OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	複眼カメラTOMBOを用いた多次元情報取得
Author(s)	堀崎, 遼一
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27636
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

情報14575

複眼カメラTOMBOを用いた多次元情報取得

2010年7月

堀﨑 遼一

複眼カメラTOMBOを用いた多次元情報取得

提出先　大阪大学大学院情報科学研究科
提出年月　2010年7月

堀﨑 遼一

発表論文リスト

原著論文

[1] R. Horisaki, S. Irie, Y. Ogura and J. Tanida: "Three-dimensional information acquisition using a compound imaging system," Optical Review, **14**, 5, pp. 347–350 (2007).

[2] R. Horisaki, Y. Nakao, T. Toyoda, K. Kagawa, Y. Masaki and J. Tanida: "A thin and compact compound-eye imaging system incorporated with an image restoration considering color shift, brightness variation, and defocus," Optical Review, **16**, 3, pp. 241–246 (2009).

[3] R. Horisaki, K. Kagawa, Y. Nakao, T. Toyoda, Y. Masaki and J. Tanida: "Irregular lens arrangement design to improve imaging performance of compound-eye imaging systems," Applied Physics Express, **3**, 2, 022501 (2010).

[4] R. Horisaki, K. Choi, J. Hahn, J. Tanida and D. J. Brady: "Generalized sampling using a compound-eye imaging system for multi-dimensional object acquisition," submitted to Optics Express (2010).

国際会議

[1] R. Horisaki, S. Irie, Y. Ogura and J. Tanida: "3D object acquisition using a compound imaging system," 5th international conference on optics-photonics design & fabrication ODF'06, Nara, Vol. 7PS4-28, Optical Design Group of OSJ, pp. 263–264 (2006).

[2] R. Horisaki, S. Irie, Y. Nakao, Y. Ogura, T. Toyoda, Y. Masaki and J. Tanida: "High-quality image acquisition using a compact compound-eye camera," Computational Optical Sensing and Imaging, Vol. PTuA8 (2007).

[3] R. Horisaki, S. Irie, Y. Nakao, Y. Ogura, T. Toyoda, Y. Masaki and J. Tanida: "3D information acquisition using a compound imaging system," SPIE Optics and Pho-

tonics, Vol. 6695-17 (2007).

[4] R. Horisaki, Y. Nakao, T. Toyoda, K. Kagawa, Y. Masaki and J. Tanida: "Irregular lens arrangement in compact compound-eye digital camera (TOMBO) for high-resolution imaging and accurate depth estimation," International Topical Meeting on Information Photonics 2008, Vol. P3-9, pp. 178–179 (2008).

[5] R. Horisaki, Y. Nakao, T. Toyoda, K. Kagawa, M. Yasuo and J. Tanida: "A compound-eye imaging system with irregular lens-array arrangement," SPIE Optics and Photonics, Vol. 7072-15 (2008).

[6] R. Horisaki, K. Choi and D. J. Brady: "Enhancing performance of convex unconstrained optimization for compressive sensing via iterative reshaped quadratic error and reweighted ℓ_1 minimization," Compressive Sensing Workshop (2009).

国内発表

[1] 堀崎, 入江, 小倉, 谷田："複眼撮像システムにおける三次元情報取得", Optics & Photonics Japan 2006, 9pE2, 日本光学会, pp. 274–275 (2006).

[2] 堀崎, 入江, 中尾, 豊田, 小倉, 政木, 谷田："小型複眼カメラによる高解像度画像取得", 第 68 回応用物理学会学術講演会, 7p-X-10, 応用物理学会, p. 1024 (2007).

[3] 堀崎, 入江, 中尾, 豊田, 小倉, 政木, 谷田："複眼撮像システムによる物体抽出法の検討", 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 28p-SB-7, 応用物理学会, p. 1078 (2007).

[4] 堀崎, 入江 覚 小倉, 谷田："小型複眼カメラを用いた高解像度画像取得", 第 1 回情報フォトニクス研究討論会日本光学会情報フォトニクス研究グループ, pp. 39–40 (2007).

[5] 堀崎, 入江, 小倉, 谷田："小型複眼カメラによる高解像度画像取得", 第 7 回情報フォトニクス研究グループ研究会 (秋合宿) 情報フォトニクス研究グループ, p. 21 (2007).

[6] 堀崎, 入江, 中尾, 豊田, 香川, 政木, 谷田："複眼薄型結像系をもつ CMOS イメージセンサ取得画像の高解像度化手法", 映像情報メディア学会技術報告, 第 31 巻, 映像情報メディア学会, pp. 49–52 (2007).

[7] 堀崎, 入江, 中尾, 豊田, 香川, 政木, 谷田："レンズ配置の最適化による複眼カメラの画質向上", 2008 年秋季第 69 回応用物理学会学術講演会, 4a-ZF-1, p. 878 (2008).

[8] 堀崎, 入江, 中尾, 豊田, 香川, 政木, 谷田："不規則レンズ配置による TOMBO の画質と測距精度の向上", 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZW-10, p. 1063 (2008).

[9] 堀崎, 入江, 中尾, 豊田, 香川, 政木, 谷田："複眼撮像システムを用いた三次元情報取得

とその応用", 動的画像処理実用化ワークショップ 2008, 02-01, pp. 17–20 (2008).

[10] 堀崎："複眼カメラにおける小型化と画質の向上の両立は可能か？ ", 第 9 回情報フォトニクス研究グループ研究会, p. 31 (2008).

[11] 堀崎, 入江, 中尾, 豊田, 香川, 政木, 谷田："単一撮像素子を用いた小型複眼カメラにおける画質と測距精度の向上", 映像情報メディア学会技術報告, 32, pp. 25–28 (2008).

[12] 堀崎, 入江, 中尾, 豊田, 小倉, 政木, 谷田："小型複眼カメラにおける幾何学ボケを考慮した超解像処理", レーザー学会学術講演会第 28 回年次大会, H2-31aI8, p. 198 (2008).

[13] 堀崎, チョイ, ハン, 谷田, ブレイディ："複眼カメラ TOMBO を用いた多次元情報取得", 2010 年春季第 57 回応用物理学関係連合講演会, 17p-J-10 (2010).

その他

解説論文

[1] 堀崎, 入江, 中尾, 豊田, 政木, 谷田："複眼撮像システムとその応用", 可視化情報学会誌, **28**, 109, pp. 111 114 (2008).

共著論文

[1] D. J. Brady, K. Choi, D. L. Marks, R. Horisaki and S. Lim: "Compressive holography," Opt. Express, **17**, 15, pp. 13040–13049 (2009).

[2] A. A. Wagadarikar, D. L. Marks, K. Choi, R. Horisaki and D. J. Brady: "Imaging through turbulence using compressive coherence sensing," Opt. Lett., **35**, 6, pp. 838–840 (2010).

[3] Q. Xu, K. Shi, H. Li, K. Choi, R. Horisaki, D. Brady, D. Psaltis and Z. Liu: "Inline holographic coherent anti-stokes raman microscopy," Opt. Express, **18**, 8, pp. 8213–8219 (2010).

[4] K. Choi, R. Horisaki, S. Lim, J. Hahn, D. Marks, T. Schulz and D. Brady: "Compressive holography of diffuse objects," Appl. Opt., **49**, 34, pp. H1–H10 (2010).

[5] K. Choi, A. Wagadarikar, R. Horisaki and D. Brady: "Compressive coded aperture computed tomography–part 1: coded aperture snapshot spectral imager (CASSI)," submitted to IEEE Trans. on Image Processing (2009).

[6] K. Choi, R. Horisaki, A. Wagadarikar and D. Brady: "Compressive coded aperture computed tomography–part 2: compressive X-ray tomography (CXT)," submitted to

IEEE Trans. on Image Processing (2009).

共著発表

[1] 佐藤, 堀崎, 中尾, 豊田, 香川, 政木, 谷田：“TOMBO を用いた視点位置合わせによる口腔内観察法の検討”, 2008 年秋季第 69 回応用物理学会学術講演会, 4a-ZF-2, p. 879 (2008).

[2] K. Kagawa, R. Horisaki, Y. Nakao, T. Toyoda, Y. Masaki and J. Tanida: “TOMBO super-resolution in 3-D space, time, and wavelength,” IEEE Computer Society 2009 VAIL Computer Elements Workshop (2009).

[3] K. Kagawa, H. Tanabe, C. Ogata, R. Horisaki, Y. Ogura, Y. Nakao, T. Toyoda, Y. Masaki, M. Ueda and J. Tanida: “A compact shape-measurement module based on a thin compound-eye camera with multiwavelength diffractive pattern projection for intraoral diagnosis,” SPIE Optics and Phoonics, Vol. 74420U (2009).

[4] K. Choi, R. Horisaki, D. L. Marks and D. J. Brady: “Coding and signal inference in compressive holography,” Computational Optical Sensing and Imaging, Vol. CThA5, Optical Society of America (2009).

[5] S. Lim, R. Horisaki, K. Choi, D. L. Marks and D. J. Brady: “Experimental demonstrations of compressive holography,” Computational Optical Sensing and Imaging, Vol. CThA6, Optical Society of America (2009).

[6] J. Tanida, K. Kagawa, K. Fujii and R. Horisaki: “A computational compound imaging system based on irregular array optics,” Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Adaptive Optics: Methods, Analysis and Applications/Advances in Optical Materials/Computational Optical Sensing and Imaging/Femtosecond Laser Microfabrication/Signal Recovery and Synthesis on CD-ROM, Vol. CWB1Optical Society of America (2009).

[7] J. Hahn, S. Lim, K. Choi, R. Horisaki, D. L. Marks and D. J. Brady: “Compressive holographic microscopy,” Biomedical Optics, Optical Society of America, p. JMA1 (2010).

[8] D. Brady, K. Choi, R. Horisaki, J. Hahn and S. Lim: “Compressive holography of diffuse scatterers,” Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, Optical Society of America, p. DWA1 (2010).

[9] J. Hahn, S. Lim, K. Choi, R. Horisaki, D. L. Marks and D. J. Brady: "Compressive holographic microscopy," Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, Optical Society of America, p. JMA1 (2010).

特許

[1] 谷田, 堀崎, 豊田, 中尾, 政木：“光学的条件設計方法及び複眼撮像装置”, 特願 2008-223979 (2008).

[2] 谷田, 堀崎, 豊田, 中尾, 政木：“複眼撮像装置”, 特開 2009-206922 (2009).

目 次

緒論 **1**

第1章 複眼カメラTOMBO **5**

1.1 緒言 5
1.2 複眼 5
1.3 複眼カメラ 7
1.4 Thin Observation Module by Bound Optics (TOMBO) 8
1.5 線形システム 8
1.6 TOMBO撮像モデル 11
1.7 画像再構成シミュレーション 15
1.8 結言 16

第2章 三次元物体計測 **19**

2.1 緒言 19
2.2 撮像系を用いた距離計測 19
2.3 TOMBOを用いた三次元物体計測 21
2.4 三次元形状をもつ対象の再構成法 23
2.5 原理確認実験 25
2.6 測距精度に関する考察 26
2.7 結言 29

第3章 高解像度画像取得を考慮したレンズ配置 **31**

3.1 緒言 31
3.2 複眼結像系の問題点 31
3.3 不規則レンズ配置 32
3.4 不規則レンズ配置に関する原理確認実験 32
3.5 レンズ配置の最適化 39

3.6 原理確認シミュレーション 42
3.7 アライメント精度に関する考察 45
3.8 測距精度に関する考察 48
3.9 結言 50

第4章 多次元情報取得への拡張 **53**
4.1 緒言 53
4.2 コンプレッシブサンプリング 53
4.3 多次元情報取得モデル 56
4.4 実装例 58
4.4.1 距離 58
4.4.2 時間 60
4.4.3 分光 60
4.4.4 偏光 61
4.4.5 高ダイナミックレンジ 61
4.4.6 広角視野 62
4.5 原理確認シミュレーション 62
4.6 z_n 軸方向の再構成精度に関する考察 66
4.7 結言 68

総括 **69**

謝辞 **71**

参考文献 **73**

緒論

約5億4500万年前から5億500万年前のカンブリア紀に起きた爆発的な生物の進化は，カンブリア爆発とよばれ生物史における大きな謎とされていた[1]．この時代，突如として現在見られる動物門が出そろう．特に，それまでは軟体性の動物しか存在しなかったが，カンブリア紀に出現する動物には，歯，触手，爪，顎，殻等が備わっていた．

1998年，A. Parkerは，光の知覚器官である「眼」をもつ生物の登場による淘汰圧の高まりがカンブリア爆発の原因とする「光スイッチ説」を提唱した[1]．眼をもつ捕食者が生物史上はじめて登場し，軟体性の体をもつ被食者に対して圧倒的に優位に立つ．被食者がそれに対応するため眼や殻を獲得する．捕食者が被食者の進化にさらに対応するために，爪や牙等を獲得していった．すなわち，光が現存する生物を形作るきっかけとなった．

また，光に関する技術は人類の歴史にも大きな影響を与えてきている．集光を目的としたレンズは，紀元前からエジプト等で使用されていた．1590年頃，Z. Janssenは，レンズを用いて微小物体を拡大して観測する顕微鏡の原型を発明したとされる[2]．その分解能は時代とともに向上し，光の回折限界を打破し，ナノスケールに達している[3, 4, 5]．現在，顕微鏡は，医療，精密工学分野で必要不可欠な道具となっている．

1608年，H. Lippersheyは二枚のレンズを組み合わせた望遠鏡の特許を申請している[6]．その後，G. Galileiにより天体観測が行われ，彼が地動説を提唱したことは有名である[7]．現在は，大気の影響を除去するために，宇宙空間に望遠鏡を設置する宇宙望遠鏡が実用化され，宇宙に関する多くの知見をもたらしている[8]．

写真技術は，光技術を人類にとってより身近なものにした．15世紀頃，カメラ・オブスクラとよばれるピンホールカメラが芸術家の間で使用されていた．カメラ・オブスクラでは，箱の一面に針穴あけ，穴と反対側に投影される像を人がトレースする[9]．1825年，J. Niépceは石版印刷（リトグラフ）技術を用いて，カメラ・オブスクラの像を定着することに成功した[9]．その後，様々な改良を経て，写真は二次元の光学データの記録媒体として様々な分野で利用されている．

光を電気信号に変換する電荷結合素子（CCD）の出現は，写真のあり方を一変させる．

CCDは，1969年，W. BoyleとJ. Smithによって発明された[10]．彼らは，2009年にノーベル物理学賞を受賞している．この技術は，後にデジタルカメラやビデオカメラや生み出し，数学や情報工学の技術を取り込み，X線CTや音波CT等のトモグラフィーとよばれる革新的な映像技術を推進する原動力となった．

そして現在，光技術，写真技術は大きなパラダイムシフトの中にある．中央演算処理装置（CPU）の処理能力は，ムーアの法則に従って向上している[11]．また，近年，GPUとよばれる画像処理に特化した演算処理装置の処理能力は，CPUの処理能力を大きく超え，今後その差はさらに大きくなっていくことが予想される[12]．このような計算機の処理能力の向上に伴い，撮像後の処理を前提とした光技術，写真技術の研究が活発に行われている．この技術は，Computational imaging，Computational photography，Computational optical sensing and imaging (COSI) とよばれている[13, 14, 15]．

このコンセプトに基づいた撮像システムとして，デジタルホログラフィ，X線CT，開口符号化イメージング等が有名である[16, 17]．これらのシステムでは，撮像後の処理により対象物体の二次元情報や三次元情報を再構成する．その他の例としては，位相板を用いてデフォーカスぼけの距離依存性を低減した被写界深度の伸長，カメラアレイを用いた多視点画像取得によるぼけ合成や自由視点画像合成，反射光学系により光路を折り畳んだ薄型カメラ等がデモンストレーションされている[18, 19, 20]．

一方，多くの生物に見られる視覚器官にヒントを得た複眼光学系が注目されている．従来の撮像システムにおける光学系は，一つあるいは複数のレンズが光軸上に直列に並んでいる．本論文ではこのような光学系を単眼光学系とよぶ．一方，複眼光学系では，複数のレンズが並列に並ぶ．複眼光学系では，複数視点からの画像取得を活かした撮像後の視点変更やリフォーカス，対象の三次元情報取得が可能である[21]．これは，近年の3Dテレビブームと相まって活発に研究開発が行われている．

本論文では，TOMBOとよばれる複眼カメラを用いた多次元情報の一括取得に関する新しいフレームワークの開発の成果をまとめたものである．TOMBOでは，微小複眼光学系を用いることで撮像部の薄型化を実現している．撮影画像は低解像度画像群となるが，撮像後の画像処理により高解像度な対象画像を得られる．TOMBOのアーキテクチャを用いて，小型，薄型な指紋画像取得，分光画像取得等のシステムが提案されている[22, 23]．

イメージセンサを用いて三次元以上の対象を観測する場合，イメージセンサに平行な空間軸以外の次元軸に対して走査を行う必要がある．例えば，共焦点顕微鏡は試料ステージを光軸方向に動かしながら[24]，カラーフィルタを用いた分光画像取得はフィルタを変

更しながら[25]，対象物体を撮影する必要があり，計測時間は走査速度に制限されていた．また，カメラアレイやTOMBO等の複眼カメラを使って，多次元情報取得の一括取得を行う場合，ハードウェアの大型化や，取得情報の低解像度化が問題となっていた[13, 23]．TOMBOでは多様な光学系を個眼ごとに実装可能である．本論文ではその特徴を活かし，薄型複眼カメラTOMBOの各個眼での光学的信号操作による，多次元情報の一括取得のためのフレームワークの構築を試み，原理確認実験よりその有効性を評価した．これらの成果により，距離，時間，波長，偏光等の光情報取得や高ダイナミックレンジ撮影，広角画像取得を提案するフレームワークによって統一的に扱える．さらに，複数の光学的信号操作を組み合わせることで，多様な光学情報取得システムの構築が可能となる．

1章では，本論文におけるいくつかの基本概念を提示する．TOMBOの概略と二次元平面の対象物体についてのTOMBOの撮像モデルについて述べる．本論文を通じて用いる線形システムとその逆問題の概念についても説明する．また，TOMBOモデルと逆問題の解法のシミュレーションを行い，それらの妥当性を示す．

2章では，TOMBOを用いた多次元情報取得の具体例として，TOMBOを用いた三次元物体計測について述べる．ここでは，個眼像間の視差にもとづく距離計測を行う．1章で示した撮像モデルを拡張し，三次元形状をもつ対象物体についての撮像モデルを提示する．この場合，システムの逆問題は不良設定となるため，1章で示す線形な解法では対象の形状を回復することはできない．そこで，非線形な解法を提案し，実験による原理確認を行った結果について述べる．

3章では，高解像度画像取得を考慮したレンズ配置について議論する．従来，複眼カメラでは，実装や信号処理の容易さから，正方グリッド状または六方グリッド状にレンズを配置していた．しかし，このレンズ配置では特定の距離群で複数の個眼像の情報が一致し，対象の高解像度情報を得られない問題があった．そこで，レンズ配置に不規則性を導入し，距離によらない高解像度画像取得が可能なTOMBOを提案し，実験によりレンズの不規則配置が有効であることを示す．また，レンズ配置の最適化についても述べる．

4章では，TOMBOを用いた多次元情報取得の一括取得を検討する．1章，2章で提示した撮像モデルを多次元情報取得モデルへ拡張し，多様な光学情報の取得に適用可能な多次元情報取得の新しい概念を提案する．このシステムによる情報回復の問題は不良設定なため，コンプレッシブサンプリング[26]とよばれるフレームワークを用いる．また，シミュレーション実験により原理確認を行い，その有効性を評価する．

最後に本研究を総括し，今後の課題について述べる．

第 1 章

複眼カメラTOMBO

1.1 緒言

複眼光学系を用いた視覚器官は，昆虫等の節足動物に多く見られる[1, 27]．複眼は，ほ乳類等の視覚器官に見られる単眼系と比較して，いくつかの長所，短所を持っている．また，それを利用した光学システムも提案されている．

本章では，本論文における議論の対象となるいくつかの基本概念を提示する．まず，複眼の概略とその特徴について述べる．次に，複眼光学系を用いた光学システムの例を紹介する．その後，本論文で用いるTOMBOとよばれる複眼カメラの概略とその特徴について述べる．また，光学システムは一般に線形システムとして扱われる．そこで，本論文の議論の基礎となる線形システムと線形逆問題について説明する．その上で，TOMBOの撮像モデルを導出する．得られたTOMBOの撮像モデルに基づき画像再構成のシミュレーションを行い，モデルの妥当性を示す．

1.2 複眼

複眼は，昆虫等の節足動物に見られる，多数の個眼で構成された視覚器官である[1, 27]．複眼は，Fig. 1.1に示すように，主にレンズ，感桿（受光素子），色素から構成され，連立像眼 （apposition-eye）と重複像眼（superposition-eye）に分類される．

Fig. 1.1(a)に示す連立像眼は，昼行性のハエ，ミツバチ，チョウ等にみられる．連立像眼の各個眼は，色素によって光学的に分離されており，異なる視点の小さな倒立像を取得する．一つのレンズに対し一つの感桿が対応している場合，対象物体をモザイク状に観察していると考えられている．また，一つのレンズに対し複数の感桿が対応する連立像眼も確認されており，神経性重複像眼とよばれる[28]．神経性重複像眼では，各個眼から伸びる神経は交叉しているため，脳内で大きな像を再構成していると考えられる．

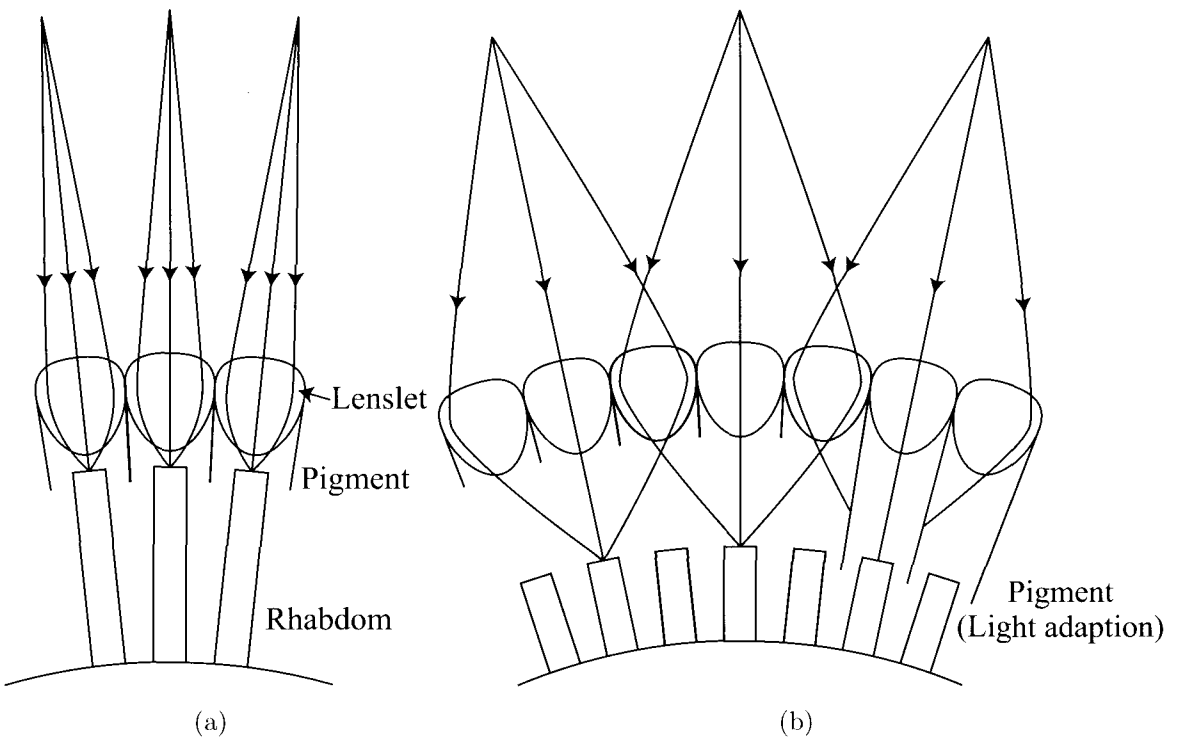


Fig. 1.1　Structures of compound-eye. (a) Apposition-eye and (b) superposition-eye.

一方，Fig. 1.1(b) に示す重複像眼は，夜行性のホタルやガにみられる．各個眼は光学的に分離されておらず，一つの感桿に対して複数のレンズが対応しており，複眼全体で一つの正立像が得られる．重複像眼は，連立像眼に比べ鮮明な像を得るのには向かないが，明るい像を得ることができる．また，Fig. 1.1(b) に示すように，重複像眼の種類によっては，色素が暗順応時にはレンズ付近に集まり，明順応時には感桿を囲い込むように移動する．すなわち，このような重複像眼は明順応時に連立像眼となる．

単眼と比較した複眼の短所として，得られる像が小さい又は低解像度な画像群となる点が挙げられる．複眼の特徴を以下に示す．

1. **撮像系の厚み**　各レンズの焦点距離が単眼に比べて短い．そのため，レンズ–受光素子間距離を短くすることができ，撮像系全体の厚みを薄くできる．

2. **被写界深度**　各レンズが単眼に比べて小口径，短焦点であり，深い被写界深度が得られる [29, 30]．

3. **視野**　Fig. 1.1 に示すように，曲面上にレンズを配置することで，広角な視野を薄型な撮像系で実装することができる．

4. **撮像系の重量** 広角な視野を得るための単眼光学系として魚眼レンズがあるが，サイズや重量が大きい．一方，視野に関する項で示したように，広角視野を得るための複眼光学系は，魚眼レンズと比べて，光学系の軽量化が可能である．昆虫は複眼を用いて視覚系の軽量化を図り，飛行能力を高めていると考えられる．

5. **多視点画像取得** 神経性重複像眼の場合，複数の異なる視点から対象物体を観察していることと等価である．そのため，多視点画像から対象の立体形状を取得できる．上述の特徴と合わせて考えると，昆虫等の節足動物は，広角な立体視を行っている可能性がある．

6. **頑強性** 重複像眼や神経性重複像眼では，複眼中の一部の個眼が損傷したり，塵が付着したりしても視覚機能に大きな影響は無い．

1.3 複眼カメラ

1.2節で示した複眼の特徴を活かした様々な複眼カメラの方式が提案されている．本節では，その中から代表的なシステム例をいくつか紹介する．

まず，薄型カメラは，複眼の物理的形態を活かしたシステム例として重要である．Duparréらは，連立像眼を模倣し，光学系の厚み216 μm，画素数60×60の複眼カメラを提案している[31]．

また，広角視野も複眼の大きな利点であり，この特徴を用いた広角カメラが提案されている．Hornseyらは，神経性重複像眼を模倣した広角な移動物体捕捉システムを提案している．撮影方向をずらした各個眼をファイバーバンドルによって作製し，個眼数が25個のシステムにおいて，方位角150°の視野を得ている[32]．中尾らは，各個眼の前にプリズムを配置した，150°の方位角を持つ複眼カメラを提案している[33]．

さらに，複眼光学系から得られた多視点画像から自由視点，自由焦点，全焦点画像を取得する神経性重複像眼を模倣した撮像システムが提案されている．マイクロレンズアレイを用いて撮影した多視点画像をもとに，コンピュータグラフィックスのレンダリング手法の一種であるライトフィールドレンダリング[34]を用いて，自由視点，自由焦点，全焦点画像等を取得する[35, 36]．

この他にも，複眼を用いてテレセントリックな光学系を構成することで，対象物体の撮像倍率の距離依存性を無くし，文字認識等に有効なパターンマッチングを容易にしたシステムが提案されている[37]．また，視野をレンズ群で分割し収差補正を行う光学系設計手

法が提案されている[38]．立体ディスプレイの分野では，複眼光学系を用いて対象からの光線を再生するインテグラルフォトグラフィについて活発に研究がなされている[39]．

1.4 Thin Observation Module by Bound Optics (TOMBO)

大阪大学谷田研究室では，神経性重複像眼を模倣したThin observation module by bound optics (TOMBO) とよばれる複眼カメラを提案し，系統的な研究を行ってきた[22, 23, 40, 41]．TOMBOの外観と構造をFig. 1.2に示す．Fig. 1.2(b) に示すように，TOMBOはレンズ，イメージセンサ，そして隣り合うレンズからのクロストークを防ぐための隔壁から構成されている．一つのレンズに対応する機構をユニットとよぶ．ユニットの数を$N_u{}^2$とした場合，TOMBOのレンズの口径と焦点距離を，単眼のレンズに対し$1/N_u$倍とすることで，単眼カメラと同等の視野を得ることができる．その結果，ユニットで得られる像の大きさが$1/N_u$，レンズ-イメージセンサ間距離が$1/N_u$，被写界深度が$N_u{}^2$となる．すなわち，TOMBOは，単眼カメラよりも薄型の撮像系を持ち，被写界深度の深い撮影が可能である．

1.5 線形システム

センシングシステムが線形に応答する場合，その線形システムの逆問題を解くことで，観測信号から原信号が復元できる[42]．一般に，光を用いたセンシングシステムは線形システムとして表されることが知られている[43]．

線形システムは次式で表される．

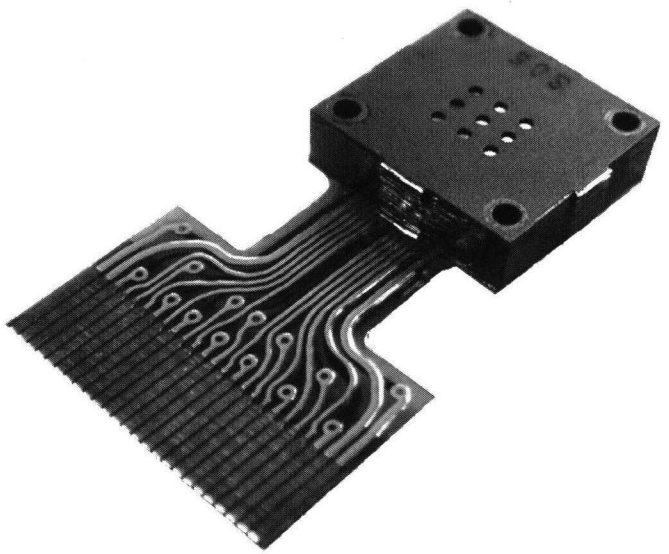
$$\boldsymbol{g} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{f}. \tag{1.1}$$

ここで，$\boldsymbol{g} \in \mathbb{R}^{N_g \times 1}$は観測信号，$\boldsymbol{\Phi} \in \mathbb{R}^{N_g \times N_f}$はシステム行列，$\boldsymbol{f} \in \mathbb{R}^{N_f \times 1}$は原信号である．$N_g$は観測信号の要素数，$N_f$は原信号の要素数を示す．$\mathbb{R}^{N_0 \times N_1 \times \cdots}$は実数からなる$N_0 \times N_1 \times \cdots$行列または配列を示す．

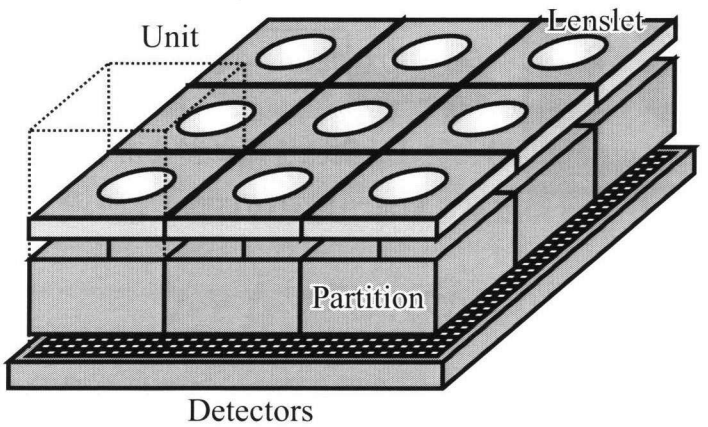
本論文で想定する光学システムは，Fig. 1.3のように考えられる．原信号は，光学系による情報操作を受け，イメージセンサにより観測される．観測データから，計算機による信号処理を経て，原信号が回復される．

システム行列$\boldsymbol{\Phi}$は，特異値分解（SVD）により，二つのユニタリ行列$\boldsymbol{U} \in \mathbb{R}^{N_g \times N_g}$，$\boldsymbol{V} \in \mathbb{R}^{N_f \times N_f}$と一つの対角行列$\boldsymbol{\Sigma} \in \mathbb{R}^{N_g \times N_f}$に分解でき，

$$\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^T, \tag{1.2}$$



(a)



(b)

Fig. 1.2 TOMBO. (a) The appearance and (b) the components.

