The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	被写界深度・視野拡大のためのコンピュテーショナルイメージング
Author(s)	中村, 友哉
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/52027
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

被写界深度・視野拡大のための
コンピュテーショナルイメージング

提出先　　大阪大学大学院情報科学研究科
提出年月　2015年1月

中村 友哉

発表論文リスト

原著論文

[1] Tomoya Nakamura, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, “Computational superposition compound eye imaging for extended depth-of-field and field-of-view,” Optics Express, Vol. 20, No. 25, pp. 27482–27495 (2012).
(also the Virtual Journal for Biomedical Optics, Vol. 8, No. 1 (2013).)

[2] Tomoya Nakamura, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, “Computational superposition projector for extended depth of field and field of view,” Optics Letters, Vol. 38, No. 9, pp. 1560–1562 (2013).

[3] Tomoya Nakamura, David S. Kittle, Seo -H. Youn, Steven. D. Feller, Jun Tanida, and David J. Brady, “Autofocus for a multiscale gigapixel camera,” Applied Optics, Vol. 52, No. 33, pp. 8146–8153 (2013).

[4] Tomoya Nakamura, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, “Computational phase modulation in light field imaging,” Optics Express, Vol. 21, No. 24, pp. 29523–29543 (2013).

[5] Tomoya Nakamura, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, “Compact Wide-field-of-view Imager with a Designed Disordered Medium,” Optical Review (2015) in press.

国際会議

[1] Tomoya Nakamura, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, “Experimental verification of computational superposition imaging for compensating defocus and off-axis aberrated images,” Imaging and Applied Optics, CM2B.4 (2012).

[2] Tomoya Nakamura, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, “Extended Depth-of-Field and Field-of-View Imaging Using Superposition Compound-Eye Imaging Optics,” The Second Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics, C020 (2012).

[3] Tomoya Nakamura, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, “Extended depth-of-field and field-of-view projection using computational superposition imaging,” Imaging and Applied Optics, CW3C.4 (2013).

[4] Tomoya Nakamura, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, “Extended depth-of-field in superresolved image reconstruction on a compound-eye camera,” Classical Optics 2014, CTh2C.4 (2014).

国内発表

[1] 中村友哉, 香川景一郎, 杉村武昭, 下村英介, 野田英行, 谷田 純, “複眼カメラシステム TOMBO における画像再構成処理の並列プロセッサ MX による高速化の検討”, LSI とシステムのワークショップ 2010, pp. 221–223 (2010).

[2] 中村友哉, “複眼カメラを用いた 3 次元拡張現実”, 情報数理学シンポジウム (IPS2011), pp. 40–41 (2011).

[3] Tomoya Nakamura, “High-Speed Image Reconstruction for Compound-Eye Cameras on Massively Parallel Embedded Processor,” Osaka University Global GCOE Program Young Researchers’ 2nd International Workshop on Ambient Information Platform, Student’s Talk 4 (2011).

[4] 中村友哉, 香川景一郎, 谷田 純, “組み込み用並列プロセッサを用いた複眼カメラシステムにおける被写体距離推定処理の高速化”, 第 17 回画像センシングシンポジウム (SSII2011), IS4-04 (2011). [ハイライト発表採択]

[5] 中村友哉, 谷田 純, “複眼撮像システム TOMBO”, フォトニクス技術フォーラム H23 年度合同研究会公開シンポジウム, No. 4 (2011).

[6] 中村友哉, 堀崎遼一, 谷田 純, “デフォーカス・軸外収差除去のための重畳イメージングシステムの実装法の検討”, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 16p-B10-14 (2012).

[7] 中村友哉, 堀崎遼一, 谷田 純, “像重畳に基づく視野・被写界深度拡張技術”, 第 1 回計算オプティクス研究会, p. 4 (2012).

[8] 中村友哉, 堀崎遼一, 谷田 純, “重複像眼複眼光学系を用いた被写界深度・視野拡大イメージング”, 第 13 回情報フォトニクス研究グループ研究会, p. 55 (2012).

[9] 中村友哉, 堀崎遼一, 谷田 純, “重複像眼複眼光学系を用いた視野・被写界深度拡大イメージング”, Optics & Photonics Japan 2012, 24aD8 (2012). [第 8 回 Optics & Photonics Japan ベストプレゼンテーション賞]

[10] 中村友哉, 堀崎遼一, 谷田 純, “視野・被写界深度拡大イメージングのための重複像眼撮像システム”, 第 2 回計算オプティクス研究会, p. 5 (2013).

[11] 中村友哉, “重複像眼カメラによる高精細イメージング ”, 情報数理学シンポジウム (IPS2013), p. 40 (2013).

[12] 中村友哉, 堀崎遼一, 谷田 純, “プロジェクションにおける視野・被写界深度の拡大 ”, 第 7 回新画像システム・情報フォトニクス研究討論会, A-10 (2013).

[13] 中村友哉, “複眼光学系を用いたコンピュテーショナルイメージング ”, 第 1 回情報フォトニクスシンポジウム (2013).

[14] 中村友哉, 堀崎遼一, 谷田 純, “重畳とデコンボリューションに基づく任意三次元面への鮮明な投影 ”, 第 3 回計算オプティクス研究会, 2-2 (2013).

[15] 中村友哉, 堀崎遼一, 谷田 純, “コンピュテーショナルイメージングに基づく撮像系・投影系における視野・被写界深度の拡大”, 第 14 回情報フォトニクス研究グループ研究会 (2013). [招待講演]

[16] 中村友哉, “光学と情報処理の融合による視野・被写界深度拡大イメージング”, IT 連携フォーラム OACIS 第 25 回シンポジウム, IPS-1 (2013).

[17] 中村友哉, “Computational optics における光伝播解析”, 第 4 回計算オプティクス研究会, 1-1 (2013).

[18] 中村友哉, 堀崎遼一, 谷田 純, “ライトフィールドイメージングにおける位相変調の実現”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 18p-F10-15 (2014). [第 36 回応用物理学会講演奨励賞]

[19] 中村友哉, “光学系と信号処理の融合設計に基づくイメージングシステムの高機能化”, 第 4 回先端フォトニクスシンポジウム, 67 (2014).

[20] 中村友哉, 堀崎遼一, 谷田 純, “ライトフィールドイメージングに基づく位相変調の仮想化”, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-S11-8 (2014). [招待講演]

[21] Tomoya Nakamura, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, “Computational image projection with extended depth-of-field and field-of-view: concept and implementations,” JSAP-OSA Joint Symposia 2014, 20p-C4-2 (2014).

[22] 中村友哉, “視野・被写界深度拡大のためのコンピュテーショナルイメージング”, 第 11 回八大学工学系連合会博士フォーラム, (2014).

[23] Tomoya Nakamura, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, “Computational imaging for extended depth-of-field and field-of-view,” CIS-Japan Collaboration Symposium,

(2014).

[24] 中村友哉, “被写界深度・視野拡大のためのコンピュテーショナルイメージング”, サービス科学を拓く数理モデルとアルゴリズム, p. 66 (2014).

その他

解説論文

[1] 中村友哉, 香川景一郎, 谷田 純, “並列プロセッサによる複眼距離計測の高速化：組み込み向け並列プロセッサ MX の複眼カメラ TOMBO への適用”, 画像ラボ, 日本工業出版社, 2012 年 2 月号, pp. 1–7 (2012).

[2] Ryoichi Horisaki, Tomoya Nakamura, and Jun Tanida, “Compound-eye-based multi-dimensional imager,” SPIE Newsroom, Dec. 11 (2014).

共著論文

[1] Ryoichi Horisaki, Tomoya Nakamura, and Jun Tanida, “Superposition Imaging for Three-Dimensionally Space-Invariant Point Spread Functions,” Applied Physics Express, Vol. 4, No. 11, p. 112501 (2011).

[2] Takamasa Ando, Ryoichi Horisaki, Tomoya Nakamura, and Jun Tanida, “Single-shot acquisition of optical direct and global components using single coded pattern projection,” Japanese Journal of Applied Physics (2015) in press.

共著発表

[1] 堀崎遼一, 中村友哉, 谷田 純, “三次元空間不変点像分布関数のための重畳イメージング”, 第 72 回応用物理学会学術講演会, 31p-ZL-2 (2011).

[2] Jun Tanida, Tomoya Nakamura, and Ryoichi Horisaki, “Computational multiplex imaging,” The Second Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics, I004 (2012). [invited]

[3] Ryoichi Horisaki, Tomoya Nakamura, and Jun Tanida, “Computational TOMBO imaging and its applications,” International Symposium on Microoptical Imaging and Projection, (2012). [invited]

[4] Seo -H. Youn, Hui S. Son, Daniel L. Marks, Amanda Pendleton, Paul O. McLaughlin,

Tomoya Nakamura, David J. Brady, and Jungsang Kim, “Thru-focus optical analysis of microcameras in a gigapixel camera,” US-Korea Conference on Science, Technology, and Entrepreneurship, K-1029 (2013).

[5] Ryoichi Horisaki, Tomoya Nakamura, and Jun Tanida, “Computational multi-dimensional imaging based on compound-eye optics,” SPIE/COS Photonics Asia, 9279-27 (2014). [invited]

[6] Jun Tanida, Tomoya Nakamura, and Ryoichi Horisaki “Advanced Computational Imaging Based on Sophisticated Fusion of Optics and Computation,” The Fourth Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics, PL2 (2014). [invited]

目 次

緒論 **1**

第 1 章　コンピュテーショナルイメージング **5**

1.1　緒言 5

1.2　コンピュテーショナルイメージング 6

1.3　実装法 9

1.3.1　物体面変調 9

1.3.2　瞳面変調 12

1.3.3　像面変調 14

1.3.4　走査 14

1.3.5　撮像系全体の再構築 15

1.4　実現例 18

1.4.1　位相変調イメージング 18

1.4.2　ライトフィールドイメージング 22

1.4.3　コンプレッシブイメージング 24

1.5　本論文における研究項目 27

1.6　結言 28

第 2 章　重畳イメージングに基づく被写界深度・視野の拡大 **31**

2.1　緒言 31

2.2　CI に基づく被写界深度・視野の拡大 31

2.3　重畳イメージングに基づく被写界深度・視野の同時拡大 35

2.4　重複像眼複眼光学系を用いたシングルショット化 39

2.5　性能解析 40

2.6　光線追跡に基づく原理実証 43

2.7　結言 51

第 3 章　重畳イメージングの投影系への応用 **53**
3.1　緒言 53
3.2　撮像系と投影系の技術的関係 53
3.3　投影系における被写界深度・視野の拡大 54
3.4　重畳イメージングの投影系への適用 56
3.5　原理実証実験 57
3.6　結言 63

第 4 章　ライトフィールドイメージングに基づく位相変調の仮想化 **65**
4.1　緒言 65
4.2　ライトフィールドイメージング 65
4.3　位相変調の仮想化 67
4.4　システムの設計条件 69
4.4.1　LF のサンプリング条件 70
4.4.2　光線追跡に基づく検証 74
4.5　原理実証実験 82
4.5.1　撮像系における位相変調イメージング 83
4.5.2　投影系における位相変調イメージング 88
4.6　結言 91

第 5 章　散乱体設計に基づくレンズレス広視野イメージング **93**
5.1　緒言 93
5.2　散乱体を用いたコンピュテーショナルイメージング 93
5.3　散乱体の設計に基づく広視野イメージング 95
5.3.1　原理 95
5.3.2　設計 99
5.4　原理実証シミュレーション 101
5.5　結言 107

総括 **109**

謝辞 **113**

緒論

人間は実世界の情報の大部分を光により知覚することが知られている．実世界の光情報を忠実に取得し，保存し，別の空間及び時間上に再現することは，古くから人類の重要な目標の一つであった．結像光学の発展は科学や産業の発展にも歴史的に大きく関与している．天文学の進展はこの世界の起源に関する人類の理解を助け，顕微鏡の発展は微細な世界を支配する物理法則を明らかにした．写真術は時空間を超えた光情報の伝達を可能にしただけでなく，計算機科学の進展にも密接な関わりを持つ．映像表現技術は今日三次元的な光の場の再生を可能にしつつあり，現代社会に欠かせない技術となっている．

結像光学の研究の起源は紀元前にまで遡ることができる．紀元前 5–4 世紀頃には Aristotle [1] や墨子 [2] により独立に結像の現象が発見され，ピンホールカメラの概念が創出された．11 世紀には Alhazen により結像理論が体系化され [3]，その後の中世において天文学を中心とした自然科学研究に結像器が広く用いられるようになった．特に Galilei が 16 世紀頃力学の発展を背景に結像光学理論を実験的に実証して以降，結像光学は近代光学の基礎として急速な発展を見せる [4]．ピンホールを用いた結像装置は Kepler によりカメラ・オブスキュラと名付けられ，15 世紀以降芸術家の間で広く用いられるようになった．1558 年に Porta はカメラ・オブスキュラに両凸レンズを初めて導入し，明るく鮮明な結像を実現した [5]．この Porta により発明された両凸レンズは写真レンズの元祖として知られている．以降レンズ系はカメラ用の光学設計法の基本として定着した．レンズ系は明るく鮮明な結像を実現する一方，原理上収差が必ず発生する [6]．この収差を抑制するため，今日に至るまで収差論及び光学設計論が発展しつづけてきた [7]．

結像光学の進展は光の空間的転送を可能にしたものの，結ばれた像を時間的に固定する方法は長らく存在しなかった．Niépce は 1825–1826 年アスファルトの光硬化性に着目し初めて像の長時間の固定に成功した [8]．Niépce が撮影した「馬を引く男」は現存する世界最古の写真として知られている．その後，1831 年に Daguerre はハロゲン化銀の感光性を発見し，実用的な時間内での露光を実現する銀塩写真を発明した．当初湿板として開発された銀板は，その後乾板，ロールフィルムへと改良が進められ，特に 19 世紀末に現像が

サービス化されてからは一般大衆が写真を撮れる時代となった．その後，1969 年，Boyle と Smith により電荷結像素子 (CCD: Charge Coupled Device) が発明され，像の電気信号への変換が可能となった [9]．これにより，イメージングにおいて信号処理の技術が積極的に取り入れられるようになり，画像工学や視覚情報処理等の研究分野の進展のきっかけともなった．

イメージングに関する研究は，光学設計法とセンサ技術及び信号処理技術がそれぞれ独立に進展してきたといえる．すなわち，光学設計法は鮮明な像形成を目的として発展し，センサ技術及び信号処理技術は基本的には光学像が既に形成された状態を前提として検討が進められてきた．一方，近年，情報科学の目覚ましい進歩を背景に，高い性能と低いコストを両立する計算機が急速に社会に普及した．この恩恵を受け，積極的に光学系と信号処理系を融合設計し，システムの全体最適化を試みる学術研究が，光学分野及び情報科学分野から注目されるようになった．この新しい考え方に基づくイメージング法は，主に光学分野ではコンピュテーショナルイメージングと呼ばれ，情報科学分野ではコンピュテーショナルフォトグラフィと呼ばれている [10, 11, 12]．これらは用語は異なるものの，本質的には同じ概念を指す．コンピュテーショナルイメージングでは従来光学設計に限定されていたイメージングシステムの設計自由度が信号処理を含めた形に拡張される．これにより，既存の光学設計に重きを置いたイメージングシステムに課される種々の物理制約を解決できると考えられている．

コンピュテーショナルイメージングの考え方は，古くは断層撮影法 [13] やカラーイメージング [14] 等に用いられてきた．これらは符号化撮像と復号処理の組合せに基づき，従来イメージングに課されていた撮像対象や取得波長数に関する制限を打破する撮像法であるといえる．近年，光学や情報科学の進展とともにより多様な光学設計や信号処理アルゴリズムが実現可能となり，コンピュテーショナルイメージングの考え方はより積極的に研究されるようになった．その適用対象は広く，光学解像度 [15]，ナイキスト周波数 [16]，視点数 [17]，距離分解能 [18] 等様々なイメージングシステムの性能及び機能に関する物理制約を打破する手法がこれまで開拓されている．

先に述べた通り，光情報の忠実な取得及び再現は古くからの光学研究の重要なテーマである．本研究では，コンピュテーショナルイメージングの考え方を用いてこの問題にアプローチする．既存の光学設計法ではレンズ系による収差が不可避であるため，イメージングにおける被写界深度及び視野が物理的に制限される [6, 19]．すなわち，三次元空間の限られた領域しか鮮明にイメージングできない．この収差による光情報の劣化，すなわち空

間帯域幅積の損失はイメージングにおいて解決されるべき重要な課題の一つであることは明らかである．光学設計による収差補正はこの課題の解決のために広く用いられるアプローチであるが，分解能，光量，系のサイズが犠牲となる．一方，信号処理に基づく収差除去技術は，不良設定逆問題を解く必要があるため，演算コスト，解の不定性等が問題となる．コンピュテーショナルイメージングに基づくアプローチはこれらのトレードオフの解決に有効であることが知られており，これまで被写界深度 [20] あるいは視野 [21] を拡大する撮像法が提案されている．しかし，これらを同時に拡大する手法は未開拓であった．また，コンピュテーショナルイメージングの実装には変調光学系が必要となる．このことにより実装の簡便さ及び柔軟性が損なわれることは，技術の実利用を推進する上での課題であった．本研究では，これらの問題を解決するための新原理のコンピュテーショナルイメージングシステムの構築を目標とする．

以下に，本論文の構成と内容を示す．

1 章では，本研究の基礎となるコンピュテーショナルイメージングの概要について述べる．コンピュテーショナルイメージングの考え方及びモデルを導入し，その特徴を述べる．また，コンピュテーショナルイメージングの実装法を分類し，その応用例を示す．

2 章では，被写界深度及び視野の同時拡大のための重畳イメージング [22] について述べる．重畳イメージングは結像特性の空間不変化と周波数空間上のフィルタリング処理に基づき，深い被写界深度と広い視野を同時に達成するイメージングを実現する技術である．まず，重畳イメージングの概念とモデルを示し，光学実験による原理確認結果を示す [23]．次に，複眼光学系を用いて重畳イメージングをシングルショットで実現する技術を導入し，性能解析及び原理実証シミュレーションを行う [24]．

3 章では，重畳イメージングを投影系に応用する．撮像系における結像と信号処理の順序を逆転させることで，投影系においても重畳イメージングを実装できる [25]．この重畳プロジェクションに関してモデルを示し，実装法の検討を行う．次に，光学実験による原理実証を行う．また，重畳される像の数が投影像の画質に与える影響を実験的に検証する [26]．

4 章では，重畳イメージングを含む種々のコンピュテーショナルイメージングで用いられる位相変調を信号処理により仮想的に実現する技術を導入する [27]．位相変調は一般的に位相板により実装されるが，これによりシステム実装のコストや簡便さが犠牲となる．この問題を解くために，ライトフィールドイメージングの概念を応用して位相変調の実装を仮想化する．まず位相変調の仮想化の概念を述べ，モデルを示し，実装法を定式化す

る．次に，仮想化を実現するためにシステムに課される設計条件を示す．最後に，位相変調に基づく全焦点超解像イメージングの原理実証実験を行い，提案手法の効果を明らかにする [28]．

5 章では，超小型散乱体を用いたレンズレス広視野イメージングを実現する [29]．多重散乱体を透過した光の取得と信号復元処理の組み合わせにより超小型広視野光学系を実装できることが知られているが，光量損失が課題となっている．広視野イメージングに用いることを前提とした散乱体の設計法を導入することで，高い光量を達成できる広視野撮像系を実現する．散乱体の設計法について，考え方とモデルを述べ，設計法を示す．また，数値シミュレーションを行い，原理実証を行う．

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

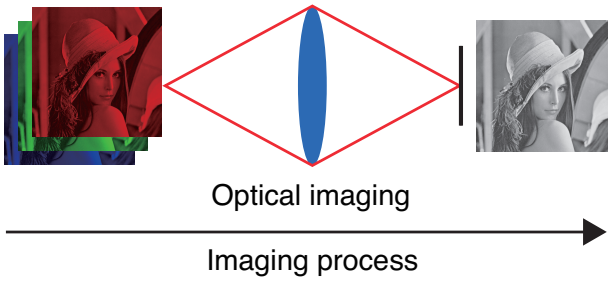
コンピュテーショナルイメージング

1.1　緒言

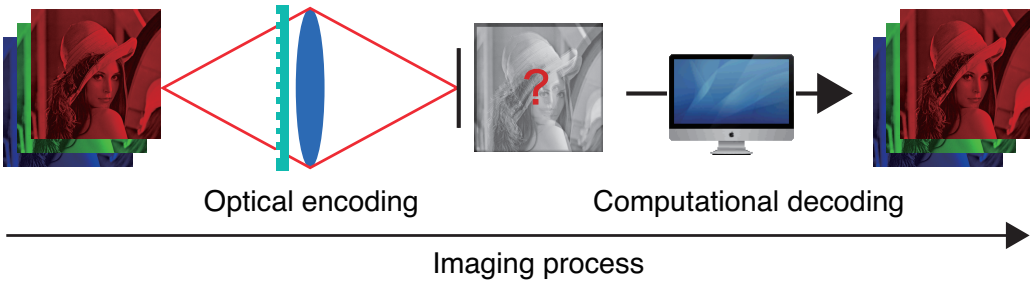
CCD の発明により，結像光学系により形成される光学像を電気信号に変換することが可能となった．このことは，像の電子的な記録を可能としただけでなく，イメージングシステムに信号処理過程を加えることが可能になったことを意味する．これにより，これまで結像光学系のみに限定されていたイメージングシステムの設計自由度が信号処理を含めた形に拡張され，より自由度の高いシステム設計が可能となった．しかし現実的には，光学技術や情報処理技術等の制約により，既存の結像のために最適化されたイメージングシステムのアーキテクチャはこれまでほとんど変化しなかった．

一方近年，光学素子の製造技術や半導体技術，計算機科学の急速な進展を背景に，信号処理を含めてイメージングシステムを最適設計する試みが様々な研究者により行われている [10, 11, 12]．この新しい考え方に基づくイメージング技術はコンピュテーショナルイメージング (CI) と呼ばれ，既存の光学結像に基づくイメージング法における様々な物理制約を打破できるポテンシャルを有している．イメージングは科学計測のみならず医療・産業・安全保障・教育・エンタテインメント等様々な分野において基盤技術として用いられるため，その性能及び機能の向上は重要な意味を持つ．

本章では，本論文の研究で用いるイメージング法である CI について述べる．まず，1.2 節では，CI の概要について述べる．信号処理を前提としたイメージングシステムの最適設計法について，考え方やそのモデルを示す．次に，1.3 節では，CI を具現化するための実装法について述べる．これまで提案されている変調・符号化光学系及の実装法を分類し，それぞれの原理や特徴を示す．次に，1.4 節では CI の実現例を示す．従来研究で提案されている CI 技術の例を提示し，光学結像のみに基づくイメージング技術に対する優位性を明らかにする．最後に，1.5 節では本論文の研究項目及び構成を，CI の既存研究と関連付けながら説明する．



(a)



(b)

Fig. 1.1　Schematic diagram of the image acquisition based on (a) conventional imaging and (b) computational imaging.

1.2　コンピュテーショナルイメージング

一般的なイメージング技術では，Fig. 1.1(a) に示されるように鮮明な像の形成を目的として光学設計が最適化される．信号処理は，例えば画像の鮮鋭化等，補助的な役割として用いられることが多い．このシステム設計の考え方は，像に対して信号処理の適用が不可能であった時代の光学設計法に由来しているといえる．

光の伝搬は線形システムとしてモデル化できる [6]．例えば，インコヒーレント光源を用いた伝搬光強度の取得は，ノイズを無視した場合，次式の線形システムとしてモデル化できる．

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

ここで，$\boldsymbol{g} \in \mathbb{R}^{N_g \times 1}$ はセンサにより取得された伝搬光強度分布ベクトル (以下，取得画像)，$\boldsymbol{f} \in \mathbb{R}^{N_f \times 1}$ は物体光強度分布ベクトル (以下，原画像)，$\boldsymbol{H} \in \mathbb{R}^{N_g \times N_f}$ はシステム行列を表す．システム行列は，原画像が取得画像に変換されるまでのシステムの作用を表現している．$\mathbb{R}^{N_i \times N_j}$ は $N_i \times N_j$ の行要素数及び列要素数を持つ実数行列を表す．光源がインコ

ヒーレントである場合，システム行列の要素は非負である．一般的なイメージングにおける光学設計では，単位行列となるシステム行列 $\boldsymbol{H}$ の物理実装，すなわち $\boldsymbol{g} = \boldsymbol{f}$ を達成することが目標となる．なお，ここでは議論の簡略化のため正立等倍結像を仮定している．一般的なイメージングでは，物理的な見方をすれば，無収差の光学結像を実現する光学設計が理想となる．ただし現実的にはそのような光学設計法は存在しないため，対象位置や光学系に様々な制約を課す必要が生じる．

一方 CI では，Fig. 1.1(b) のように，光学情報を符号化した状態で取得し，信号処理により原画像を復号する．光学系による取得画像はあくまでも中間画像として取り扱われる．そのため，中間画像は原画像に忠実である必要は無く，むしろ復号処理過程に適していることが重要となる．

CI では撮像後に式 (1.1) で表される撮像過程の逆問題を解くことで原画像を復号する．推定原画像 $\hat{\boldsymbol{f}}$ を取得するための逆問題は，$N_f = N_g$ である場合，すなわちシステム行列 $\boldsymbol{H}$ が正則である場合次式で簡潔に表現できる．

$$\hat{\boldsymbol{f}} = \boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{g}. \tag{1.2}$$

ここで，$\boldsymbol{H}^{-1}$ はシステム行列 $\boldsymbol{H}$ の逆行列を表す．

$N_f < N_g$ である場合, 特異値分解により擬似逆行列を生成することで逆問題を解く．システム行列 $\boldsymbol{H}$ は特異値分解により次のように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 (特異値行列)$\boldsymbol{\Sigma} \in \mathbb{R}^{N_g \times N_f}$ に分解できる．

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^T. \tag{1.3}$$

ここで，$\boldsymbol{V}^T$ は行列 $\boldsymbol{V}$ の転置を表す．式 (1.3) の特異値分解に基づき，$\hat{\boldsymbol{f}}$ は次にように求まる [30]．

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{f}} &= \left(\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^T\right)^{-1}\boldsymbol{g} \\ &= \boldsymbol{V}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\boldsymbol{U}^T\boldsymbol{g}. \end{aligned} \tag{1.4}$$

$\boldsymbol{V}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\boldsymbol{U}^T$ は擬似逆行列又は一般化逆行列と呼ばれる．式 (1.4) における $\boldsymbol{\Sigma}^{-1}$ は特異値の逆数 $1/\lambda_1, 1/\lambda_2, \cdots, 1/\lambda_{\mathrm{N_f}}$ を対角成分に持つ．そのため，最小特異値 λ_{min} が小さい場合，推定原画像 $\hat{\boldsymbol{f}}$ を再構成する際取得画像 $\boldsymbol{g}$ に混入したノイズが増幅される．最大特異値を λ_{max} と置いた時，$|\lambda_{\mathrm{max}}/\lambda_{\mathrm{min}}|$ は条件数と呼ばれ，数値解析におけるノイズに対するロバスト性を表す指標として用いられる．ノイズロバストなイメージングシステムを設計するためには，条件数が小さくなるようなシステム行列 $\boldsymbol{H}$ を構成することが重要となる．

$N_f > N_g$ の場合は逆問題が不良設定となり，前述の直接的な解法では解が一意に定まらなくなる．この場合，推定原画像 $\hat{\boldsymbol{f}}$ を得るためには先見情報の利用が必要となる．

CI はシステム行列 $\boldsymbol{H}$ が単位行列となるような光学設計を行う必要がない点に大きな特徴がある．むしろ，式 (1.1) の逆問題を解くのに適したシステム行列 $\boldsymbol{H}$ の物理実装が望まれる．必ずしも鮮明な結像を実現する結像系を構成する必要が無くなるため，システム設計の自由度が飛躍的に拡大される．ただし，システム設計の際は，前述のように良設定問題の設計や良条件なシステム行列の実装が重要となる．

式 (1.2) や式 (1.4) のような逆行列計算及び特異値分解計算に基づく直接解法は，計算機に膨大な記憶容量を必要とする点，計算精度やノイズ耐性が低い点からあまり実用的ではない．そのため，現実的には近似解を回帰的に求める場合が多い．例えば，次の二乗ノルム最小化問題を数値的に解くことで逆問題の近似解を求めることができる．

$$\hat{\boldsymbol{f}} = \underset{\boldsymbol{f}}{\operatorname{argmin}} ||\boldsymbol{g} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{f}||^2. \tag{1.5}$$

ここで，$||\cdot||^2$ は二乗ノルムを表す．ベクトル $\boldsymbol{x}$ の二乗ノルム $||\boldsymbol{x}||^2$ は次式で定義される．

$$||\boldsymbol{x}||^2 = \sum_i x_i^2. \tag{1.6}$$

ここで，x_i は $\boldsymbol{x}$ の i 番目の要素を表す．式 (1.5) の最小化問題を解くために様々なアルゴリズムが提案されている．例えば最も単純な勾配法のアルゴリズムである最急降下法では次の計算により式 (1.5) を解く．

$$\hat{\boldsymbol{f}}_i = \hat{\boldsymbol{f}}_{i-1} + 2\boldsymbol{H}^T\left(\boldsymbol{g} - \boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{f}}_{i-1}\right). \tag{1.7}$$

ここで，i は反復回数，$\hat{\boldsymbol{f}}_i$ は i 回目の反復における推定信号を表す．$\hat{\boldsymbol{f}}_0$ は任意に決定できる初期解を表す．あるいは，次式の最尤法を解くことでも逆問題の近似解を求めることができる．

$$\hat{\boldsymbol{f}} = \underset{\boldsymbol{f}}{\operatorname{argmax}}\, \mathcal{L}[\boldsymbol{g}|\boldsymbol{f}]. \tag{1.8}$$

ここで，$\mathcal{L}[\cdot]$ は尤度関数である．式 (1.8) は例えば Richardson-Lucy 法 (RL 法) を用いて解くことができる [31, 32]．

$$\hat{\boldsymbol{f}}_i = \hat{\boldsymbol{f}}_{i-1}\boldsymbol{H}^T\left(\boldsymbol{g}/\left(\boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{f}}_{i-1}\right)\right). \tag{1.9}$$

ここで，$/$ は要素ごとの除算を表す．

以上のことから，CI は既存のイメージング技術と比較してより自由度の高いシステム設計を実現する技術であるといえる．そのため，従来物理的に制限されていたイメージングの性能及び機能を打破するポテンシャルを有しているといえる．例えば，解像度，被写界深度，視野，撮像速度，取得光学情報の次元数等において，既存のイメージングを超える性能を実現し得る．

1.3 実装法

CI は主に，光学情報の符号化取得過程と信号処理過程から成る．物体の光学情報は変調光学系により符号化された状態でセンサによりサンプリングされる．符号化画像は復号処理により目的の光学情報に変換される．以下，CI の実装に用いられる符号化光学系の実装法を分類する [33, 34]．ここではインコヒーレント光源を仮定した場合のイメージングのみを取り扱う．

1.3.1 物体面変調

物体空間の光学情報を変調することで，符号化撮像を実現できる．概念図を Fig. 1.2(a) に示す．概念図ではイメージングシステムを抽象化し，物体面，瞳面，像面のみにより構成されるとした．Fig. 1.2(a) はイメージングにおいて物体面に変調が加えられている状態を示している．

構造光照明は，通常のイメージングシステムでは取得できない多様な情報を取得するために広く用いられている技術である．三次元物体に対して構造光を照射した場合，照射パターンに三次元情報に対応した歪み [35, 36] やデフォーカス [37] が生じる．すなわち，三次元情報が符号化される．この性質を利用した，縞パターンやランダムドットの投影に基づく三次元計測技術が提案されている．また，構造光は物体輝度に空間的な特徴点を付与することにも用いられ，撮像系の内部パラメータ推定や，複数台カメラの取得画像の位置合わせの精度向上にも役立てられている [38]．三次元情報は，一様な平行光照明を位置を変えながら複数回照射することでも符号化できる．陰影の異なる複数の物体像から三次元情報を復号することで，物体表面形状の法線情報を知ることができる．これを積分することで，物体の相対的な三次元情報を知ることができる．この手法は照度差ステレオ法と呼ばれる [39]．

散乱体内を伝搬する光には，直接反射成分と非直接反射成分 (大域成分) が混在している．チェッカーパターン等の構造光を高周波成分を変化させながら複数回照射した場合，

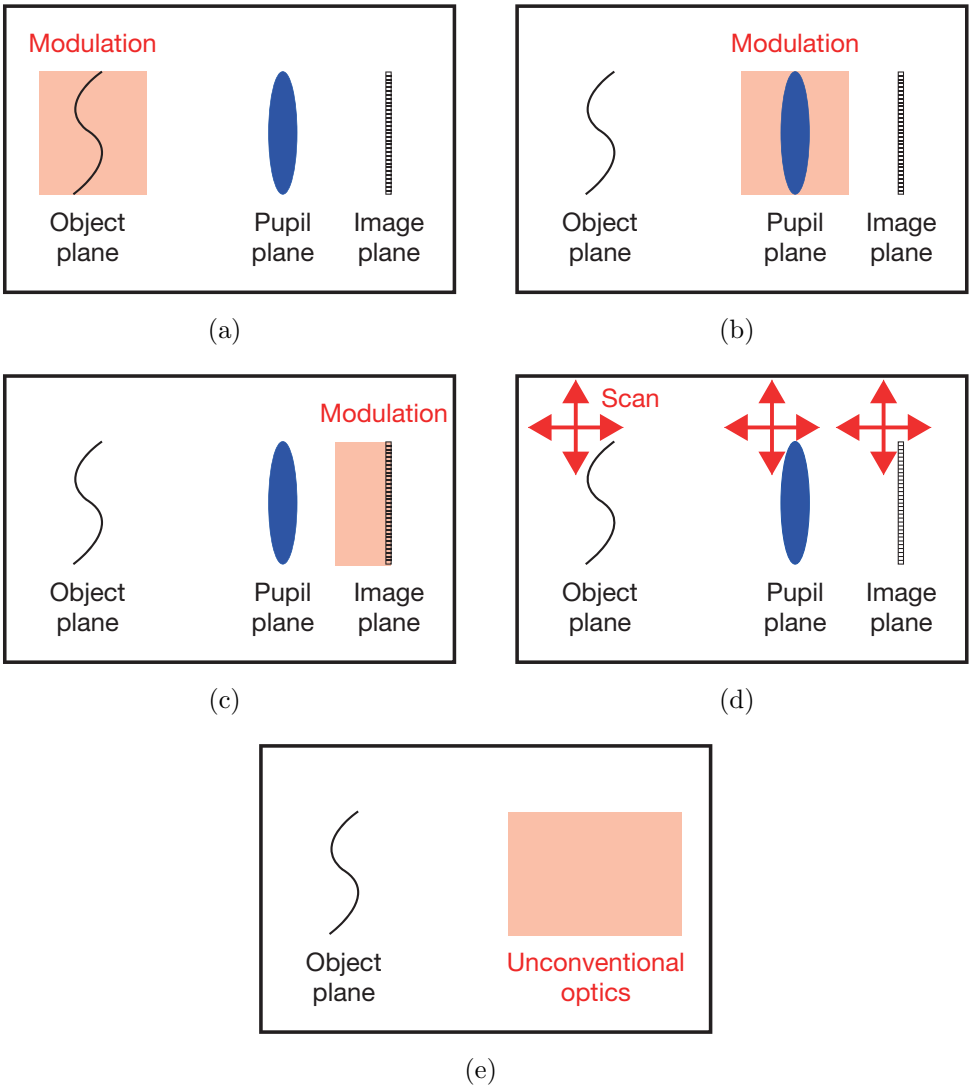


Fig. 1.2　Classification of realizations of optical modulation for CI. Optical information is modulated by (a) object-plane coding, (b) pupil-plane coding, (c) image-plane coding, (d) mechanical scan of an arbitral plane, and (e) unconventional optics.

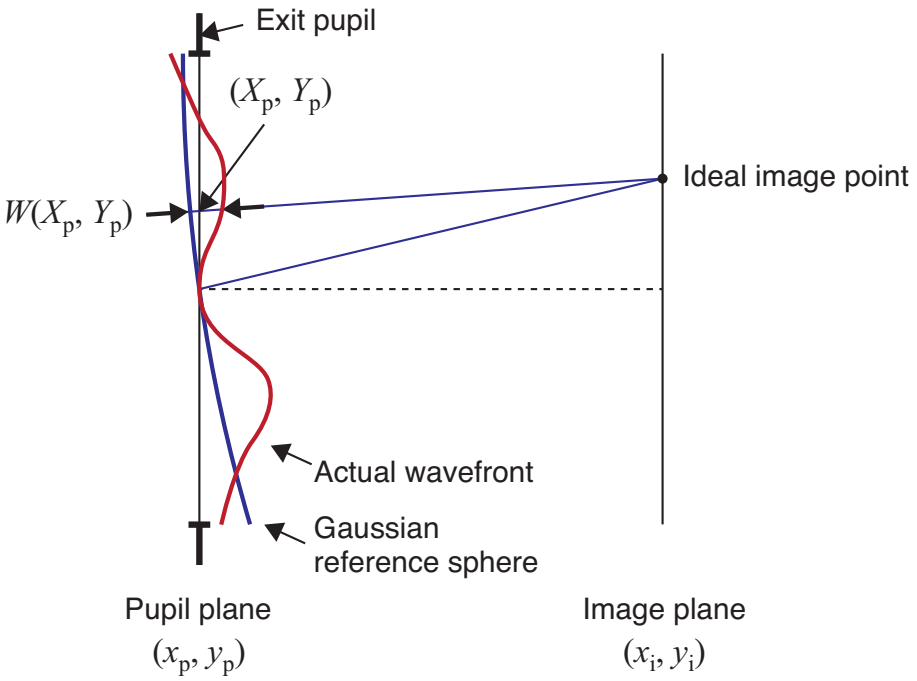


Fig. 1.3 Geometrical representation of aberration function.

直接反射成分は構造光変化に反応して変化するが，大域成分は散乱等の影響により高周波を伝達しないため変化しない．つまり，直接反射成分を独立的に符号化できる．この性質を利用することで散乱体を伝搬した光から直接反射成分を分離でき，散乱除去等に応用できる [40]．この考え方は蛍光成分分離にも応用できる．蛍光物質に対して波長空間上の高周波成分を変えながら複数回照明を照射した場合，非蛍光成分に対応する反射光は照射光に応じて変化するが，蛍光成分に対応する反射光は変化しないことが知られている [41]．つまり蛍光成分を符号化でき，後処理によりこれを分離できる [41]．

カットオフ周波数を超える微細な構造はイメージングシステムを通じて直接的には観察できない．一方，このような構造物に構造光照明を照射することで，微細構造との相互作用からモアレ縞を発生させることができる．すなわち，カットオフ周波数を超える微細情報をカットオフ周波数を下回るモアレ縞に符号化できる．このモアレ縞を解析することで，微細構造を間接的に観察することが可能となる．この超解像イメージング法は構造化照明顕微鏡法 (SIM: Structured Illumination Microscopy) と呼ばれている [42]．

1.3.2　瞳面変調

Fig. 1.2(b) のように伝搬光の変調は瞳面でも実装できる．射出瞳上の伝搬光の波面の状態は，一般化瞳関数 P_{gen} を用いて表現される [6]．一般化瞳関数に用いられる変数の定義を Fig. 1.3 に示す．P_{gen} は瞳面において次式で表される．

$$P_{\mathrm{gen}}(x_{\mathrm{p}}, y_{\mathrm{p}}) = P(x_{\mathrm{p}}, y_{\mathrm{p}}) \exp[jkW(x_{\mathrm{p}}, y_{\mathrm{p}})]. \tag{1.10}$$

ここで，$(x_{\mathrm{p}}, y_{\mathrm{p}})$ は規格化瞳面座標，P は振幅関数，k は波数である．W は収差関数と呼ばれ，任意の瞳面座標における，理想像点を形成する波面 (ガウス参照球) と実際の波面との経路長誤差を表す．物理的には，瞳面上の等位相面の形を間接的に表現しているとみることができる．収差関数 W は，波面展開により種々の収差関数の和として表現できる [6]．この収差はデフォーカスや軸外収差を含むため，光学系の焦点距離及び光軸位置を固定した場合であっても物体位置 $(x_{\mathrm{o}}, y_{\mathrm{o}}, z_{\mathrm{o}})$ と像面位置 $(x_{\mathrm{i}}, y_{\mathrm{i}}, z_{\mathrm{i}})$ に依存して変化するといえる．また，kW は物理的には位相差に相当する．そのため，等位相面 W を変調することは位相変調と呼ばれる．

光学系のインパルス応答は点光源の像によって記述でき，点像分布関数 (PSF: Point Spread Function) と呼ばれる．インコヒーレント結像において，一般化瞳関数 P_{gen} と PSF h は次式の関係をもつ [6]．

$$h(x_{\mathrm{i}}, y_{\mathrm{i}}) = |\mathcal{F}[P_{\mathrm{gen}}(x_{\mathrm{p}}, y_{\mathrm{p}})]|^2. \tag{1.11}$$

ここで，$\mathcal{F}[\cdot]$ はフーリエ変換を表す．つまり，瞳面で伝搬光を変調することは，PSF をフーリエ空間上で変調していることに相当する．インコヒーレント結像で得られる像強度は原画像の輝度と PSF の重ね合せ積分で表現できる．そのため，PSF はイメージングシステムの結像特性を実空間上で表現する重要な関数であるといえる．また，光学系の伝達関数である光学伝達関数 (OTF: Optical Transfer Function) $\mathcal{H}$ は PSF と次式の関係を持つ．

$$\mathcal{H}(f_{\mathrm{X}}, f_{\mathrm{Y}}) = \mathcal{F}[h(x_{\mathrm{i}}, y_{\mathrm{i}})]. \tag{1.12}$$