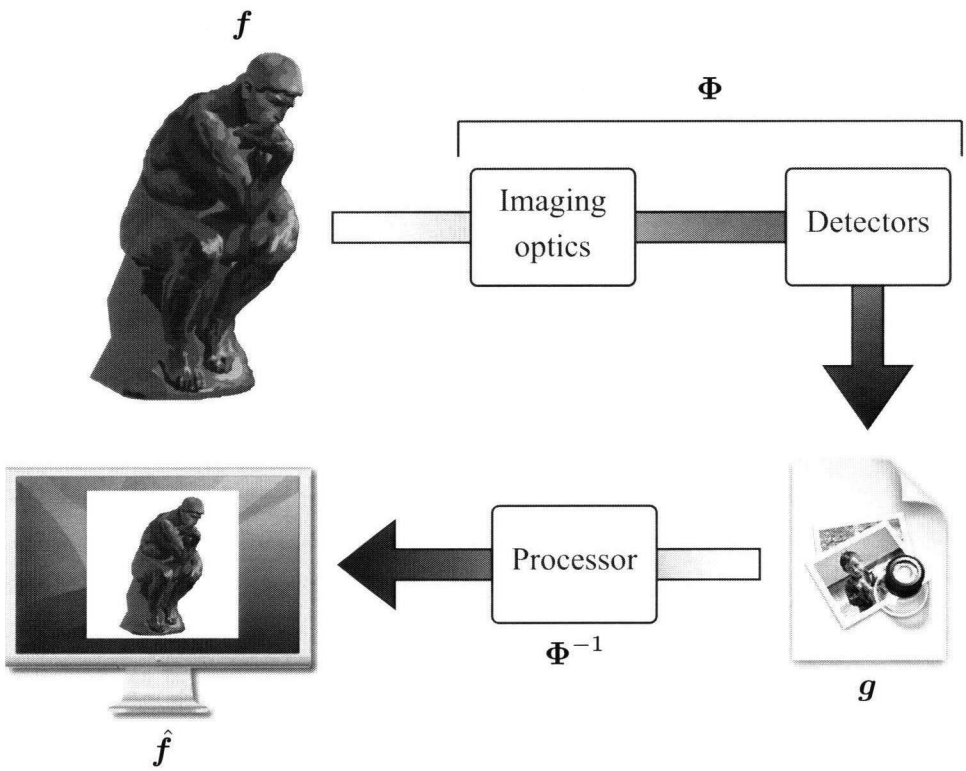


Fig. 1.3　A computational imaging system.

と表される．ここで，$\boldsymbol{V}^T$ は行列 $\boldsymbol{V}$ の転置を表す．

式 (1.1) の逆問題の解 $\hat{\boldsymbol{f}}$ は，式 (1.2) の特異値分解による擬似逆行列を用いて，以下のように解ける [42]．

$$\hat{\boldsymbol{f}} = \boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{g} = (\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^T)^{-1}\boldsymbol{g} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\boldsymbol{U}^T\boldsymbol{g}. \tag{1.3}$$

特異値分解は計算コストが大きく，一般的な画像取得システムへの適用は現実的ではない．そのため，数値解析により逆問題を解く手法がしばしば用いられる．式 (1.1) の逆問題を

$$\hat{\boldsymbol{f}} = \underset{\boldsymbol{f}}{\operatorname{argmin}} ||\boldsymbol{g} - \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{f}||^2, \tag{1.4}$$

と書き換え，最急降下法（Steepest decent method (SD 法)）[42, 44] を適用すると，

$$\hat{\boldsymbol{f}}_k = \hat{\boldsymbol{f}}_{k-1} + 2\boldsymbol{\Phi}^T(\boldsymbol{g} - \boldsymbol{\Phi}\hat{\boldsymbol{f}}_{k-1}). \tag{1.5}$$

反復的にこの演算を繰り返すことで，原信号を回復できる．ここで $||\cdot||^2$ は二乗ノルム，k は反復回数，$\hat{\boldsymbol{f}}_k$ は k 回目の反復における推定信号を示す．

観測信号 $\boldsymbol{g}$ の尤度が最大になる原信号 $\boldsymbol{f}$ を推定する最尤法も有用である．この問題は，原信号が $\boldsymbol{f}$ の場合の $\boldsymbol{g}$ の尤度関数を $\mathcal{Y}$ とすると

$$\hat{\boldsymbol{f}} = \underset{\boldsymbol{f}}{\operatorname{argmax}}\, \mathcal{Y}(\boldsymbol{g}|\boldsymbol{f}), \tag{1.6}$$

と表せ，尤度関数が正規分布を持つ事を前提として，Richardson–Lucy 法（RL 法）を用いて解くことができる [45, 46]．k 回目の反復における推定信号は

$$\hat{\boldsymbol{f}}_k = \hat{\boldsymbol{f}}_{k-1}\boldsymbol{\Phi}^T(\boldsymbol{g}./(\boldsymbol{\Phi}\hat{\boldsymbol{f}}_{k-1})), \tag{1.7}$$

となる．ここで ./ は行列の要素ごとの割り算を示す．

1.6 TOMBO 撮像モデル

Fig. 1.4 に示すように，撮像する対象を平面物体 $\mathcal{F}$ とし，イメージセンサと平行に配置されていると仮定する．(x, y) はイメージセンサ面に平行な空間座標を示し，イメージセンサの中心を $(x, y) = (0, 0)$ とする．

以下では，簡単化のために，y 軸を省略して議論を進める．また，デフォーカス，光学系の収差等は無視し，各ユニットはピンホールカメラとして取り扱う．各ユニットの局所

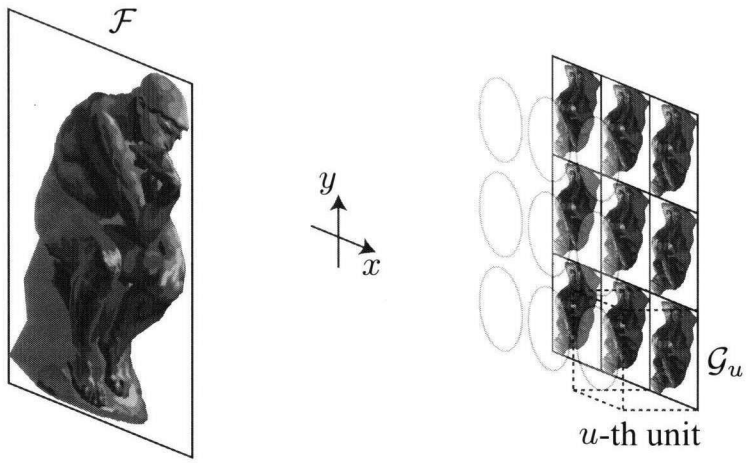


Fig. 1.4　Two-dimensional imaging in TOMBO.

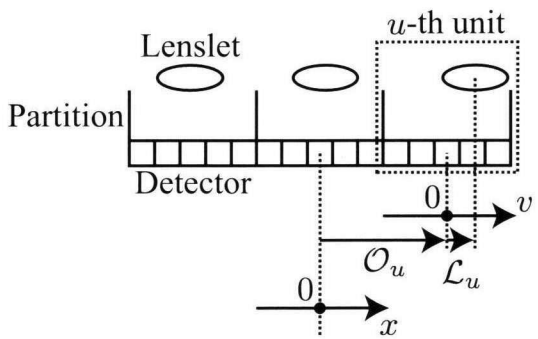


Fig. 1.5　A cross section view of TOMBO. v, $\mathcal{O}_u$, and $\mathcal{L}_u$ denote the spatial dimension, the center position, and the position of a lenslet in the u-th unit, respectively.

座標を，Fig. 1.5 に示すように，$v = x - \mathcal{O}_u$ と設定する．ここで $\mathcal{O}_u$ は，ユニット u の中心位置を示す．イメージセンサ上への結像過程は，以下のように表せる．

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_u(v) &= \mathcal{F}(v - \mathcal{S}_u - \mathcal{L}_u), \\ &(u = 0, \cdots, N_u - 1). \end{aligned} \tag{1.8}$$

ここで，$\mathcal{G}_u$ は光学系による結像信号，$\mathcal{S}_u$ は 2 章で導入する視差等によるシフト，$\mathcal{L}_u$ は Fig. 1.5 で示した v 軸上でのレンズ位置である．

次に，TOMBO の離散化モデルを示す．離散化された対象を $\tilde{\mathcal{F}}_l = \mathcal{F}(l\triangle_x)$，結像信号を $\tilde{\mathcal{G}}'_{i,u} = \mathcal{G}_u(i\triangle_x)$ と定義する．ここで，l, i は対象と結像信号の画素番号を，$\triangle_x$ は対象の画素ピッチを示す．$\tilde{\mathcal{F}} \in \mathbb{R}^{N_x \times 1}$，$\tilde{\mathcal{G}}' \in \mathbb{R}^{N_x \times N_u}$ である．チルダ記号は離散データを明示

するために用いる．結像信号はイメージセンサ上の受光素子によりサンプリングされる．サンプリングデータは，$\tilde{\mathcal{G}}_{j,u} = \sum_i \tilde{\mathcal{G}}'_{i,u}\,\mathrm{rect}((i\triangle_x - j\triangle_v - \mathcal{D}_u)/\triangle_v)$ として表される．ここで，$\triangle_v$，j，$\mathcal{D}_u$ はイメージセンサの画素ピッチ，イメージセンサの画素番号，ユニット u の中心画素の中心を示す．$\tilde{\mathcal{G}} \in \mathbb{R}^{N_v \times N_u}$（$N_v$ はイメージセンサの受光素子数）である．rect 関数の定義は以下の通りである．

$$\mathrm{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| < \frac{1}{2}, \\ \frac{1}{2} & |x| = \frac{1}{2}, \\ 0 & |x| > \frac{1}{2}. \end{cases} \tag{1.9}$$

サンプリングを考慮した離散データは，

$$\tilde{\mathcal{G}}_{j,u} = \sum_i \mathrm{rect}\left(\frac{i\triangle_x - j\triangle_v}{\triangle_v}\right)\tilde{\mathcal{F}}_{i-\bar{\mathcal{S}}_u}, \tag{1.10}$$

となる．ここで，$\bar{\mathcal{S}}_u = \mathrm{round}[(\mathcal{S}_u + \mathcal{L}_u - \mathcal{D}_u)/\triangle_x]$ である．round は，実数中の小数点以下を四捨五入する関数である．

TOMBO のシステム行列 $\boldsymbol{\Phi}$ は，次のようにして求められる．式 (1.10) は，対象信号 $\tilde{\mathcal{F}}$ は $\bar{\mathcal{S}}_u$ だけシフトした後，ダウンサンプリングすることを示している．簡単化のために，文献[40] で用いられている定義に従って，$\triangle_x = \triangle_v/N_u$，$N_x = N_v N_u$ とする．このとき，$N_g = N_f = N_x$ となる．

対象物体のシフトを表現する行列 $\boldsymbol{C}_u \in \mathbb{R}^{N_x \times N_x}$ は

$$\boldsymbol{C}_u(p,q) = \begin{cases} 1 & (p = q + \bar{\mathcal{S}}_u), \\ 0 & (p \neq q + \bar{\mathcal{S}}_u), \end{cases} \tag{1.11}$$

と表される．ここで $\boldsymbol{C}_u(p,q)$ は行列 $\boldsymbol{C}_u$ の (p,q) 要素を示す．また，イメージセンサによるダウンサンプリングを表現する行列 $\boldsymbol{T} \in \mathbb{R}^{N_v \times N_x}$ は

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}^T & \mathbf{0}^T & \dots & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1}^T & \dots & \mathbf{0}^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{0}^T & \dots & \mathbf{1}^T \end{bmatrix}, \tag{1.12}$$

と表される．ここで $\mathbf{1}$ は全要素が 1 の $N_u \times 1$ ベクトル，$\mathbf{0}$ は全要素が 0 の $N_u \times 1$ ベクトルを示す．すなわち，TOMBO のシステム行列 $\boldsymbol{\Phi} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_x}$ は，

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{T}\boldsymbol{C}_0 \\ \boldsymbol{T}\boldsymbol{C}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{T}\boldsymbol{C}_{N_u-1} \end{bmatrix}, \tag{1.13}$$

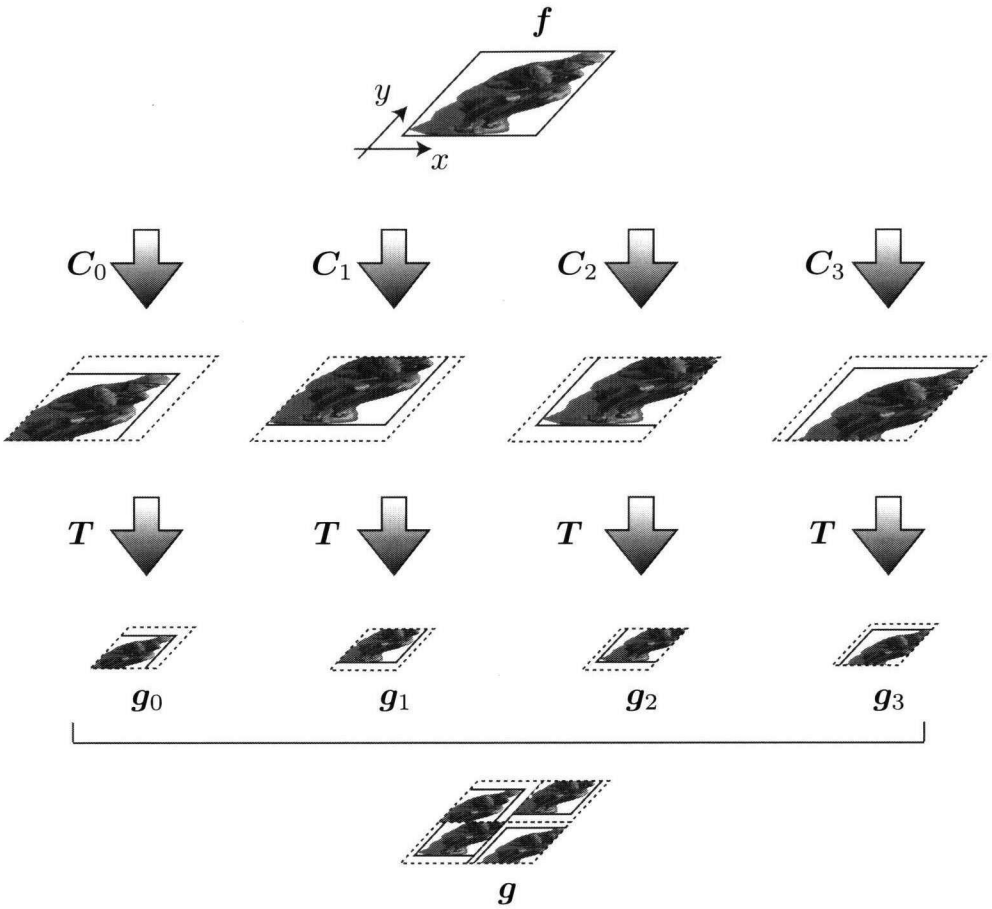


Fig. 1.6　A flowchart of image capturing using TOMBO, where the number of units is 2×2.

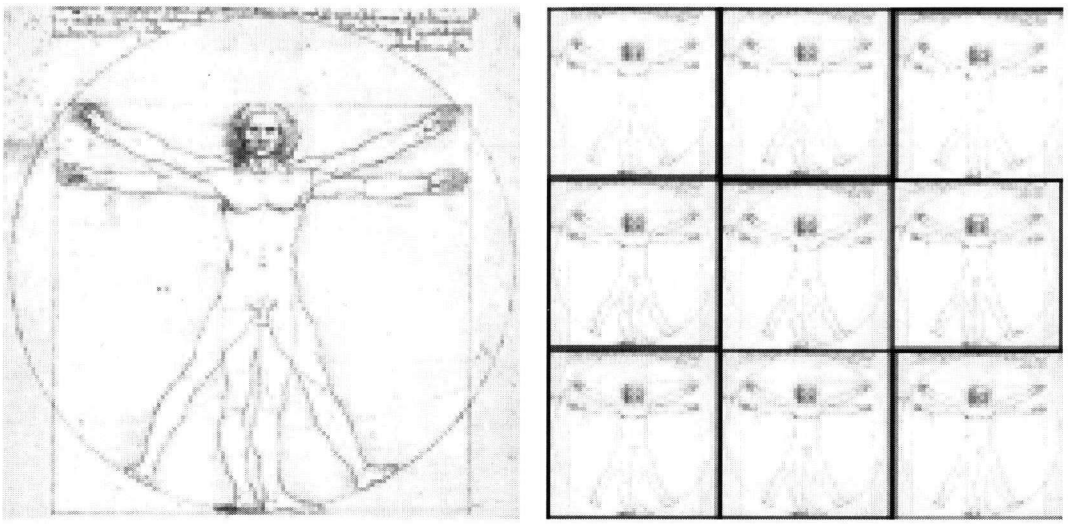
となる．システム行列 $\boldsymbol{\Phi}$ による対象信号に対する操作は Fig. 1.6 のように表される．対象 $\boldsymbol{f}$ は，ユニットごとに行列 $\boldsymbol{C}_u$ によりシフトを受け，行列 $\boldsymbol{T}$ によりダウンサンプリングされ，各ユニットにおける観測データ $\boldsymbol{g}_u$ となる．

イメージセンサの特性，光学系の収差や周辺減光等が $\boldsymbol{A}_u \in \mathbb{R}^{N_x \times N_x}$ として線形に表される場合，それらを考慮すると式 (1.13) は

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{T}\boldsymbol{C}_0\boldsymbol{A}_0 \\ \boldsymbol{T}\boldsymbol{C}_1\boldsymbol{A}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{T}\boldsymbol{C}_{N_u-1}\boldsymbol{A}_{N_u-1} \end{bmatrix}, \tag{1.14}$$

と書き換えられる．

システム行列 $\boldsymbol{\Phi}$ を 1.5 節に示した手法に適用することにより，対象の情報を回復することができる．また，式 (1.12) 中の $\mathbf{1}$ の代わりに唯一の非零要素をもつ $N_u \times 1$ ベクトルを



(a) (b)

Fig. 1.7 A simulation result of imaging of two-dimensional data using TOMBO. (a) An original image and (b) a captured image.

用い，$\mathbf{\Phi}^{-1}$ を近似的に求める画素再配置法とよばれるアルゴリズムも提案されている [47]．この手法は，観測データ $\boldsymbol{g}$ に $\mathbf{\Phi}^{-1}$ をかけた後に補間処理を必要とするが，反復処理を省略できるため処理時間を大幅に短縮できる．ただし，ダウンサンプリングを無視しているため，その影響が再構成画像中のボケとして発生する [48]．この傾向はユニット数 N_u が大きいほど顕著になる．

1.7 画像再構成シミュレーション

1.5 節に示した SD 法と RL 法による再構成シミュレーションにより，TOMBO 撮像モデルの妥当性を示す．これらのシミュレーションでは，光学系の収差やボケを無視している．Fig. 1.7 に原画像と観測データを示す．Fig. 1.7(a) の原画像のサイズは 129×129，Fig. 1.7(b) の観測データのサイズは 129×129 である．Table 1.1 に想定したシステムの仕様を示す．各ユニットにおける画像シフト $\bar{\mathcal{S}}_u$ は乱数を用いて設定した．x 方向，y 方向の画像シフトは，それぞれ独立に設定した．

Fig. 1.8 に再構成結果を示す．SD 法，RL 法ともに，Fig. 1.7(a) の原画像と比較して良好な再構成結果が得られている．特に，個眼像との比較により，解像度の向上が確認できる．再構成画像では，リンギングとよばれるアーティファクトがわずかに見られる．しか

Table 1.1　Specifications used in a simulation of two-dimensional imaging using TOMBO.

Number of units ($N_u \times N_u$)	3×3
Pixels per unit ($N_v \times N_v$)	43×43
Shift of image in the u-th unit ($\vec{\mathcal{S}}_u$)	A random number whose range is $[-2, +2]$

し，近傍画素間の滑らかさを考慮した再構成処理により，リンギングを抑えることができる[44]．

1.8　結言

本章では，本論文全体を通して用いる重要な基本概念を提示した．

1.2節では，複眼について説明した．複眼はいくつかの種類に分けらる．共通した特徴と種類ごとの特徴を整理して示した．

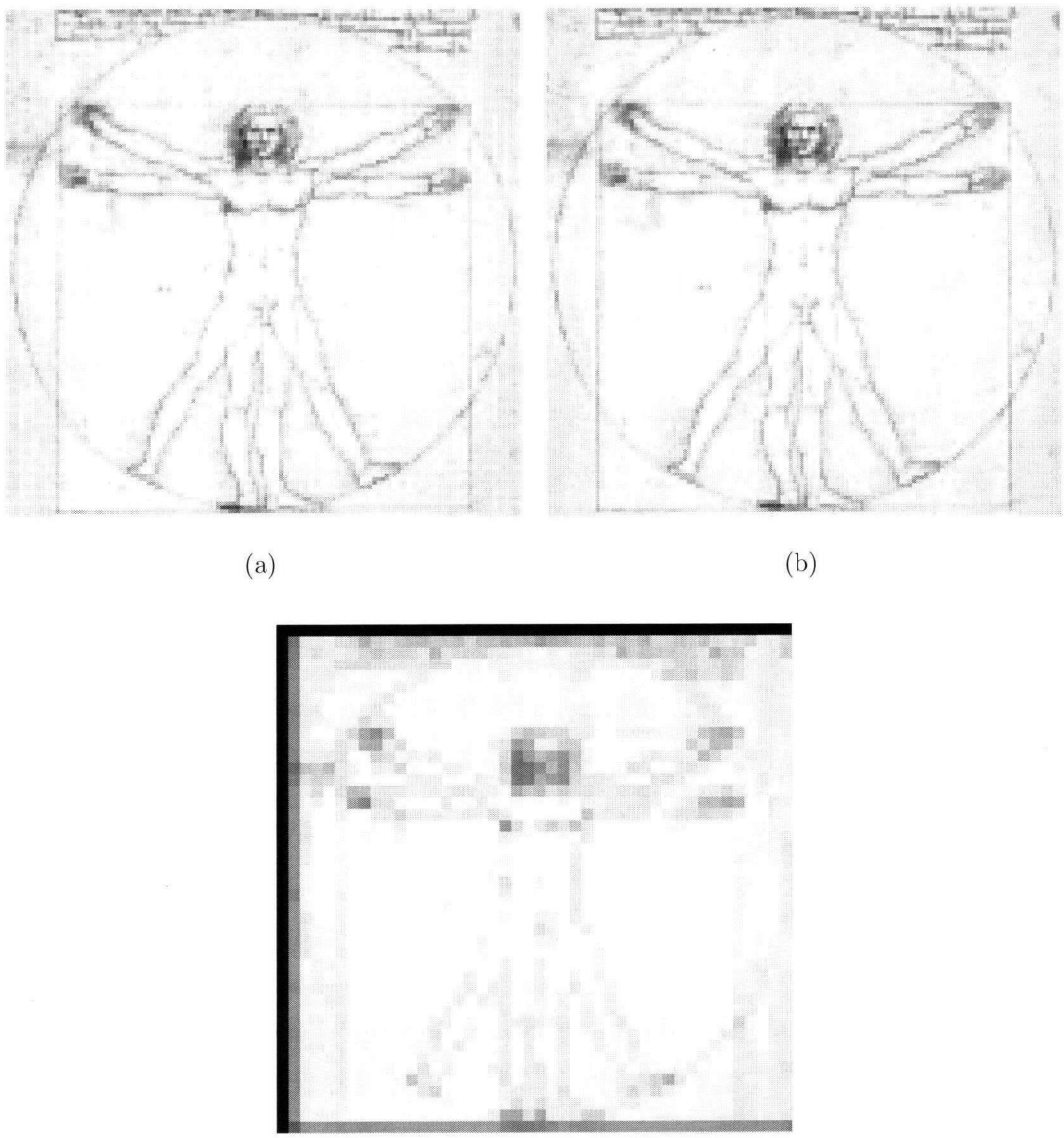
1.3節では，複眼構造を利用したいくつかの光学システムを紹介した．1.2節で述べた複眼の特徴と照らし合わせながら，それぞれシステムを説明した．

1.4節では，本論文で用いる複眼カメラTOMBOについて述べた．単眼カメラと比較して，TOMBOは薄型撮像系による被写界深度の深い撮影が可能である．

1.5節では，線形システムとその逆問題の解法について述べた．TOMBOは線形システムモデルで表される．

1.6節では，TOMBOの撮像モデルを示した．1.5節で示した手法を用いて，TOMBOシステムの逆問題を解くことができる．この節では，対象物体を二次元平面に限定し，簡略化されたモデルを示した．三次元形状を持つ対象物体についてのモデルは，2章で示す．

1.7節では，1.6節で示したTOMBO撮像モデルと1.5節で示した画像再構成のシミュレーションを行い，それらの妥当性を示した．



(a) (b)

(c)

Fig. 1.8 Reconstruction results. (a) A reconstructed image by the SD method, (b) a reconstructed image by the RL method, and (c) a unit image.