ここで，$(f_{\mathrm{X}}, f_{\mathrm{Y}})$ は周波数成分を表す．式 (1.11) と式 (1.12) より，OTF は一般化瞳関数の自己相関に対応することが分かる．つまり，瞳面変調は OTF の変調にも相当する．結像の空間不変性が仮定できる場合，OTF 値は原画像の各周波数成分がイメージングシステムを通じてどれほど伝達されるかの割合を示している．そのため，広い周波数領域において OTF 値が値を持つことは，画像復元問題において重要である．以下，瞳面変調の実装法を，振幅 P の変調と位相 kW の変調に分けて説明する．

振幅変調

符号化開口や空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) により瞳面の伝搬光の振幅 P を変調できる．光センシングにおいて振幅変調は古くから利用されており，例えばX 線を用いたセンシング [43] や PSF のサイドローブ軽減 [6]，位相イメージング [44]，分光法 [45]，OTF の広帯域化 [46]，デフォーカス OTF の広帯域化 [47] 等に利用されている．

この振幅変調技術は，CI の実装においても役立てることができる．振幅変調の最適設計により，デフォーカス除去を高画質で実現する手法 [48] や，複数の焦点画像群から距離を推定する技術 (DFD: Depth From Defocus) を高精度化する手法 [49] が提案されている．また，瞳面での振幅変調により光の伝搬角度を符号化することができ，光線信号 (LF: Light Field) [17] の取得 [48] や双方向散乱面反射率分布関数 (RF: Reflectance Field，あるいは BSSRDF: Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function) [50] の計測 [51] にも応用されている．LF や RF の概念や応用に関する詳細は 1.4.2 節で述べる．振幅変調を用いて符号化を実装する場合は，光量の減少が最終結果に与える影響に注意を払う必要がある．

位相変調

瞳面に位相変調光学素子を挿入することで，伝搬光の位相差 kW を制御できる．すなわち，波面の形を変調できる．結像系に位相変調を加える場合，インフォーカス PSF がデルタ関数では無くなるため，結像の忠実性は失われる．しかし，撮像後の信号処理を前提とした場合，既存の結像と比較して優れた性能・機能を示す PSF を構成できる場合がある．

このような考え方に基づく位相変調イメージングは，波面符号化法 (WFC: Wavefront Coding) 等と呼ばれる被写界深度拡大法 [20] や三次元イメージング [18]，ディジタル超解像と呼ばれるサンプリング解像度の改善法 [52] 等に応用されている．詳細は 1.4.1 節に示す．光は等位相面の法線方向に伝搬する性質を持つため，位相変調は幾何光学的には光線の伝搬方向の変調に相当する．位相変調は，SLM や位相板，プリズム，拡散板等の挿入により実装される．また，結像レンズ自体も位相変調光学素子であるため，レンズと一体化した位相変調機能の実装も可能である．

1.3.3　像面変調

像面では，形成された像に対して直接的に光学的変調を加える事ができる．概念図を Fig. 1.2(c) に示す．光学フィルタにより特定の波長や偏光を選択的に透過させることができ，その結果，これらの光学信号を分離取得することができる．これにより，例えば三原色の波長のみ透過させることで，CCD の取得画像からカラー画像を復元できる [14]．ただし，光学フィルタを適用する場合，一般的に撮像時間あるいは空間解像度が犠牲になる．また，画素幅より細かい構造を持つ符号化マスクを挿入することで，ディジタル超解像イメージングを実現する Focal plane coding と呼ばれる技術が提案されている [53]．他にも，露光の時間的タイミングを符号化することで，モーションブラー PSF の周波数特性を広帯域化でき，結果高画質な手ぶれ除去が実現できることが知られている [12]．

1.3.4　走査

デフォーカスは物体面，瞳面，像面の相互的な位置関係に依存して変化する．これらの面のいずれかを露光時間内に光軸方向に走査することで，WFC と同様に，PSF のデフォーカスに依存した変化を均一化できる．概念図を Fig. 1.2(d) に示す．図の矢印は，各面の機械的な走査を表す．顕微鏡のように観察対象を特定の物体面に固定するシステムの場合，露光時間内の物体面を軸上方向に走査することで，この距離不変 PSF を実装できる [54]．同様に，レンズ系 [55] やセンサ [56] を軸上走査することでも距離不変 PSF を実装できる．これらの方法で得られた画像は，物体の距離に依らず単一のフィルタで画像復元が行えるため，被写界深度拡大イメージングを実現できる．また，走査によりデフォーカスと同時にモーションブラーも均一化できることが知られており，安定な手ぶれ除去にも応用できることが知られている [57]．

また，結像距離を走査しながら複数回撮像し，得られた画像群から合焦領域を抽出し一枚の画像に統合することでも被写界深度の深い画像を取得できる．この技術は焦点合成法，あるいは Focal stack 法と呼ばれる [58]．複数回の撮像と非線形な信号処理が必要となるが，通常の撮像系のみを用いて全焦点画像を生成できる利点を持つ．

一方，撮像系の光軸位置，すなわち視点を走査しながら撮影を繰り返すことで，対象の三次元情報を視差という形で符号化取得できる [59]．撮影位置が既知である場合，画像の特徴量等を手がかりに画像群に含まれる視差量を推定することで，物体の三次元情報を取得できる．この技術はステレオビジョンと呼ばれ，照明系の不要な距離計測技術として古くから研究されている．また，撮影位置が未知である場合でも，エピポーラ拘束等

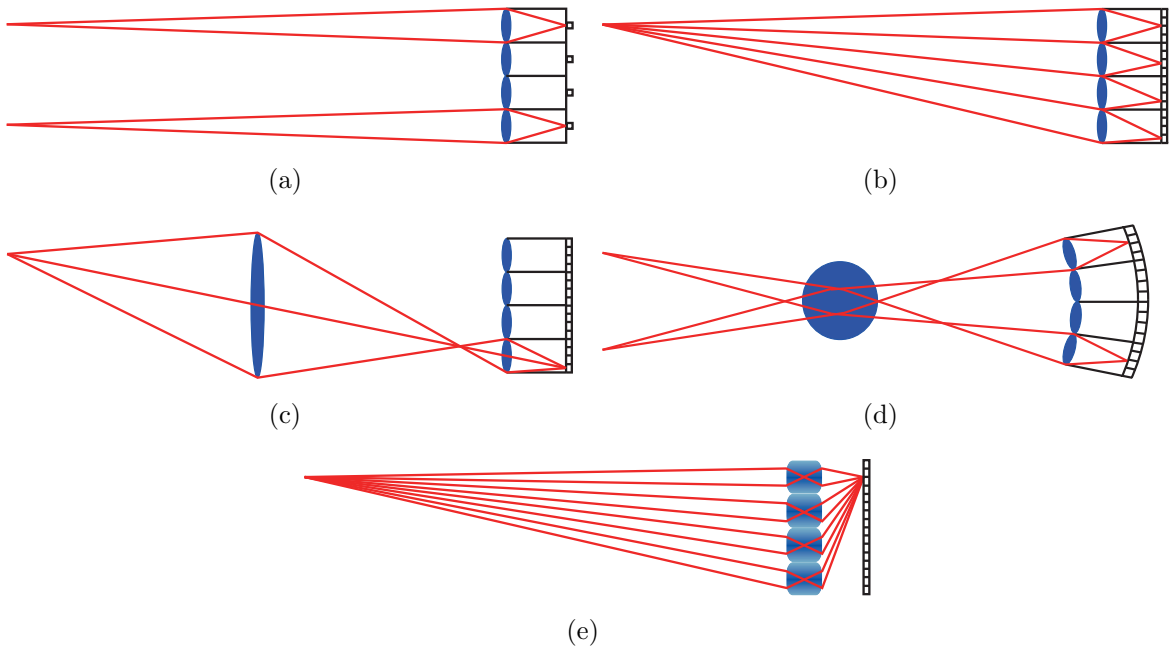


Fig. 1.4 Classification of compound-eye optics. (a) Apposition compound-eye optics, optics in (b) TOMBO and (c) plenoptic camera, (d) multiscale lens design, and (e) superposition compound-eye optics.

の幾何的な先見情報を利用することで物体の疎な三次元情報を復元できる．この手法は Structure from Motion (SfM) 法と呼ばれ，光学系への制約が少ない三次元イメージング技術として主にマシンビジョンの分野で利用されている [60]．

1.3.5 撮像系全体の再構築

ここまで，既存の結像系を基にして，物体面，瞳面，及び像面に対して独立に変調を加える実装法を説明した．一方近年，結像光学系そのものを再構築することにより符号化撮像を実現する CI 技術も提案されている．概念図を Fig. 1.2(e) に示す．一般的な結像光学系は単一の瞳面とセンサの組により構成されるが，ここではその基本的な構成自体が再構築される．以下，具体的な例を示す．

複眼化

複眼を有する生物は，多数の直径 10μm から 80μm 程度の微細結像系により眼を構成していることが知られている [61, 62, 63] この生物の複眼を工学応用した CI 技術が数多く提案されており，マルチアパーチャイメージング等と呼ばれている [10]．複眼光学系では光学

的には鮮明な単一の像を形成できないが，取得画像に信号処理を適用することで単一画像を再構成できる．複眼光学系は，各結像レンズ–受光器の対が光学的に分離されているものと結合されているものに大別される [64]．生物学の用語に倣い，前者を連立像眼，後者を重複像眼と呼ぶ [65]．

トンボ等に見られる生物の連立像眼では，Fig. 1.4(a) のように結像レンズと画素が一対一対応する．この系では，短い焦点距離による薄型光学系の実現と曲面状の光学系実装が同時に達成できる．この構成を直接模倣することで，小型撮像系による広視野イメージングが実現できる [66, 67]．より実装コストと解像度を改善した方式として，一つの結像レンズに複数の画素を対応させる TOMBO (Thin Observation Module by Bound Optics) と呼ばれる複眼光学系が提案されている [68]．TOMBO の構成を Fig. 1.4(b) に示す．一定のセンサ領域が一つのレンズに対応し，形成される像をサンプリングする．光線のクロストークを避けるため，各レンズ–センサ領域の組 (要素光学系) は隔壁により分離される．要素光学系の像は低解像度となるが，再構成処理により高解像度画像を復元できる [68, 69, 70, 71, 72, 73]．要素光学系はレンズ径が小さく短い焦点距離を持つため，薄型光学系による高解像度イメージングが実現できる．要素光学系の視野の重複度は任意に調節できる．重複が大きい場合，1.4.2 節で述べる LF イメージングを実現できる．また，要素光学系ごとに異なる光学特性を割り振る場合は，波長や偏光等を含む多次元光学信号の一括取得に応用できる [74, 75]．視野重複が少ない場合は，撮像系の広視野化を実装できる．

LF 取得のための別種の複眼光学系として，結像レンズの後方にマイクロレンズアレイを配置する方式の光学系が提案されている．この光学系を用いたカメラはプレノプティックカメラと呼ばれる．TOMBO と比較して，複眼光学系の設計自由度が向上される一方，撮像系の厚みが増加する．構成を Fig. 1.4(c) に示す．レンズアレイは結像レンズの結像面 [76] やデフォーカス面 [77] に配置される．レンズアレイ面をプリズム–凹レンズ対のアレイにより構成し，結像レンズに対して物体面側に配置することでも同様の機能を実現できる [78]．

プレノプティックカメラは視野重複を前提として LF イメージングに応用される．一方，視野分割を前提とし，ボールレンズの後方に高倍率なレンズアレイを配置する光学設計法が提案されており，マルチスケールレンズデザイン [21] と呼ばれている．構成を Fig. 1.4(d) に示す．この光学設計法は主に広視野・高解像度イメージングに応用されている [79, 80]．

重複像眼を模倣した複眼光学系を Fig. 1.4(e) に示す．連立像眼と異なり各光学系間は隔壁により分離されていない．正立結像レンズアレイにより複数のレンズ由来の光が画

素上で重なりあう．幾何光学的には，Fig. 1.4(e) のように，複眼光学系全体を開口とした単一の正立結像系のように振る舞う．そのため，連立像眼と比較して，LF を取得できない代わりに高い光量及びカットオフ周波数を実現できる利点を持つ [81, 82, 83]．つまり，薄型光学系を高い光量で実現できる [82]．平面に構成された重複像眼は単一の焦平面を持つ．このような重複像眼は，プリンタやスキャナの読み取り用光学系として産業応用されている．また，生物と同様に重複像眼を球状に構成する場合，広視野を達成できる．ただし，この場合系全体で生じる球面収差は実効的な光学分解能を制限する [84]．視差バリアを用いて系全体の球面収差を抑制することで，鮮明な画像を取得できる薄型広角撮像系を実装できる [85]．正立結像光学系は，倒立結像レンズの組合せ [82] や屈折率分布レンズ [85]，鏡 [86] 等により実装可能である．

対称化

単一の光軸を持つレンズ系では，軸外収差が必ず発生する．軸外収差は視野制限や光学系の大型化の要因となる．点対称な光学設計は，軸外収差を抑制するのに効果的な光学設計法である．点対称な屈折率分布を持つ球状レンズが実現できれば，理論上無収差の全方位イメージングが実現できることが知られているが [87, 88]，現在の技術ではこのようなレンズは物理実装が不可能である．一方，ボールレンズを用いることで点対称な結像光学系の物理実装が可能となるが，この場合球面収差が問題となる．ボールレンズ後方にアレイ光学系を配置して球面収差を補償し，撮像後に画像を接続する手法 [21] や，信号処理により球面収差を除去する手法 [89, 90] が提案されている．また，複眼光学系を用いて点対称光学系を構成する手法 [85] も提案されている．

レンズレス化

CI では光学結像が不要となるため，原理上レンズ系が不要となる．ただし，現実的には逆問題が良条件となるような符号化光学系は依然として必要となる．このような符号化光学素子として，散乱体 [91, 92]，符号化開口 [93]，ランダム配置された微小鏡片 [94]，回折光学素子 [95]，拡散板 [96] 等が用いられている．これらの非結像光学素子を用いて対象の光強度分布を符号化取得し，撮像後に逆問題を解くことで，対象の画像を取得できる．光学設計において光学結像や収差補正の実装を省略できるため，極めて小型な撮像系の実装を実現できる．

単画素化

画素アレイによる像のサンプリングは，単画素の複数回の撮像に置き換えることができる．単画素による撮像は，光強度の空間分布を積分して取得することに相当する．撮像過程において構造光照明や SLM を用いて対象の光強度分布を重み付け符号化することで，単画素の信号列から二次元画像を復号することが可能となる [97]．逆問題を良設定にするためには，本来推定原画像の画素数回独立な符号化撮像を行う必要があるが，1.4.3 節で述べるスパース再構成技術によりこの撮像回数は削減できる [98]．この技術は Single pixel imaging [99, 100]，あるいは Computational ghost imaging [101] と呼ばれ，例えばテラヘルツ領域のような画素アレイを構成することが難しいスペクトルを含む光源を用いた光センシングに効果的である．画素アレイを単画素に置き換えることでセンサ自体は大幅に小型化されるが，代わりに物体輝度の二次元情報を符号化するために照明系や SLM が必要となる．

1.4　実現例

1.4.1　位相変調イメージング

インコヒーレント結像における PSF は，式 (1.11) に示されるように一般化瞳関数のフーリエ変換の強度として表される．既存のイメージングでは光学結像を前提とするため，PSF はデルタ関数に近づくよう最適化されるが，CI では敢えて位相変調により非デルタ関数の PSF を設計する場合がある．取得画像の原画像に対する忠実性は失われるが，復号処理を組み合わせることにより高性能・高機能なイメージングが実現される．本論文ではこのような位相変調に基づく CI 技術を位相変調イメージングと呼ぶ．以下，代表的な位相変調イメージング技術について述べる．

被写界深度拡大

被写界深度はデフォーカス PSF が許容錯乱円以内のサイズに収まる物体距離範囲として定義される [19]．言い換えれば，被写界深度は結像系が合焦できる物体距離範囲を指す．概念図を Fig. 1.5 に示す．図の光線は，被写界深度を規定する参照光線を表す．許容錯乱円は任意に決めることができるが，例えば画素幅等を用いて決定される．F 値を大きくすることで被写界深度を拡大できるが，この場合光学分解能や明るさが犠牲となる．逆問題を解くことでデフォーカスを取り除く手法も提案されているが [102]，不良設定逆問題を解

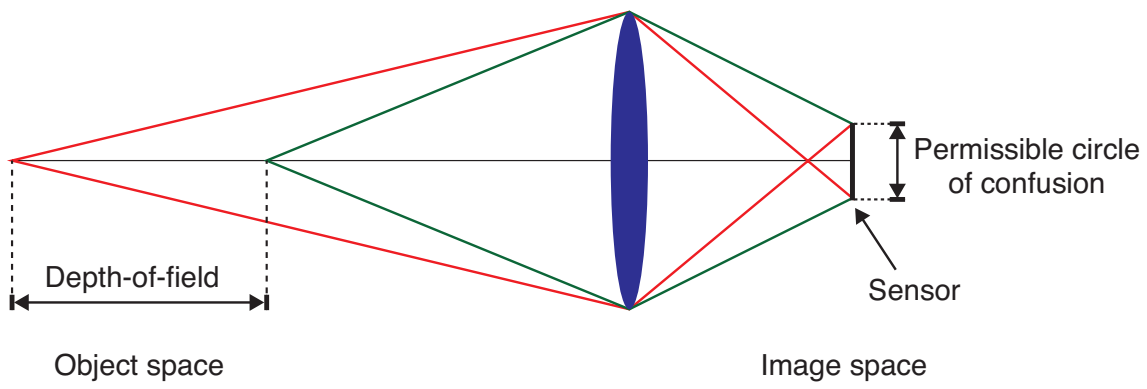


Fig. 1.5 Definition of depth-of-field.