第 2 章

三次元物体計測

2.1 緒言

対象物体の三次元形状を取得する研究は，光学やコンピュータビジョン等の分野で古くから活発に行われている[16, 49]．特に，光プローブや撮像系を用いた三次元形状計測は，非接触かつ高速に計測が行えるため，医療や工業等の様々な分野で利用されている．

本章では，まず，撮像系を用いた測距法の概要を紹介する．様々な測距法がこれまでに提案されているが，それらの長所と短所についてまとめる．次に，TOMBO を用いた測距技術について述べる．まず，三次元形状を持つ対象物体についての撮像モデルを示す．三次元物体に対する撮像システムの逆問題は不良設定なため，1.5 節に示した解法は利用できない．そこで，非線形な解法を用いた三次元情報の再構成処理を試みる．提案手法の原理確認実験を示し，測距精度に関する考察を行う．

2.2 撮像系を用いた距離計測

撮像系を用いることにより，対象物体情報を非接触に取得し，距離計測が可能となる．また，少ないフレーム数で形状情報を取得する手法が考案されており，計測は高速に行われる．

撮像系を用いた距離計測は，アクティブ方式とパッシブ方式に分けられる．一般に，アクティブ方式は，パッシブ方式に対して高精度な形状計測が可能であるが，投影系が必要なため，ハードウェアが大型化する問題がある．また，パッシブ方式は，計測精度の対象依存性が大きい．例えば，テクスチャの薄い測定対象に対して計測精度は低下する．

撮像系を用いた距離計測手法として以下のものがあげられる[50]．

- アクティブ方式
  - 三角法

対象物体に特定の光パターンを投影し，投影系と撮像系の位置にもとづいて，対象物体の位置や形状を求める手法である [49]．この手法に属するものとして，スポット光法，空間コード化法，光切断法等があげられる．

- 光レーダ法（Time of flight）

  対象物体にパルス光を投影し，投影時刻と対象物体からの反射光がセンサによって測定された時刻の差，すなわち光の飛行時刻にもとづき，対象までの距離を求める手法である．処理がシンプルなため，高速に実装できる．対象画像と距離画像を同時に取得する CMOS イメージセンサも報告されている [51]．

- モアレ法

  モアレとは規則的なパターンを複数重ね合わせる時に，各パターンの周期の違いにより発生する模様である．複数の規則パターンのビートやうなりと捉えることもできる．対象物体に格子パターンを投影し，その物体により歪んだパターンを格子パターンを通して観測する．その際に得られるモアレより対象の形状を測定する手法である [52]．

- 干渉計測法

  コヒーレント光の干渉現象を用いた対象形状の計測法である．コヒーレント光を物体光と参照光の二つに分け，それらを干渉させる．物体光と参照光の光路長によって，干渉パターン中の光の強度が変化する．そこで参照光の光路長を走査して得られる干渉パターン群を処理することにより，対象の形状を得る．光コヒーレンストモグラフィ（OCT）がこれに属し，医療分野で利用されている [53]．

- ホログラフィ

  コヒーレント光の回折現象をもとに対象の三次元情報を取得する手法である．回折パターンは距離により変化する．特にフレネル回折とよばれる回折現象が観測される領域では，その観測パターンを計算機を用いて逆伝搬させることで，任意の位置の回折パターンが得られる．それをもとに物体距離を判定し対象の形状を回復できる [54]．

- 非可視波長領域光を用いた計測

  可視光では観測不可能な体内等を観測する様々な手法が提案され，医療やセキュリティ分野で利用されている．これらの手法は主に Computed tomography (CT) とよばれる．対象に音波や X 線等の投影し，その透過パターンや反射パ

ターンから対象の情報を回復する．X線を用いたX線CT，超音波を用いた超音波CT，磁気共鳴現象を用いたMRI等が，医療分野での体内診断，建造物の非破壊検査等に用いられている[16]．

- パッシブ方式
  - 単眼視
    - デフォーカス

      結像系のデフォーカスによるぼけは対象までの距離によって異なる．すなわち，このぼけに関する情報から対象の距離を決定できる[55]．デフォーカス量は合焦点位置からその前後に同じ距離だけ離れた二カ所で同じとなる．これを分離するためには，フォーカス位置が異なる二枚以上の撮影画像が必要になる．また，デフォーカスによるぼけの形状に異方性を持たせて，上記の問題を解決する手法も提案されている[56]．
    - 視差

      運動物体の複数の画像を取得する，あるいは静止物体の複数の画像をカメラの位置を変えて取得する[57, 58]．その後，画像間の視差を用いて対象の距離を測定する．ただし，運動物体の速度やカメラの位置が不明な場合は，対象の絶対距離を求められない．
  - 複眼視，ステレオ視

    位置が既知の複数のカメラを用いて対象を撮影し，三角法を用いて，画像間の視差より対象の距離を計測する．様々な高速アルゴリズムが現在までに提案され[59, 60]，ロボットビジョンや車載カメラ等へ応用されている．

2.3 TOMBOを用いた三次元物体計測

TOMBOでは，個眼像間の視差を用いて対象物体の距離を測定できる．これは，2.2節の複眼視に基づく距離計測に対応している．また，TOMBOに投影系を集積したアクティブ方式の形状計測システムも提案されている[61]．

1.6節で示された撮像モデルは，計測対象を平面物体に限定していた．本節では，対象物体が三次元形状を持つ場合の撮像モデルを示す．ただし，オクルージョン（隠蔽効果）を無視して議論を進める．

対象物体を $\mathcal{F}(x,z)$ と表す．ここで，z 軸はイメージセンサと垂直に交わる軸を示し，y 軸は式 (1.8) と同様に省略している．ユニット u におけるイメージセンサ上の結像信号 $\mathcal{G}_u$ を示す式 (1.8) は以下のように書き換えられる．

$$\mathcal{G}_u(v) = \int \mathcal{F}(v - \mathcal{S}_u(z) - \mathcal{L}_u, z)dz, \quad (u = 0, \cdots, N_u - 1). \tag{2.1}$$

$\mathcal{S}_u(z)$ は個眼像間の視差に対応し，

$$\mathcal{S}_u(z) = \frac{\rho(\mathcal{L}_u + \mathcal{O}_u)}{z}, \tag{2.2}$$

と表される [62]．ここで，ρ はレンズの焦点距離を示す．

次に，式 (2.1) の離散モデルについて考える．離散化された対象は，$\tilde{\mathcal{F}}_{l,m} = \mathcal{F}(l\triangle_x, m\triangle_z)$ である．m は z 軸方向の離散座標系 (整数)，$\triangle_z$ は z 軸方向の画素ピッチを示す．式 (1.10) の導出過程と同様にして，式 (2.1) は，

$$\tilde{\mathcal{G}}_{j,u} = \sum_i \mathrm{rect}\left(\frac{i\triangle_x - j\triangle_v}{\triangle_v}\right) \sum_m \tilde{\mathcal{F}}_{i-\bar{\mathcal{S}}_{m,u},m}\triangle_z, \tag{2.3}$$

と変形される．ここで，$\bar{\mathcal{S}}_{m,u} = \mathrm{round}[(\mathcal{S}_u(m\triangle_z) + \mathcal{L}_u - \mathcal{D}_u)/\triangle_x]$ である．式 (2.3) は，対象物体が，距離ごとに視差によるシフトを受け，z 軸方向に積分され，イメージセンサによりダウンサンプリングされて撮像されることを示している．

システム行列は以下のように定式化される．$z = m\triangle_z$ で表される平面を m 平面と定義する．対象中の m 平面の数を N_z とすると，対象信号の要素数 N_f は N_xN_z となる．また，1.6 節で用いた仮定と同様に，観測データの要素数 N_g は $N_g = N_vN_u = N_x$ とする．

m 平面に対応するシフト行列 $\boldsymbol{C}'_{m,u} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_x}$ は，

$$\boldsymbol{C}'_{m,u}(p,q) = \begin{cases} \triangle_z & (p = q + \bar{\mathcal{S}}_{m,u}), \\ 0 & (p \neq q + \bar{\mathcal{S}}_{m,u}), \end{cases} \tag{2.4}$$

となる．全ての m 平面に対するシフト行列 $\boldsymbol{C}_u \in \mathbb{R}^{N_f \times N_f}$ は，

$$\boldsymbol{C}_u = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}'_{0,u} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{C}'_{1,u} & \cdots & \boldsymbol{O} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{C}'_{N_z-1,u} \end{bmatrix}, \tag{2.5}$$

となる．ここで，$\boldsymbol{O}$ は $N_x \times N_x$ の零行列を表す．

イメージセンサ上への積分を行う行列 $\boldsymbol{Q} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_f}$ は，

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & \boldsymbol{I} & \cdots & \boldsymbol{I} \end{bmatrix}, \tag{2.6}$$

となる．ここで，$\boldsymbol{I} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_x}$ は単位行列を示す．

式 (1.12) に示すダウンサンプリング行列 $\boldsymbol{T} \in \mathbb{R}^{N_v \times N_x}$ を用いて，システム行列 $\boldsymbol{\Phi} \in \mathbb{R}^{N_g \times N_f}$ は，

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{TQC}_0 \\ \boldsymbol{TQC}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{TQC}_{N_u-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{TC}'_{0,0} & \boldsymbol{TC}'_{1,0} & \cdots & \boldsymbol{TC}'_{N_z-1,0} \\ \boldsymbol{TC}'_{0,1} & \boldsymbol{TC}'_{1,1} & \cdots & \boldsymbol{TC}'_{N_z-1,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{TC}'_{0,N_u-1} & \boldsymbol{TC}'_{1,N_u-1} & \cdots & \boldsymbol{TC}'_{N_z-1,N_u-1} \end{bmatrix}, \tag{2.7}$$

となる．

すなわち，システム行列 $\boldsymbol{\Phi}$ による操作は Fig. 2.1 のように表される．対象 $\boldsymbol{f}$ の m 平面は，ユニットごとに，視差によるシフトを受ける（行列 $\boldsymbol{C}_u$）．次に，イメージセンサ上に積分される（行列 $\boldsymbol{Q}$）．最後に，ダウンサンプリングされ（行列 $\boldsymbol{T}$），各ユニットにおける観測データ $\boldsymbol{g}_u$ となる．

2.4 三次元形状をもつ対象の再構成法

2.3 節で示したように，対象が三次元形状を持つ場合，対象の要素数 N_f と観測データの要素数 N_g の関係は，$N_f = N_x N_z > N_g = N_x$ となる．すなわち，このシステムの逆問題は不良設定となるため，1.5 節に示した解法で解くことはできない．そこで，非線形な解法に基づく対象の三次元形状の回復を考える．対象が不透明物体である場合，オクルージョンが発生する．そこで，対象情報 $\hat{\boldsymbol{f}} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_z}$ を直接求めず，三次元情報 $\hat{\boldsymbol{f}}' \in \mathbb{R}^{N_x \times 1}$ と距離情報 $\hat{\boldsymbol{d}} \in \mathbb{R}^{N_x \times 1}$ に分割して求める．

処理の流れを以下に示す．

for $m = 0$ to $N_z - 1$ **do**

$\dot{\boldsymbol{f}}_m = \dot{\boldsymbol{\Phi}}_m^{-1} \boldsymbol{g}$.

$\dot{\boldsymbol{g}}_m = \dot{\boldsymbol{\Phi}}_m \dot{\boldsymbol{f}}_m$.

$\boldsymbol{e}_m = \dot{\boldsymbol{\Phi}}_m^T (\boldsymbol{g} - \dot{\boldsymbol{g}}_m)^2$.

$\boldsymbol{e}_m$ を平滑化

end for

$\boldsymbol{e}_m$ が最小となる m を要素ごとに判定し，その $m\triangle_z$ を距離画像 $\hat{\boldsymbol{d}}$ の要素，

その $\dot{\boldsymbol{f}}_m$ の要素を再構成画像 $\hat{\boldsymbol{f}}'$ の要素とする．

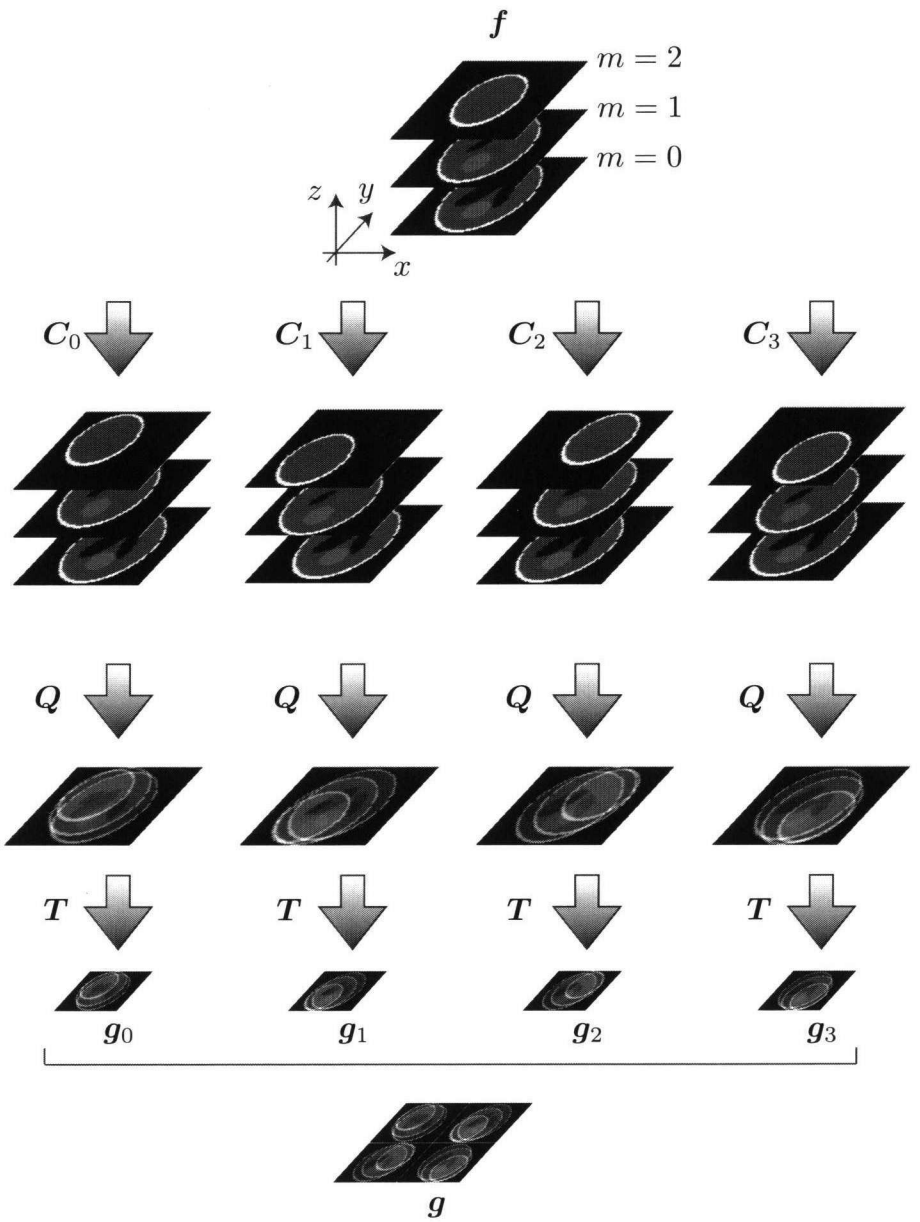


Fig. 2.1　A flowchart of image capturing of range detection in TOMBO.

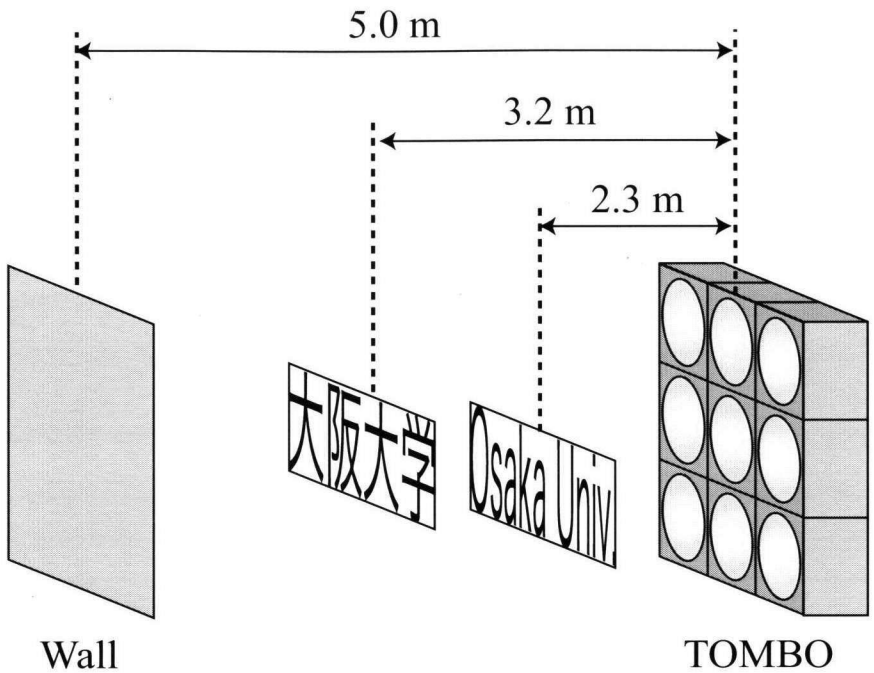


Fig. 2.2 An experimental setup for range detection.

ここで，$\dot{\boldsymbol{\Phi}}_m \in \mathbb{R}^{N_x \times N_x}$ は，1.6節で示した m 平面に対するシステム行列を示す．すなわち $\dot{\boldsymbol{f}}_m \in \mathbb{R}^{N_x \times 1}$ は，対象物体が m 平面にあることを仮定し，式 (1.5) に示した反復法により再構成した結果に対応している．$\dot{\boldsymbol{g}}_m \in \mathbb{R}^{N_g \times 1}$ は，m 平面に対象物体 $\dot{\boldsymbol{f}}_m$ があることを仮定した観測データのエミュレーション結果である．$\boldsymbol{e}_m \in \mathbb{R}^{N_x \times 1}$ は m 平面での評価値マップ，$(\cdot)^2$ は要素ごとに二乗する演算を示す．$\boldsymbol{e}_m$ を平滑化することで，測距のばらつきを低減できる．ただし，平滑化フィルタのサイズによっては，距離画像中の x, y 方向の分解能が低下する．

2.5 原理確認実験

2.4節に示した手法の原理を確認するための実験を行った．実験系をFig. 2.2に，TOMBOの仕様をTable 2.1に示す．対象は三つの平面物体である．三次元物体計測の原理確認としては，複数の平面群を対象とする実験で十分と考える．

Fig. 2.3に実験結果を示す．Fig. 2.3(a) は撮影画像，Fig. 2.3(b) は個眼像 $\boldsymbol{g}_u$，Fig. 2.3(c) は提案手法による再構成結果 $\hat{\boldsymbol{f}}'$ である．Fig. 2.3(b) に比べて，全ての対象物体に焦点が合った高解像度な画像が得られていることがわかる．Fig. 2.3(d) に示す距離画像 $\hat{\boldsymbol{d}}$ より，

Table 2.1　Specifications of TOMBO used in the experiment.

Number of units ($N_u \times N_u$)	3×3
Pixels per unit ($N_v \times N_v$)	160×160
Pixel size ($\triangle_v$ sq.)	3.125 μm sq.
Focal length of lenslet (ρ)	1300 μm
Diameter of lenslet	500 μm

対象の距離が概ね良好に推定されていることがわかる．測距誤差を次式を用いて評価した．

$$\sum_{i \in \mathcal{R}_j} \frac{|\hat{\boldsymbol{d}}(i) - \mathcal{Z}_j|}{\mathcal{N}_j}. \tag{2.8}$$

ここで，$\mathcal{R}_j$，$\mathcal{Z}_j$，$\mathcal{N}_j$ は，j 番目の対象物体の領域，距離，画素数を示す．$\mathcal{R}_j$ は Fig. 2.3(c) を参考にして目視により指定した．測距誤差は，Fig. 2.2 に示した手前の物体から順に，0.2 m，0.2 m，1.0 m であった．

2.6　測距精度に関する考察

複眼視における測距誤差の説明図を Fig. 2.4 に示す．2.3 節に示したように，複眼視を用いた測距は，複数の画像間の視差に基づいている．Fig. 2.4 では，一画素精度で視差の検出が行えることを前提にしている．b は二つのカメラ間の距離，$\triangle_v$ はイメージセンサの画素ピッチを示す．距離 z における $\triangle_{z_{near}}$ を前側測距深度，$\triangle_{z_{far}}$ を後側測距深度と定義する．これらは，

$$\triangle_{z_{near}} = \frac{z^2 \triangle_v}{\rho b + z \triangle_v}, \tag{2.9}$$

$$\triangle_{z_{far}} = \frac{z^2 \triangle_v}{\rho b - z \triangle_v}, \tag{2.10}$$

と表される．測距結果が $z_{near} = z - \triangle_{z_{near}}$ から $z_{far} = z + \triangle_{z_{far}}$ の間に一様にばらつくと仮定すると，測距誤差は以下のように表される．

$$\int_{z_{near}}^{z_{far}} \frac{|z - z'|}{z_{far} - z_{near}} dz' = \frac{\frac{1}{2}{z_{far}}^2 - z_{far} z + \frac{1}{2}{z_{near}}^2 - z_{near} z + z^2}{z_{far} - z_{near}}. \tag{2.11}$$

Table 2.1 の仕様のシステムにおける，式 (2.11) に基づく測距誤差を Fig. 2.5 に示す．ただし，$b = \triangle_v N_v (N_u - 1)$ としている．また，視差計測の解像度を 1/1 画素から 1/50 画素まで段階的に変化させて計算した．式 (2.8) を用いて計算された平均誤差を × 印で示して

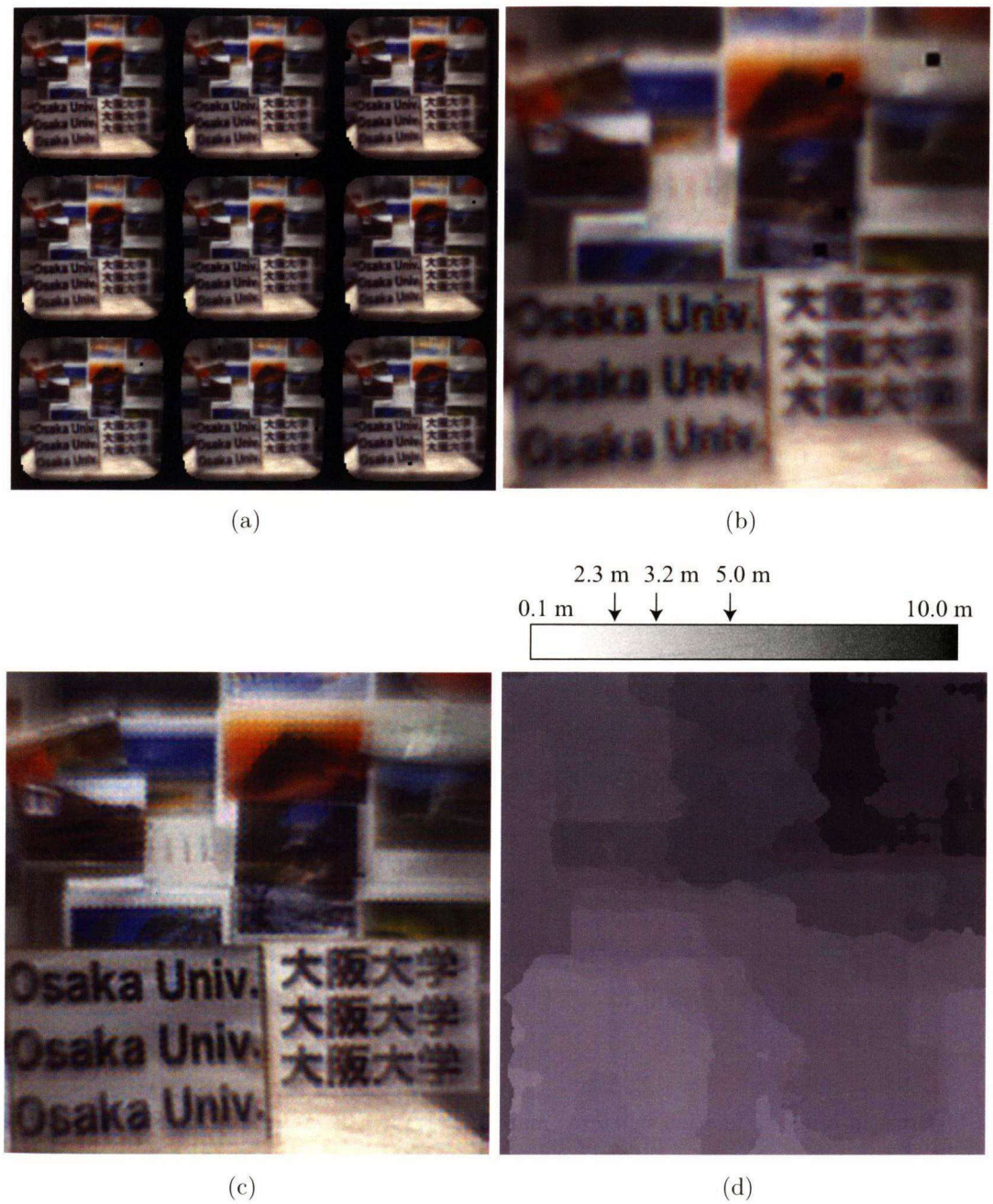


Fig. 2.3 Experimental results for reconstruction of objects arranged in a three dimensional space. (a) A captured image, (b) a unit image, (c) a reconstructed image by the proposed method, and (d) a depth map.

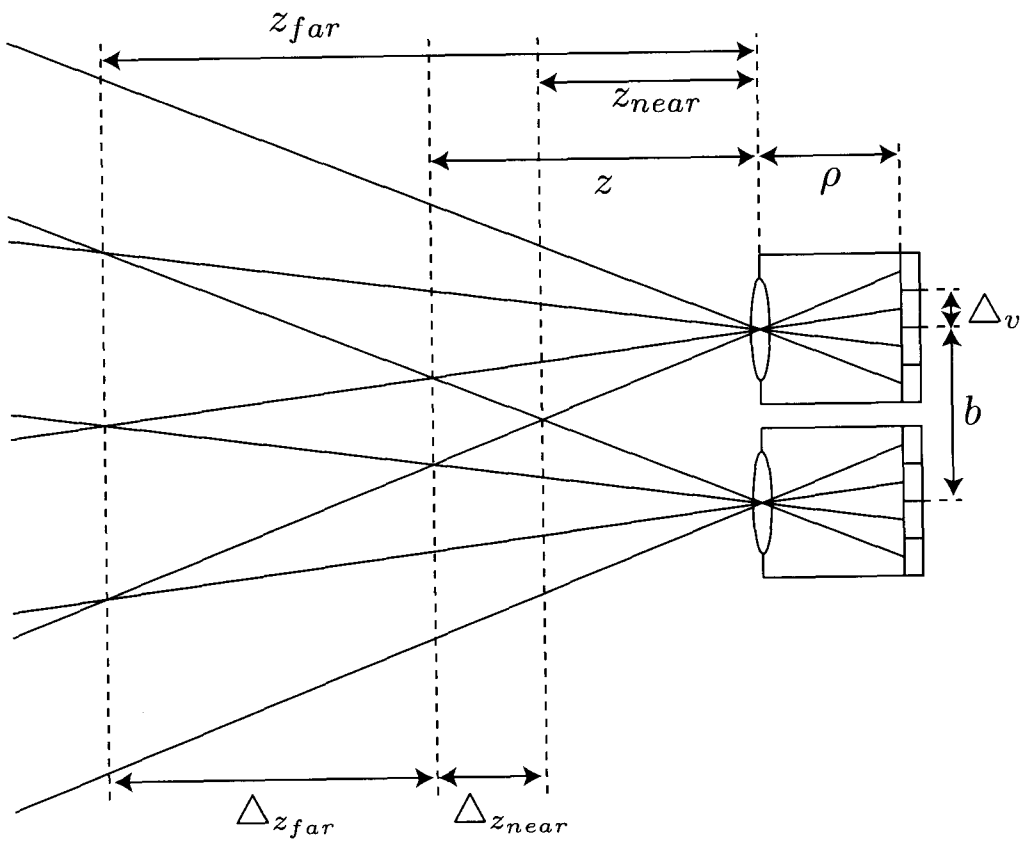


Fig. 2.4　Error in range estimation by stereo matching. ($\triangle_{z_{near}} + \triangle_{z_{far}}$) indicates range of error at z.

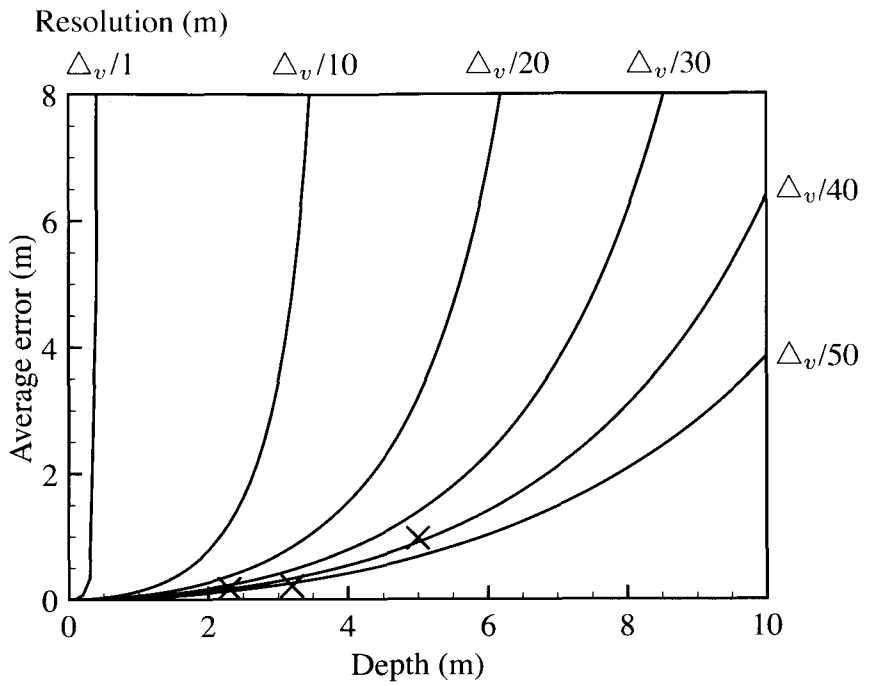


Fig. 2.5 Comparison between experimental and theoretical results on errors in range estimation with stereo matching. Cross marks show errors in the experiment of Fig. 2.3(d).

いる．この結果から，今回用いた手法により，およそ1/40画素の解像度で視差計測が行われていると推定される．

ハードウェアの改善による測距精度の向上策として，式(2.9)と式(2.10)を考慮すると，焦点距離ρとカメラ間距離bを大きくする，あるいは，イメージセンサの画素ピッチ$\triangle_v$を小さくすることがあげられる．また，視差計測アルゴリズムの改善による視差計測の高精度化も有効である．

2.7 結言

本章では，TOMBOを用いた物体の三次元形状計測，および，その情報を用いた画像再構成手法を示し，その有効性を明らかにした．

2.2節では，撮像系を用いた距離計測の手法をまとめた．撮像系を用いることで，用いる手法によっては一切の走査を必要とせず，高速な計測が実現できる．

2.3節では，TOMBOを用いた距離計測について述べた．この手法は，個眼像間の視差を用いた三角法に基づいている．三次元形状をもつ物体を対象としたTOMBO撮像モデ

ルを示した．

2.4節では，三次元形状をもつ対象物体に関する再構成法を示した．2.3節で示したように，本システムの逆問題は不良設定である．そのため，1.5節で示した手法では対象物体を再構成することができない．そこで，非線形なアルゴリズムを用いて，計測対象の二次元画像と距離画像を得る手法を提案した．

2.5節では，2.4節で示した手法の原理確認実験を示した．TOMBOから2.3 m，3.2 m，5.0 mの距離に配置された対象物体に対し，再構成処理による高解像度画像取得および測距が行えることを確認した．測距誤差は0.2 m，0.2 m，1.0 mとなった．

2.6節では，複眼視を用いた測距における精度に関して考察した．2.5節の原理確認実験で示した結果は，およそ1/40画素の解像度をもつ視差計測に対応することがわかった．

第 3 章

高解像度画像取得を考慮したレンズ配置

3.1 緒言

複眼カメラ TOMBO は，三次元空間に分布する計測対象に対して，単眼カメラとは異なるサンプリング特性を持っている．従来の TOMBO の各レンズは等間隔に配置されていた．本論文ではこのレンズ配置を規則レンズ配置とよぶ．規則レンズ配置におけるサンプリングの問題として，対象物体がある特定の距離にある場合に，各個眼よる物体上のサンプリング点が完全に一致してしまうことがあげられる．全個眼のサンプリング点が一致した場合，再構成処理による高解像度化の効果は得られない．つまり，多次元情報取得において，再構成情報中のイメージセンサと平行な空間方向（m 平面）の解像度が低下してしまう．そこで，本章ではレンズ配置に不規則性を導入する．本論文ではこのレンズ配置を不規則レンズ配置とよぶ．不規則レンズ配置に関する原理確認実験を行い，その効果を示す．次に，高解像度画像取得を考慮したレンズ配置の設計法を示す．本論文ではこのレンズ配置を最適化レンズ配置とよぶ．シミュレーションにより，不規則レンズ配置と最適化レンズ配置の有効性を確認する．さらに，レンズ配置に求められるアライメント精度と不規則性を導入したレンズ配置における測距について考察する．

3.2 複眼結像系の問題点

Fig. 3.1 に単眼カメラと従来の規則レンズ配置による TOMBO のサンプリング点の分布を示す．ここでは，ダウンサンプリングやボケ等を無視する．各受光素子の中心からレンズの中心を通る主光線をサンプリング線，サンプリング線と対象物体面との交点をサンプリング点と定義する．

Fig. 3.1(a) に示すように，単眼カメラは距離に依存せず，一様に対象面をサンプリングしている．一方，Fig. 3.1(b) に示すように，TOMBO では距離に依存して，サンプリン

グ点の局在化が発生している．Table 2.1 に示した仕様の TOMBO を用いた場合の，複数距離でのサンプリング点の分布を Fig. 3.2 と Fig. 3.3 に示す．Fig. 3.2 と Fig. 3.3 では白い画素がサンプリング点を示している．対象の距離が 0.4 m の時（Fig. 3.2(b)）には対象物体が一様にサンプリングされていることがわかる．しかし，その他の距離では，サンプリング点の局在化が発生している．この傾向は，遠距離の対象に対して顕著になる．各ユニットが対象の同一点を観測することは，各個眼における取得情報が一致することを意味する．この場合，TOMBO 全体での取得情報と各個眼での取得情報が一致するため，複数の個眼画像を用いても高解像度な再構成画像を得られない．

3.3　不規則レンズ配置

3.2 節に示した問題の解決法として，レンズ配置によるサンプリング点の操作を提案する．ただし，ある特定の距離に対してのみサンプリング点が分散するように設定しても，その他の距離でサンプリング条件は良くならない．そこで，Fig. 3.4(a) に示すように，レンズ配置に不規則性を導入し，サンプリング点の分散を図る．Fig. 3.1(b) と不規則性を導入したレンズ配置のサンプリング線の分布を示した Fig. 3.4(b) との比較から，サンプリング点の局在化が解消されていることがわかる．また，Fig. 3.5 と Fig. 3.6 に複数の観察距離におけるサンプリング点の分布を示す．Fig. 3.2，Fig. 3.3 と比較して，対象の距離によるサンプリング点の局在化が解消され，さまざまな距離でほぼ同様のサンプリング分布が得られることがわかる．

3.4　不規則レンズ配置に関する原理確認実験

不規則レンズ配置における，再構成処理による高解像度化の距離依存性を確認した．Table 2.1 に示した TOMBO のレンズアレイをイメージセンサ面に平行に回転し配置した．レンズアレイの回転を行うと，レンズ配置方向のレンズ間距離は等間隔のままであるが，ユニットの配置方向を見ると，レンズ位置のシフトやレンズ間隔の拡大縮小を行える．つまり，各個眼のサンプリング点がシフトするため，レンズアレイの回転により擬似的に不規則レンズ配置を模倣できると考えられる．Fig. 3.7 に示すようにストライプパターンのテストチャートを TOMBO 撮像部に平行に配置した．TOMBO からテストチャートの距離は 0.8 m と 1.6 m とした．ストライプのピッチは，イメージセンサ上の像において

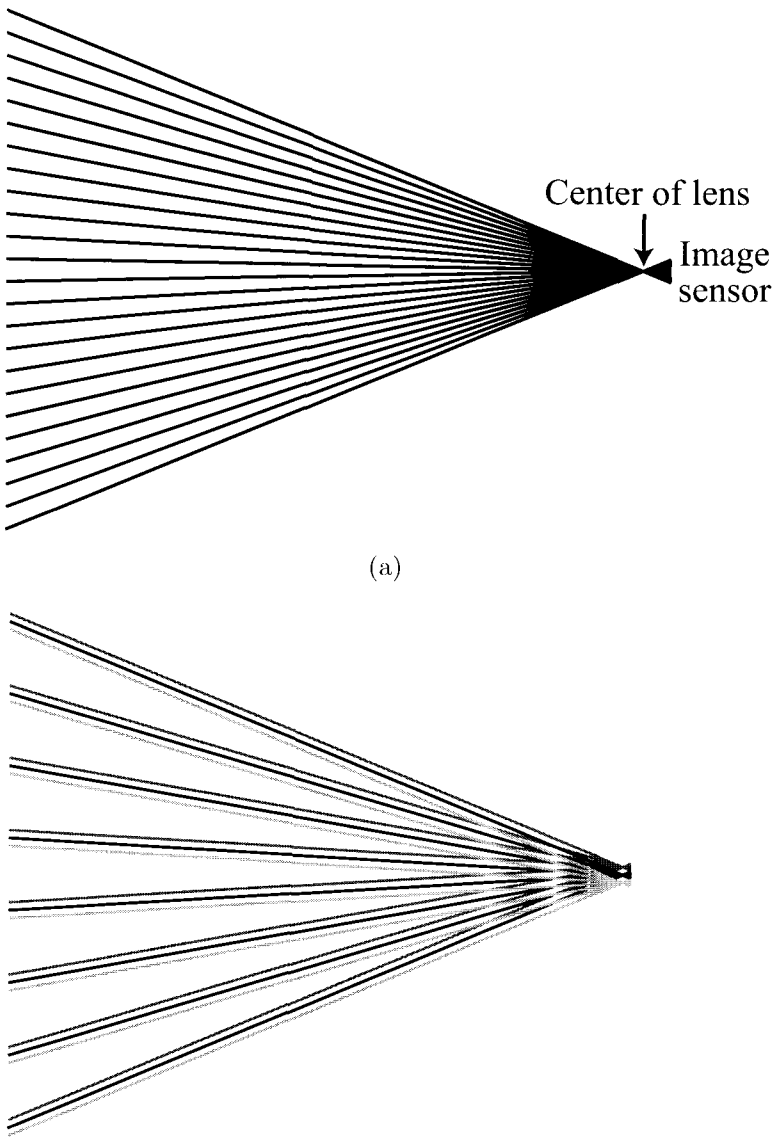


Fig. 3.1 Distributions of sampling rays in (a) single-eye imaging and (b) TOMBO imaging.

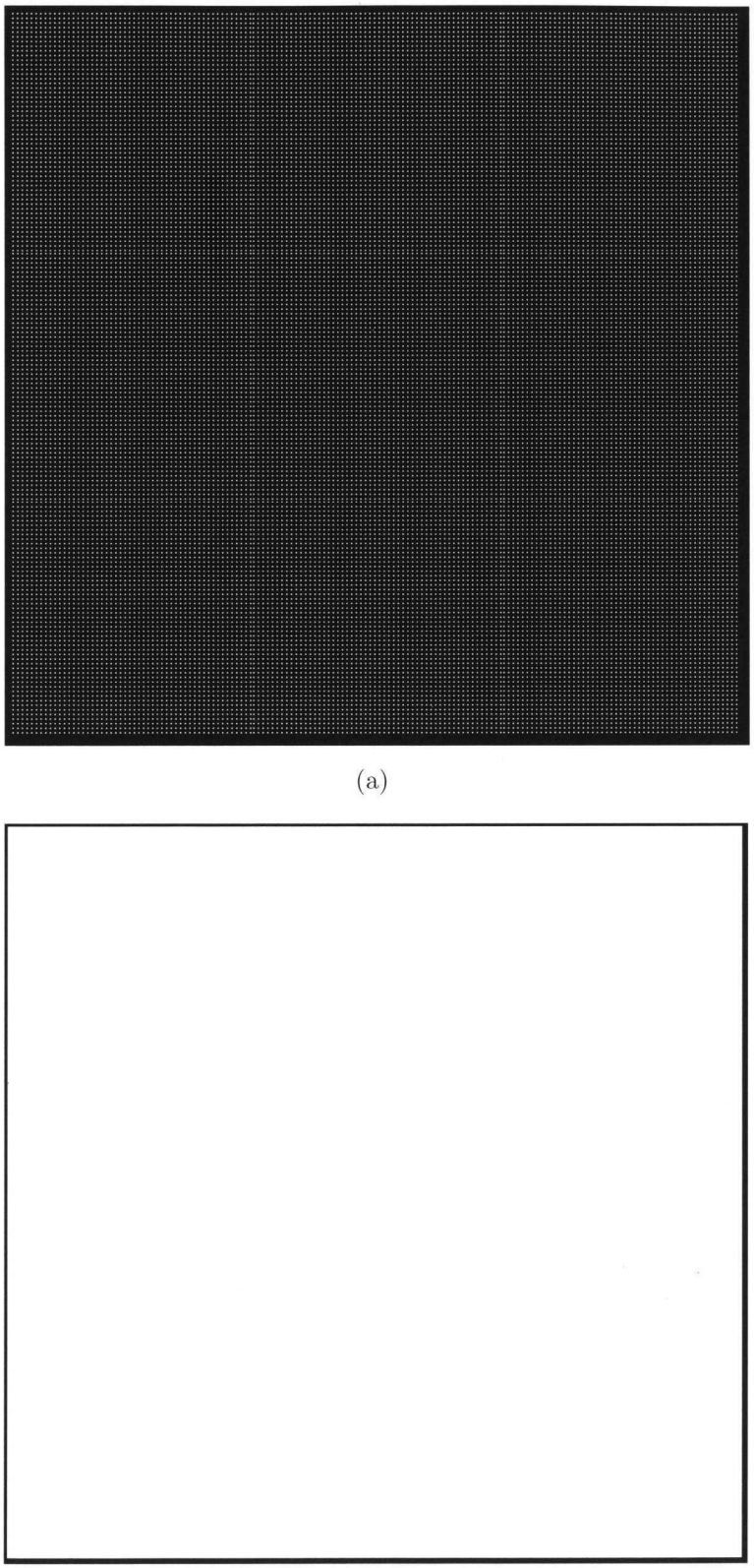
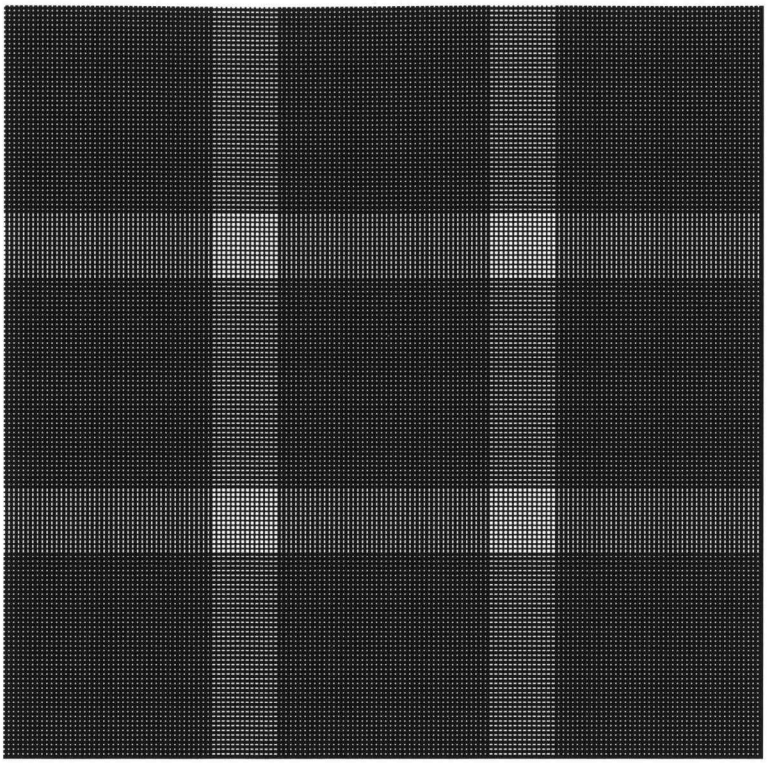
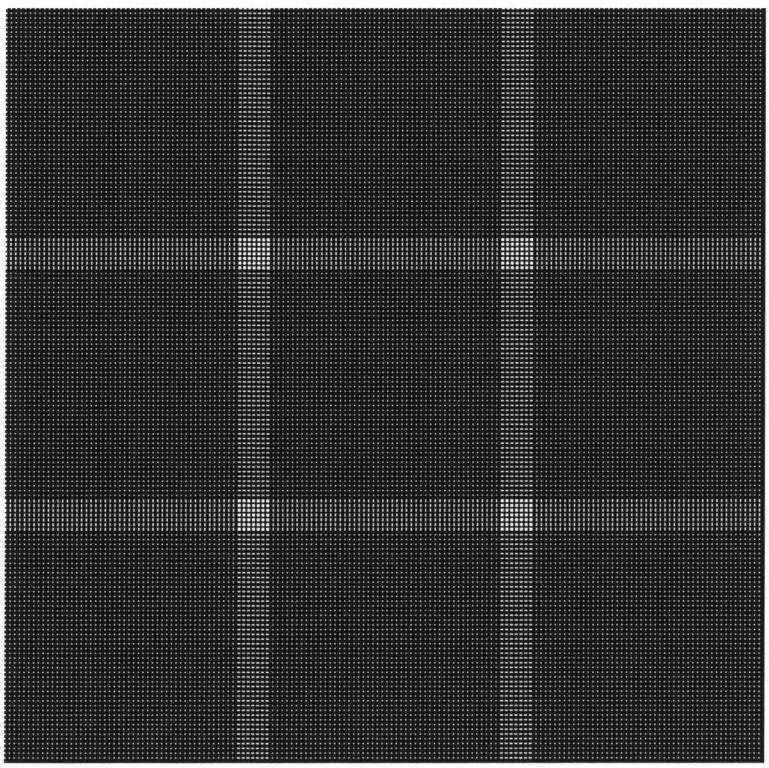


Fig. 3.2　Distributions of sampled points at (a) 0.2 m and (b) 0.4 m using a regular lens arrangement.

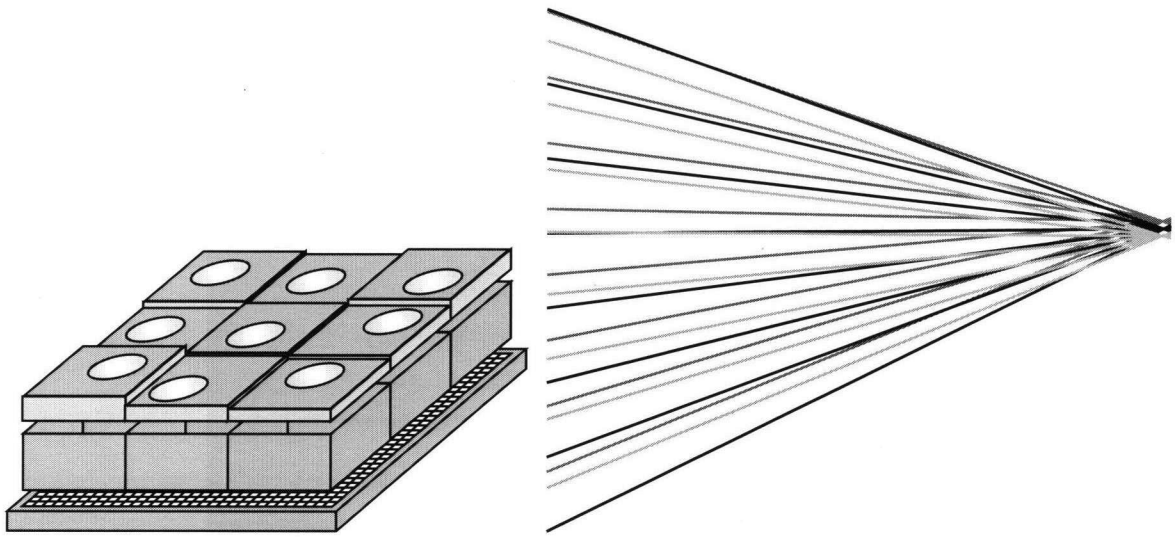


(a)



(b)

Fig. 3.3 Distributions of sampled points at (a) 5.0 m and (b) 10.0 m, using a regular lens arrangement.



(a)　(b)

Fig. 3.4　TOMBO with an irregular lens arrangment. (a) The imaging hardware and (b) a distribution of the sampling rays.

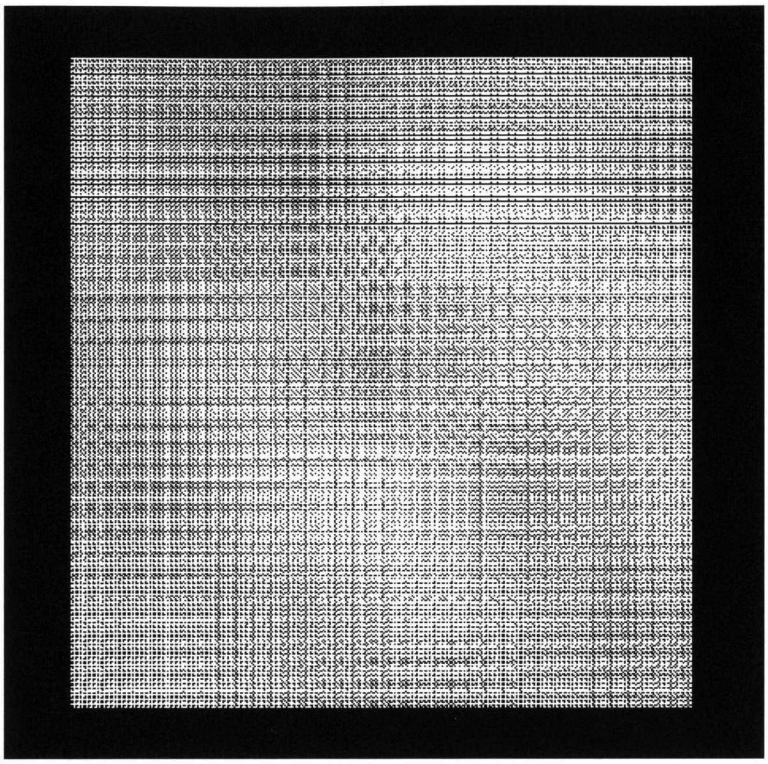
123 lp/mm となるように設定した．

個眼像と再構成画像の一例を Fig. 3.8 に示す．ただし，テストチャートは 45° 回転させている．Fig. 3.8(a) と Fig. 3.8(c) の個眼像にはエイリアシングが見られるが，Fig. 3.8(b) と Fig. 3.8(d) の再構成画像では距離に依存せずにエイリアシングがほぼ抑えられていることがわかる．

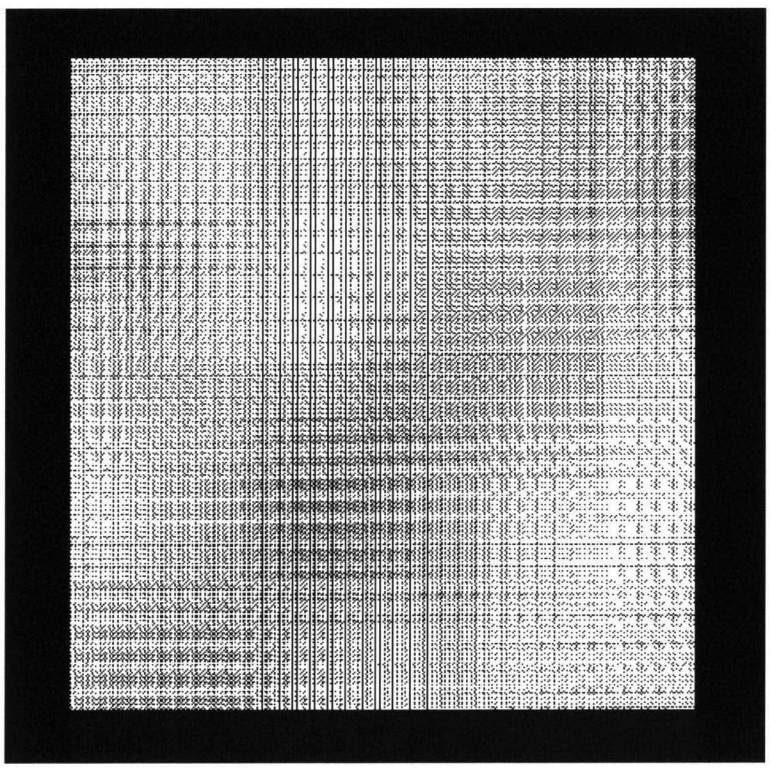
Fig. 3.9 に像高に対する個眼像と再構成画像のコントラストの変化を示す．TOMBO システムの伝達関数には方向依存性が無いと仮定し，テストチャートを 45° 刻みで回転させて得られたコントラストを像高ごとに平均している．コントラストは次式で表される．

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \tag{3.1}$$

ここで，$I_{\max}$ は信号の最大値，$I_{\min}$ は信号の最小値を示す．Fig. 3.9 より，対象の距離が 0.8 m と 1.6 m の場合でほぼ同等のコントラストが得られていることがわかる．すなわち，不規則レンズ配置において，再構成画像解像度の対象物体距離依存性が低いことが確認できた．

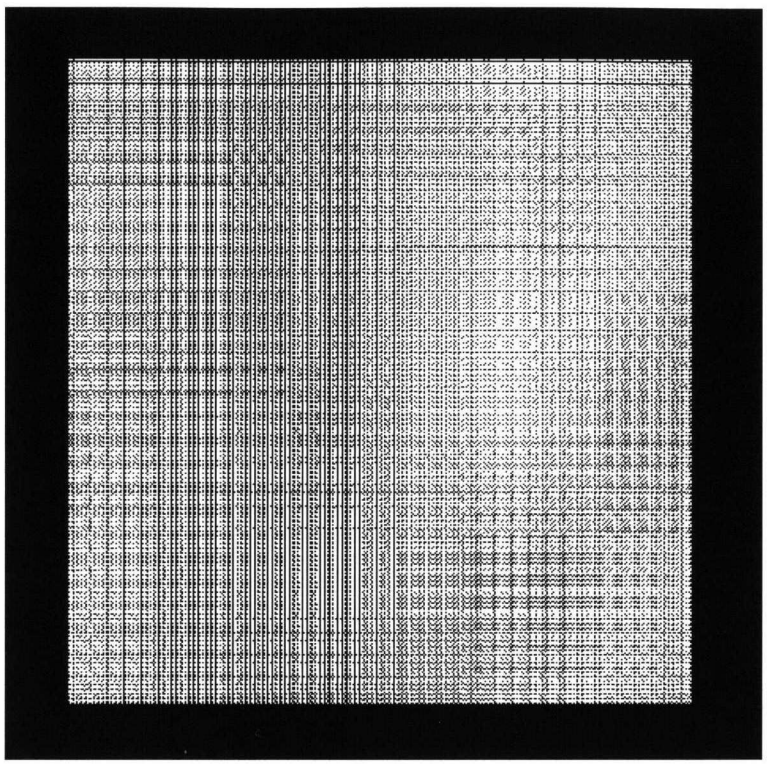


(a)

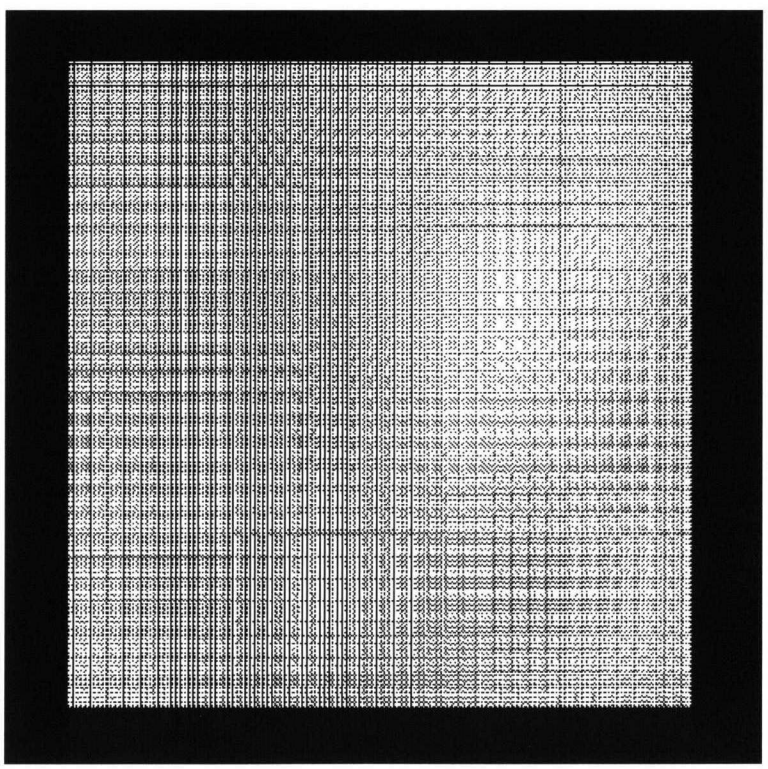


(b)

Fig. 3.5 Distributions of sampled points at (a) 0.2 m and (b) 0.4 m, using an irregular lens arrangement.