く必要が生じるため演算コストや解の安定性が犠牲となる．また，多数の焦点画像の合成に基づく焦点合成法 [58] でも被写界深度の深い画像を生成できるが，撮像時間と演算コストが犠牲となる．

Dowski らは WFC と呼ばれる CI 技術によりこの問題を解いた [20]．WFC の概念図を Fig. 1.6 に示す．図に示されるように，WFC では瞳面に三次位相板を挿入することで PSF のデフォーカス特性を対象距離変化に対して不変化する．三次位相板の位相分布 ϕ は次式で表される．

$$\phi(x_{\mathrm{p}}, y_{\mathrm{p}}) = \alpha(x_{\mathrm{p}}^3 + y_{\mathrm{p}}^3). \tag{1.13}$$

ここで，α は定数である．撮像における PSF が空間不変である場合，撮像は物体と PSF のコンボリューションで表現できることが知られている [6]．また，コンボリューションはフーリエ空間上の要素積で計算できる．そのため，WFC で得られる撮像画像に対して，デコンボリューションと呼ばれるフーリエ空間上での除算を適用することで，深い距離範囲に合焦した物体像を取得できる [6]．ただし，WFC では軸外収差による PSF 変化の影響を受けるため，視野を近軸に限定する必要がある [103]．WFC に代表される被写界深度拡大法は 2 章以降の研究の基礎となるため，2 章の導入部でモデルを示す．

WFC は，光量や解像度，演算コスト，撮像時間を犠牲にせず被写界深度の深いイメージングを実現できる点に意義がある．WFC の技術的本質は，三次位相板を用いた位相変調による PSF の距離不変化にあるといえる．三次位相板の他にも，球面収差 [104, 105] やコマ収差 [106] の利用，波長分散の強調 [107]，多焦点レンズ [108]，ランダム拡散板 [109]，放射状拡散板 [110]，最適化位相板 [111] 等による距離不変 PSF の実装が報告されている．

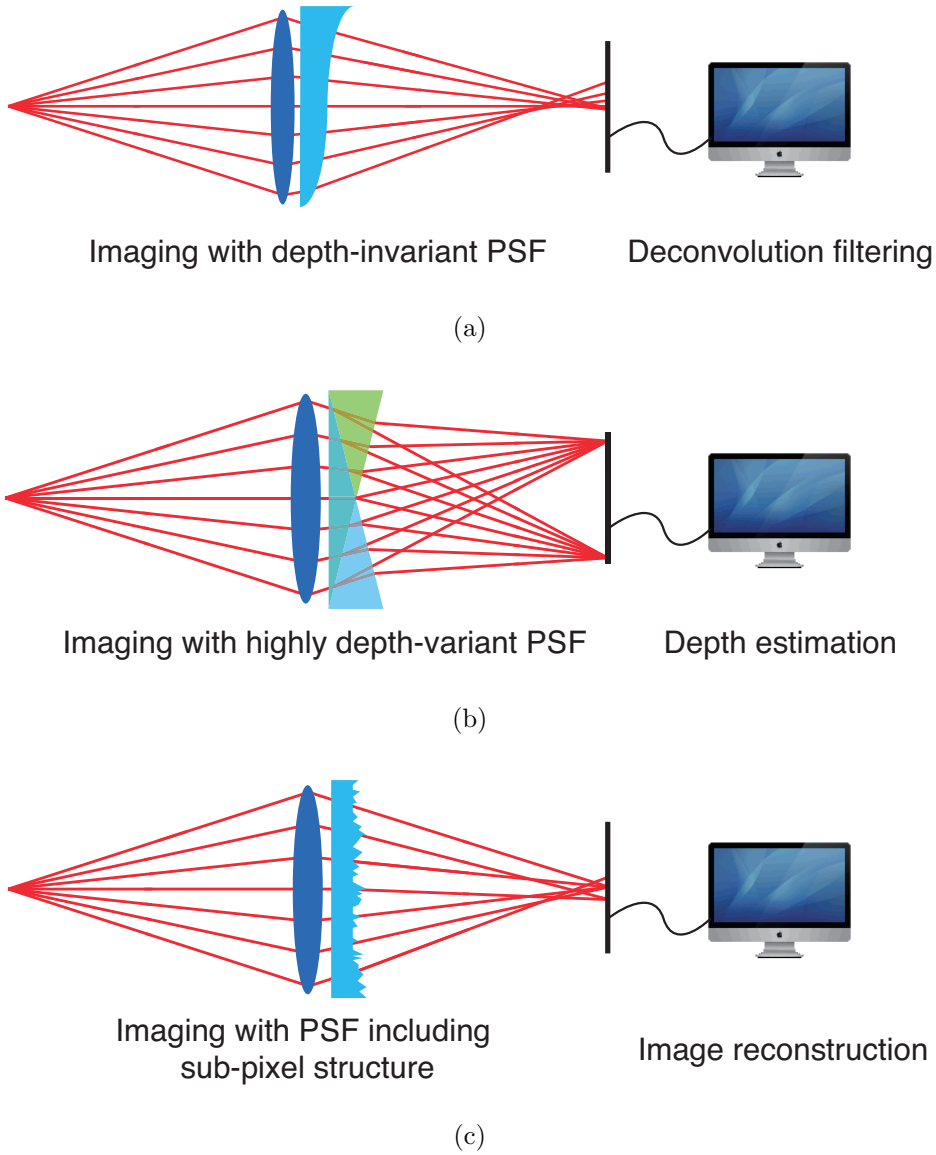


Fig. 1.6　CI based on phase modulation. (a) Extended depth-of-field imaging, (b) three-dimensional imaging, and (a) digital-superresolution imaging

三次元イメージング

WFC の逆の考え方として，位相変調により結像特性の距離変化を強調することもできる．物体距離変化に応じて急峻に変化する PSF は，高精度な三次元イメージングに役立てることができる．概念図を Fig. 1.6(b) に示す．図は位相変調光学系と距離推定処理の組み合せに基づく三次元イメージングシステムを表す．物体の三次元情報は，デフォーカスにより符号化されて撮像系で取得される．DFD 法では取得画像から PSF のデフォーカス量を推定することで，対象の三次元情報を復号する [112]．通常の結像系における PSF はデフォーカスに応じて線形にスケーリングする．見方を変えれば，デフォーカスに対する PSF 変化が穏やかであり，異なるデフォーカス PSF 同士の相関が高い．この相関を減少させることができれば，より安定な DFD を実現できる．

この問題を解決するために，瞳面での光学変調によりデフォーカス PSF の特性を制御する手法が提案されている．Greengard らは，回折光学素子によりデフォーカスに応じて回転しながら変化する二重螺旋型回転 PSF を実装し，デフォーカス PSF 間の相関を減少させた [18]．Pavani らは DFD に最適設計された位相変調を導入することで，二重螺旋 PSF を高い光量で実装する手法を提案した [113, 114, 115]．この技術は三次元超解像顕微鏡に応用されている [116]．このような PSF 変調は位相変調だけでなく振幅変調によっても実装されている [117, 49]．Levin らは符号化開口を用いることで，デフォーカスに応じて零交差位置が急峻に変化する OTF を実装し，安定な DFD を実現した [49]．この技術は，マシンビジョン等に応用されている．他にも，プリズムを用いる実装法 [118] や拡散板を用いる実装法 [119] 等が提案されている．

ディジタル超解像イメージング

回転対称な結像系における PSF は回転対称な空間分布を持つ．このような PSF は，空間的に高い自己相関を持つ．一方，結像系にランダム位相板を挿入することで，より細かい構造に分割された非対称な PSF を実装できる．このようなランダム位相板を適切に設計することで，サブ画素サイズの構造を含み，かつ空間的な自己相関が低い PSF を実装できる．Focal plane coding と同様にサブ画素情報を符号化取得することができるため，式 (1.1) で表される撮像の逆問題を解くことで，センサのナイキスト周波数を超える情報を持つ画像を復号できる．Ashok らは，この考えに基づいたディジタル超解像画像イメージング法を提案した [52]．概念図を Fig. 1.6(c) に示す．瞳面の後側の光学素子は，ランダム位相板を模式的に表した素子である．用いられるランダム位相板は，逆問題が良条件と

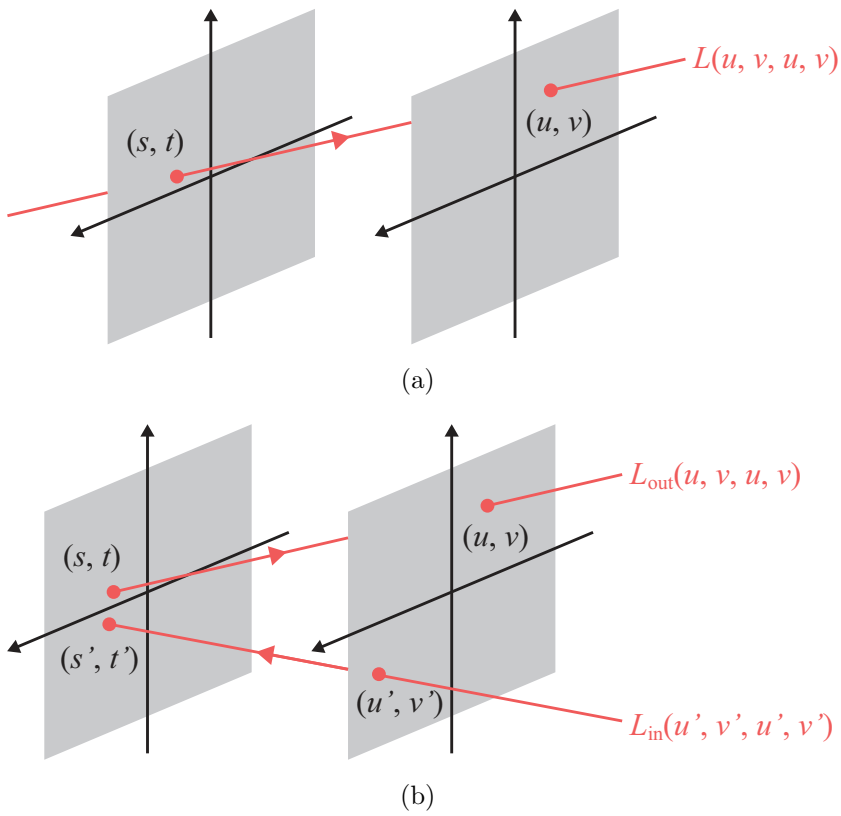


Fig. 1.7　Parameter definition for expressing (a) four-dimensional LF and (b) eight-dimensional RF.

なるよう最適設計される [120, 52]．

1.4.2　ライトフィールドイメージング

プレノプティック関数は光線の伝搬を表現する数学モデルとして知られ，光の出射位置と伝搬方向を次元量に持つ四次元関数として定義されている [17]．プレノプティック関数で表現される光線の集合はライトフィールド (LF) と呼ばれる．光線は Fig. 1.7(a) のように，通過する二平面の座標 (s,t) 及び (u,v) を用いて $L(s,t,u,v)$ と表現できる [121]．LF を計測し，それを再構成することで物体画像を取得する CI 技術はライトフィールドイメージング (LF イメージング) と呼ばれる [17, 122]．概念図を Fig. 1.8 に示す．LF イメージングシステムでは，アレイ光学系により LF を取得し，その後計算機上で光線を投影することで単一の画像を形成する．一般的な結像系は，ある物点から拡散した光を全て同じ像点に写すよう設計されるため，光の伝搬経路に関する情報，すなわち LF は取得できない．一方，撮像の走査や，カメラアレイ [123]，視野重複型複眼光学系 [124, 68]，符号化開口を用いた撮像 [125] により，LF を取得することができる．LF は四次元の次元数を持つ情報で

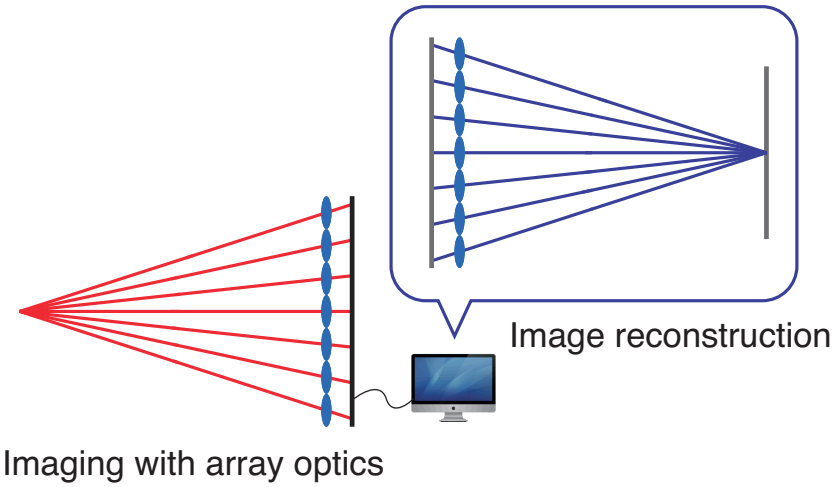


Fig. 1.8 Schematic diagram of LF imaging.

あるため，単一の二次元画素アレイで計測する際，空間解像度や撮像時間が犠牲となる．しかし，三次元情報やスパース性等対象に関する先見情報を利用した再構成処理により，損失された空間解像度を復元することができる [126, 127]．

LF を取得後，LF を光線追跡により再構成することで像を形成できる．Fig. 1.8 から示唆されるように，LF イメージングは光学結像の一部を仮想化したものと見ることができる．光線追跡に用いる仮想像面の位置や形状，仮想開口のサイズや位置を変更することで，撮像の結像距離や F 値，視点等を変更できる [128, 76]．すなわち，撮像後の計算により柔軟に結像パラメータを変更できるイメージングが実現できる．この仮想化の効果は，撮像の際のパラメータ調節 (結像距離，視点，F 値等) を省略できるだけでなく，現在の技術では物理実装不可能な撮像系 (自由形状を持つセンサ等) を実現できる点でも価値がある．

物体を照射する任意の LF と物体から反射される任意の LF の関係はリフレクタンスフィールド (RF) と呼ばれる八次元関数で表現できる [50]．RF を表現するためのパラメータ定義を Fig. 1.7(b) に示す．八次元の次元量を持つ RF R は，対象に対する照射 LF L_{in} と反射 LF L_{out} を用いて次式で定義される．

$$R(s,t,u,v,s',t',u',v') = \frac{\mathrm{d}L_{\mathrm{out}}(s,t,u,v)}{\mathrm{d}L_{\mathrm{in}}(s',t',u',v')}. \tag{1.14}$$

RF を取得することで，計算により任意の照明及び撮像環境下での物体像を再構成できる．また，物理的に見れば，RF は内部散乱を含む物体の一般的な散乱特性を表現できる関数であるといえる．そのため，RF はコンピュータグラフィックスの精度向上 [50] や質感認知 [129] 等にも役立つ．RF は次元数の大きな情報であるため，各次元量を逐次的に計測す

る計測法は撮像時間の観点から現実的ではない．そのため，照明系及び撮像系のアレイ化 [130] や亀甲多面鏡の使用 [131]，二枚の符号化開口を用いた多重計測法 [51, 132] 等，効率的な計測技術の開発が進められている．

LF や RF を再現できるディスプレイが実現できれば，既存のディスプレイと比較してより現実の光の場に忠実な映像表現が可能となる．LF は計測系と同様に複眼光学系を用いて再生することができる．この原理は，インコヒーレント光源を用いた裸眼式三次元ディスプレイ技術として古くから研究されている [133, 134]．また，入射 LF (鑑賞空間の光線) と反射 LF (提示したい映像の光線) は同一の複眼光学系で計測及び表示ができる．提示映像の RF が既知であれば，この両 LF は式 (1.14) で示される RF を用いた演算により対応付けることができる．すなわち，単一の複眼光学系で提示物体の RF を再現するディスプレイが実現できる [135, 136]．これにより，鑑賞空間の照明にインタラクティブに応答するディスプレイを構成できる．

1.4.3　コンプレッシブイメージング

1.2 節で述べたように, センシング過程の逆問題が不良設定である場合, すなわち $N_f > N_g$ となる場合は，線形な解法を用いて原信号を再構成することは不可能である．つまり，推定原信号の唯一解を決定できず，現実的な精度及び計算時間での信号復元が保証できない．一方，原信号を基底変換によりスパースベクトルで表現でき，スパースベクトルの非零要素数 N_k が N_g より小である場合，逆問題を良設定に置き換えられることが知られている．すなわち，この変換後のスパースベクトルを推定することで，観測信号のデータ量を超える原信号を高精度に復元できる．このような対象のスパース性を利用したセンシング技術はコンプレッシブセンシング (CS) と呼ばれる [16, 137, 138]．一般的に，自然画像は幾つかの基底空間上でスパースベクトルとして表現できる [138]．CS に基づくイメージング技術はコンプレッシブイメージングと呼ばれ，CI の分野で近年盛んに研究されている．

自然画像のセンシング過程を線形システムとして表現した場合の概念図を Fig. 1.9 に示す．図では行列とベクトルの各要素の値を濃淡で表現した．対象がある基底空間上でスパースベクトルとして表現できる場合，式 (1.1) の撮像過程は次のように書き換えられる．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{g} &= \boldsymbol{H}\boldsymbol{f} \\ &= \boldsymbol{H}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\beta} \\ &= \boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\beta}. \end{aligned} \tag{1.15}$$

ここで，$\boldsymbol{\Phi} \in \mathbb{R}^{N_f \times N_{f'}}$ は基底変換行列であり，$\boldsymbol{\beta} \in \mathbb{R}^{N_{f'}} \times 1$ は基底空間上の対象ベクトル

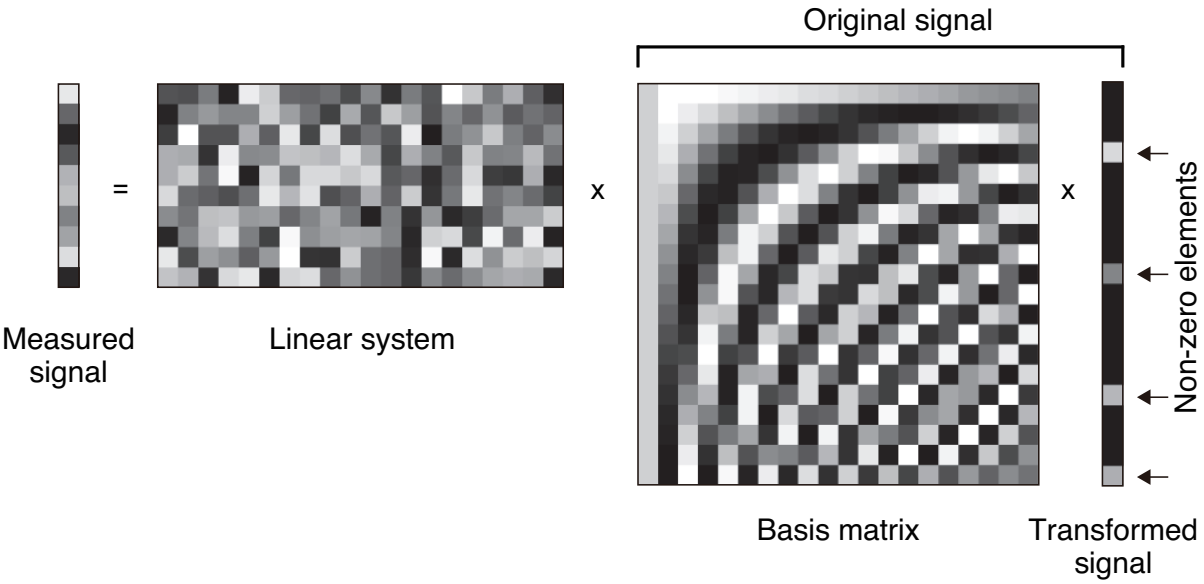


Fig. 1.9 Vector-matrix representation of sensing of a natural image.

である．対象が自然画像である場合，$\boldsymbol{\Phi}$ に離散コサイン変換行列や離散ウェーブレット変換行列等を選択することで，$\boldsymbol{\beta}$ はスパースベクトルとなる．Fig. 1.9 は離散コサイン変換によりスパースに表現できる自然画像の撮像過程を，行列とベクトルを用いて模式的に表現している．$\boldsymbol{\beta}$ における非零要素数が N_k に相当する．$\boldsymbol{\beta}$ の零要素に対応する Θ の列は計算に影響しないため，$N_k \leq N_g$ となる場合，良設定逆問題となる．ただし，再構成の際に非零要素の位置を知るのは困難である．そのため，次式の l_1 ノルム最小化問題を解くことでスパースベクトル $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ を推定する．

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\beta}} &= \underset{\boldsymbol{\beta}}{\operatorname{argmin}} \, ||\boldsymbol{\beta}||_1, \\ &\text{subject to } \boldsymbol{g} = \boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\beta}. \end{aligned} \tag{1.16}$$

ここで，$||\cdot||_1$ は l_1 ノルムを表す．ベクトル $\boldsymbol{x}$ の l_p ノルムは次式で定義される．

$$||\boldsymbol{x}||_p = \left(\sum_i |x_i|^p \right)^{1/p}. \tag{1.17}$$

ここで，x_i は $\boldsymbol{x}$ の i 番目の要素，p は実数である．

Fig. 1.10(a) に $N_k = N_g = 1$，$N_f = 2$ の場合の最適解の例を示す．式 (1.15) の逆問題は不良設定であるため，解候補は広がりを持つ．ベクトルの l_1 ノルムは各座標軸上で厚みを持つため，他のノルムと比較して解候補との接点が座標軸上で求まる可能性が高くなる．座標軸上の解はスパースベクトルであるため，CS の前提を満たす．一方，Fig. 1.10(b) の

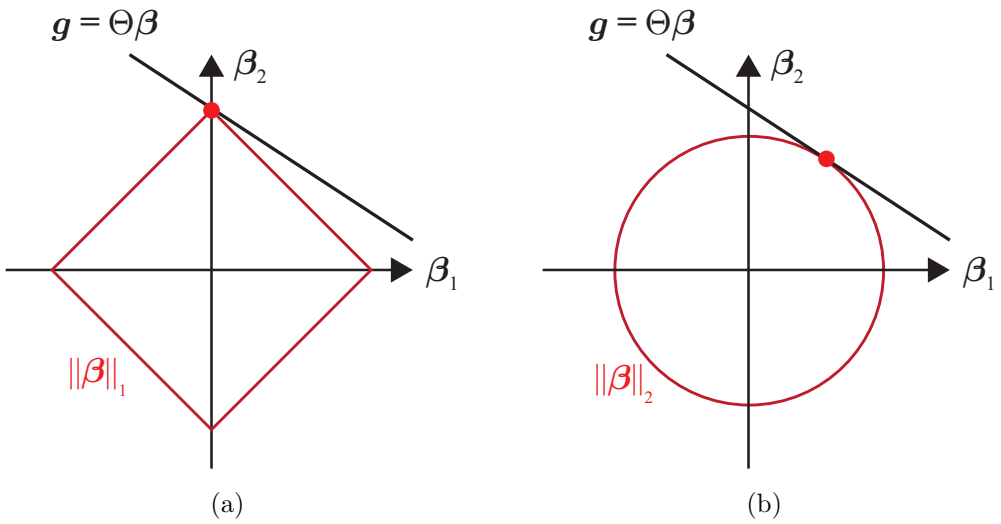


Fig. 1.10　Reconstruction of a vector with minimization of (a) l_1 and (b) l_2 norm.

l_2 ノルムの例のように，l_1 ノルム以外を最小化する場合は，スパース解が求まる可能性が低くなる．

また，安定な再構成を実現するためには，システム行列と基底変換行列の積 $\boldsymbol{\Theta}$ が Restricted isometric property (RIP) と呼ばれる条件を満たす必要がある [137]．RIP は次式で定義される．

$$(1-\epsilon)||\boldsymbol{\beta}||_2^2 \leq ||\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\beta}||_2^2 \leq (1+\epsilon)||\boldsymbol{\beta}||_2^2. \tag{1.18}$$