(a)



(b)

Fig. 3.6　Distributions of sampled points at (a) 5.0 m and (b) 10.0 m, using an irregular lens arrangement.

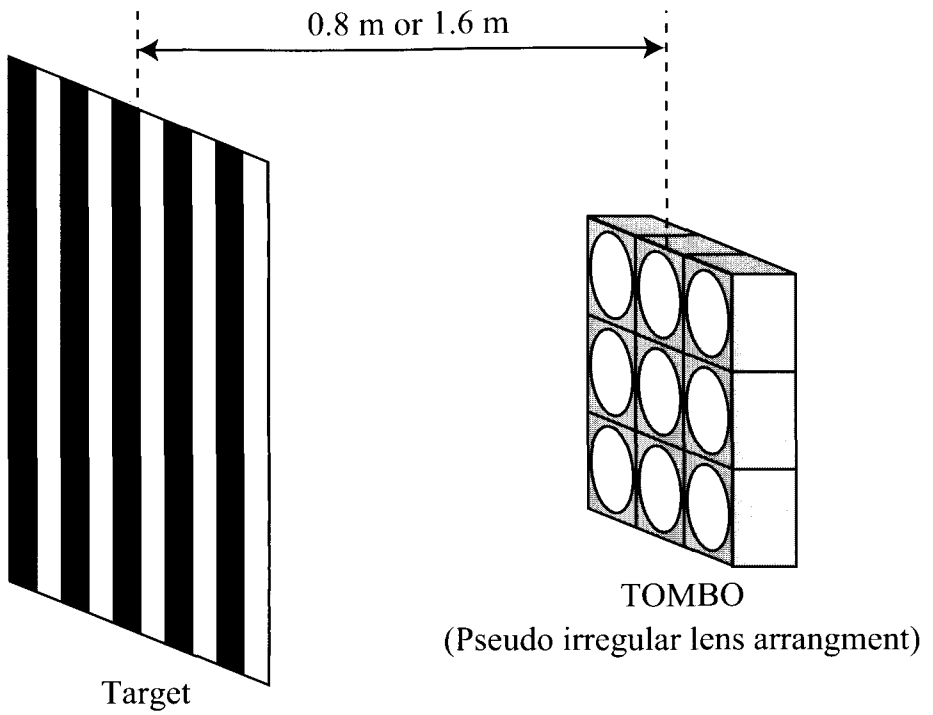


Fig. 3.7 An experimental setup to measure a characteristics of an irregular lens arrangement.

3.5 レンズ配置の最適化

3.3 節で示した不規則レンズ配置は，レンズ配置のランダム性のみが考慮されており，レンズ位置によって効果にばらつきが出ることが予想される．そこで，レンズ配置の最適化を検討する．

TOMBO から距離 z だけ離れた離散化された平面において，画素の総数に対するサンプリング点を含む画素数の割合を被覆率と定義する．被覆率が高いほど，物体の多数の画素がサンプリングされているため，高解像度な画像再構成が期待できる．そこで，様々な距離の被覆率の総和を最大化するレンズ配置を求める．目的関数を以下のように定義する．

$$\sum_{m \in \boldsymbol{z}} \mathcal{C}_m(\boldsymbol{r}) + \alpha \mathcal{V}_m(\boldsymbol{r}). \tag{3.2}$$

ここで，$\boldsymbol{z}$ は設計の対象として設定する距離集合，$\boldsymbol{r} \in \mathbb{R}^{3 \times N_u}$ は各レンズの xyz 座標，$\mathcal{C}_m$ は m 面における被覆率，$\mathcal{V}_m$ は m 面における各ユニットの視野の重複率，α は $\mathcal{V}_m(\boldsymbol{r})$ の重みを設定する定数を示す．ここで，視野の重複率は，TOMBO 全体の視野の面積に対する全個眼の共通視野の面積の割合をとして定義する．被覆率のみを目的関数として用いた場合，各個眼の視野の重複が低下し，TOMBO 全体としての実質的な視野が狭くなる

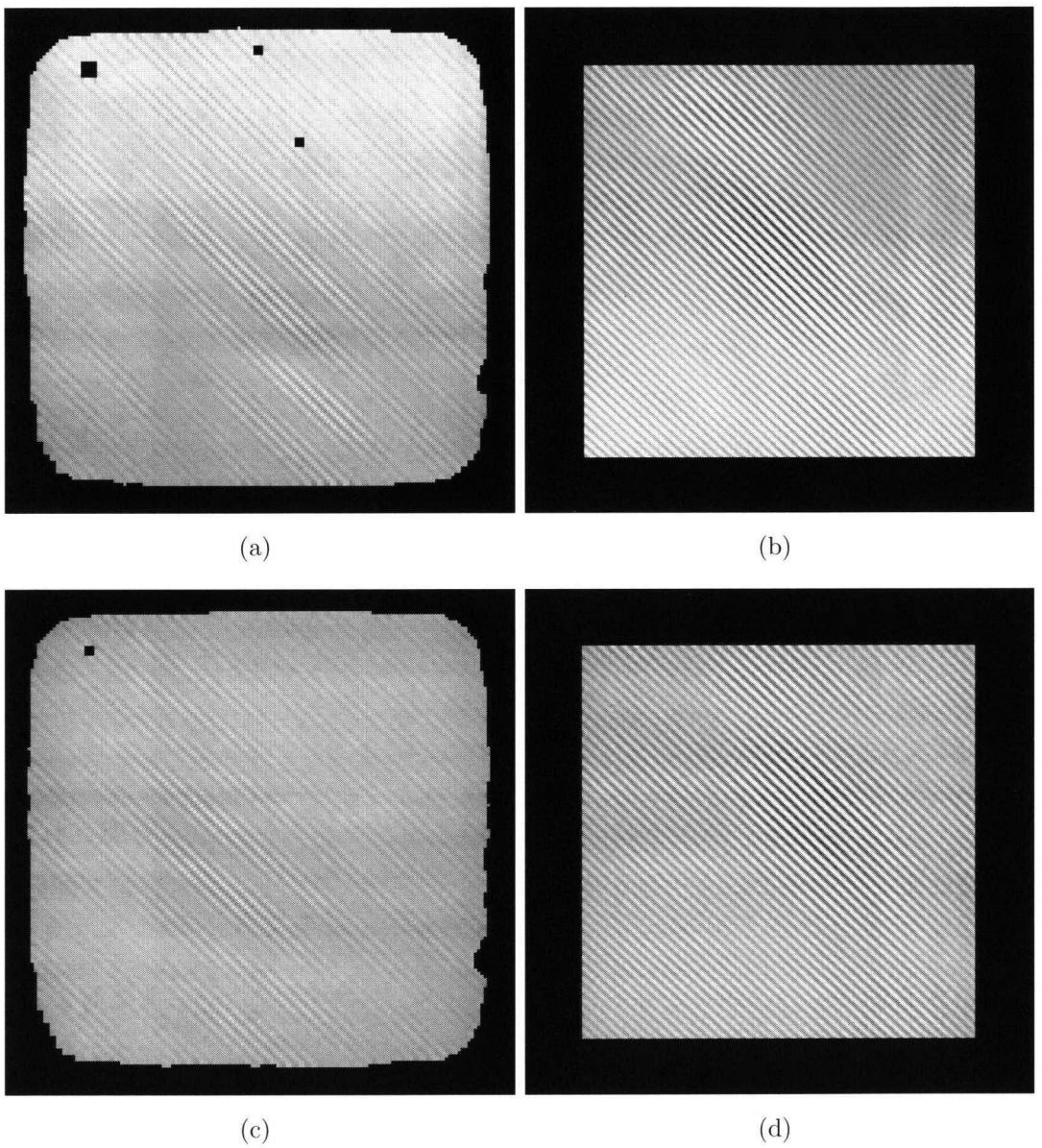


Fig. 3.8　Reconstruction results of a stripe pattern. (a) A unit image and (b) reconstructed image when the pattern was placed at 0.8 m from TOMBO. (c) A unit image and (d) reconstructed image when the pattern was placed at 1.6 m fromTOMBO.

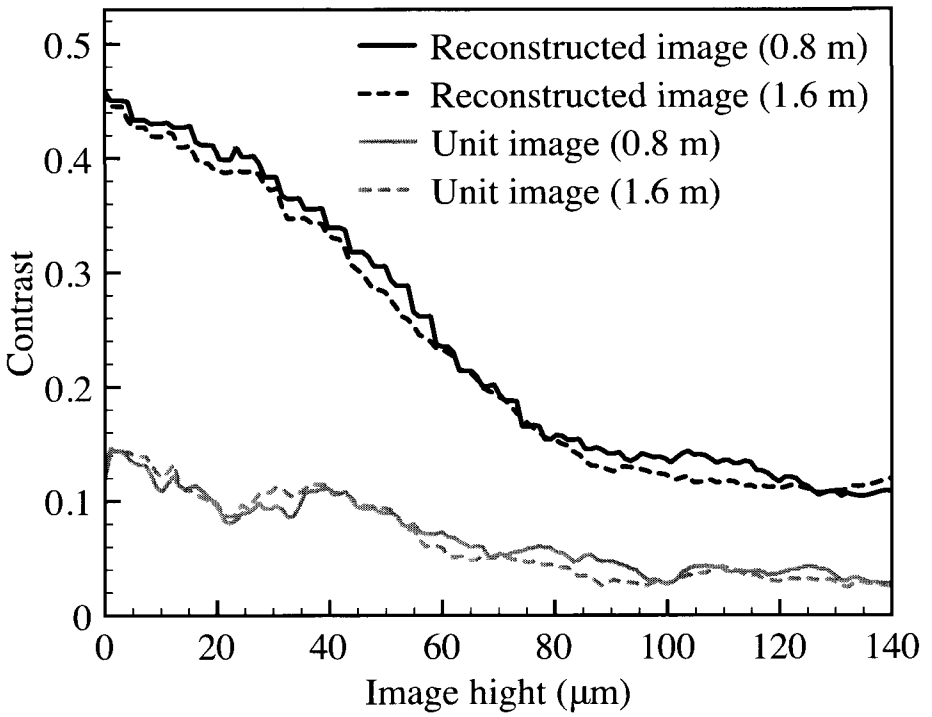


Fig. 3.9 Relationships between image hight and contrast when the pattern was place at 0.8 m or 1.6 m from TOMBO.

恐れがあるため，視野の重複率 $\mathcal{V}_m$ を導入している．また，距離集合 $\boldsymbol{z}$ は次式を満たす距離 z の部分集合として設定する．

$$\frac{1}{z} = \frac{p\triangle_v}{\rho q b_{\min}}, \qquad (p = 0, \cdots, N_v - 1,\ q = 0, \cdots, N_u - 1). \tag{3.3}$$

ここで，$b_{\min}$ は近傍ユニット間の距離，ρ はレンズの焦点距離，$\triangle_v$ はイメージセンサの画素ピッチを示す．この距離集合 $\boldsymbol{z}$ は，Fig. 2.4 に示した規則レンズ配置において，サンプリング線の交点が発生する距離群を示す．ただし，Fig. 2.4 では $b = qb_{min}$ である．これらの $\boldsymbol{z}$ では特に被覆率が低下することを考慮し，この距離群における被覆率が高くなるよう目的関数を設定している．

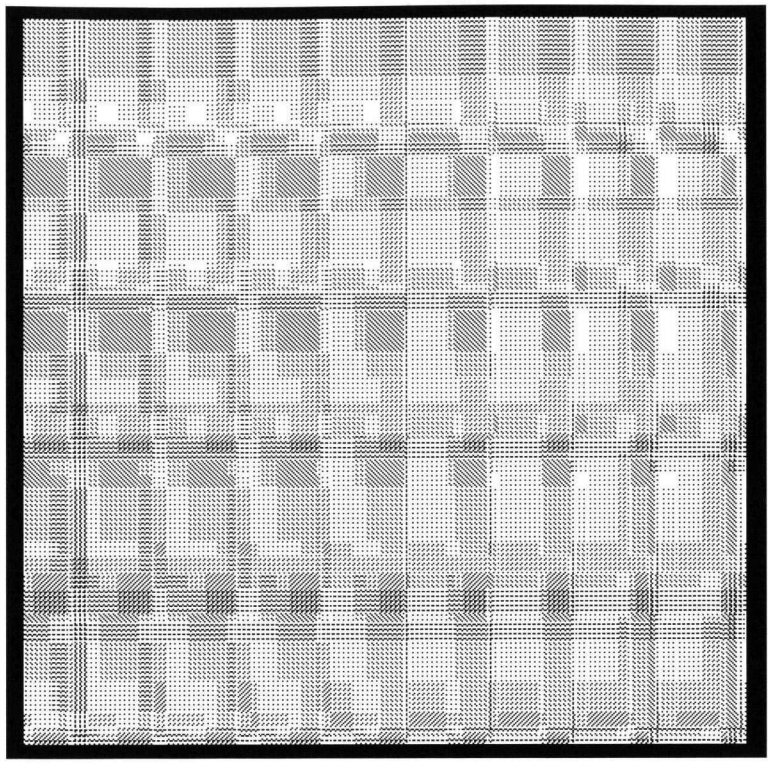
非線形最適化手法である滑降シンプレックス法[63] を用いて，式 (3.2) に示した目的関数の局所的最大値を与えるレンズ配置 $\boldsymbol{r}$ を求めた．式 (3.2) 中の α は 1 に設定した．初期レンズ位置は規則レンズ配置とした．Table 3.1 に最適化されたレンズ配置 $\mathcal{L}_u$ (式 (1.8)) を示す．また，Fig. 3.10 と Fig. 3.11 に最適化レンズ配置における複数の距離でのサンプリング点の分布を示す．Fig. 3.10, Fig. 3.11 と Fig. 3.5, Fig. 3.6 との比較から，最適化レンズ配置では，複数距離の対象を均一にサンプリングできることがわかる．

Table 3.1　Positions of lenslets in an optimized lens arrangement. (μm)

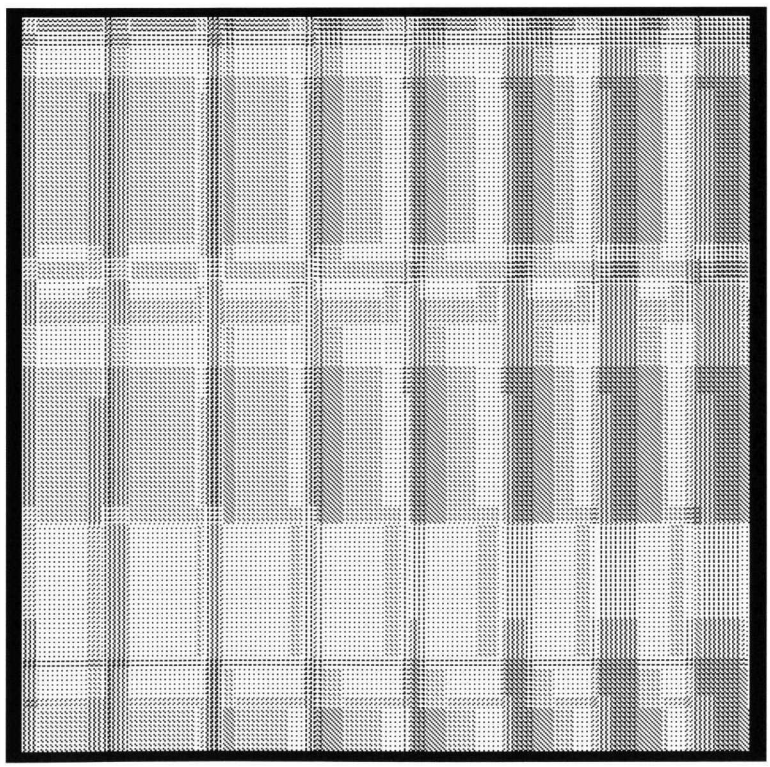
Index of lenslet	Shift along the x-axis	Shift along the y-axis	Shift along the z-axis
0,0	3.28	-8.96	0.57
0,1	-2.44	-4.79	0.59
0,2	-4.40	7.55	-0.28
1,0	-1.37	-6.87	-1.01
1,1	-0.82	-8.87	0.07
1,2	-4.88	-5.77	-1.98
2,0	-9.68	-7.85	-0.55
2,1	0.71	2.55	-0.81
2,2	-3.32	-6.85	1.22

3.6　原理確認シミュレーション

3.3 節で述べたレンズ配置への不規則性の導入と，3.5 節で述べたレンズ配置の最適化の効果をシミュレーションにより確認した．Table 2.1 に示したシステム仕様を想定した．

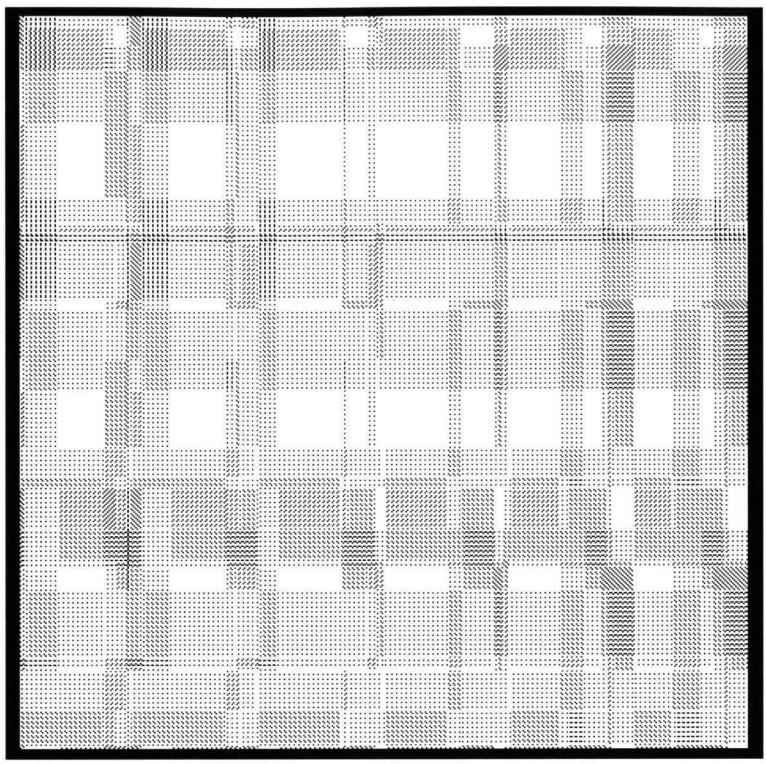


(a)

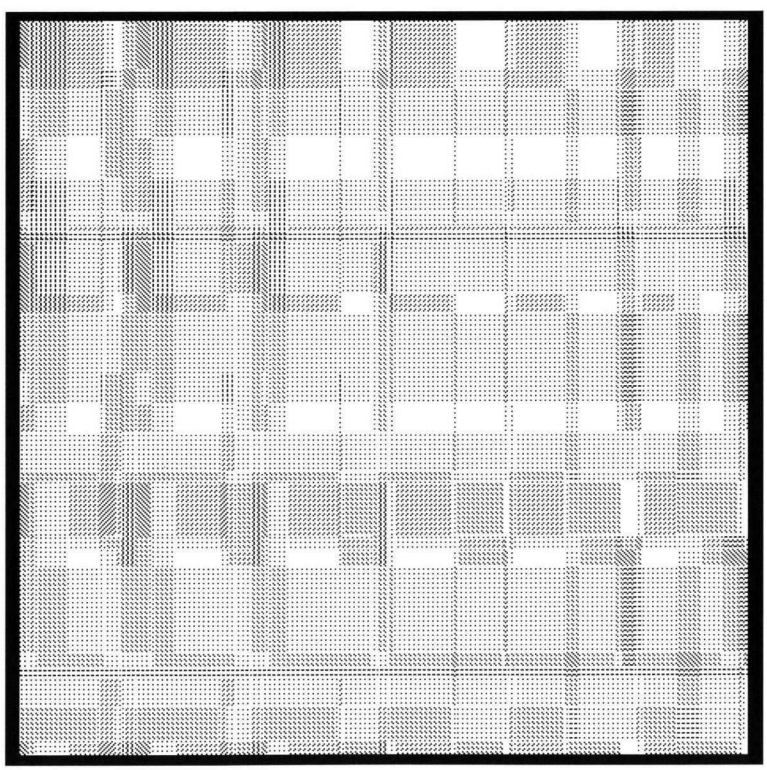


(b)

Fig. 3.10 Distributions of sampled points at (a) 0.2 m and (b) 0.4 m, using an optimized lens arrangement.



(a)



(b)

Fig. 3.11　Distributions of sampled points at (a) 5.0 m and (b) 10.0 m, using an optimized lens arrangement.

不規則レンズ配置は，x 軸，y 軸，z 軸に沿って，$\pm 10\ \mu$m 以内のシフトをランダムに与えて実現した．最適化レンズ配置に関しては，3.5 節の最適化手法に基づいて決定した．

マンドリル画像を 0.05 m から 10 m まで動かしながら，それぞれのレンズ配置における，被覆率と原画像–再構成画像間の peak signal-to-noise ratio (PSNR) の推移を観測した．PSNR は二つの信号の一致度を示す指標であり，次式により計算される [64]．

$$20\log_{10}\left(\frac{MAX}{\sqrt{MSE}}\right). \tag{3.4}$$

ここで MAX は信号の最大値，MSE は平均二乗誤差を示す．二つの信号が同一の場合，PSNR は無限大となる．

シミュレーション結果を Fig. 3.12 に示す．Fig. 3.12(a) より，規則レンズ配置では距離に依存して被覆率が激しく変化していることがわかる．不規則レンズ配置では．5 種類のレンズ配置を試行し，その最大値と最小値を示している．距離に依存せずにほぼ一定の被覆率を保っている．また，最適化レンズ配置では不規則レンズ配置よりも高い被覆率が得られている．Fig. 3.12(b) より，最適化レンズ配置，不規則レンズ配置，規則レンズ配置の順で高い PSNR が得られている．

対象距離が 10 m の場合の再構成画像を Fig. 3.13 に示す．マンドリルの左目部分を拡大して表示している．Fig. 3.12(b) と同様に，最適化レンズ配置，不規則レンズ配置，規則レンズ配置の順で高解像度な再構成画像が得られている．

3.7 アライメント精度に関する考察

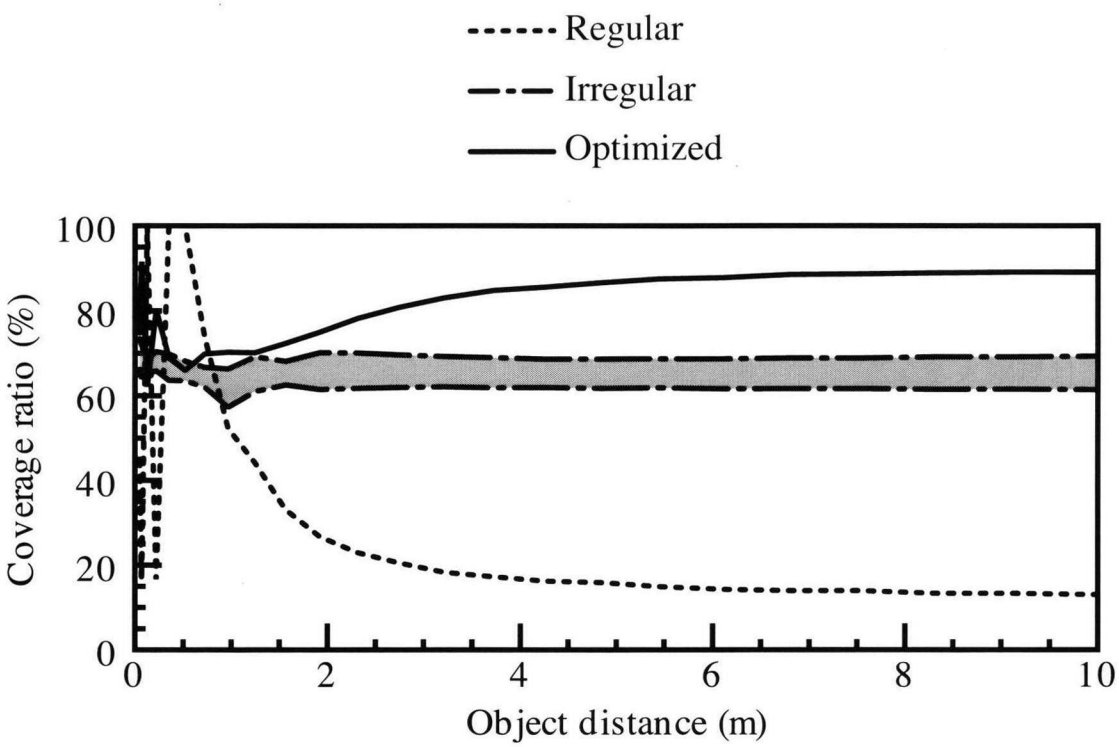
3.3 節で不規則レンズ配置，3.5 節で最適化レンズ配置を示した．実際のシステムを設計する際，どの程度の精度でレンズを配置するのか，あるいは，レンズ位置を推定するのかが重要になる．そこで，本節では，レンズのアライメント精度，および，位置推定精度について考察する．

Fig. 3.14 にレンズシフトによる結像位置ずれについて示す．ここではデフォーカスの影響を無視して議論を進める．Fig. 3.14(a) に示すように，x 方向のレンズシフトを δ_{lx} とすると，結像位置のシフト δ_x は次式で表される．

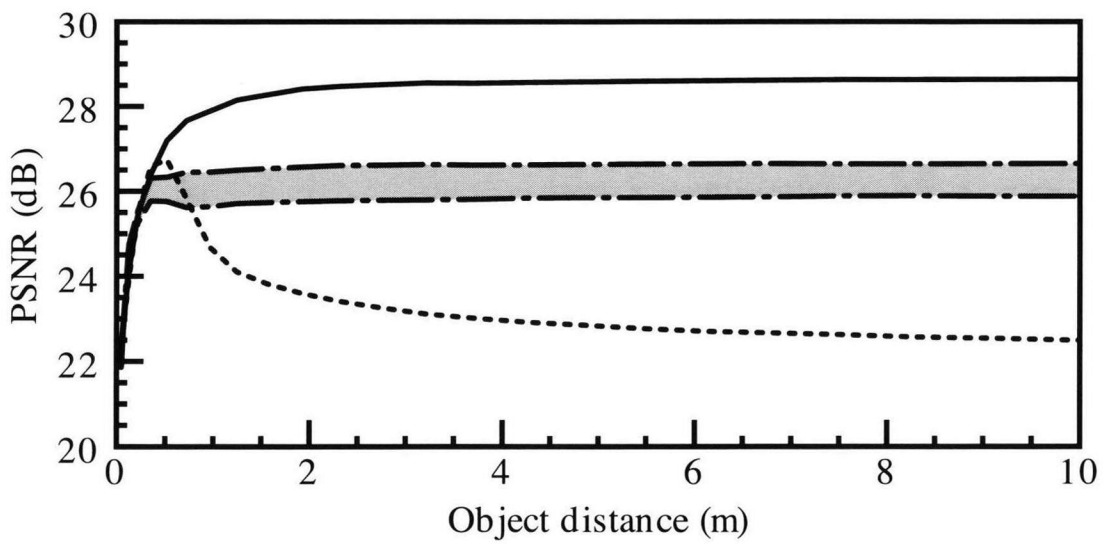
$$\delta_x = \frac{(z+\rho)\delta_{lx}}{z}. \tag{3.5}$$

ここで，z は対象距離，ρ はレンズ焦点距離である．$z \gg \rho$ の場合，式 (3.5) は次式のように書き換えられる．

$$\delta_x = \delta_{lx}. \tag{3.6}$$



(a)



(b)

Fig. 3.12　Simulation results for comparison between regular, irregular, and optimized lens arrangements. (a) Coverage ratio and (b) PSNR.

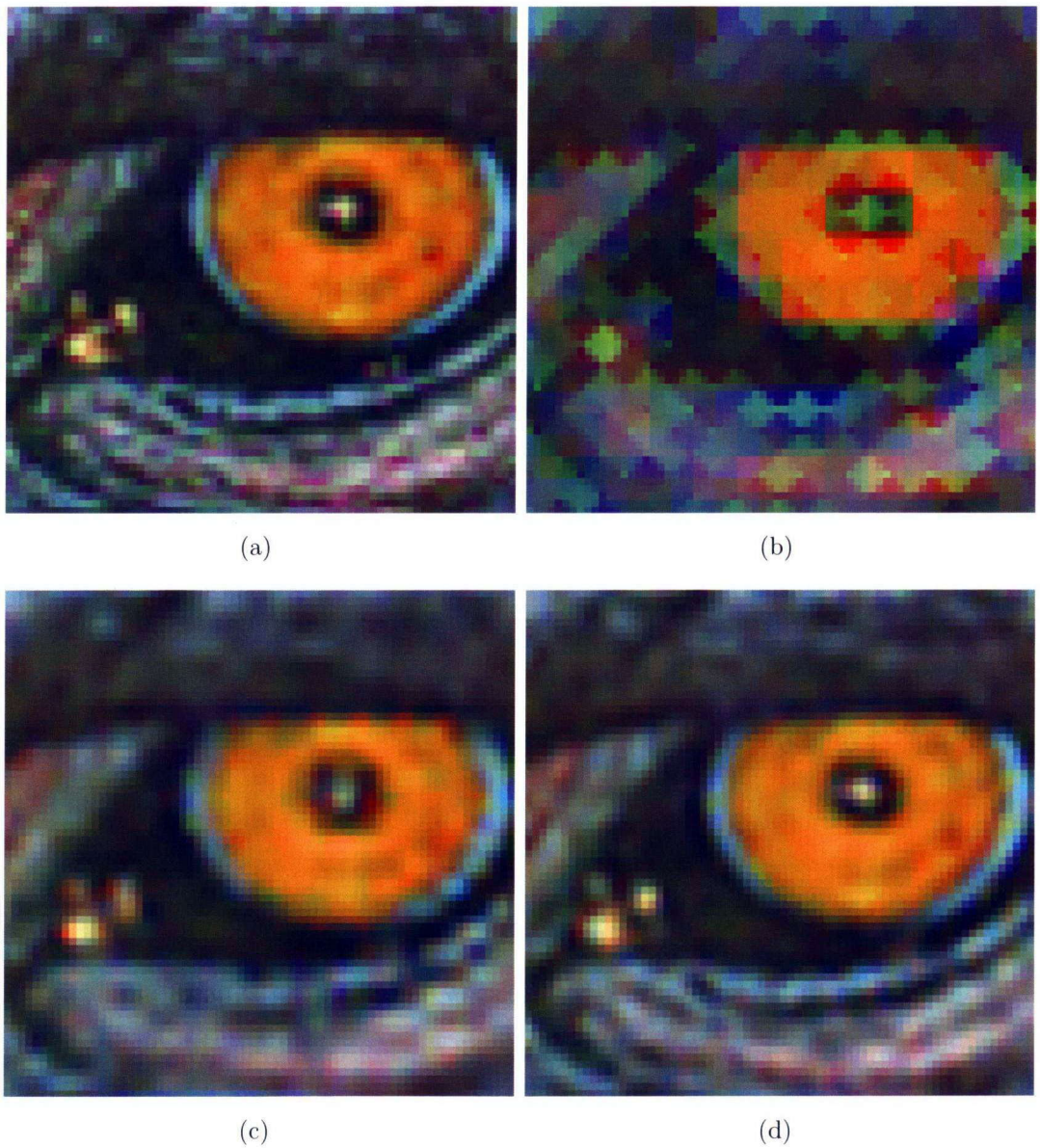


Fig. 3.13 Reconstructed images obtained with different lens arrangements. (a) A magnified original image. Magnified reconstruction images with (b) the regular, (c) an irregular, and (d) the optimized lens arrangements.

一方，Fig. 3.14(b) に示すように，z 方向のレンズシフトを δ_{lz}，光線の入射角を θ とすると，結像位置のシフト δ_x は次式で表される．

$$\delta_x = \frac{(z+\rho)\delta_{lz}\tan\theta}{z-\delta_{lz}}. \tag{3.7}$$

$z \gg \rho$ かつ $z \gg \delta_{lz}$ の場合，式 (3.7) は次式のように書き換えられる．

$$\delta_x = \delta_{lz}\tan\theta. \tag{3.8}$$

すなわち，z 方向のレンズシフトの影響は，x 方向のレンズシフトの影響と異なり，光線の入射角，あるいは像高に依存する．

2.6 節で示したように，複眼視における距離計測の精度は，視差計測の解像度に依存する．求められる視差計測の解像度 δ_x と式 (3.6) と式 (3.8) から，許容されるレンズシフト δ_{lx} と δ_{lz} を見積もることができる．また，求められるレンズ位置の推定精度に関しても同様な議論が行える．

一般的な画素サイズは μm オーダーである．1 画素以下の解像度の視差計測を求める場合，サブミクロン精度の実機構築あるいはレンズ位置の推定が必要となる．ウェハー技術を用いて光学系とイメージセンサをパッケージ化することで，サブミクロン精度の実機を構築できる可能性がある [65]．

3.8　測距精度に関する考察

前節までは，レンズ配置について，再構成画像の高解像度化における効果に着目して議論してきた．本節では，距離計測におけるレンズ配置の影響や効果について考察する．

複眼視における距離計測は，画像間の視差に基づいている．すなわち，測距精度は二つの画像の位置合わせ精度に依存する．位置合わせの評価関数としては，二つの画像の自乗差分や絶対差分が一般に用いられる [49]．Fig. 3.15 に一次元信号の位置ずれの様子を示す．I は画素値，δ は信号のずれ，$\mathcal{E}$ は原信号 $\mathcal{F}(x)$ と位置がずれた信号 $\mathcal{F}(x-\delta)$ の差分を示す．$\mathcal{F}(x-\delta)$ のテーラー展開は次式のように表される．

$$\mathcal{F}(x-\delta) = \mathcal{F}(x) - \mathcal{F}'(x)\delta + \frac{1}{2}\mathcal{F}''(x)\delta^2 - \cdots. \tag{3.9}$$

ここで，アポストロフィー記号 ($'$) は微分を示す．δ が十分小さいとし，式 (3.9) の二次以上の項を無視すると，Fig. 3.15 における原信号と位置ずれのある信号の差分 $\mathcal{E}$ は次式

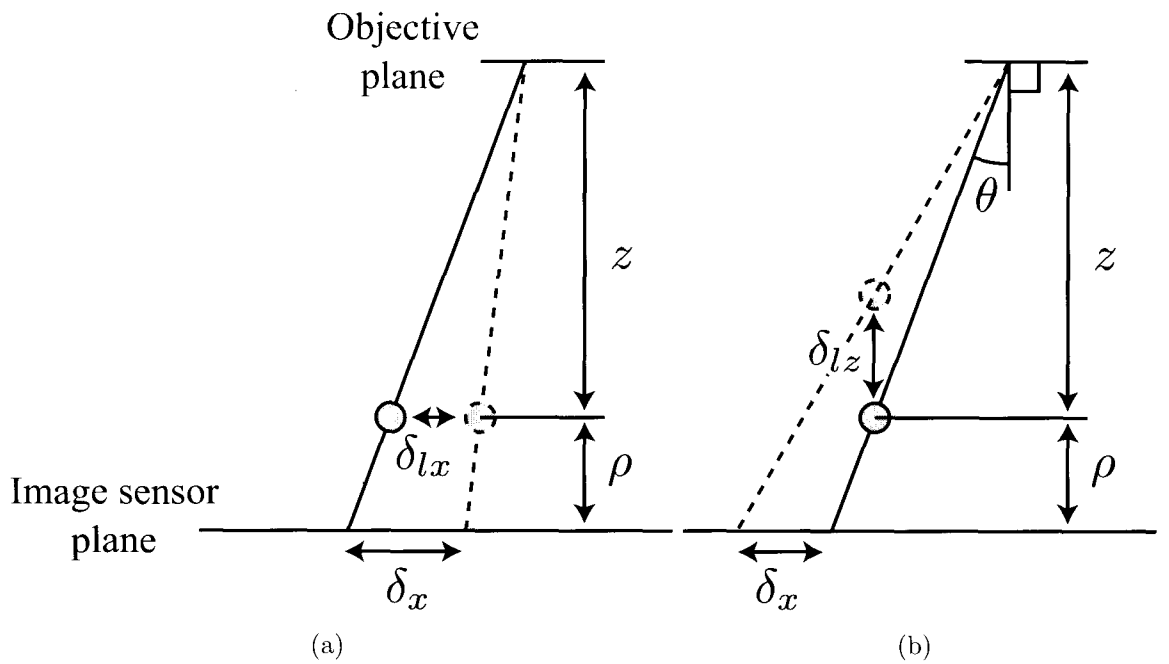


Fig. 3.14 Image shift by alignment errors in (a) x and (b) z directions. Circles and dashed lines show positions of lenslets and shifted arrangements, respectively.

で表される.

$$\mathcal{E} = \mathcal{F}(x-\delta) - \mathcal{F}(x) = -\mathcal{F}'(x)\delta. \tag{3.10}$$

2.4節に示したように, 信号の自乗差分を用いた場合, 位置ずれ評価関数は次式で表される.

$$\mathcal{E}^2 = (-\mathcal{F}'(x)\delta)^2. \tag{3.11}$$

評価関数の勾配が急峻なほど, 位置ずれを高精度に評価できる. 評価関数のδに関する勾配は,

$$\frac{\partial \mathcal{E}^2}{\partial \delta} = 2(\mathcal{F}'(x))^2\delta, \tag{3.12}$$

となる. すなわち, 画像のx, y方向に関する一次微分が大きいほど, 高精度な位置ずれ評価, もしくは視差計測が行える. 一般的に, 画像の高周波成分が大きいほど, 一次微分が大きい. Fig. 3.13に示したように, レンズ配置に不規則性を導入することで, 再構成処理により画像の高周波成分を回復することができる. したがって不規則性を持つレンズ配置は, 規則レンズ配置より高解像度に視差計測が可能であり, その結果, 距離計測の精度が向上する.

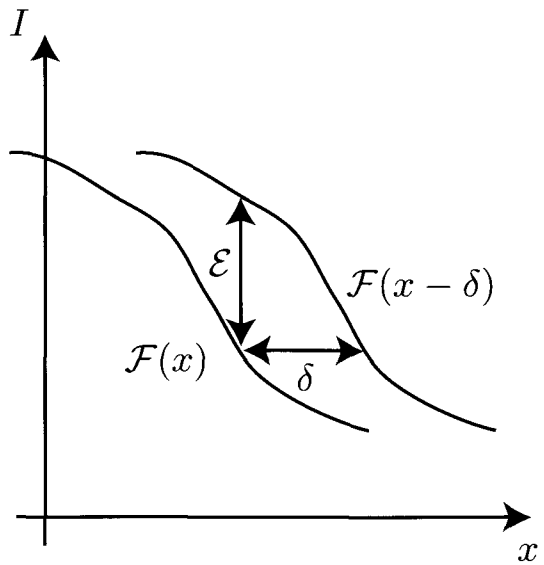


Fig. 3.15　Difference of signal-intensity $\mathcal{E}$ between an original signal $\mathcal{F}(x)$ and a shifted signal $\mathcal{F}(x-\delta)$.

Fig. 3.16 に規則レンズ配置と不規則レンズ配置における測距のシミュレーション結果を示す．距離は，2.4 節で述べた距離計測アルゴリズムを用いて算出した．Fig. 3.16(a) と Fig. 3.16(b) は設定した計測対象のテクスチャと距離分布である．マンドリル画像を TOMBO から 0.70 m，マンドリル以外の画像を 1.10 m に配置して，計測対象とした．規則レンズ配置により得られた距離画像を Fig. 3.16(c)，不規則レンズ配置により得られた距離画像を Fig. 3.16(d) に示す．式 (2.8) によって評価した測距誤差は，規則レンズ配置における距離画像（Fig. 3.16(c)）では 0.15 m と 0.24 m，不規則レンズ配置における距離画像（Fig. 3.16(d)）では 0.02 m と 0.03 m であった．この結果から，レンズ配置への不規則性の導入により，測距精度が向上することを確認できた．

3.9　結言

本章では，複眼カメラ TOMBO のサンプリング特性を考慮したレンズ配置について検討し，不規則性を導入したレンズ配置法に関する研究についてまとめた．

3.2 節では，TOMBO のサンプリング特性とその問題点について述べた．TOMBO では単眼カメラと異なり，対象物体の距離に依存してサンプリング点の局在化が起きる．この

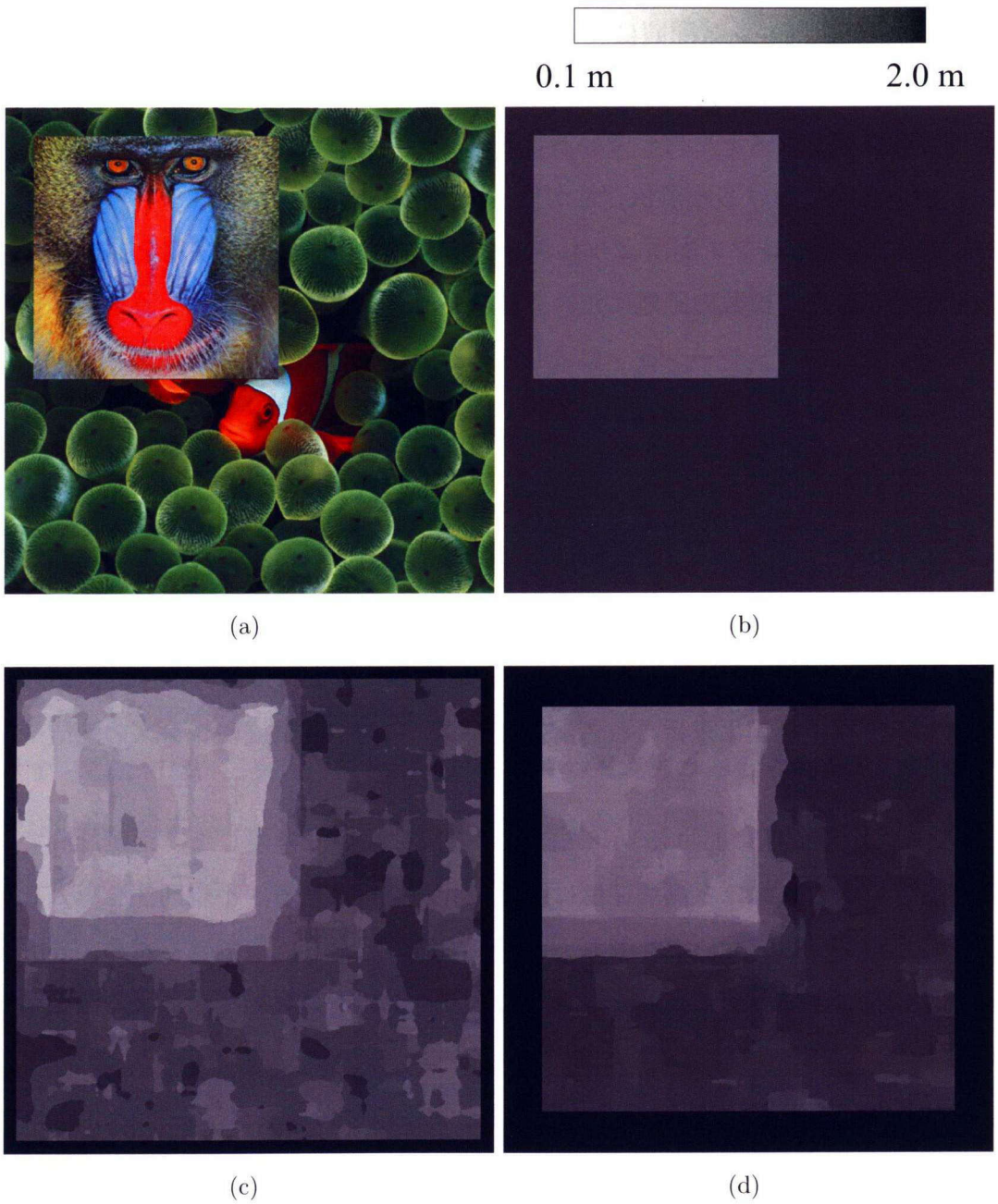


Fig. 3.16 Range estimation in multiple lens arrangements. (a) The texture and (b) the depth map of the input image. Estimated depth maps with (c) regular and (d) irregular lens arrangements.

場合，再構成処理による高解像度化の効果は期待できない．

3.3節では，3.2節で述べた問題を解決するために，レンズ配置に不規則性を導入した．シミュレーションにより，サンプリング点の局在化の解消に有効であることを確認した．

3.4節では，不規則レンズ配置における再構成画像の距離依存性を確認した．異なる距離に配置したストライプパターンを撮影し，再構成処理を行った結果，各距離での再構成画像が同等のコントラストを持っていることを確認した．これにより，不規則レンズ配置では，再構成画像における距離依存性が低いことを実証できた．

3.5節では，不規則レンズ配置よりもさらにサンプリング点の局在化を抑えるレンズ配置の設計法を示した．複数の距離における被覆率を最大化するレンズ配置を最適化手法を用いて決定した．シミュレーションにより，不規則レンズ配置よりもサンプリング点の局在化抑制の効果が大きいことを確認した．

3.6節では，再構成処理における規則レンズ配置，不規則レンズ配置，最適化レンズ配置の性能をシミュレーションにより比較した．その結果，最適化レンズ配置，不規則レンズ配置，規則レンズ配置の順で被覆率の距離依存性が低く，高解像度な再構成画像が得られることを明らかにした．

3.7節では，レンズを配置する際に求められる精度，レンズ位置の推定に求められる精度を考察した．視差計測に求められる解像度が高いほど，高精度にレンズの配置や位置推定を行う必要がある．

3.8節では，距離計測におけるレンズ配置の効果について考察した．距離計測では，高周波成分を多く含む画像ほど高解像度に視差の計測を行なえる．不規則性を導入したレンズ配置では，規則レンズ配置と比較し，より高周波の成分を回復できるため，高解像度な視差計測が期待できる．シミュレーションにより，不規則レンズ配置による測距精度の向上を確認した．

第 4 章

多次元情報取得への拡張

4.1 緒言

コンプレッシブサンプリング とよばれる不良設定な線形逆問題を解く手法が近年注目されている[66, 67]．本章では，コンプレッシブサンプリングを応用した，TOMBO における多次元情報取得ためのフレームワークについて述べる．

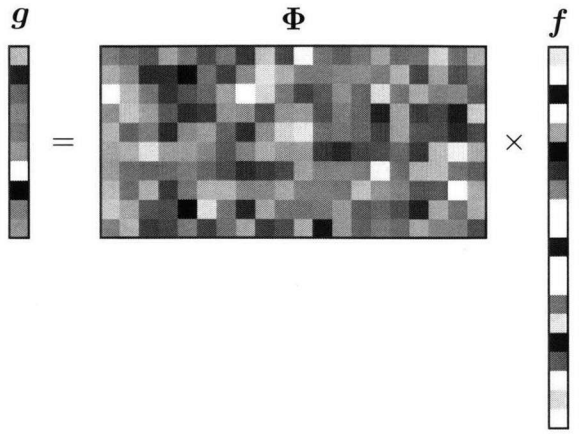
まず，コンプレッシブサンプリングの概要について述べる．次に，1 章と 2 章で示した TOMBO 撮像モデルを，多次元の対象物体を撮像するための，より一般的なモデルに拡張する．この撮像モデルの逆問題は不良設定であるが，コンプレッシブサンプリングを用いることで，目的の多次元情報を得ることができる．次に，撮像モデルのいくつかの実装例を示す．ここでは，三次元の対象物体についての実装例のみを考えるが，複数の光学的信号操作の組み合わせにより，より高次元の情報取得が可能になる．原理を確認するために行ったシミュレーションの結果を示す．最後に，本フレームワークにおける x，y 軸以外の次元軸方向に関する再構成精度について考察する．

4.2 コンプレッシブサンプリング

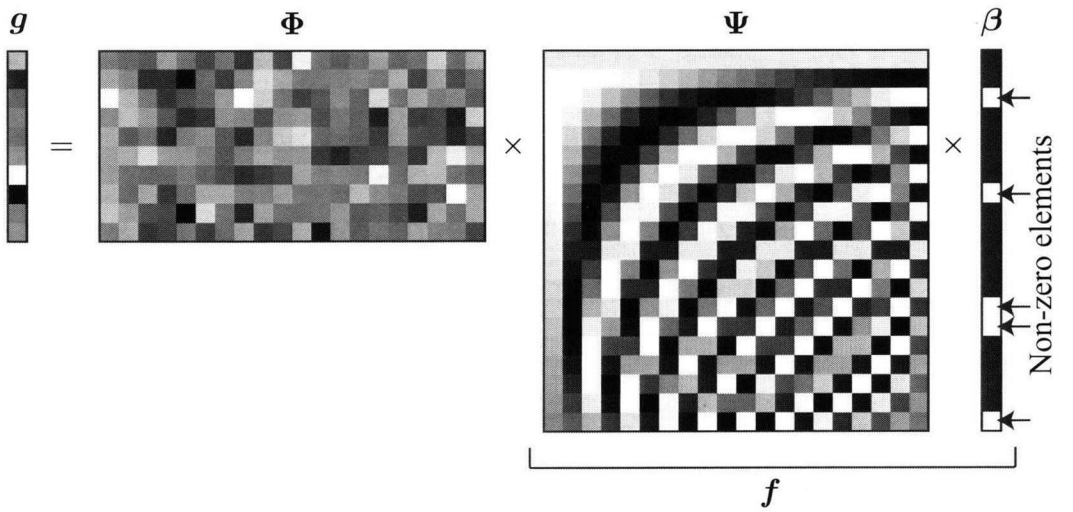
対象物体に関する三次元情報を取得する場合，2.3 節に示したように，TOMBO システムの逆問題は不良設定である．コンプレッシブサンプリング (CS) は，不良設定な線形逆問題を解くフレームワークである[66, 67]．CS を用いて，TOMBO システムの逆問題を解くことにより原情報を回復する．

Fig. 4.1 に CS のコンセプトを示す．Fig. 4.1 では，ベクトルと行列の要素を輝度値で模式的に示している．線形システムを用いたセンシングを示す式 (1.1) は Fig. 4.1(a) に対応している．CS では，式 (1.1) を次のように書き換える．

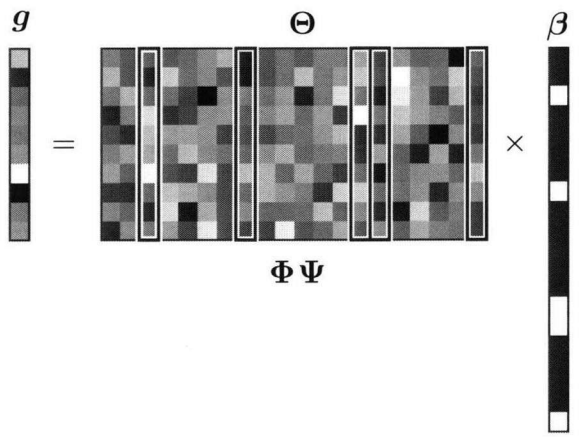
$$\boldsymbol{g} = \boldsymbol{\Phi f} = \boldsymbol{\Phi\Psi\beta} = \boldsymbol{\Theta\beta}. \tag{4.1}$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.1　Concept of compressive sampling. Measurement processes in (a) an ill-posed linear system and compressive sampling with (b) $\mathbf{\Phi\Psi}$ and (c) $\mathbf{\Theta}$.

ここで，$\boldsymbol{\Psi} \in \mathbb{R}^{N_f \times N_f'}$ はある空間への変換行列，$\boldsymbol{\beta} \in \mathbb{R}^{N_f' \times 1}$ はある空間へ変換された対象データを示す．$\boldsymbol{\Psi}$ として，離散コサイン変換（DCT）行列，離散ウェーブレット変換（DWT）行列等のユニタリ行列がよく用いられる．Fig. 4.1(b) の $\boldsymbol{\beta}$ に示されるように，自然画像は，これらの変換された空間上で，原信号要素数 N_f より少数の非零要素群により，疎に表されることが知られている [50, 67, 68]．言い換えると，一般に自然画像は圧縮可能である．その結果，Fig. 4.1(c) に示すように，$\boldsymbol{\Theta}$ 中の枠で示された特定の列群以外の影響は無視できる．すなわち，Fig. 4.1(a) では不良設定な逆問題が，行列 $\boldsymbol{\Psi}$ を用いて対象信号 $\boldsymbol{f}$ を変換することで，良設定な逆問題に置き換わる [68]．

CS において，$\boldsymbol{\Theta}$ があらゆる $\boldsymbol{\beta}$ について，Restricted isometric property (RIP) とよばれる十分条件を満足すれば，高精度に対象データが再構成されることが知られている．RIP は以下のように表される．

$$(1 - c_s)||\boldsymbol{\beta}_\Lambda||_2^2 \leq ||\boldsymbol{\Theta}_\Lambda \boldsymbol{\beta}_\Lambda||_2^2 \leq (1 + c_s)||\boldsymbol{\beta}_\Lambda||_2^2. \tag{4.2}$$

ここで，$c_s \in (0, 1)$ は定数，Λ は $\boldsymbol{\beta}$ 中の非零要素のインデックス集合を示す．$\boldsymbol{\beta}_\Lambda$ は非零要素群，$\boldsymbol{\Theta}_\Lambda$ は非零要素に対応する列群を示す．式 (4.2) は，c_s が小さい場合，$\boldsymbol{\Theta}_\Lambda$ が $\boldsymbol{\beta}_\Lambda$ のユークリッド距離を保存していると考えられることを意味している．$\mathcal{M}(\boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{\Psi}) \in [1, \sqrt{N_f'}]$ はコヒーレンスとよばれ，

$$\mathcal{M}(\boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{\Psi}) = \sqrt{N_f'} \max_{1 \leq i \leq N_g, 1 \leq j \leq N_f'} |\langle \boldsymbol{\Phi}(i, :), \boldsymbol{\Psi}(:, j) \rangle|, \tag{4.3}$$

で定義される．ここで，$\boldsymbol{\Phi}(i, :)$ は $\boldsymbol{\Phi}$ の i 番目の行，$\boldsymbol{\Psi}(:, j)$ は $\boldsymbol{\Psi}$ の j 番目の列，$\langle , \rangle$ は内積を示す．コヒーレンスが小さい時，$\boldsymbol{\Phi}$ と $\boldsymbol{\Psi}$ はインコヒーレントと表現される．高精度な再構成に必要な観測データの要素数は

$$N_g' \geq c\mu(\boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{\Psi})^2 s \log N_f', \tag{4.4}$$

となる [66]．ここで，c は定数，s は $\boldsymbol{\beta}$ の非零要素数を示す．対象データは次の問題を解くことで再構成される．

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\beta}} &= \underset{\boldsymbol{\beta}}{\operatorname{argmin}} ||\boldsymbol{\beta}||_1, \\ &\text{subject to } \boldsymbol{g} = \boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\beta}. \end{aligned} \tag{4.5}$$

ここで $||\cdot||_1$ は ℓ_1 ノルムを示す．

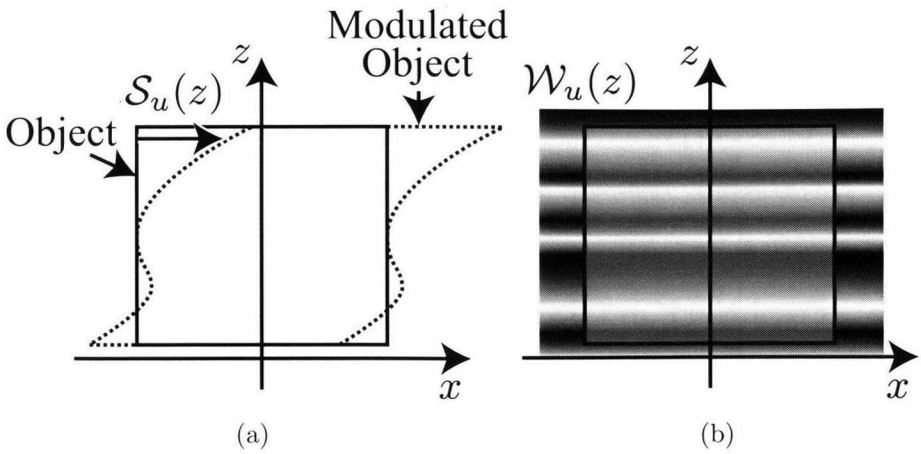


Fig. 4.2　Coding schemes in TOMBO. (a) Modulated integration and (b) weighted integration in a unit.