ϵ は $0 < \epsilon \leq 1$ となる実数定数である．$||\cdot||_2$ は l_2 ノルムと呼ばれる．RIP は任意ベクトル $\boldsymbol{\beta}$ の長さをどれだけ保存するかの指標である．ϵ が 1 に近い場合，行列 Θ は $\boldsymbol{\beta}$ の長さを保存しないため，良好な再構成ができない．ガウシアンランダム行列，ベルヌーイランダム行列，フーリエ変換行列のランダムサブセット行列等が，良好な RIP を達成できる行列として知られている．現実的には，システム行列 $\boldsymbol{H}$ がある程度のランダム性を含み，大まかに RIP を満足すれば，十分有用なコンプレッシブイメージングが実現できる [138]．コンプレッシブイメージングでは，この CS の前提を満たすセンシング過程をいかにして物理実装するかが中心的課題となる．

CS は単画素イメージングやディジタル超解像イメージング，多次元光学情報の一括取得等に応用されている．ディジタル超解像イメージングでは，SLM や散乱を利用してセンサのナイキスト周波数を超える像情報を符号化取得する．この情報をスパース再構成技術に基づき復号することで，超解像画像を取得する．例えば 1.3.5 節で述べた Single pixel

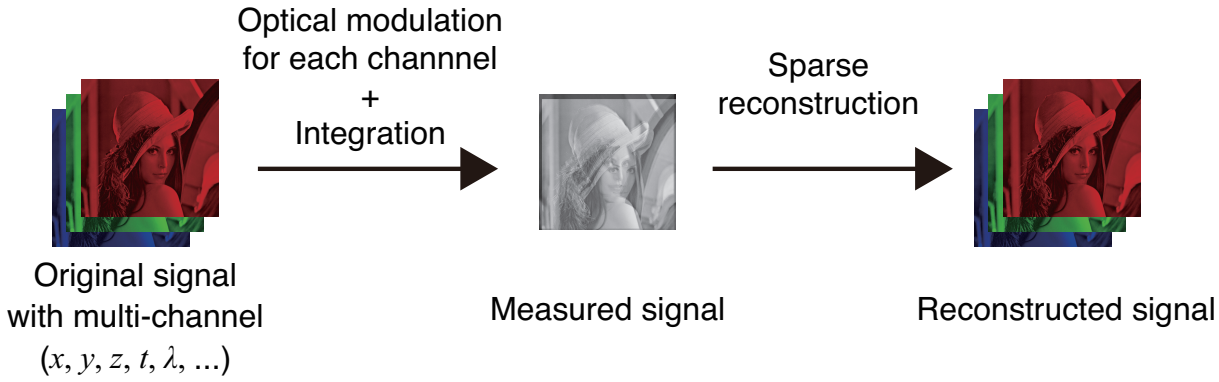


Fig. 1.11 Compressive sensing of multi-dimensional optical information.

imaging や 1.3.3 節で述べた Focal plane coding 等の基盤技術として用いられている．また，Fig. 1.11 のように，波長，偏光等様々な光学情報を光学系により独立に変調し，これらをセンサで多重取得し，これを復号することで多次元光学情報を一括取得する技術が提案されている [139, 140, 141]．

1.5 本論文における研究項目

本論文では，本章で示した CI の考え方及びその有用性に着目し，被写界深度及び視野拡大のためのイメージングシステムの構成法及び実装法を検討する．本論文の構成，及び本章で紹介した技術との関連を Fig. 1.12 に示す．本論文の具体的な研究項目は以下の通りである．

1. 重畳イメージングに基づく被写界深度・視野の拡大 (2，3 章)

1.3.5 節で導入した重複像眼を応用し，被写界深度と視野が同時に拡大された重畳イメージングシステムを構築する．重複像眼の光学設計に 1.3.5 節で示した対称化の考え方を適用することで広視野な系を実装しつつ，1.4.1 節の被写界深度拡大法の考え方を応用し被写界深度も同時に拡大する．この重畳イメージングのモデル構築及び光線追跡による原理実証を行う．また，重畳イメージングに関して，撮像系だけでなく投影系への適用を検討する．重畳投影系の原理確認を光学実験により行う．

2. LF イメージングに基づく位相変調の仮想化 (4 章)

1.4.2 節の LF イメージングの考え方を応用し，CI で多く用いられる位相変調光学系のより柔軟な実装法を検討する．1.3.2 節で触れた位相変調を仮想的に実装するための手法について，モデルの構築，設計条件の検討，光線追跡による性能評価を行う．LF 取得のための光学系の例として，1.3.5 節の複眼光学系の使用を想定する．1.4.1 節で紹介した位相変調に基づく被写界深度拡大法の仮想的実現に関して，光学実験による原理実証を行う．

3. 散乱体設計に基づくレンズレス広視野イメージング (5 章)

1.3.5 節のレンズレスイメージングの考え方に基づき，広視野イメージングシステムのより小型な実装法を検討する．非結像光学素子として散乱体を用い，散乱体の実効屈折率分布を積極設計することでシステムを広角化する．モデルの構築，設計条件の検討，光伝搬シミュレーションに基づく原理確認を行う．

1.6　結言

本章では，本論文で取り扱う研究に共通する基本的な概念である CI について説明し，既存研究をまとめ，本論文との関連を述べた．

1.2 節では，CI の考え方，モデル，特徴を示した．CI はイメージングシステムを光学センシング過程と信号処理過程を統合して最適設計するイメージングシステムの構成技術である．

1.3 節では，CI のための光学設計法を分類した．CI では，物体面変調，瞳面変調，像面変調，各面の走査，あるいは非結像光学系により伝搬光を変調し，後処理に最適化された像を取得する．

1.4 節では，CI の代表的な既存研究として，被写界深度拡大イメージング，ライトフィールドイメージング，コンプレッシブイメージングを紹介した．いずれも，光学情報の符号化取得と信号処理の組合せにより，既存のイメージングでは実現できない性能・機能を実現する点で意義がある．

1.5 節では，本論文の構成を本章で紹介した手法と関連付けながら整理した．本論文では，CI の考え方や要素技術を用いて，被写界深度及び視野の拡大，位相変調の仮想化，レンズレス広視野イメージングに関する検討を行う．

CI for extended depth-of-field (DOF)
and field-of-view (FOV)

Chapter 2, 3:
Superposition imaging for extended DOF and FOV

Related methods:
・Superposition compound eye imaging (Sec. 1.3.5)
・Monocentric optics (Sec. 1.3.5)
・Computational DOF extension (Sec. 1.4.1)

Chapter 4:
LF imaging for computational phase modulation

Related methods:
・LF imaging (Sec. 1.4.2)
・LF imager, especially compound-eye optics (Sec. 1.3.5)
・Phase modulation (Sec. 1.3.2)

Chapter 5:
Imaging with a designed disordered medium
for wide FOV

Related methods:
・Lensless imaging with a disordered medium (Sec. 1.3.5)
・Graded-index medium

Fig. 1.12 Structure of this dissertation and related methods introduced by this chapter.

第 2 章

重畳イメージングに基づく被写界深度・視野の拡大

2.1　緒言

収差は結像系の OTF を劣化させ，結果として系の視野や被写界深度を制限する要因となる [6]．収差は光学設計により抑制されることが一般的であるが，開口絞りを用いた場合 F 値が増加し，組レンズを適用した場合レンズ系の大型化が不可避となる [142]．信号処理による収差除去の手法も古くから研究されているが，不良設定逆問題を解く必要があるため，計算量の増加や解の不安定さが問題となる [102]．一方近年，CI の枠組みに基づきこの問題を解決する技術が研究されている．変調光学系による PSF の距離不変化とデコンボリューションによる被写界深度拡大技術 [20] や，点対称光学系の適用による視野拡大技術 [143] が提案されている．これらの技術は被写界深度あるいは視野を個別に拡張するのに有効であるが，物理空間は三次元空間であるため，これらを同時に拡大する技術が必要であるといえる．

本章では，被写界深度・視野の同時拡大のための，CI に基づく三次元収差除去技術について述べる．2.2 節では，既存の被写界深度・視野拡大技術についてまとめる．2.3 節では，これらを同時拡大するために，提案手法である重畳イメージングを導入する．2.4 節では，重畳イメージングをシングルショットで実装するために，重複像眼複眼光学系を導入する．2.5 節では，重複像眼を用いたイメージングに関して，理論的な性能解析を行う．2.6 節では，光線追跡に基づく原理実証シミュレーションの結果を示す．

2.2　CI に基づく被写界深度・視野の拡大

1.2 節で述べたように，インコヒーレント照明下でのイメージングは，光強度に関する線形システムとして表現できる．本章では，三次元的な収差の影響を表現するため，また

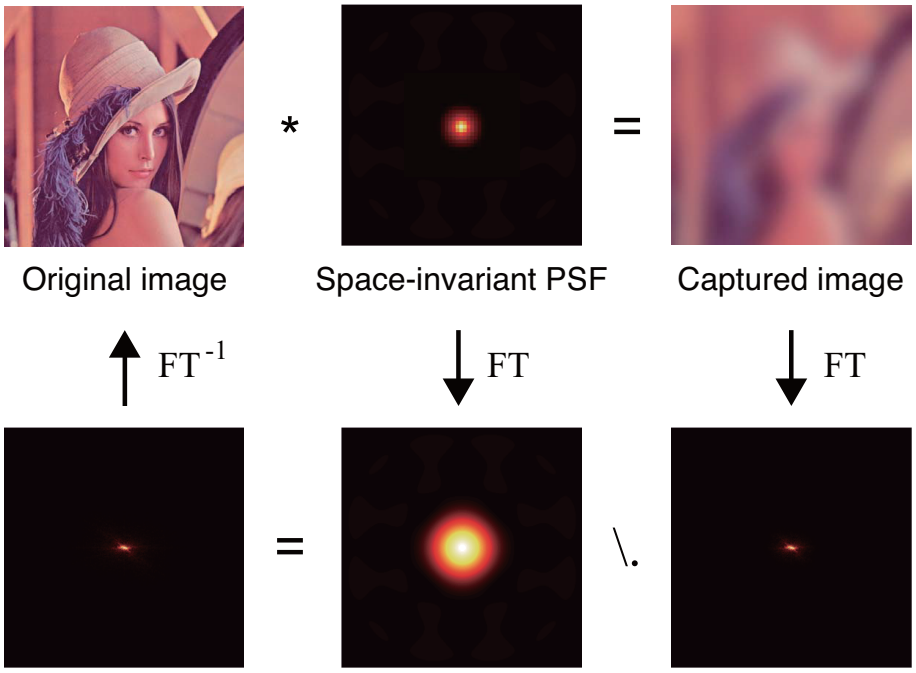


Fig. 2.1　Schematic diagram of deblurring by deconvolution and space-invariant PSF.

ノイズの影響を考えるため，式 (1.1) の撮像のモデルを次式で書きなおす．

$$\boldsymbol{g} = \boldsymbol{H}_{x_\mathrm{f},y_\mathrm{f},z_\mathrm{f}}\boldsymbol{f} + \boldsymbol{n}. \tag{2.1}$$

ここで，$\boldsymbol{H}_{x_\mathrm{f},y_\mathrm{f},z_\mathrm{f}}$ は，光軸と像面の交点に対する物体面側の像点座標が $(x_\mathrm{f}, y_\mathrm{f}, z_\mathrm{f})$ となるような光学系のシステム行列を表す．$\boldsymbol{n}$ はノイズ信号ベクトルを表す．ノイズを無視した場合，未知の無収差原画像 $\boldsymbol{f}$ を取得するためには，$\boldsymbol{H}_{x_\mathrm{f},y_\mathrm{f},z_\mathrm{f}}$ が単位行列となるような光学設計を行うか，式 (2.1) の逆問題を解く必要がある．レンズ系の使用を前提とする場合，デフォーカスや軸外収差等の三次元的な収差の影響を必ず受けるため，単位行列を実装する光学設計は存在しない．2.1 節で述べたように，光学設計によるアプローチでは F 値及び光学系サイズが犠牲となり，信号処理によるアプローチでは演算コストや解の安定性が犠牲となる [102]．

ここで，PSF が対象の三次元位置に関して不変であるような場合を考える．このような撮像環境下で未知の三次元物体を撮像した場合，取得画像は次式のように原画像と空間不変 PSF のコンボリューションと近似できる．

$$\begin{aligned}\bar{\boldsymbol{g}} &= \bar{\boldsymbol{H}}\boldsymbol{f} + \boldsymbol{n} \\ &= \bar{\boldsymbol{h}} * \boldsymbol{f} + \boldsymbol{n}.\end{aligned} \tag{2.2}$$

ここで，$\bar{\boldsymbol{g}}$ は PSF が空間不変である場合の取得画像，$\bar{\boldsymbol{H}}$ は空間不変 PSF を表現するシステム行列，$\bar{\boldsymbol{h}}$ は空間不変 PSF ベクトル，$\boldsymbol{f}$ は無収差の原画像である．PSF ベクトル $\bar{\boldsymbol{h}}$ は点光源に対する取得画像と等価である．畳み込み定理により，式 (2.2) はフーリエ空間上で下記のように要素積を用いて表現できる．

$$\bar{\boldsymbol{g}} = \mathcal{F}^{-1}\left[\mathcal{F}[\bar{\boldsymbol{h}}] \times \mathcal{F}[\boldsymbol{f}] + \mathcal{F}[\boldsymbol{n}]\right]. \tag{2.3}$$

ここで，$\mathcal{F}[\cdot]$ はフーリエ変換，$\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$ は逆フーリエ変換，$\times$ は要素積を表す．式 (2.3) の逆問題は良設定であり，次式のようにフーリエ空間上での画素毎の除算を用いて解析的に解くことができる．

$$\hat{\boldsymbol{f}} = \mathcal{F}^{-1}\left[\frac{\mathcal{F}[\bar{\boldsymbol{g}}]}{\mathcal{F}[\bar{\boldsymbol{h}}]} - \frac{\mathcal{F}[\boldsymbol{n}]}{\mathcal{F}[\bar{\boldsymbol{h}}]}\right]. \tag{2.4}$$

ここで，分数記号は要素ごとの除算を表す．

式 (2.4) はコンボリューションにより表現される撮像の逆問題を解く演算であるため，デコンボリューションと呼ばれる．ただし，ノイズ $\boldsymbol{n}$ は一般的に知ることの出来ない物理量であるため，式 (2.4) は直接的には計算出来ない．逆フィルタリングと呼ばれるデコンボリューション法では，ノイズを無視できるとみなし，次式を計算して逆問題の近似解を得る．

$$\hat{\boldsymbol{f}} = \mathcal{F}^{-1}\left[\frac{\mathcal{F}[\bar{\boldsymbol{g}}]}{\mathcal{F}[\bar{\boldsymbol{h}}]}\right]. \tag{2.5}$$

式 (2.5) はフーリエ空間上で OTF の逆数を用いて取得信号をフィルタリングする計算とみることができる．そのため，OTF の逆数は逆フィルタと呼ばる．ノイズを無視した場合の空間不変 PSF による撮像とデコンボリューションの関係を Fig. 2.1 にまとめる．このように PSF が空間不変である場合，物体の三次元情報が失われる代わりに，簡易な信号処理で無収差の原画像を復元できる．一方，デコンボリューションを適用するためには，PSF を空間不変化するための撮像法を検討する必要がある．

式 (2.4) 及び式 (2.5) に示されるように，デコンボリューションは OTF を分母とした除算を含む．そのため，OTF に零値が存在する場合，解が発散する．また，OTF に小さな値が存在する場合でも，フーリエ空間上でノイズ信号 $\mathcal{F}[\boldsymbol{n}]$ が増幅し，リンギング等のアーティファクトの要因となる．そのため，空間不変 PSF の実現と同時に，広い周波数領域で高い OTF 値を達成する光学設計が，良好なデコンボリューション結果を得るために重要である．ノイズの影響の抑制は，デコンボリューションアルゴリズムの工夫によっ

てもある程度達成できる．ウィナーフィルタリング [144] では，式 (2.5) の逆フィルタリングを次式に置き換える．

$$\hat{\boldsymbol{f}} = \mathcal{F}^{-1}\left[\mathcal{F}[\bar{\boldsymbol{g}}] \times \frac{\mathcal{F}^*[\bar{\boldsymbol{h}}]}{\left|\mathcal{F}[\bar{\boldsymbol{h}}]\right|^2 + \frac{\mathcal{F}[\boldsymbol{n}]}{\mathcal{F}[\boldsymbol{f}]}}\right]. \tag{2.6}$$

ここで，$\mathcal{F}^*[\cdot]$ は $\mathcal{F}[\cdot]$ の複素共役を表す．$\mathcal{F}[\boldsymbol{n}]/\mathcal{F}[\boldsymbol{f}]$ はフーリエ空間上での信号対雑音比 (SNR: Signal to Noise Ratio) の逆数に相当するため，一般的なウィナーフィルタリングでは発見的に SNR の固定値を設定して次式を計算する．

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{f}} &\approx \mathcal{F}^{-1}\left[\mathcal{F}[\bar{\boldsymbol{g}}] \times \frac{\mathcal{F}^*[\bar{\boldsymbol{h}}]}{\left|\mathcal{F}[\bar{\boldsymbol{h}}]\right|^2 + \frac{1}{\mathrm{SNR}}}\right], \\ \mathrm{SNR} &= \frac{P_{\mathrm{f}}^{\mathrm{F}}}{P_{\mathrm{n}}^{\mathrm{F}}}. \end{aligned} \tag{2.7}$$

ここで，$P_{\mathrm{f}}^{\mathrm{F}}$，$P_{\mathrm{n}}^{\mathrm{F}}$ はフーリエ空間上での原信号及びノイズの強度の分散である．PSF をシステム行列で表現する場合は，式 (2.6) は次のように書ける．

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{f}} &\approx \left(\boldsymbol{H}^t\boldsymbol{H} + \frac{1}{\mathrm{SNR}}\boldsymbol{I}\right)^{-1}\boldsymbol{H}^t\boldsymbol{g}, \\ \mathrm{SNR} &= \frac{P_{\mathrm{f}}^{\mathrm{S}}}{P_{\mathrm{n}}^{\mathrm{S}}}. \end{aligned} \tag{2.8}$$

ここで，$\boldsymbol{I}$ は単位行列，$P_{\mathrm{f}}^{\mathrm{S}}$，$P_{\mathrm{n}}^{\mathrm{S}}$ は実空間上での原信号及びノイズの強度の分散である．ウィナーフィルタリングで得られる解は，数学的には式 (1.5) の最小二乗平均誤差法の解に相当する．

このように，PSF の空間不変性が仮定できれば，非反復の演算で推定原画像を得ることができる．一方，敢えて式 (1.5) や式 (1.9) の最適化問題を反復的に解くことで，画質や対雑音性を高めることも可能である．推定解と PSF のコンボリューションと取得画像の差を最小化する手法は Iterative Back Projection (IBP) 法と呼ばれる [145]．比を 1 に近づける，すなわち推定解の尤度を最大化する手法は 1.2 節で述べた RL 法に相当する．スパース性や非負性等，対象に関する先見情報をコスト関数内に拘束項として付加できるため，より高精度な画像復元が行える [146]．一方，反復アルゴリズムを用いるため演算コストは増加する．

1.4.1 節で述べたように，三次位相板や球面収差強調レンズ等，様々な光学素子を用いた距離不変 PSF の実装法が提案されている．このような光学系とデコンボリューションを統合することで，被写界深度拡大イメージングが実現できる．また，点対称光学系を用いることで軸外不変 PSF を実装でき，広視野イメージングが実現できる．一方既存研究

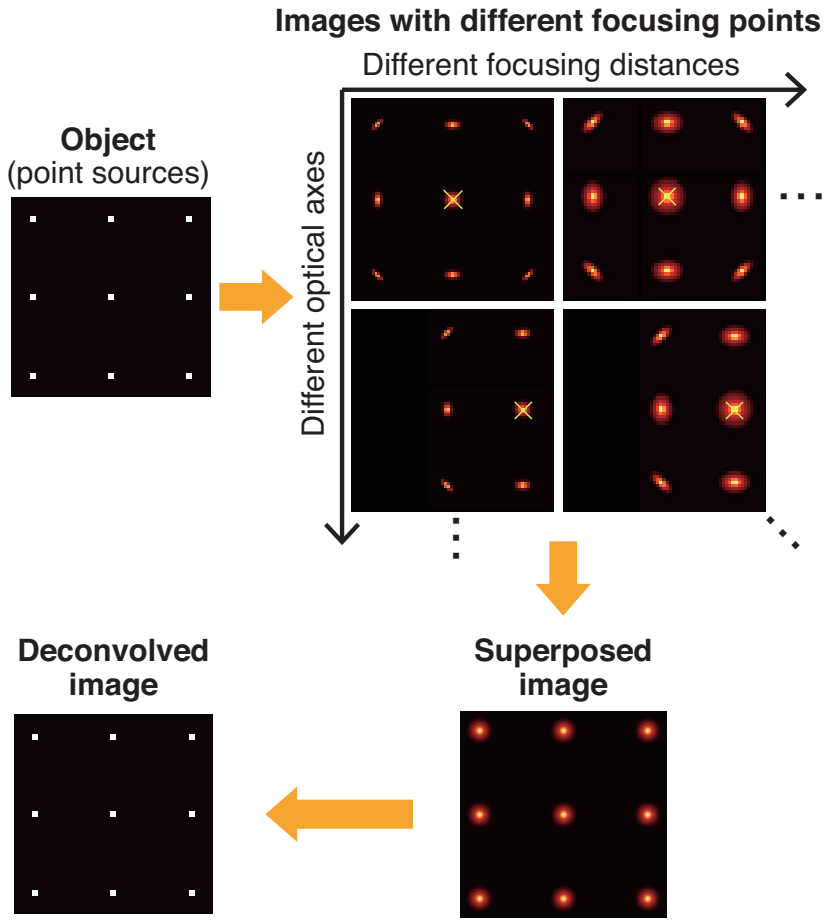


Fig. 2.2 Schematic diagram of computational superposition imaging.