4.3　多次元情報取得モデル

TOMBO を用いた三次元情報取得モデルを 2.3 節で示した．本節では，撮像モデルを多次元情報取得へ拡張する．個眼ごとにイメージセンサの露光時刻をずらし，スナップショットで対象物体の時間情報を取得する TOMBO システムが報告されている [69]．そこで用いられた光学的信号操作も考慮して，多次元情報取得のための撮像モデルを導出する．

ここで，対象を $\mathcal{F}(x, y, z_0, \cdots, z_{N_n-1})$ と表す．1.6 節や 2.3 節と同様に，y 軸は省略して考える．また，簡単化のため $N_n = 2$ の撮像モデルを示すが，それ以上の次元への拡張は容易に行える．

本システムでは，対象物体の情報に光学的な操作を適用し，その後，イメージセンサ上で積分する．光学的に物体の情報を操作する方法は二通り考えられる．それらを Fig. 4.2 に示す．Fig. 4.2(a) は，2.3 節で示した距離計測に用いた考え方を一般化した光学的信号操作を示す．対象信号を光学素子により変形し，その後，イメージセンサ上で積分する．この変形は，対象信号の各 z における情報を x 軸に沿ってシフトすることに対応する．このシフトは，例えば 2.3 節で述べた視差 (式 (2.2)) から得ることができる．Fig. 4.2(b) は，文献 [69] の時間情報取得を一般化した光学操作を示す．対象信号を z ごとに設定された光学素子による重みと乗算した上で，イメージセンサ上で積分する．この重みは z の関数であり，文献 [69] では露光パターンに対応する．この二種類の光学的信号操作をそれぞれ，Modulated integration (MI) と Weighted integration (WI) とよぶ．

光学的信号操作を加えた後，ユニット u におけるイメージセンサで積分されるデータ

$\mathcal{G}_u$ は，式 (2.1) から以下のように書き換えられる．

$$\mathcal{G}_u(v) = \int\int \mathcal{F}(v - \mathcal{S}_{0,u}(z_0) - \mathcal{S}_{1,u}(z_1) - \mathcal{L}_u, z_0, z_1)\, \mathcal{W}_{0,u}(z_0)\mathcal{W}_{1,u}(z_1) dz_0 dz_1, \quad (u = 0, \cdots, N_u - 1). \tag{4.6}$$

ここで，$\mathcal{S}_{n,u}(z_n)$，$\mathcal{W}_{n,u}(z_n)$ はユニット u における z_n 軸での MI のシフトと WI の重み分布を示す．

さらに，式 (4.6) の離散モデルを求める．離散化された対象物体の信号は $\tilde{\mathcal{F}}_{l,m_0,m_1} = \mathcal{F}(l\triangle_x, m_0\triangle_{z_0}, m_1\triangle_{z_1})$ となる．m_n と $\triangle_{z_n}$ は z_n 軸上のインデックスと画素ピッチをそれぞれ示す．離散モデルは，

$$\tilde{\mathcal{G}}_{j,u} = \sum_i \mathrm{rect}\left(\frac{i\triangle_x - j\triangle_v}{\triangle_v}\right) \sum_{m_0}\sum_{m_1} \tilde{\mathcal{F}}_{i-\bar{\mathcal{S}}_{m_0,m_1,u},m_0,m_1} \bar{\mathcal{W}}_{m_0,m_1,u}, \tag{4.7}$$

となる．ここで，$\bar{\mathcal{S}}_{m_0,m_1,u} = \mathrm{round}[(\mathcal{S}_{0,u}(m_0\triangle_{z_0}) + \mathcal{S}_{1,u}(m_1\triangle_{z_1}) + \mathcal{L}_u - \mathcal{D}_u)/\triangle_x]$，$\bar{\mathcal{W}}_{m_0,m_1,u} = \mathcal{W}_{0,u}(m_0\triangle_{z_0})\mathcal{W}_{1,u}(m_1\triangle_{z_1})\triangle_{z_0}\triangle_{z_1}$ である．

式 (4.7) のシステム行列を示す．式 (4.7) に示すように，対象信号に対しては，z_n 軸ごとに光学的な操作を行い，z_n 軸方向に積分し，イメージセンサによりダウンサンプリングする．ここで，$z_n = m_n\triangle_{z_n}$ となる平面を m_n 平面とよぶ．対象信号のサイズ N_f は，各 z_n 軸の m_n 平面の数を N_{z_n} とすると，$N_x N_{z_0} N_{z_1}$ となる．また，1.6 節での仮定に従って，$N_g = N_v N_u = N_x$ とする．

m_n 平面に対する光学的信号操作行列 $\boldsymbol{C}'_{m,u} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_x}$ は，

$$\boldsymbol{C}'_{m_0,m_1,u}(p,q) = \begin{cases} \bar{\mathcal{W}}_{m_0,m_1,u} & (p = q + \bar{\mathcal{S}}_{m_0,m_1,u}), \\ 0 & (p \neq q + \bar{\mathcal{S}}_{m_0,m_1,u}), \end{cases} \tag{4.8}$$

と表される．全対象信号に対する光学的信号操作行列 $\boldsymbol{C}_u \in \mathbb{R}^{N_f \times N_f}$ は，

$$\boldsymbol{C}_u = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}'_{0,0,u} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{C}'_{1,0,u} & \cdots & \boldsymbol{O} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{C}'_{N_{z_0}-1,N_{z_1}-1,u} \end{bmatrix}, \tag{4.9}$$

となる．ここで，$\boldsymbol{O}$ は $N_x \times N_x$ の零行列を示す．

式 (2.6) に示すイメージセンサ上への積分を行う行列 $\boldsymbol{Q} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_f}$ と式 (1.12) に示すダウンサンプリング行列 $\boldsymbol{T} \in \mathbb{R}^{N_v \times N_x}$ を用いて，システム行列 $\boldsymbol{\Phi} \in \mathbb{R}^{N_g \times N_f}$ は，

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{TQC}_0 \\ \boldsymbol{TQC}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{TQC}_{N_u-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{TC}'_{0,0,0} & \boldsymbol{TC}'_{1,0,0} & \cdots & \boldsymbol{TC}'_{N_{z_0}-1,N_{z_1}-1,0} \\ \boldsymbol{TC}'_{0,0,1} & \boldsymbol{TC}'_{1,0,1} & \cdots & \boldsymbol{TC}'_{N_{z_0}-1,N_{z_1}-1,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{TC}'_{0,0,N_u-1} & \boldsymbol{TC}'_{1,0,N_u-1} & \cdots & \boldsymbol{TC}'_{N_{z_0}-1,N_{z_1}-1,N_u-1} \end{bmatrix}, \tag{4.10}$$

となる．

システム行列 $\boldsymbol{\Phi}$ による操作は Fig. 4.3 のように表される．対象信号 $\boldsymbol{f}$ の m_n 平面に対してユニットごとに各 z_n 軸に沿った，MI によるシフト，WI による重みの乗算を行列 $\boldsymbol{C}_u$ として適用する．次に，行列 $\boldsymbol{Q}$ によりイメージセンサ上で積分する．最後に，行列 $\boldsymbol{T}$ でダウンサンプリングし，各ユニットにおける観測データを得る．

4.4　実装例

4.3 節で示したモデルは様々な情報を取得する計測システムへの応用が可能である．ここでは，三次元情報取得に関する実装例を示す．$N_n = 1$ の場合，式 (4.6) の下付文字 n は省略する．式 (4.6) は

$$\mathcal{G}_u(v) = \int \mathcal{F}\left(v - \mathcal{S}_u(z) - \mathcal{L}_u, z\right) \mathcal{W}_u(z) dz, \tag{4.11}$$

となる．この光学的信号操作により，Table 4.1 に示すように，距離，時間，分光，偏光，高ダイナミックレンジ，広角画像などの情報の取得が可能となる．さらに，複数の手法を組み合わせることで，N_n が 2 以上の情報取得も可能となる．

Table 4.1　Physical coding examples of modulated and weighted integrations.

	MI	WI
Range	Parallax	
Time	Lens displacement	Shuttering pattern or exposure time
Spectrum	Dispersive element	Color filter
Polarization	Birefringent polarizer	Polarization plate
Large dynamic range		Neutral density filter
Wide field-of-view	Half mirror (shift)	Half mirror (transparency)

4.4.1　距離

MI に基づく距離情報の取得には，視差を用いればよい．この方式については，2.3 節で説明したものと同等である．

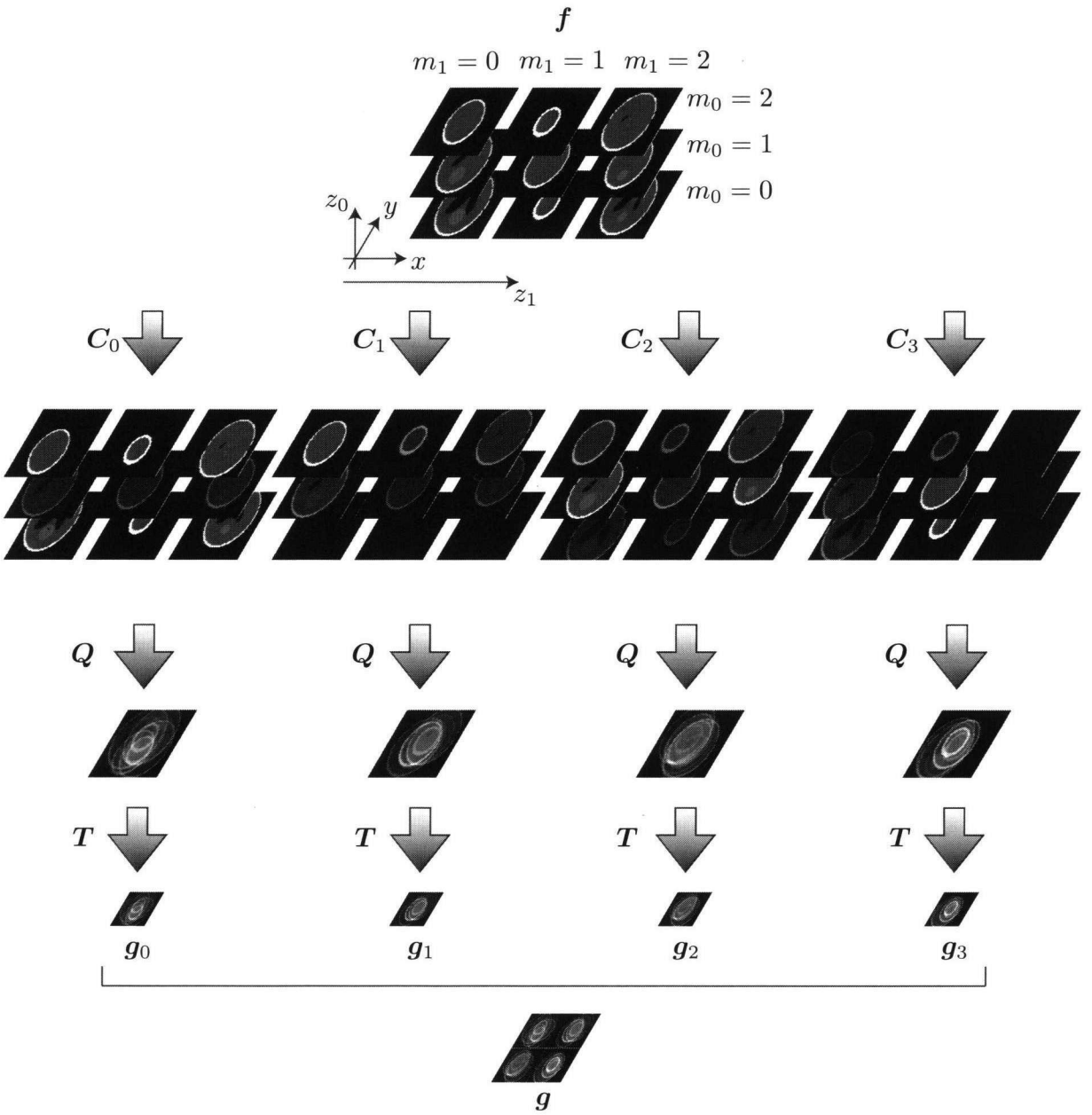


Fig. 4.3 A flowchart of multi-dimensional data acquisition in TOMBO.

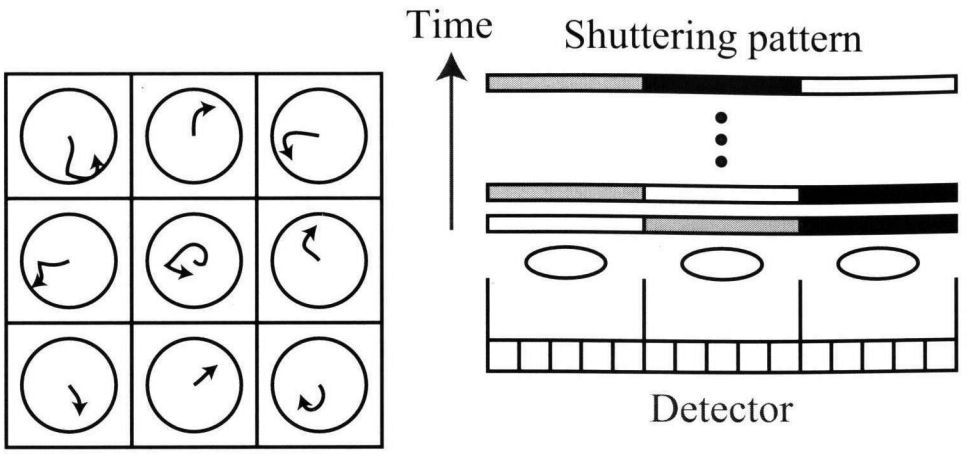


Fig. 4.4　TOMBO for time imaging. (a) Top view of TOMBO with MI and (b) cross section view of TOMBO with WI. Circles and ellipse indicate lenslets. Arrows show displacements of lenslets.

WI に基づくシステムの実装は，特定の距離にある物体について重みを乗算する光学素子が必要になる．結像系の被写界深度を極端に浅くすることで，WI に基づく距離情報取得を擬似的に実装できる可能性がある．

4.4.2　時間

時間情報取得の実装例を Fig. 4.4 に示す．MI に基づく時間情報の取得には，レンズ移動を用いる．Fig. 4.4(a) に示すように，各レンズに異なる挙動を与え，各 m 平面の像に時刻に応じたシフトを与える．式 (4.11) の z は時間に対応し，レンズの移動量は $\mathcal{S}_u(z)$ に対応している．

WI に基づくシステムは，文献 [69] 以外の手法では，シャッターの透過率の変化により実装できる．Fig. 4.4(b) に示すように，シャッターの透過率をユニットごとに変化させる．この透過率が，式 (4.11) の $\mathcal{W}_u(z)$ に対応する．

4.4.3　分光

分光情報取得の実装例を Fig. 4.5 に示す．MI に基づく分光情報の取得には，波長分散光学素子を用いる．Fig. 4.5(a) に示すように，それぞれのユニットの光学素子は異なる分散方向や分散量を持っており，各 m 平面の像に波長に応じたシフトを与える．式 (4.11) の

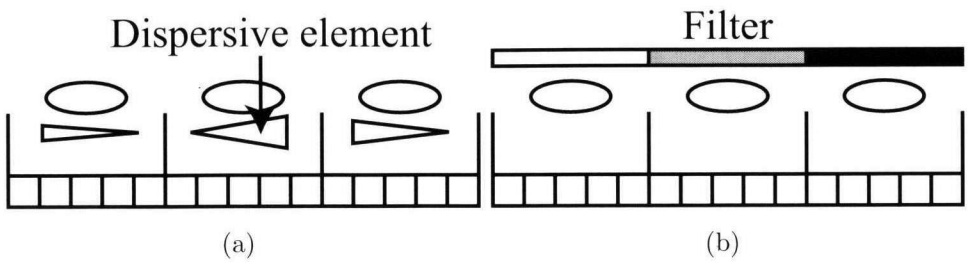


Fig. 4.5 Cross section views of TOMBO for spectral imaging with (a) MI and (b) WI.

z は波長に対応し，シフトは $\mathcal{S}_u(z)$ に対応している．

WI に基づくシステムは，マルチバンドパスフィルタにより実装可能である．Fig. 4.5(b) に示すように，各フィルタをレンズの上もしくは下に置く．各フィルタは異なる通過波長帯域と遮断波長帯域をもっており，それぞれ $\mathcal{W}_u(z) = 1$ と $\mathcal{W}_u(z) = 0$ と表される．またマルチバンドパスフィルタの代用として，複数のノッチフィルタの積層や，複数のシングルバンドパスフィルタのパッチ化が考えられる．

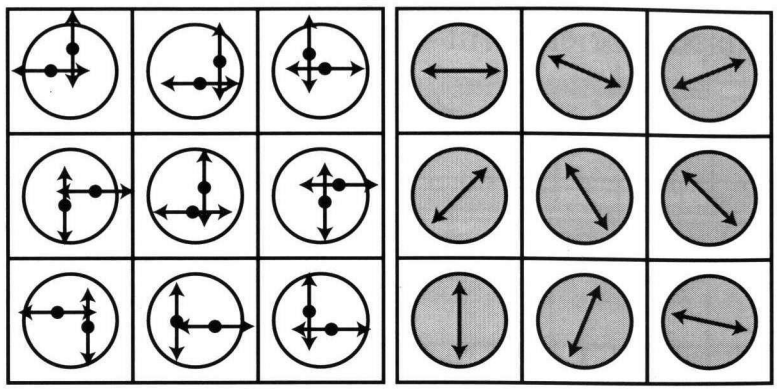
4.4.4 偏光

偏光情報取得の実装例を Fig. 4.6 に示す．ここでは対象物体からの光が直線偏光となっている場合に限定して議論を行う．偏光情報の取得には，MI では複屈折光学素子 [30] を用いる．この光学素子はある光線を 2 つの直線偏光の光線へ分離する．Fig. 4.6(a) に示すように，それぞれのユニットは偏光角ごとに異なるシフトを発生させる．式 (4.11) の z は物体からの光の偏光角に対応し，シフトは $\mathcal{S}_u(z)$ に対応している．

WI に基づくシステムは，偏光板により実装できる．Fig. 4.6(b) に示すように，各ユニットのレンズ上もしくは下に異なる偏光角をもつ偏光板が配置されている．重み分布は $\mathcal{W}_u(z) = \cos^2(\mathcal{P}_u - z)$ となる [30]．ここで，$\mathcal{P}_u$ はユニット u の偏光板の偏光角を示す．様々な偏光角をもつ偏光板をパッチ化することで，より自由に重み分布を設計できる．

4.4.5 高ダイナミックレンジ

高ダイナミックレンジ情報取得の実装例を Fig. 4.7 に示す．WI に基づく高ダイナミックレンジ情報の取得には，減光フィルターを用いる．ユニットごとに異なる透過率をもつ減光フィルターが設置されている．これにより，各ユニットで異なるダイナミックレンジ



(a)　(b)

Fig. 4.6　Top views of TOMBO for polarization imaging with (a) MI and (b) WI. Arrows, dots, and shaded areas indicate directions of polarization, centers of shifted images, and polarization plates, respectively.

で対象を撮影できる．式 (4.11) の z は光強度に対応している．各ユニットで撮影可能な光強度レンジは $\mathcal{W}_u(z) = 1$，撮影不可能なレンジは $\mathcal{W}_u(z) = 0$ と表せる．

MI に基づくシステムの実装は，特定の光強度レンジを空間的にシフトさせる光学素子が必要になる．

4.4.6　広角視野

広角情報取得の実装例を Fig. 4.8 に示す．この場合は，ハーフミラーあるいはビームスプリッターを用いる．式 (4.11) の z は視野角に対応している．ハーフミラーの位置に起因する各視野像のシフトは $\mathcal{S}_u(z)$，ハーフミラーの反射や透過に起因する各視野像の透過率は $\mathcal{W}_u(z)$ で表される．

4.5　原理確認シミュレーション

TOMBO を用いた多次元情報取得の原理を確認するためにシミュレーションを行った．ここでは対象とする情報の次元に特定の物理量を指定しないが，4.4 節で示したように，さまざまな物理量を各次元に適用できる．

Two-step iterative shrinkage/thresholding algorithm (TwIST)[70] とよばれるアルゴリズムを再構成処理に用いた．TwIST は式 (4.5) に示す凸問題を解く最適化アルゴリズムである．反復処理中では，二回前の反復結果を考慮して収束を早める．

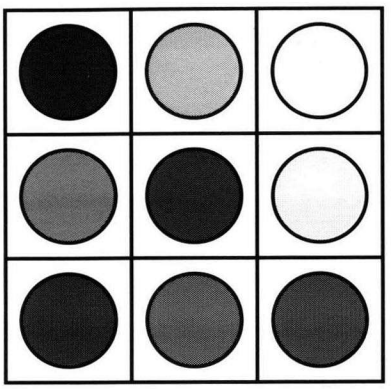


Fig. 4.7 Top view of TOMBO for high-dynamic-range imaging with WI. Shaded areas show neutral density filters.

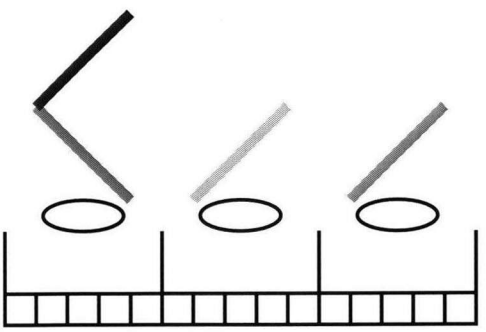


Fig. 4.8 Cross section view of TOMBO for wide angle imaging. Heavy lines show half mirrors, where the gray-scale level indicates transmission rate.

簡略化のためにMIのシフトを$\mathcal{S}_u(z) = (\mathcal{A}_u z + \mathcal{B}_u)\triangle_x$とする．この場合，対象がシアー変形を受ける．$\mathcal{A}_u$と$\mathcal{B}_u$はシアー変形の勾配とオフセットを示す．また，$\mathcal{A}_u = (-2u/(N_u - 1) + 1)\mathcal{A}_0$，$\mathcal{B}_u = -\mathcal{A}_u N_z \triangle_z/2$とする．例えば，$\mathcal{A}_0 = 1.0$，$N_u = 3$のとき$\mathcal{A}_0 = 1.0$，$\mathcal{A}_1 = 0.0$，$\mathcal{A}_2 = -1.0$となる．$z = N_z\triangle_z/2$，すなわち，中央の$m$平面では，$\mathcal{S}_u(z) = 0.0$となる．

WIにおける重み分布はバイナリーパターンとする．m平面では，h個のユニットで$\mathcal{W}_u(m\triangle_z) = 1$とする．$h$個のユニットはランダムに選ばれる．またそれ以外の${N_u}^2 - h$個のユニットは$\mathcal{W}_u(m\triangle_z) = 0$となる．分離可能な$m$平面の最大数は${}_{{N_u}^2}C_h$となる．

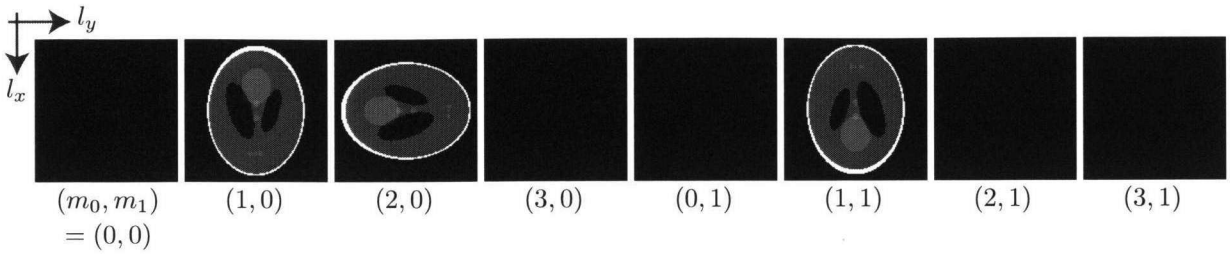
式(4.6)中のレンズ位置$\mathcal{L}_u$はユニットごとにランダムに設定した．乱数の範囲は$[-\triangle_v/2, \triangle_v/2]$，ここで$\triangle_v$はイメージセンサの画素ピッチである．式(4.7)の中心画素の中心位置$\mathcal{D}_u$は0とした．

Fig. 4.9に四次元情報取得のシミュレーション結果を示す．式(4.1)中の変換行列$\mathbf{\Psi}$として，二次元のTotal variation (TV)[71]をそれぞれのm_n平面へ用いた．この場合，TVは$\sum_{l_x}\sum_{l_y}\sum_{m_0}\sum_{m_1}|\nabla[\tilde{\mathcal{F}}_{l_x,l_y,m_0,m_1}]_{l_x,l_y}|$として表される．ここで，$l_x$と$l_y$は離散化された対象の$x$軸と$y$軸のインデックスを示す．また，$\nabla[\cdot]_{l_x,l_y}$は$x$軸と$y$軸方向の二次元勾配ベクトル，$|\cdot|$はその勾配ベクトルの強度を示す．対象物体は複数のShepp-Loganファントムから構成される．このファントムは二次元TV中で疎に表されることが知られている．

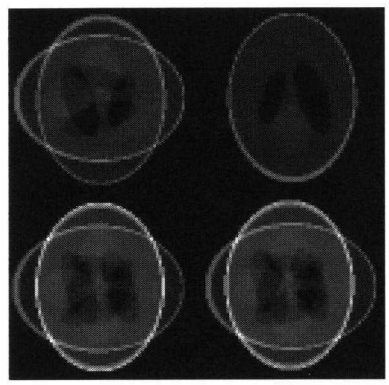
Fig. 4.9(a)の対象物体のサイズは$128\times128\times4\times2$，Fig. 4.9(b)の観測データのサイズは$128\times128$である．対象物体と観測データのサイズ比は$N_f/N_g = 8$である．TV中での対象物体の非零要素数$s$は3242であった．Fig. 4.9では，対象と再構成結果を$128\times128\times8$として表示した．MI ($\mathcal{A}_0 = 1.0$) をz_0軸，WI ($h = 3$) をz_1軸に使用した．ユニット数は2×2であり，測定データにはsignal-to-noise ratio (SNR)= 30 dBのガウス雑音を加えた．TwISTとRichardson-Lucy (RL) 法[45, 46]による再構成結果をFig. 4.9(c)とFig. 4.9(d)に示す．PSNRはそれぞれ32.1 dBと19.4 dBであった．

Fig. 4.10に離散ウェーブレット変換 (DWT) を用いた五次元情報取得のシミュレーション結果を示す．二次元のDWTをそれぞれのm_n平面に適用した．対象物体は複数の自然画像から構成されている．ただし，それぞれの画像は，DWT空間中で強度の小さい成分を切り捨てて構成されている．

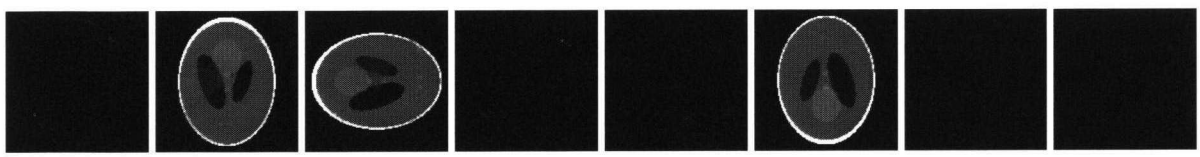
Fig. 4.10(a)の対象とFig. 4.10(b)の測定データのサイズはそれぞれ$128\times128\times2\times2\times2$，$128\times128$である．対象物体と測定データのサイズ比は8である．DWT中での対象物体の非零要素数sは2000である．MI ($\mathcal{A}_0 = 3.0$) がz_0軸，WI ($h = 12$) がz_1軸，WI ($h = 12$)



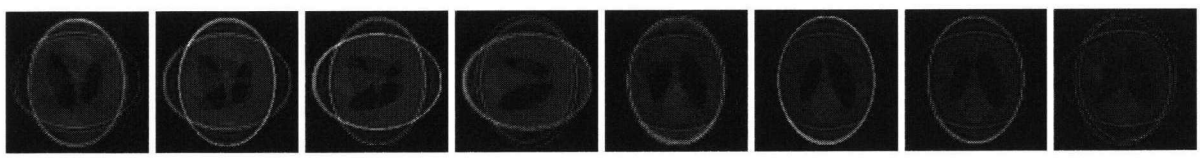
(a)



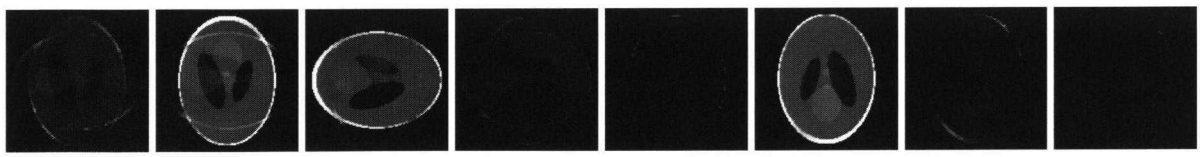
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 4.9 Simulation results with total variation. (a) A four-dimensional object ($\in \mathbb{R}^{128\times128\times4\times2}$), where indices of axial planes are shown under each axial plane, (b) a measurement data, (c) a reconstruction with TwIST, (d) a reconstruction with RL method, and (e) a reconstruction with TwIST using a small $|\mathcal{A}_0|$.

が z_2 軸にそれぞれ用いられている．ユニット数は 4×4，測定データには PSNR=30 dB のガウス雑音を加えた．TwIST と RL 法による再構成結果を Fig. 4.10(c) と Fig. 4.10(d) にそれぞれ示す．PSNR は 24.5 dB と 15.4dB であった．Fig. 4.9 と Fig. 4.10 の結果から，コンプレッシブサンプリングに基づく再構成アルゴリズムの有効性を確認した．

4.6　z_n 軸方向の再構成精度に関する考察

CS において，再構成結果の精度は，式 (4.1) 中の $\boldsymbol{\Theta}$ のある二つの行の相関により推定できる [72]．ここで，$\boldsymbol{\Theta}$ はシステム行列 $\boldsymbol{\Phi}$ と変換行列 $\boldsymbol{\Psi}$ の積である．$\boldsymbol{\Theta}$ 中の二つの行の相関が高ければ，変換された対象信号 $\boldsymbol{\beta}$ 中で，その二つの行に対応する要素を分離することは困難になる．すなわち，再構成精度は $\boldsymbol{\Phi}$ だけでなく $\boldsymbol{\Psi}$ にも依存する．

4.5 節のシミュレーションのように，二次元の変換行列をそれぞれの m 平面に用いる時，z_n 軸方向へ再構成精度は，システム行列 $\boldsymbol{\Phi}$ のみから大まかに推定できる可能性がある．$\boldsymbol{\phi}_{m_0,m_1} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_x}$ を，

$$\boldsymbol{\phi}_{m_0,m_1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{TC}'_{m_0,m_1,0} \\ \boldsymbol{TC}'_{m_0,m_1,1} \\ \vdots \\ \boldsymbol{TC}'_{m_0,m_1,N_u-1} \end{bmatrix}, \tag{4.12}$$

と定義する．このとき，式 (4.1)，式 (4.10)，式 (4.12)，および，二次元の変換行列をそれぞれの m 平面に用いると，システム行列，変換行列，$\boldsymbol{\Theta}$ は以下のように書き換えられる．

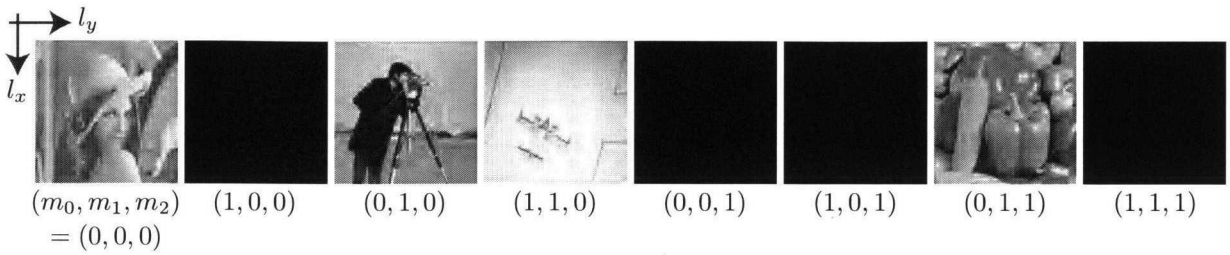
$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}_{0,0} & \boldsymbol{\phi}_{1,0} & \cdots & \boldsymbol{\phi}_{N_{z_0}-1,N_{z_1}-1} \end{bmatrix}, \tag{4.13}$$

$$\boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{\psi} & \cdots & \boldsymbol{O} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix}, \tag{4.14}$$

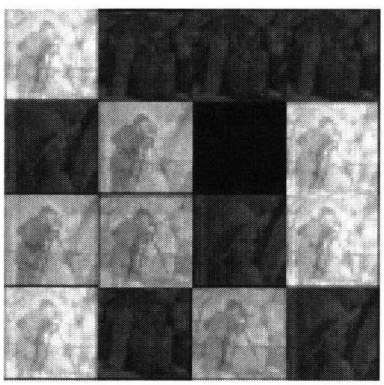
$$\boldsymbol{\Theta} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}_{0,0}\boldsymbol{\psi} & \boldsymbol{\phi}_{1,0}\boldsymbol{\psi} & \cdots & \boldsymbol{\phi}_{N_{z_0}-1,N_{z_1}-1}\boldsymbol{\psi} \end{bmatrix}. \tag{4.15}$$

ここで，$\boldsymbol{\psi} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_x}$ は二次元変換行列，$\boldsymbol{O} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_x}$ は $N_x \times N_x$ の零行列を示す．もし，$\boldsymbol{\phi}_{m_0,m_1}$ のある行と，その他の m_n 平面のある行の相関が高ければ，$\boldsymbol{\phi}_{m_0,m_1}\boldsymbol{\psi}$ のある行と，その他の m_n 平面のある行の相関が高いことが予想される．この場合，二つの m 平面を分離することは難しい．$|\mathcal{A}_0|$ が小さい，または h が大きい場合，$\boldsymbol{\phi}_{m_0,m_1}$ のある行と，その他の m_n 平面のある行の相関は高くなる．

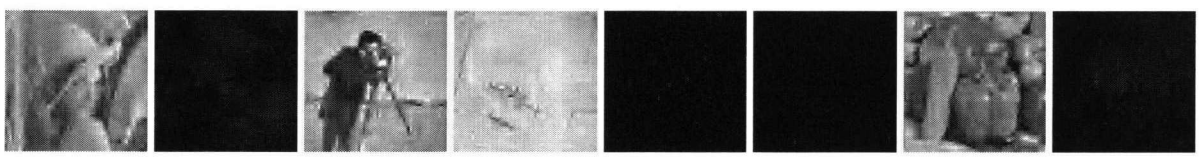
例えば，Fig. 4.9(e) では $\mathcal{A}_0 = 0.2$ の MI を z_0 軸について用いている．z_n 軸に沿っての再構成精度は，$\mathcal{A}_0 = 0.2$ の場合の方が $\mathcal{A}_0 = 1.0$ の場合よりも低い．Fig. 4.10(e) に，$h = 15$



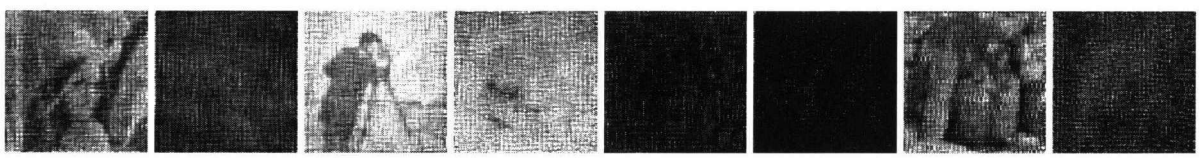
(a)



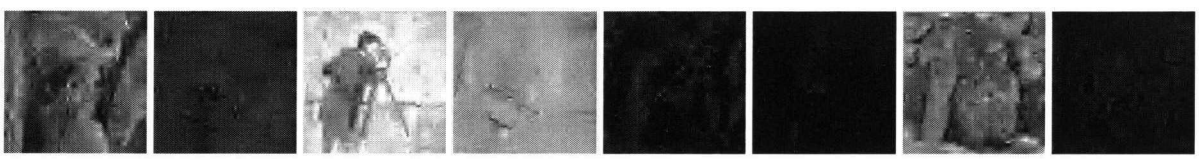
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 4.10 Simulation results with discrete wavelet transform. (a) A five-dimensional object ($\in \mathbb{R}^{128\times128\times2\times2\times2}$), (b) a measurement data, (c) a reconstruction with TwIST, (d) a reconstruction with RL method, and (e) a reconstruction with TwIST using a large h.

の WI を z_1 軸と z_2 軸にそれぞれ用いた場合の結果を示す．z_n 軸に沿っての再構成精度は，$h = 15$ の場合の方が $h = 12$ の場合よりも低い．

z_n 軸に沿っての再構成精度を向上するためには，$|\mathcal{A}_0|$ が大きい MI，h が小さい WI を用いれば良いが，分離可能な m_n 平面の最大数が減少する可能性がある．また，三次元以上の変換行列を用いることも考えられる．ただし，対象情報がその変換された空間上で疎でなければならない．

4.7　結言

本章では，TOMBO を用いた多次元情報取得について述べた．対象信号が三次元以上の場合，TOMBO の撮像システムの逆問題は不良設定となる．そこで，不良設定な線形システムの逆問題を解くフレームワークであるコンプレッシブサンプリングアルゴリズムを再構成処理に適用した．

4.2 節では，コンプレッシブサンプリングの概要について述べた．コンプレッシブサンプリングは対象物体の情報がある空間上で粗に表現されることを前提に，不良設定な逆問題を解くためのフレームワークである．

4.3 節では，対象の多次元情報を取得する場合の TOMBO 撮像モデルを示した．個眼ごとに各次元軸に沿った変形や重み分布の乗算を，光学的操作を利用して対象の情報に与える．この節では対象を四次元と仮定したが，さらに高次の対象へも簡単に拡張できる．

4.4 節では，4.3 節で導出した計測方法を光学的に実装する方法について述べた．距離，時間，分光，偏光，高ダイナミックレンジ，広角視野を取得するための実装例を示した．複数の光学的信号操作を組み合わせることで，様々な情報取得が可能になる．

4.5 節では，多次元情報取得の原理確認をシミュレーションにより行った．四次元，五次元の対象に対し，TV，DWT をそれぞれ変換行列として適用したところ，良好に対象が再構成できることを確認した．この時，対象の要素数は測定データの要素数の 8 倍であった．

4.6 節では，z 軸方向の再構成精度について考察し，シミュレーションにより原理確認を行った．各 m_n 平面に二次元の変換行列が適用される場合は，z_n 軸方向の相対的な再構成精度を予想できる．光学的信号操作としてシアー変形を用いる場合，その歪みが小さいほど，z_n 軸方向の再構成精度は低下する．また，光学的信号操作としてバイナリーの重み分布を用いる場合，重みが 1 の m_n 平面が多いほど，z_n 軸方向の再構成精度は低下することがわかった．

総括

本論文では，複眼カメラ TOMBO を用いた多次元情報の一括取得技術に関する研究成果をまとめた．TOMBO では多様な光学系を個眼ごとに実装可能であり，その特徴を活かした多次元情報一括取得のフレームワークを構築し，その有効性を評価した．

以下，本研究において得られた成果を総括する．

1 章では，複眼カメラ TOMBO の概要について述べた．複眼光学系とそれを用いた光学システムを紹介した．複眼光学系を用いた薄型カメラ TOMBO について述べ，二次元物体に対する TOMBO 撮像モデルを提示した．また，線形システムとその逆問題の概念について述べ，TOMBO 撮像モデルを使ったシミュレーションを行い妥当性を確認した．

2 章では，TOMBO を用いた三次元物体計測について述べた．撮像系を用いた距離計測法をいくつか紹介し，本研究が対象とする距離計測法の位置づけを行った．まず，TOMBO の個眼像間の視差を用いた距離計測について述べ，三次元形状をもつ対象物体についての撮像モデルを示し，その再構成法について検討した．本システムの逆問題は不良設定である．そこで物体距離を仮定し，二次元の対象物体に対する逆問題を解くことで，対象物体の高解像度画像と距離画像を得る手法を提案した．TOMBO から複数の距離に配置された対象物体に対し，再構成処理による高解像度画像取得と測距を確認した．実験における測距精度は，約 1/40 画素の解像度の視差計測に対応することを確認した．

3 章では，高解像度画像取得を考慮したレンズ配置の設計法を考案し，その効果をシミュレーションにより評価した．規則的にレンズが配置された従来の TOMBO では，特定の距離群で再構成画像の解像度が低下する問題を示した．その解決策として，不規則性をもつレンズ配置を提案し，シミュレーションと実験により，再構成画像の解像度低下が抑えられていることを確認した．また，被覆率を目的関数，レンズ配置を変数として目的関数の最大化を行う，高解像度画像取得に最適化されたレンズ配置設計法を提案した．不規則性の導入および最適化レンズ設計法の効果による被覆率と再構成画像の解像度の向上をシミュレーションにより確認した．

4 章では，TOMBO を用いた多次元情報の一括取得の概念を定式化し，その原理をシ

ミュレーションにより確認した．多次元情報取得のための光学的信号操作スキームを提案した．提案する光学的信号操作では，個眼ごとに各次元軸に沿った変形や重み分布の乗算を対象信号に与える．TOMBOの撮像システムは，対象信号が三次元以上の場合には，その逆問題は不良設定となる．そこで，コンプレッシブサンプリングとよばれる不良設定な線形逆問題を解くフレームワークを適用した．距離，時間，波長，偏光等の光情報取得や高ダイナミックレンジ撮影，広角画像取得に対応する光学的信号操作の実装例を示し，それらが同一の撮像モデルで記述できることを述べた．提案する撮像モデルとコンプレッシブサンプリング用のアルゴリズムを用いてシミュレーションを行い，TOMBOにおける多次元情報一括取得の原理を確認した．

本研究は，複眼カメラTOMBOにおける多次元情報一括取得のためのフレームワークの構築とその原理確認に関するものである．今後，提案したフレームワークに基づく実機構築と実世界の課題に対する適用を行う必要がある．そのために，光学系の設計，高精度な実機構築，システム行列計算のためのパラメータ推定，再構成アルゴリズムの検討等，多くの問題があげられる．しかし，本研究成果は既存の様々な光学情報取得システムの限界を打破する可能性を提示しており，新しい光情報システムへの筋道を明らかにするものと考える．

謝辞

本研究は，大阪大学大学院情報科学研究科情報数理学専攻において，本学大学院情報科学研究科谷田純教授の御指導のもとに行ったものである．本研究の遂行および本論文作成において終始的確な御指導や御助言，そして，素晴らしい研究環境や機会をくださった谷田教授に深く感謝の意を表すと共に厚く御礼申し上げます．

I deeply appreciate Dr. David Brady, who is a professor in Duke University, USA. He gave me a grate opportunity to study at his laboratory and many inspirations. And, he also showed me a beauty in researches.

本学大学院情報科学研究科森田浩教授，八木厚志教授には，本論文作成にあたり貴重な御教示を頂きました．ここに深く感謝致します．

本学大学院情報科学研究科小倉裕介准教授には，本研究の遂行および本論文作成において，懇切丁寧な御指導を頂きました．深く御礼申し上げます．

本学大学院情報科学研究科香川景一郎特任准教授には，本研究の遂行において，厳しくも的確な御助言を頂きました．深く感謝致します．

I would like to thank Dr. Kerkil Choi, who is a postdoctoral associate in Prof. Brady's group. His advice, support, and encouragement advanced my research in the group.

船井電機株式会社の政木康生氏，豊田孝氏，中尾良純氏には，本研究を遂行するにあたり，常に親身な御助言，御協力を頂きました．深く御礼申し上げます．

本学卒業生の生源寺類博士（現 静岡大学助教），堅直也博士（現 東京大学特任助教），入江覚博士（現 トヨタテクニカルデベロップメント株式会社）は，在学中より研究においては有益な御議論や研究者としての姿勢の御教示，プライベートにおいては懇切丁寧な人生相談をしてくださりました．研究者としての道を示してくださったことに，心から感謝致します．

I thank Dr. Nathan Hagen, Dr. Daniel Marks, Dr. Joonku Hahn, Dr. Andrew Portnoy, Dr. Ashwin Wagadarikar, Dr. Christina Fernandez, Mr. Sehoon Lim, Mr. Alex Mrozack, and Mrs. Leah Goldsmith, who are the past and present members of Prof. Brady's

group. They helped me in my life at Duke University and showed me the largeness and the smallness of the world.

本学博士後期課程の酒井寛人君と西村隆宏君，事務補佐員の上山和子さんを含む谷田研究室のメンバーには，研究生活における協力，日々の気分転換や無駄話の相手をして頂きました．幸せな研究生活を送らせて頂いたことに，厚く御礼申し上げます．

I also thank to Mrs. Michiko and Miss Moira Hagen, who are the family of Dr. Hagen. Their smiles, Japanese, and dinners with them, especially Japanese foods, encouraged me during my stay in Duke University.

最後に，私を支え，人生の分岐点で背中を力強く押してくれた家族と友人に，心から感謝の意を表します．

参考文献

[1] A. Parker: "In the blink of an eye: how vision sparked the big bang of evolution," Basic Books, New York, NY, USA (2003).

[2] "Microscopes: Time Line," http://nobelprize.org/educational_games/physics/microscopes/timeline/index.html.

[3] E. Betzig and J. Trautman: "Near-field optics: Microscopy, spectroscopy, and surface modification beyond the diffraction limit," Science, **257**, 5067, pp. 189–195 (1992).

[4] S. W. Hell: "Far-field optical nanoscopy," Science, **316**, 5828, pp. 1153–1158 (2007).

[5] L. Schermelleh, P. Carlton, S. Haase, L. Shao, L. Winoto, P. Kner, B. Burke, M. Cardoso, D. Agard, M. Gustafsson, H. Leonhardt and J. Sedat: "Subdiffraction multicolor imaging of the nuclear periphery with 3D structured illumination microscopy," Science, **320**, 5881, pp. 1332–1336 (2008).

[6] "Moleculer Expressions: Science, Optics and You - Timeline - Hans Lippershey," http://micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/lippershey.html.

[7] "Galileo Galilei - Wikipedia, the free encyclopedia," http://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei.

[8] "Hubble Space Telescope - Wikipedia, the free encyclopedia," http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope.

[9] "The History of The Discovery of Cinematography," http://www.precinemahistory.net/.

[10] "Physics 2009," http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/.

[11] "Excerpts from A Conversation with Gordon Moore: Moore' s Law," ftp://download.intel.com/museum/Moores_Law/Video-Transcripts/Excepts_A_Conversation_with_Gordon_Moore.pdf.

[12] J. D. Owens, D. Luebke, N. Govindaraju, M. Harris, J. Krüger, A. E. Lefohn and

T. J. Purcell: "A survey of general-purpose computation on graphics hardware," Computer Graphics Forum, **26**, 1, pp. 80–113 (2007).

[13] M. Levoy: "Light fields and computational imaging," IEEE Computer, **39**, pp. 46–55 (2006).

[14] R. Raskar, J. Tumblin, A. Mohan, A. Agrawal and Y. Li: "Computational photography," EUROGRAPHICS 2006 (2006).

[15] D. J. Brady, A. Dogariu, M. A. Fiddy and A. Mahalanobis: "Computational optical sensing and imaging: introduction to the feature issue," Appl. Opt., **47**, 10, pp. COSI1–COSI2 (2008).

[16] A. Kak and M. Slaney: "Principles of Computerized Tomographic Imaging," IEEE Press, New York (1988).

[17] E. M. Fenimore and T. M. Cannon: "Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays," Appl. Opt., **17**, 3, pp. 337–347 (1978).

[18] E. R. Dowski, Jr. and W. T. Cathey: "Extended depth of field through wave-front coding," Appl. Opt., **34**, 11, pp. 1859–1866 (1995).

[19] A. Isaksen, L. McMillan and S. J. Gortler: "Dynamically reparameterized light fields," SIGGRAPH '00: Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, New York, NY, USA, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 297–306 (2000).

[20] E. J. Tremblay, R. A. Stack, R. L. Morrison and J. E. Ford: "Ultrathin cameras using annular folded optics," Appl. Opt., **46**, 4, pp. 463–471 (2007).

[21] R. Ng: "Fourier slice photography," SIGGRAPH '05: ACM SIGGRAPH 2005 Papers, New York, NY, USA, ACM, pp. 735–744 (2005).

[22] R. Shogenji, Y. Kitamura, K. Yamada, S. Miyatake and J. Tanida: "Bimodal fingerprint capturing system based on compound-eye imaging module," Appl. Opt., **43**, 6, pp. 1355–1359 (2004).

[23] R. Shogenji, Y. Kitamura, K. Yamada, S. Miyatake and J. Tanida: "Multispectral imaging using compact compound optics," Opt. Exp., **12**, 8, pp. 1643–1655 (2004).

[24] J. B. Pawley: "Handbook of biological confocal microscopy," Springer (1995).

[25] 三宅（編）："分光画像処理入門", 東京大学出版会 (2006).

[26] D. L. Donoho: "Compressed sensing," IEEE Transactions on Information Theory,

52, 4, pp. 1289–1306 (2006).

[27] 立田："昆虫の感覚", 東京大学出版会 (1975).

[28] 林："複眼の謎を解く", 生物物理, **44**, 5, pp. 233–235 (2004).

[29] 桑島："よくわかる最新レンズの基本と仕組み", 秀和システム (2005).

[30] E. Hecht: "Optics," Addison Wesley, 4 edition (2001).

[31] J. Duparré, P. Dannberg, P. Schreiber, A. Bräuer and A. Tünnermann: "Thin compound-eye camera," Appl. Opt., **44**, 15, pp. 2949–2956 (2005).

[32] R. Hornsey, P. Thomas, W. Wong, S. Pepic, K. Yip and R. Krishnasamy: "Electronic compound-eye image sensor: construction and calibration," Proc. SPIE, Vol. 5301 (2004).

[33] 中尾, 久後, 豊田, 政木："複眼光学系を用いた広角動き検出カメラの開発", 画像センシングシンポジウム講演論文集, 第 13 巻, pp. 1–06 (2007).

[34] M. Levoy and P. Hanrahan: "Light field rendering," Proc. ACM Siggraph, ACM Press, pp. 43–54 (1996).

[35] R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, M. Horowitz and P. Hanrahan: "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," Stanford University Computer Science Tech Report CSTR 2005-02 (2005).

[36] K. Takahashi and T. Naemura: "Layered light-field rendering with focus measurement," Signal Processing: Image Communication, **21**, 6, pp. 519–530 (2006).

[37] K. Hamanaka and H. Koshi: "An artificial compound eye using a microlens array and its application to scale-invariant processing," Opt. Review, **3**, 4, pp. 264–268 (1996).

[38] D. J. Brady and N. Hagen: "Multiscale lens design," Opt. Express, **17**, 13, pp. 10659–10674 (2009).

[39] G. M. Lippmann: "La photographie integrale," Comptes-Rendus Academie des Sciences, **146**, pp. 446–451 (1908).

[40] 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," Appl. Opt., **40**, 11, pp. 1806–1813 (2001).

[41] J. Tanida, R. Shogenji, Y. Kitamura, K. Yamada, M. Miyamoto and S. Miyatake: "Color imaging with an integrated compound imaging system," Opt. Exp., **11**, 18,

pp. 2109–2117 (2003).

[42] 河田, 南：“科学計測のための画像データ処理”, CQ 出版社 (1994).

[43] J. W. Goodman: “Introduction to Fourier Optics,” McGraw-Hill (1996).

[44] 田中, 奥富：“画素数の壁を打ち破る：複数画像からの超解像技術”, 映像情報メディア学会誌, **62**, 3, pp. 337–342 (2008).

[45] W. H. Richardson: “Bayesian-based iterative method of image restoration,” J. Opt. Soc. Am., **62**, 1, pp. 55–59 (1972).

[46] L. B. Lucy: “An iterative technique for the rectification of observed distributions,” Astron. J., **79**, pp. 745–754 (1974).

[47] Y. Kitamura, R. Shogenji, K. Yamada, S. Miyatake, M. Miyamoto, T. Morimoto, Y. Masaki, N. Kondou, D. Miyazaki, J. Tanida and Y. Ichioka: “Reconstruction of a high-resolution image on a compound-eye image-capturing system,” Appl. Opt., **43**, 8, pp. 1719–1727 (2004).

[48] K. Nitta, R. Shogenji, S. Miyatake and J. Tanida: “Image reconstruction for thin observation module by bound optics by using the iterative backprojection method,” Appl. Opt., **45**, 13, pp. 2893–2900 (2006).

[49] D. A. Forsyth and J. Ponce: “Computer vision: a modern approach,” Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA (2003).

[50] 高木, 下田（編）：“新編 画像解析ハンドブック”, 東京大学出版会 (2004).

[51] S. Kawahito, I. A. Halin, T. Ushinaga, T. Sawada, M. Homma and Y. Maeda: “A CMOS time-of-flight range image sensor with gates-on-field-oxide structure,” IEEE Sensors Journal, **7**, 12, pp. 1578–1586 (2007).

[52] H. Takasaki: “Moiré topography,” Appl. Opt., **9**, 6, pp. 1467–1472 (1970).

[53] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito and J. G. Fujimoto: “Optical coherence tomography,” Science, **254**, 5035, pp. 1178–1181 (1991).

[54] D. J. Brady, K. Choi, D. L. Marks, R. Horisaki and S. Lim: “Compressive holography,” Opt. Express, **17**, 15, pp. 13040–13049 (2009).

[55] A. Rajagopalan and S. Chaudhuri: “A variational approach to recovering depth from defocused images,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **19**, pp. 1158–1164 (1997).

[56] A. Greengard, Y. Y. Schechner and R. Piestun: "Depth from diffracted rotation," Opt. Lett., **31**, 2, pp. 181–183 (2006).

[57] B. D. Lucas and T. Kanade: "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '81), pp. 674–679 (1981).

[58] C. Tomasi: "Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method," International Journal of Computer Vision, **9**, pp. 137–154 (1992).

[59] T. Kanade, A. Yoshida, K. Oda, H. Kano and M. Tanaka: "A stereo machine for video-rate dense depth mapping and its new applications," Proceedings of the 15th Computer Vision and Pattern Recognition Conference (ICVPR '96), pp. 196–202 (1996).

[60] J.-C. Cheng and S.-J. Feng: "A real-time multiresolutional stereo matching algorithm," ICIP (3), pp. 373–376 (2005).

[61] K. Kagawa, H. Tanabe, C. Ogata, Y. Ogura, Y. Nakao, T. Toyoda, Y. Masaki, M. Ueda and J. Tanida: "An active intraoral shape measurement scheme using a compact compound-eye camera with integrated pattern projectors," Japanese Journal of Applied Physics, **48**, 9, p. 09LB04 (2009).

[62] M. Okutomi and T. Kanade: "A multiple-baseline stereo," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., **15**, 4, pp. 353–363 (1993).

[63] J. A. Nelder and R. Mead: "A simplex method for function minimization," Computer Journal, **7**, pp. 308–313 (1965).

[64] Q. Huynh-Thu and M. Ghanbari: "Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment," Electronics Letters, **44**, 13, pp. 800–801 (2008).

[65] "Wafer-Level Camera Technologies Shrink Camera Phone Handsets," `http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=30459`.

[66] Y. Tsaig and D. L. Donoho: "Compressed sensing," IEEE Transactions on Information Theory, **52**, pp. 1289–1306 (2006).

[67] E. J. Candes and M. B. Wakin: "An introduction to compressive sampling," Signal Processing Magazine, IEEE, **25**, 2, pp. 21–30 (2008).

[68] R. Baraniuk: "Compressive sensing," IEEE Signal Processing Magazine, **24**, 4, pp. 118–121 (2007).

[69] M. Shankar, N. P. Pitsianis and D. J. Brady: "Compressive video sensors using multichannel imagers," Appl. Opt., **49**, 10, pp. B9–B17 (2010).

[70] J. M. Bioucas-Dias and M. A. T. Figueiredo: "A new TwIST: Two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration," IEEE Transactions on Image Processing, **16**, 12, pp. 2992–3004 (2007).

[71] L. I. Rudin, S. Osher and E. Fatemi: "Nonlinear total variation based noise removal algorithms," Phys. D, **60**, 1-4, pp. 259–268 (1992).

[72] R. Gribonval and M. Nielsen: "Sparse representations in unions of bases," IEEE Transactions on Information Theory, **49**, 12, pp. 3320–3325 (2003).