では，PSF の距離変化あるいは軸外方向変化を個別に不変化することが目的とされてきた．しかし，実際の物理空間は三次元であるため，視野を近軸に限定するか，対象距離範囲を制限する必要があった．三次元的な物理空間を鮮明に撮像するためには，PSF の三次元的な変化を不変化する撮像システムの設計が必要であるといえる．

2.3 重畳イメージングに基づく被写界深度・視野の同時拡大

本章では，像の重畳により PSF の三次元変化を同時に不変化する手法を提案する [22]．提案手法である重畳イメージングの概念図を Fig. 2.2 に示す．光軸位置及び結像距離の異なる撮像条件で得られる像を重畳することで，PSF の三次元変化を平均化する．得られる重畳画像は原画像と空間不変 PSF のコンボリューションと近似できるため，デコンボリューションにより三次元物体の鮮明な像を復元できる．すなわち，被写界深度が深く視野の広いイメージングを少ない計算量で実現できる．重畳画像取得は，式 (2.1) において

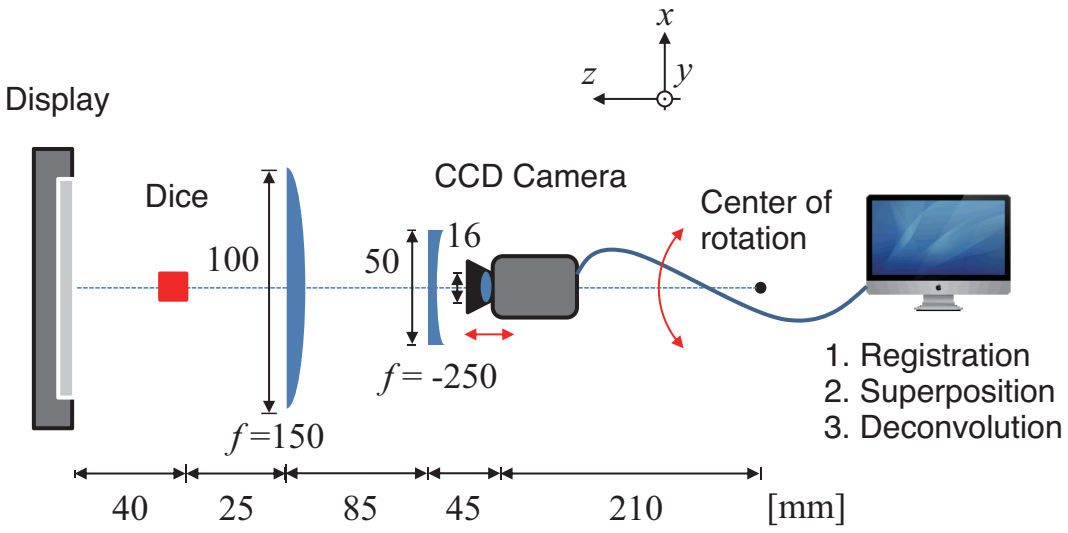


Fig. 2.3　Setup for experimental verification of computational superposition imaging with mechanical scanning.

$(x_\mathrm{f}, y_\mathrm{f}, z_\mathrm{f})$ を変えながら得た像を重畳することに相当する．ノイズを無視した場合，重畳画像取得は次式でモデル化される．

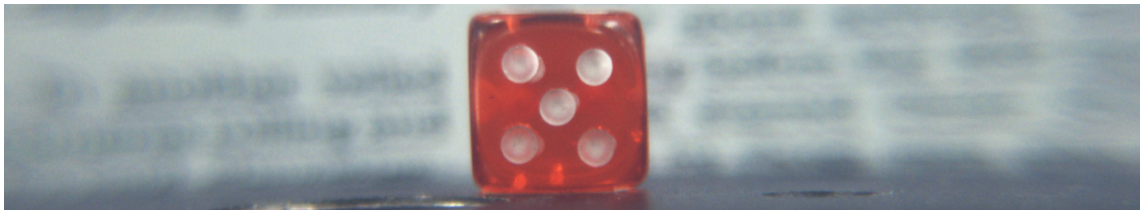
$$\begin{aligned}\bar{\boldsymbol{g}} &\approx \sum_{x_\mathrm{f}}\sum_{y_\mathrm{f}}\sum_{z_\mathrm{f}} \boldsymbol{g}_{x_\mathrm{f},y_\mathrm{f},z_\mathrm{f}} \\ &= \sum_{x_\mathrm{f}}\sum_{y_\mathrm{f}}\sum_{z_\mathrm{f}} \boldsymbol{H}_{x_\mathrm{f},y_\mathrm{f},z_\mathrm{f}} \boldsymbol{f}.\end{aligned} \tag{2.9}$$

式 (2.9) で表される重畳イメージングは，最も簡単には結像光学系の機械的な走査により実装できる [23]．走査に基づく実装では，光学系の光軸及び結像距離を変えながら対象の撮像を繰り返し，得られた取得画像群を計算機上で位置合わせし，それらを平均化することで重畳画像を得る．この手法に基づく重畳イメージングの原理実証を Fig. 2.3 の実験系を用いて行った．光学系の前方に，三次元物体として文章を表示した液晶ディスプレイ (LCD: Liquid-Crystal Display) とサイコロを配置した．撮像デバイスとして，カラー CCD カメラ (CoolSNAP$_{cf}$ by Photometrics) を用いた．収差未補正のレンズによる撮像を模擬するために，カメラの前方に収差強調用の口径の大きな凸レンズを配置した．また，画角を拡大するために，カメラの前方に凹レンズを配置した．レンズ系の主点で光学系全体を回転させることで，視差が対象距離に対して不変となるよう光軸を走査した．結像距離の走査はカメラに配置した結像レンズ位置の制御により実装した．実験の簡略化のため，Fig. 2.3 の y 軸方向の収差変化は近軸領域のみ撮像することで無視した．ただし，撮像系は回転対称であるため，x 軸に対する実証結果は y 軸においても同様に成立す

る．取得画像群は計算機上で位置合わせ及び重畳され，重畳画像は 13.0dB の SNR を仮定したウィナーフィルタによりデコンボリューションされた．本実験では，フィルタ生成に用いる PSF (重畳 PSF) は点光源の重畳画像を実験的に得ることにより取得した．原理的には，撮像系のパラメータ及び走査範囲が既知であれば，重畳 PSF は数値的に求めることもできる．

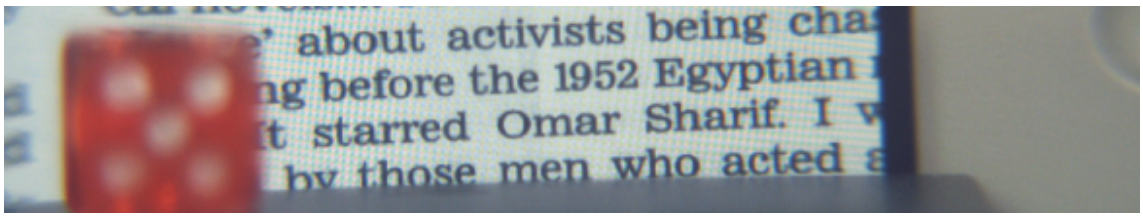
実験結果を Fig. 2.4 に示す．サイコロの前面にフォーカスした単一撮像画像を Fig. 2.4(a) に示す．デフォーカスによる被写界深度制限によりディスプレイ面が，軸外収差による視野制限により周辺視野が劣化している．結像距離を変化させた後の撮像画像を Fig. 2.4(b) に示す．Fig. 2.4(a) とは異なり，ディスプレイ面にフォーカスした画像が得られたが，被写界深度制限によりサイコロの像が劣化した．実験では結像距離は賽子面とディスプレイ面の 2 距離を走査した．光軸はレンズ系の主点を中心とする光学系の回転により走査した．Fig. 2.4(c) に光軸走査後の撮像画像の例を示す．Fig. 2.4(b) における周辺視野が撮像の光軸位置となることで鮮明化されたが，代わりに Fig. 2.4(b) の近軸領域が軸外収差により劣化した．光軸は Fig. 2.4(a) の視野内を等間隔に 29 点走査した．得られた取得画像群は，各カメラ内局所座標と世界座標の対応関係が一致するよう計算機上で位置合わせを行った．位置合わせ後重畳処理を行った画像を Fig. 2.4(d) に示す．対象の三次元位置に依らず均一なボケ方をした画像が確認された．重畳画像のデコンボリューション結果を Fig. 2.4(e) に示す．三次元物体の全距離及び全視野に合焦した画像の生成が確認された．すなわち，被写界深度及び視野が良好に拡大された画像の生成を確認した．賽子の周辺領域に発生したアーティファクトは，光軸走査により発生した遮蔽領域に起因するものと考察される．遮蔽領域は光学系に対して極端に小さな物体が系の近接領域に存在する場合に発生するが，多くの一般的な撮像環境ではこの影響は無視できると考えられる．

以上より，式 (2.9) の重畳イメージングによる被写界深度・視野拡大が実験的に実証された．三次元物体の鮮明な撮像が実現できるだけでなく，収差を含む簡易な光学系での鮮明なイメージングにも役立つ．一方，このような光学系の機械走査に基づく重畳イメージングの実装法では複数回の撮像が必要となるため，動く物体に対するイメージングが困難となる．そこで本研究では，重複像眼を用いて走査と重畳を光学結像に置き換えることで，シングルショットの重畳イメージングを実装する．



(a)

(b)



(c)

(d)

(e)

Fig. 2.4　Results of experimental verification. (a) A single captured image focusing on a frontal object. Examples of captured images during the scan of (b) focusing distance and (c) optical axis. (d) A superposed image of 58 captured images after registration, and (e) a deconvolved image of the superposed image.

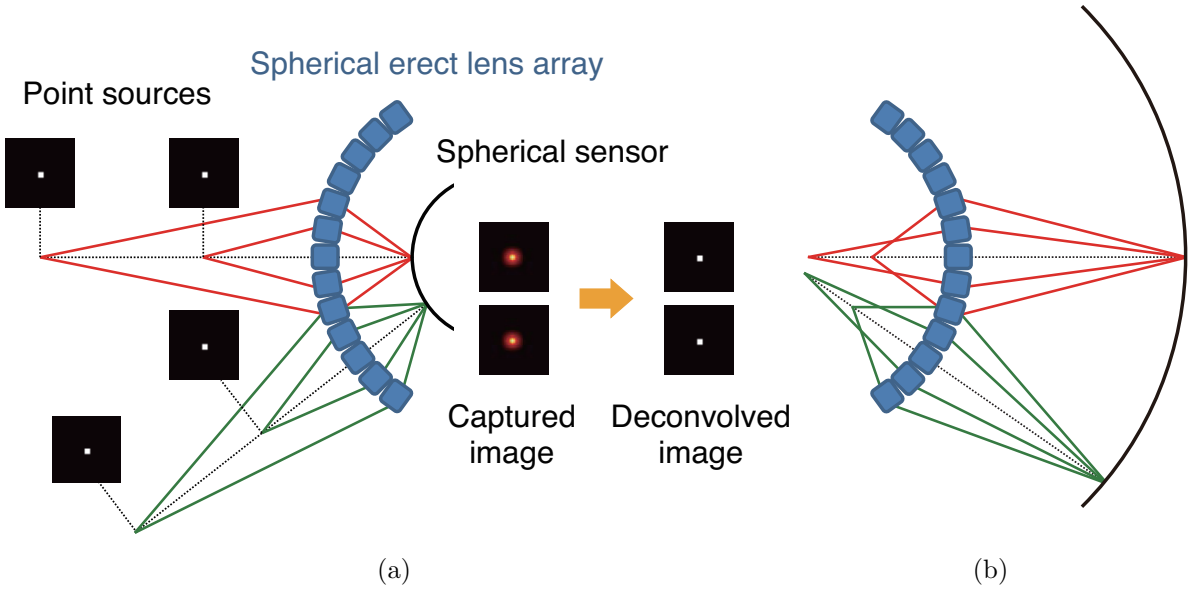


Fig. 2.5 Schematic diagram of single-shot computational superposition imaging based on spherical superposition compound eyes with (a) positive and (b) negative curvatures.

2.4 重複像眼複眼光学系を用いたシングルショット化

1.3.5 節で述べたように，複眼光学系は薄型の光学系実装を実現し，高解像度を達成でき，高い光学系の設計自由度を有する特徴を持つ．中でも正立結像光学系アレイにより構成される重複像眼は，連立像眼と比較して光量及びカットオフ周波数に優れる特徴を持つ．一方，球面の形状を持つ重複像眼では，球面収差により OTF が劣化することが知られている．従来研究により，重複像眼の光学分解能は，要素光学系による回折ではなく複眼光学系全体の収差により制限されることが知られている [61]．しかし，球面収差による OTF 劣化はデコンボリューションにより回復できる [105]．そのため，重複像眼と信号処理を統合することで，広い視野，高い光量，高い光学分解能を達成しつつ鮮明な像を取得できる撮像系を実装できると考えられる．

従来，球状重複像眼における球面収差は，要素光学系間に視差バリアを挿入することで抑制されていた [85]．一方，球面収差は OTF を劣化させつつも像の伝達情報量自体は損失しないこと [147]，光線の結像位置を分散させるため PSF の距離不変化に寄与すること [105] が知られている．そこで本研究では，被写界深度拡大イメージングを前提とし，重複像眼の球面収差をデコンボリューションで除去する．そのため，従来視差バリアで光学的に抑制されていた光線のクロストークを積極利用する．これにより，重複像眼の利点である光量の高さを最大限に活かしつつ，被写界深度の深いイメージングが実現できる．また，球

状構成された重複像眼は点対称光学系であるため，PSF が画角不変となる．つまり，単一の光学系で被写界深度と視野を同時に拡大できる．

提案手法の概念図を Fig. 2.5 に示す．図の像面は曲面状のセンサ，結像素子は正立結像レンズを表す．破線は光軸，線分は系を介して伝搬する光線の軌道を表す．図では物体は点光源とし，その取得画像として PSF を表現している．提案手法では，正立結像光学系の球状配置と球面イメージセンサにより生物の重複像眼を模擬した撮像系を構成する．Fig. 2.5(a) の光線で示されるように，球面収差の効果により，複数の結像距離で得られる像がセンサ上で重畳取得される．また，光学系の対称性により，この重畳が全ての画角で達成される．重畳画像は式 (2.9) のように三次元物体と三次元空間不変 PSF の畳み込み積分と近似できるため，デコンボリューションにより鮮明な像が復元できる．つまり，重畳イメージングをシングルショットで実現できる．本研究は広視野化を目的としているため，重複像眼を Fig. 2.5(a) のように正の曲率により球状構成するが，原理的には Fig. 2.5(b) のように負の曲率で設計することも可能である．この場合倍率が 1 より大となる撮像系が構成され [85]，微小物体を撮像する顕微鏡等への応用に適した設計となる．

本研究では，正立結像光学系として屈折率分布 (GRIN: GRaded INdex) レンズを想定する．また，対称光学系の構成のために球面のセンサの使用を想定する．球面センサは現在商用化されていないものの，様々な手法に基づく物理実装法が報告されている [148, 149]．あるいは，平面センサのアレイ化により近似的に球面センサを表現することも可能である [143, 89]．

2.5　性能解析

球状重複像眼を用いたイメージングをモデル化し，被写界深度拡大効果を解析する．Fig. 2.6 に解析に用いるパラメータ定義を示す．正立結像レンズアレイとセンサは球状に構成され，共通の中心を持つ．解析のため，アレイ光学系は厚みや長さのない理想正立結像レンズにより構成されるとする．すなわち，無限小の無収差正立結像レンズが無限個球面状に構成されているとする．Fig. 2.6 のように，一つのレンズを選択し，その光軸をシステムの光軸と定義する．システムは点対称であるため，システム光軸を定義するためのレンズは任意に選択できる．システム光軸を基準とした時の配置角が同じであるレンズペアは，特定の距離にフォーカスする結像を行う．レンズペアの配置角ごとに，結像距離は異なる．つまり，一度の撮像の中で結像距離が光学的に走査される．そのため，取得画像は物体と距離不変 PSF のコンボリューションで表現される画像となる．取得画像をデ

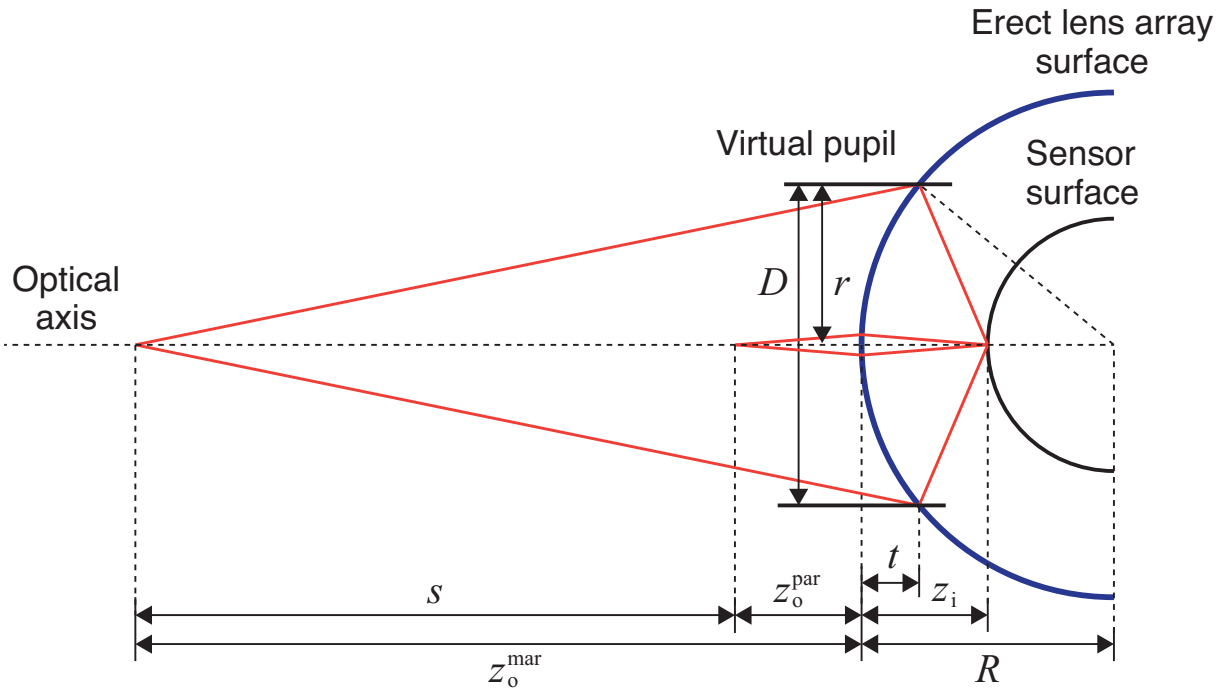


Fig. 2.6 Parameters definition of the imaging with spherical superposition compound-eye using a spherical array of ideal erect lenses.

コンボリューションすることで，走査距離範囲内の鮮明な画像を回復できる．すなわち，被写界深度の深い画像を取得できる．また，この被写界深度拡張効果は，任意のレンズをシステム光軸にとった場合で成り立つため，PSF は画角不変となる．そのため，イメージングの被写界深度と視野が同時に拡大される．視野は原理上全方位にまで拡張できる．

達成される実効的な被写界深度は，結像距離の走査範囲 s で制限される．走査範囲 s は，Fig. 2.6 に示すように，システム全体の最近軸光線と参照光線で決定される．参照光線は，重複像眼を単一結像系とみなした場合の実効的な開口 (仮想開口) により制限される．仮想開口は，GRIN レンズの口径食やレンズ間の視差バリアにより決定される．ここで，仮想開口の直径を D と置く．

点光源がレンズから $z_o \in (0, \infty)$ の距離のシステム光軸上にある場合を考える．点光源は参照光線により z_i^{mar} の位置に結像するとする．z_i^{mar} は幾何計算から次のように求まる．

$$z_i^{mar} = \frac{(z_o + t)(R^2 - 2r^2) - 2r^2\sqrt{R^2 - r^2}}{(R^2 - 2r^2) + 2(z_o + t)\sqrt{R^2 - r^2}} + t. \tag{2.10}$$

ここで，R はレンズ面の曲率半径，r は仮想開口の半径，t は参照光線を通すレンズと最近軸光線を通すレンズ間のシステム光軸上の距離を表す．また，$r = D/2$，$t = R - \sqrt{R^2 - r^2}$ である．ただし，$r \leq R/\sqrt{2}$ である．システムの焦点距離 f は式 (2.10) において $r \to 0$，

$z_{\mathrm{o}} \to \infty$ とすることで次のように求まる．

$$f = \frac{R}{2}. \tag{2.11}$$

最近軸光線の像面結像位置 $z_{\mathrm{i}}^{\mathrm{par}}$ は近軸近似により，

$$\begin{aligned} z_{\mathrm{i}}^{\mathrm{par}} &= \frac{z_{\mathrm{o}} f}{z_{\mathrm{o}} + f} \\ &= \frac{z_{\mathrm{o}} R}{2 z_{\mathrm{o}} + R}, \end{aligned} \tag{2.12}$$

となる．$z_{\mathrm{i}}^{\mathrm{par}}$ は D により変化しない．そのため，解析ではイメージセンサの像面配置位置 z_{i} を $z_{\mathrm{i}}^{\mathrm{par}}$ に固定する．つまり，

$$z_{\mathrm{i}} = z_{\mathrm{i}}^{\mathrm{par}}, \tag{2.13}$$

とする．レンズ面とセンサ面の中心は共通であるため，Fig. 2.6 に示される参照光線による結像距離 $z_{\mathrm{o}}^{\mathrm{mar}}$ と最近軸光線による結像距離 $z_{\mathrm{o}}^{\mathrm{par}}$ はレンズの公式からそれぞれ次のように求まる．

$$z_{\mathrm{o}}^{\mathrm{mar}} = \frac{(z_{\mathrm{i}} - t)(R^2 - 2r^2) + 2r^2\sqrt{R^2 - r^2}}{(R^2 - 2r^2) - 2(z_{\mathrm{i}} - t)\sqrt{R^2 - r^2}} - t, \tag{2.14}$$

$$z_{\mathrm{o}}^{\mathrm{par}} = \frac{z_{\mathrm{i}} f}{-z_{\mathrm{i}} + f} = \frac{z_{\mathrm{i}} R}{-2 z_{\mathrm{i}} + R}. \tag{2.15}$$

結像距離の走査範囲 s は次のように表すことができる．

$$s = z_{\mathrm{o}}^{\mathrm{mar}} - z_{\mathrm{o}}^{\mathrm{par}}. \tag{2.16}$$

ここで，像側 F 値 $F_{\mathrm{i}}/\#$ を次のように定義する．

$$F_{\mathrm{i}}/\# = \frac{z_{\mathrm{i}}}{D}. \tag{2.17}$$

式 (2.14)–式 (2.16) に示されるように，レンズ面の曲率半径 R が小さいほど，あるいは仮想開口系 D が大きいほど，走査範囲 s は増加する．つまり，F 値 $F_{\mathrm{i}}/\#$ が小さいほど走査範囲 s が大きくなる．

システムが達成できる実効的な拡張被写界深度は結像距離の走査範囲 s で制限される．物体面の機械走査に基づく被写界深度拡大法の従来研究により，走査に基づき PSF を距離不変化する場合走査範囲の半分程度が実効的な被写界深度として保証できることが知られている [54]．また，OTF 値の大きさは走査範囲に逆比例する．2.2 節で述べたように，低い OTF 値は最終画像のノイズを増幅する要因となる．

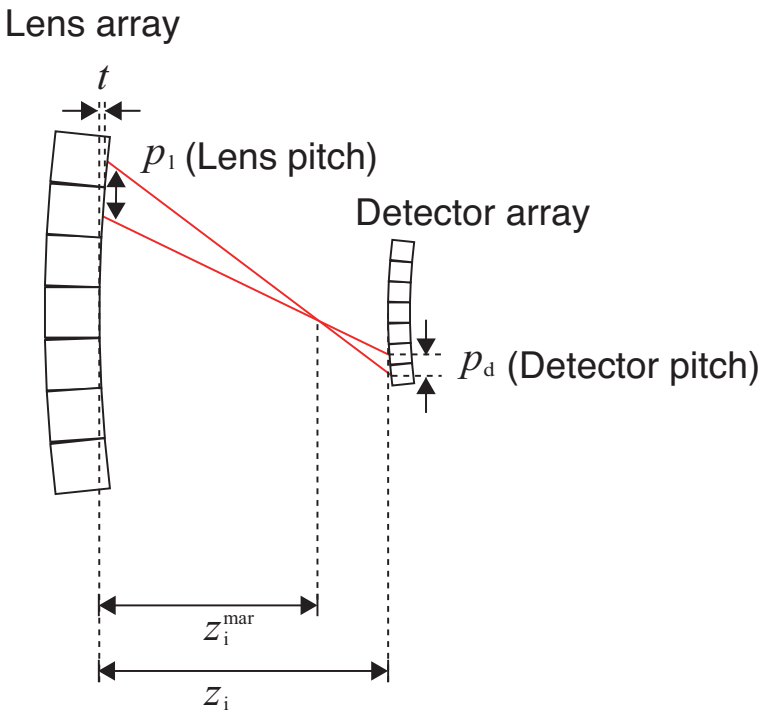


Fig. 2.7 Geometrical relation between the pitches of the erect lenses and detectors.

レンズピッチは結像距離及び光軸走査のピッチに影響する．有限の幅を持つ GRIN レンズのアレイを，これまで解析した理想的なレンズアレイに近似するためには，各画素が少なくとも一つ以上の主光線を受光する必要があると考えられる．Fig. 2.7 にこの幾何関係を示す．レンズ配置の離散化に伴う光線の欠落は OTF の劣化の要因となる [83]．ここでレンズピッチと画素ピッチをそれぞれ p_l，p_d と置く．球面レンズ面及びセンサ面を平面近似した場合，レンズピッチ条件は幾何計算から次のように見積もれる．

$$p_l \leq \frac{(z_i^{mar} - t)\, p_d}{z_i - z_i^{mar}}. \tag{2.18}$$

このレンズピッチ設計条件の影響は次節のシミュレーションで検証する．

2.6 光線追跡に基づく原理実証

光線追跡シミュレーションにより重複像眼の性能評価を行った．光学系の対称性による視野拡大効果は自明であるため，シミュレーションでは被写界深度拡張効果を検証した．理想正立結像レンズアレイと GRIN レンズアレイの結像性能を数値解析し，これらの結果を比較することで離散化の影響を同時に検証した．

Table 2.1　System parameters in simulations.

Parameter	Value
R	40 [mm]
z_{o}	200 [mm]
z_{i}	18.2 [mm]
λ	550 [nm]

Table 2.2　Parameters of GRIN lenses in simulations.

Parameter	Value
Diameter	80 [μm]
Length	400 [μm]
n_0	1.680146
n_{d2}	-52.17832
n_{d4}	1.324279×10^3
n_{d6}	-3.153335×10^4
n_{z1}	0.106156
n_{z2}	-1.597248
n_{z3}	5.202791

シミュレーションに用いるシステムパラメータを Table 2.1 に示す．ここで λ は波長を表す．数値シミュレーションでは OTF を計測できないため，代わりに OTF の絶対値である変調伝達関数 (MTF: Modulation Transfer Function) を計測する．二種のレンズアレイの MTF のデフォーカス特性を，仮想開口系 D，すなわち F 値 $F_{\mathrm{i}}/\#$ を変えながら取得する．センサの曲率半径は 20mm とした．

シミュレーションでは，GRIN レンズの屈折率分布を次式でモデル化した．

$$n = n_0 + n_{\mathrm{d2}}d^2 + n_{\mathrm{d4}}d^4 + n_{\mathrm{d6}}d^6 + n_{\mathrm{z}}z + n_{\mathrm{z2}}z^2 + n_{\mathrm{z3}}z^3. \tag{2.19}$$

ここで，d は中心軸を原点とする軸外方向距離，z は入射瞳を原点とする軸上距離，n_{variable} は屈折率係数である．各屈折率系数は，個別の GRIN レンズの収差を抑制するよう最適化して得た．最適化では，コスト関数をザイデル収差の大きさとスポット径の二乗平均平方根により構成し，これを最小化した．物理実装を想定し，屈折率の取りうる値を 1.6 から 1.8 の間に拘束した．得られた系数を Table 2.2 に示す．GRIN レンズの直径は，Table 2.1

のシステムパラメータ，$p_{\mathrm{d}} = 8\mu\mathrm{m}$，$D = 20\mathrm{mm}$ を仮定した状態で設計条件式 (2.18) を満たすよう決定した．なお，条件式から取りうるレンズ直径の上限は $88.6\mu\mathrm{m}$ である．

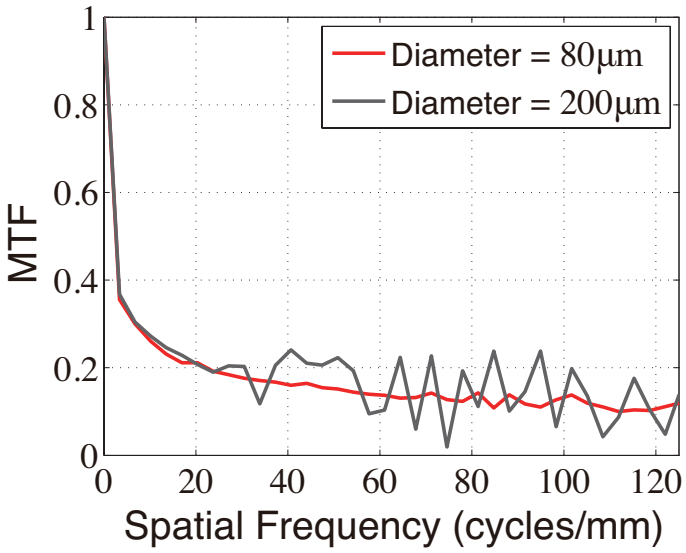


Fig. 2.8 MTFs of GRIN lens arrays with different diameters.

初めに，レンズピッチがMTFに与える影響を調べるため，レンズピッチの異なるGRINレンズアレイのMTFを光線追跡ソフトウェアZemaxを用いた光線追跡により取得した．結果をFig. 2.8に示す．$p_{\mathrm{l}} = 80\mu\mathrm{m}$ の場合，$p_{\mathrm{l}} = 200\mu\mathrm{m}$ の場合と比較して滑らかなMTFが得られた．これは，前者が設計条件式 (2.18) を満たし，後者が満たさないためであると考えられる．

次に，重複像眼の透過光線をZemaxを用いた光線追跡により取得し，系の定性的な結像特性を確認した．$D = 20\mathrm{mm}$ のGRINレンズアレイを用いた光線追跡で得られた光線をFig. 2.9に示す．Fig. 2.9(a) は系を透過する光線をいくつか抜粋し，系全体を俯瞰した図である．重複像眼が巨視的には単一の正立結像光学系に類似した結像特性を有していることを示している．Fig. 2.9(b) はGRINレンズを透過する光線を示している．生物の重複像眼と同様に，GRINレンズ内で一度光線を結像させることで正立結像を実装している．正立結像はレンズに対する光線入射角と出射角を同じ方向に揃える効果を持つ．そのため，生物の視覚においても工学応用においても，要素光学系の正立結像作用は重複像眼イメージングにとって本質的な機能であるといえる．光線追跡において，各GRINレンズの側面は吸収体であると仮定した．Fig. 2.9(c) はセンサ近傍の拡大図である．複眼全体の球面収差により，結像位置が光学的に分散されていることが確認された．この球面収差

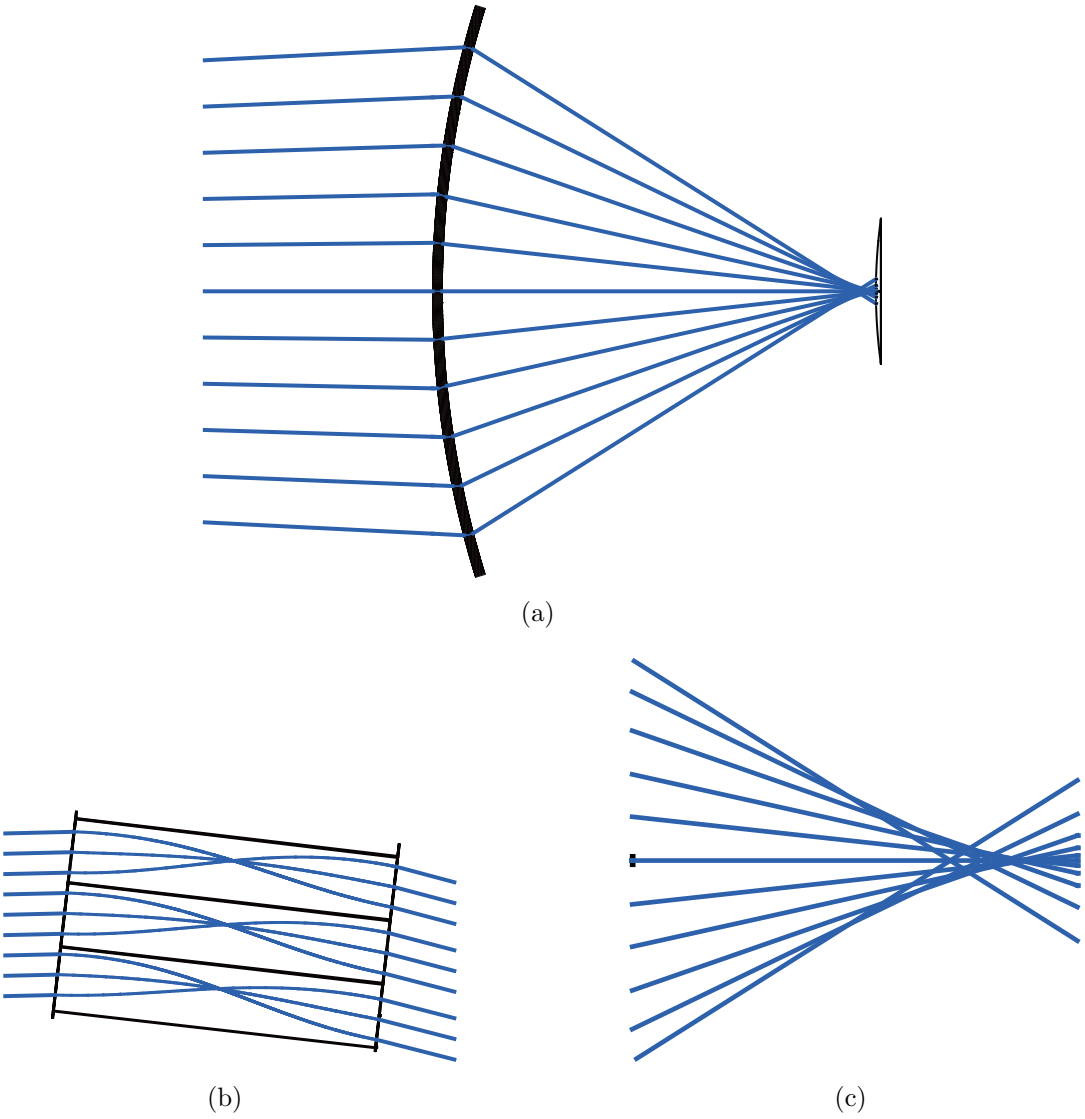
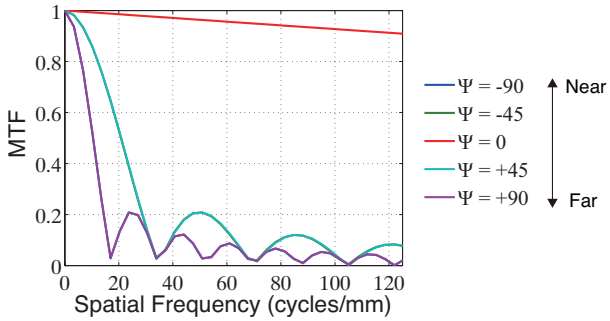


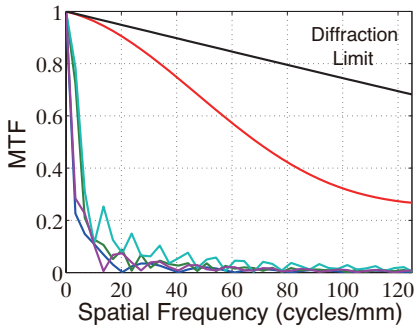
Fig. 2.9　Ray-trace of a spherical GRIN lens array. (a) Overview, (b) rays passing through GRIN lenses, and (c) rays near sensor surface.

により，PSF がある距離範囲内で近似的に均一化される．この距離不変 PSF は，1.4.1 節で述べたように被写界深度拡大を実現する．

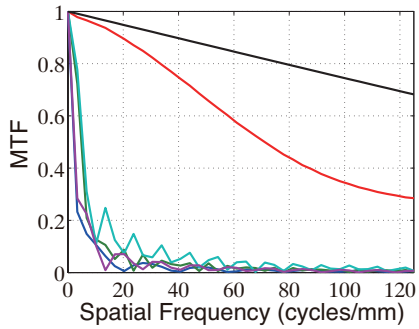
次に，理想的な重複像眼及び GRIN レンズで構成した重複像眼の MTF のデフォーカス特性を光線追跡で計測した．得られた MTF を Fig. 2.10 に示す．デフォーカスの量は一



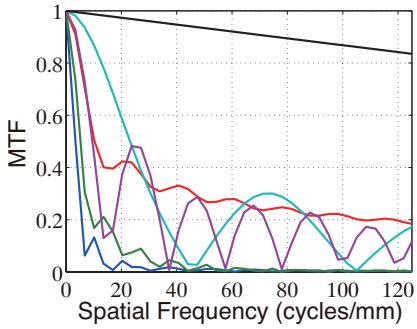
(a)



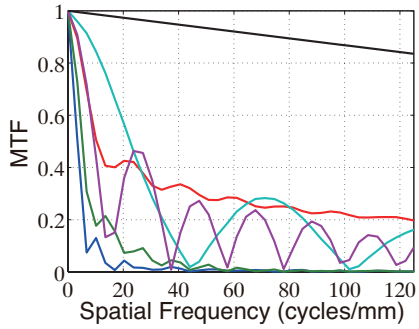
(b)



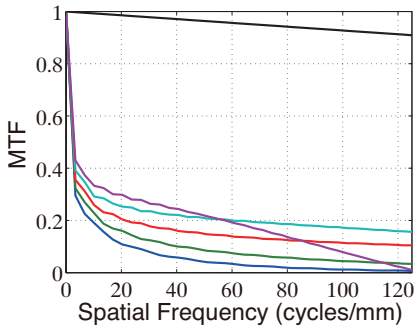
(e)



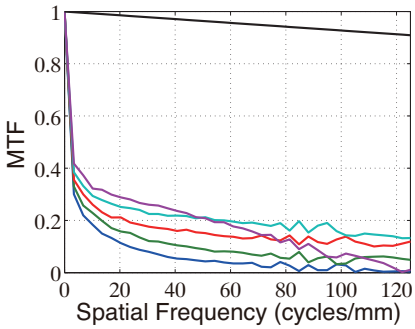
(c)



(f)



(d)



(g)

Fig. 2.10 Defocused MTFs. (a) MTFs of ideal single lens with a diameter of 20 mm. MTFs of ideal erect lens arrays with (b) $D = 5$ mm, (c) $D = 10$ mm, and (d) $D = 20$ mm. MTFs of GRIN lens arrays with (e) $D = 5$ mm, (f) $D = 10$ mm, and (g) $D = 20$ mm.

般的に次式のデフォーカスパラメータ Ψ を用いて定量的に表現される [6, 20]．

$$\begin{aligned} \Psi = kW_{20} &= \frac{\pi D^2}{4\lambda}\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z_\psi} - \frac{1}{z_\mathrm{i}}\right), \\ W_{20} &= \frac{D^2}{8}\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z_\psi} - \frac{1}{z_\mathrm{i}}\right). \end{aligned} \tag{2.20}$$

ここで，Ψ は無次元である．W_{20} は式 (1.10) の一般化瞳関数で用いられる収差関数を波面展開した際のデフォーカス項に相当する [6]．Ψ は kW_{20} と等価であるため，光学系の焦点距離，像面位置，開口径，及び対象距離を決定した際に同時に決定される瞳面での位相誤差を表現していることになる．解析では光学系の焦点距離と像面位置を固定し，開口径 D が 20mm の時デフォーカス量が Ψ となる対象距離を z_Ψ と定義する．シミュレーションでは，対象距離を $z_{\Psi=-90}$ から $z_{\Psi=+90}$ の範囲で変化させた．Fig. 2.10 の周波数軸の値域は，センサの最大サンプリング周波数の二倍 ($2/2p_\mathrm{d} = 125$cycles/mm) を上限として設定した．シミュレーションにおいて Ψ の範囲は，$D = 20$mm におけるデフォーカス MTF が最大サンプリング周波数 ($1/2p_\mathrm{d} = 62.5$cycles/mm) 以下の周波数領域でゼロ交差を持たない範囲として決定した．このデフォーカス範囲内ではデコンボリューションによる高画質な画像回復が可能であるため，本解析における達成被写界深度として定義する．

既存のイメージングとの比較のため，$D = 20$mm の理想単レンズのデフォーカス MTF を Fig. 2.10(a) に示す．MTF は Ψ の変化と共に急峻に変化し，多数の零点を含む．このような光学系で得られる取得画像から，単一のフィルタを用いたデコンボリューションで鮮明な像を復元することは不可能である．

$D = 5$mm，$D = 10$mm，$D = 20$mm となる理想正立結像レンズアレイを用いた場合のデフォーカス MTF をそれぞれ Fig. 2.10(b)–Fig. 2.10(d) に示す．また，$D = 5$mm，$D = 10$mm，$D = 20$mm の GRIN レンズアレイを用いた場合のデフォーカス MTF をそれぞれ Fig. 2.10(e)–Fig. 2.10(g) に示す．両結果共に，D の増加と共に MTF の距離不変性が向上する一方，$\Psi = 0$ の際の MTF 値が低下していることを示している．式 (2.17) より，D の増加は $F_\mathrm{i}/\#$ の低下に対応するため，提案手法の結像特性の距離不変性は $F_\mathrm{i}/\#$ に反比例し，また $\Psi = 0$ の際の MTF 値は $F_\mathrm{i}/\#$ に比例するといえる．言い換えれば，MTF の距離不変性と値の大きさのトレードオフは $F_\mathrm{i}/\#$ により制御できる．

シミュレーションでは，提案手法の達成被写界深度は光学的結像距離走査範囲 s の約 1/8 となった．一方，対象距離を露光時間内に走査する手法 [54] では，s の 1/2 の被写界深度を達成している．提案手法では透過光線を分散させることで光学的に結像距離の走査を実装している．一方機械走査による手法では，全ての透過光線を用いて特定の対象距離を

フォーカスしつつ，時間的に結像距離を変化させることで結像距離走査を実装している．この原理の差が達成性能の差の要因となっていると考察される．ただし，提案手法は非走査型のイメージング法であるため，走査に基づく既存研究 [54] と比較して撮像スピードの点で優位である．そのため，動く対象に対してもイメージングを実現できる等の利点を持つ．

撮像シミュレーションにより被写界深度拡大イメージングのデモンストレーションを行った．撮像は，$D = 20\mathrm{mm}$ の理想単レンズと GRIN レンズアレイを用いて行った．撮像画像は Fig. 2.10(a) 及び Fig. 2.10(g) の MTF を用いて生成した．シミュレーションでは物体距離を $z_{\Psi=-90}$ から $z_{\Psi=+90}$ の範囲で変化させた．物体画像の画素数は 128×128 とし，画素ピッチは $p_{\mathrm{d}} = 8\mu\mathrm{m}$ とした．理想単レンズ及び GRIN レンズアレイによる撮像画像を Fig. 2.11(a) 及び Fig. 2.11(b) に示す．理想単レンズでは，インフォーカス時とデフォーカス時で明らかに画像の鮮明さが変化した．GRIN レンズアレイでは，全物体距離で均一なデフォーカス特性が確認された．GRIN レンズアレイの撮像画像に対し，40dB の加法性ガウシアンノイズを加えた場合及び加えなかった場合のデコンボリューション結果を Fig. 2.11(c) 及び Fig. 2.11(d) に示す．デコンボリューションは $\Psi = 0$ の時の MTF を用いたウィナーフィルリングにより計算した．提案手法により，ノイズが含まれる環境下であっても，理想単レンズと比較して深い距離範囲で鮮明な画像が生成されることが確認された．

理想単レンズによる撮像画像と提案手法の最終画像の画質を，ピーク信号対雑音比 (PSNR: Peak Signal-to-Noise Ratio) を用いて定量評価した．PSNR は画像工学の分野では画質指標とも呼ばれ，二つの画像の類似度を示す指標として用いられる [150]．PSNR は次式で定義される．

$$20 \log 10 \left(\frac{\mathrm{MAX}}{\sqrt{\mathrm{MSE}}} \right). \tag{2.21}$$

ここで，MAX は画像の最大輝度，MSE (Mean Squared Error) は平均二乗誤差を表す．二つの画像が一致する場合，PSNR は無限大となる．理想単レンズと重複像眼の性能を比較するために，それぞれの系の最終画像を入力として原画像との PSNR を計算した．結果を Fig. 2.12 に示す．物体がインフォーカス距離から離れた領域に存在する場合において，提案手法における最終画像の PSNR は 40dB のノイズを考慮した場合でも理想単レンズによる PSNR を上回った．なお，ノイズを加えない場合の重複像眼における $\Psi = 0$ の場合の PSNR は，最終像と原画像が一致しているため無限大に発散している．

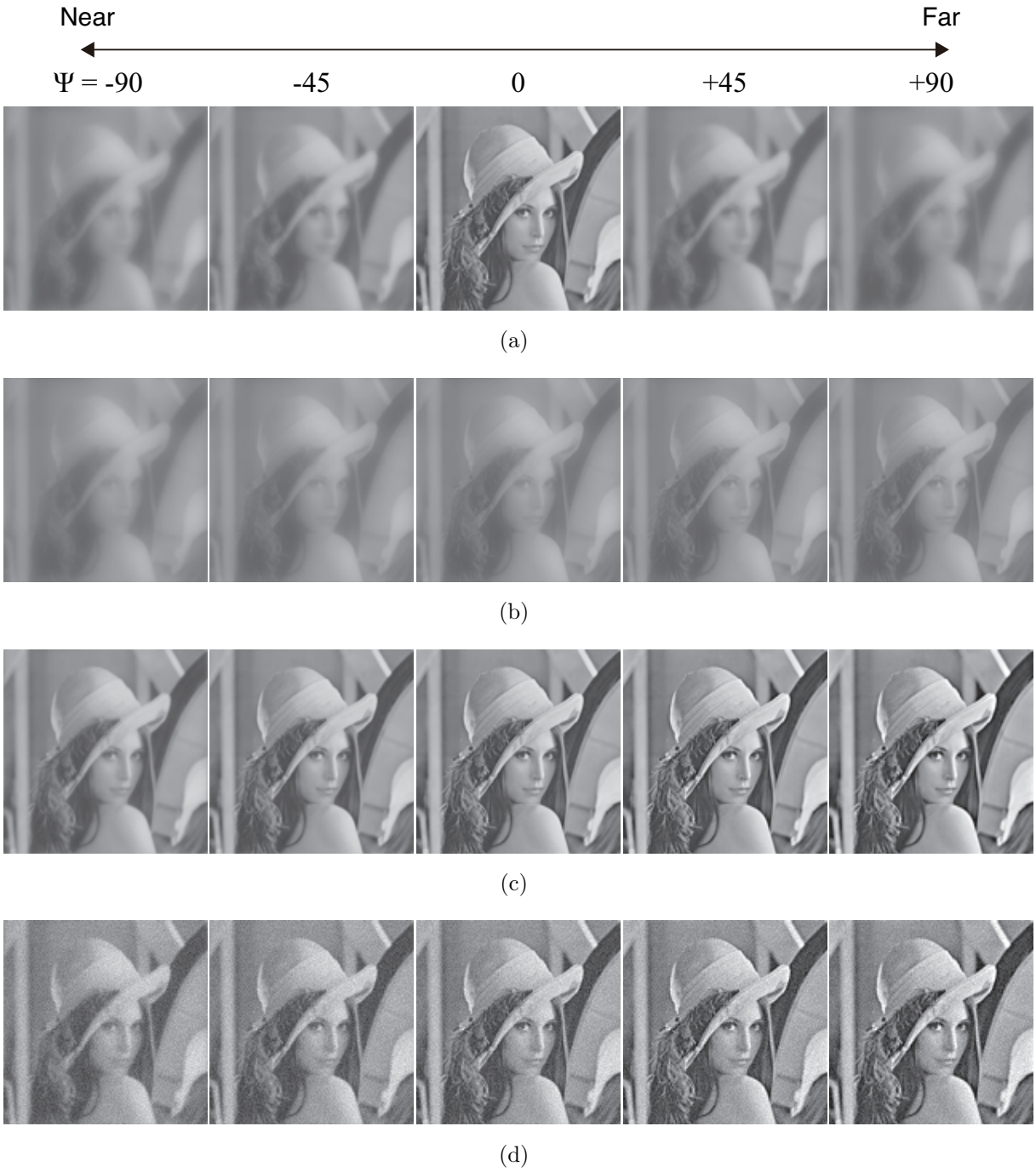


Fig. 2.11　Performance verification with Lenna image. Images captured by (a) the ideal single lens and (b) the GRIN lens array without noise. Deconvolution results of images captured by the GRIN lens array (c) with and (d) without additional Gaussian noise.

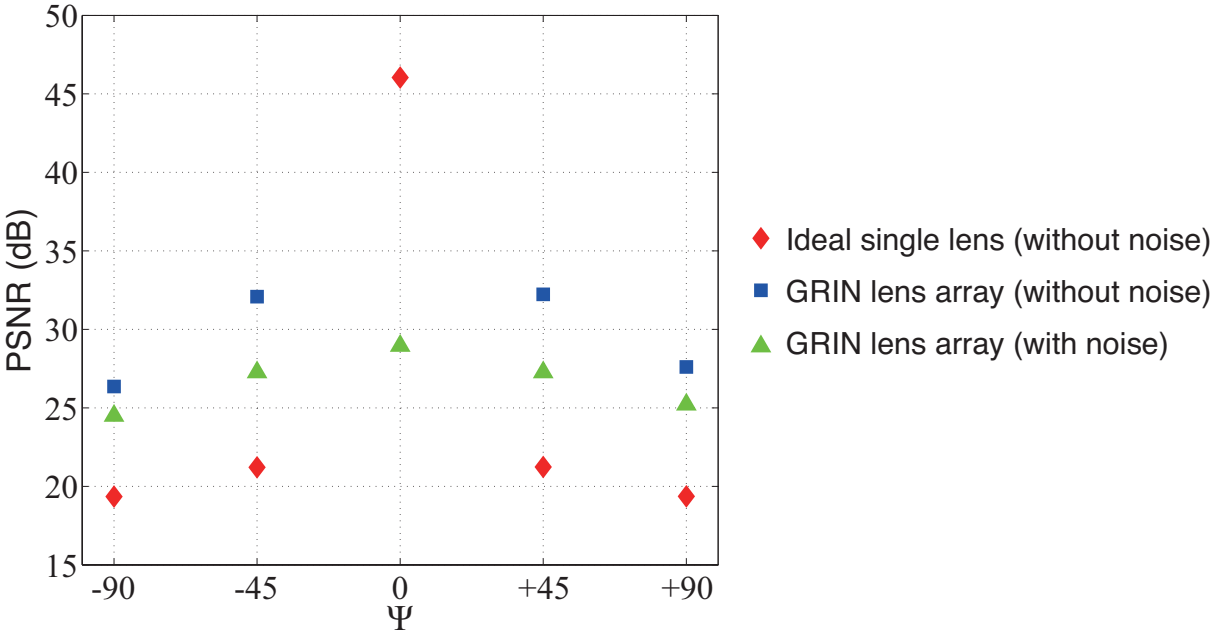


Fig. 2.12 PSNRs of the final images shown in Fig. 2.11. Note that the PSNR of the GRIN lens array at $\Psi = 0$ without noise is ∞ dB.

2.7 結言

本章では，重畳イメージングによる視野・被写界深度の同時拡大技術について述べた．重畳による三次元空間不変 PSF の実装と撮像後のデコンボリューションにより，広視野と深い被写界深度を同時に達成する撮像システムを実現できる．

2.2 節では，CI に基づく被写界深度及び視野拡大技術について述べた．PSF が空間不変である場合，高速な演算で鮮明な画像を復元できることを示した．

2.3 節では，三次元的に空間不変である PSF を実現する重畳イメージングについて述べた．結像距離及び光軸位置の異なる像の重畳により，PSF を三次元空間不変化できることを述べ，原理を実験的に実証した．

2.4 節では，球状重複像眼を用いたシングルショット重畳イメージングの概念について述べた．重複像眼により，結像距離及び光軸位置の走査と像の重畳を光学的に実装できる．

2.5 節では，重複像眼による被写界深度拡大法について理論的な性能解析を行った．結像距離の走査範囲は重複像眼の F 値等を用いて解析的に求まり，これにより提案手法で達成できる被写界深度を見積もることができる．

2.6 節では，光線追跡シミュレーションにより，重複像眼のレンズピッチの影響の解析，MTF の距離不変性の評価，及び撮像シミュレーションによる画質評価を行った．重複像

眼による被写界深度及び視野拡大の効果が，定性的及び定量的に示された．

第 3 章

重畳イメージングの投影系への応用

3.1　緒言

投影系は近年の目覚ましい光学及び情報科学技術の進展を背景に，飛躍的な性能向上及び低コスト化を実現し，社会の様々な場面で用いられるようになった．今や，産業，教育，医療，エンタテインメント等において重要な役割を果たす基盤技術となりつつある．投影系の技術的本質は撮像系と同様に光学結像であるといえる．そのため，2 章で取り扱った撮像系における収差による被写界深度及び視野の制限は，投影系においても共通の課題であるといえる．

物体空間の光を像面に結像させる撮像系と，像面に表示した画像を物体空間に表示する投影系は，技術的類似性が高い．そのため，撮像系で開拓された多くの CI 技術は，実は投影系にも適用可能である可能性を秘めている．本章では，2 章で述べた重畳イメージングによる被写界深度・視野拡大技術を投影系に応用する．まず，3.2 節では，撮像系と投影系の技術的関係を整理する．次に，3.3 節では，投影系における既存の被写界深度・視野拡大技術について述べる．既存研究をまとめ，本研究の位置付けを明らかにする．次に，3.4 節では，重畳イメージングの投影系への応用について原理を述べる．提案する重畳プロジェクションのモデル及び実装法を示す．最後に，3.5 節では，原理実証実験の結果を示す．重畳プロジェクションにより，三次元投影面に対して形状計測をせず鮮明な投影が実現できることを実証する．

3.2　撮像系と投影系の技術的関係

撮像系は物体空間の光を像空間に結像させ，投影系は，像空間の光を物体空間に結像させるシステムである．つまり，結像の方向が逆であるものの，いずれも結像光学系であるという点では共通している．撮像系では光強度分布を CCD 等の光検出器で電気信号に変

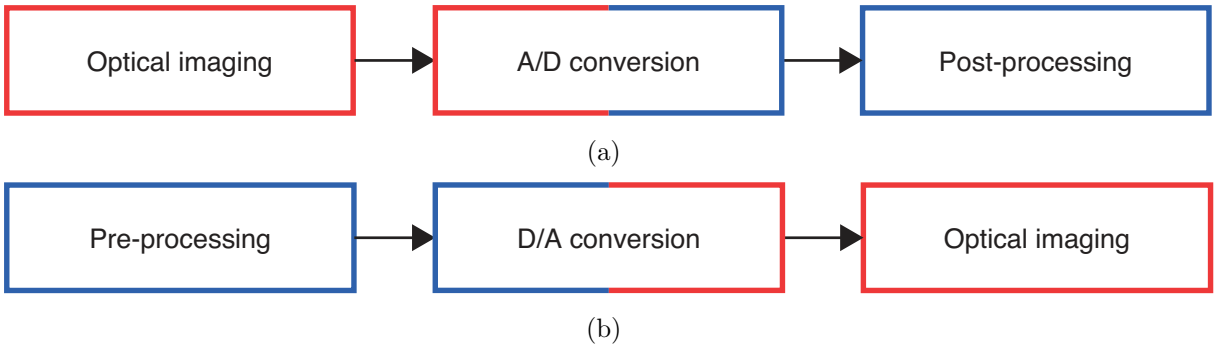


Fig. 3.1　Schematics of (a) computational cameras and (b) computational projectors.

換するが，投影系では電気的に液晶等の像表示パネルを変調することで所望の光強度分布を生成する．

CI に基づく撮像系では，Fig. 3.1(a) のように，結像及び光電変換の後に信号処理過程が追加される．これらのプロセスを逆方向化し，Fig. 3.1(b) のように信号処理及び光電変換後に光学結像を行うことで，投影系においても撮像系と同様に CI を実装できる．従来 CI 技術は，1.4 節で示したようにその多くが撮像応用を前提として開拓されてきたが，これらの技術は投影系にも適用可能であることが Fig. 3.1 から示唆される．つまり，CI による投影系の性能及び機能向上が期待できる．ただし，インコヒーレント結像を前提とする場合，投影光強度は非負値のみを表現できる点に注意を払う必要がある．

物体空間は三次元空間である一方像面は二次元平面であり，両者の次元数は異なる．そのため，撮像は物体空間における三次元的な光の分布の積分取得に相当し，投影は二次元的な光分布の三次元空間に対する照射に相当する．そのため，全ての状況下で撮像と投影が等価な関係になるという訳ではない点に注意を払う必要がある．投影系の視野内に存在する物体が全て非透明である場合，投影元像面座標と投影先物体面座標が一対一対応する．このような場合，面と面の結像関係のみを考えれば良いため，撮像と投影を等価に扱うことができる．本章では，非透明かつ距離分布を持つ物体空間を仮定し，議論を行う．

3.3　投影系における被写界深度・視野の拡大

投影系においても被写界深度及び視野の制限は鮮明な投影を実現する物体空間の範囲を制限する要因となるため，その解決は重要である．三次元的な収差の影響を含む投影は

次式でモデル化できる．

$$\boldsymbol{o}_{x_\mathrm{f},y_\mathrm{f},z_\mathrm{f}} = \boldsymbol{H}_{x_\mathrm{f},y_\mathrm{f},z_\mathrm{f}}\boldsymbol{i}. \tag{3.1}$$

ここで，$\boldsymbol{o}_{x_\mathrm{f},y_\mathrm{f},z_\mathrm{f}}$ が投影面上の画像 (投影画像)，$\boldsymbol{i}$ はプロジェクタに入力する画像 (入力画像) である．$\boldsymbol{H}_{x_\mathrm{f},y_\mathrm{f},z_\mathrm{f}}$ は投影作用を表すシステム行列である．$(x_\mathrm{f}, y_\mathrm{f}, z_\mathrm{f})$ は光軸と像面の交点に対する物体面側の像点座標である．式 (3.1) のシステム行列を単位行列に近づけるために，撮像系と同様に，開口絞りの制限や組レンズ系の適用，あるいは投影系の複数化により対処されることが一般的である．しかし，これらは光量の低下やシステムの大型化の要因となる．また，投影の場合は投影面を固定し，事前に結像距離及び光軸方位の調整が行われる場合が多い．しかし，このことは投影面に課す制約や投影系を調節する時間及び手間を増加させる要因となる．そのため，例えば三次元物体に対する投影や時間的に変化する物体への投影の実現が技術的に困難となる．レーザーを光源として用いる方式のプロジェクタはレンズ系を用いないため，被写界深度の深い投影が可能となる [151]．つまり，三次元物体全体に合焦する投影を実現できる．しかし，スペックルによる投影像の画質劣化，及び明るさと安全性のトレードオフが課題となる [152]．

この問題を解決するために，CI 技術に基づく幾つかの手法が提案されている．一般的にコンピュテーショナルプロジェクションでは，投影前に PSF の広がりや歪みを計測し，それを打ち消すような信号処理を投影する画像に施すことで，被写界深度及び視野を拡大する．被写界深度拡大のために，事前計測 PSF を用いて投影前に原画像をデコンボリューションする手法 [153, 154, 155]，TOMBO 型複眼光学系の利用を前提として事前投影面形状計測結果に基づき LF データを最適化する手法 [156, 157] が提案されている．これらの技術を用いて，奥行方向に傾いた平面への投影や球面への投影，三次元構造を持つ壁への投影等がデモンストレーションされている．視野拡大のためには，曲面鏡の配置と PSF 計測による事前歪曲補正に基づく手法が提案されている [158, 159]．室内全体を投影面として用いる没入型映像提示技術に応用されている．

これらの既存研究では，投影面に応じて変化する PSF を事前に計測する必要がある．そのため，投影における時間コストや簡便さが犠牲となる．一方，事前計測を必要としない手法として，三次位相板を用いた PSF の距離不変化に基づく手法が提案されている [160]．撮像における WFC と同様に，投影面距離の変化に対してデフォーカス PSF が変化しないため，予め実験的あるいは数値的に取得した一枚のフィルタを用いた事前デコンボリューションのみにより投影の被写界深度を拡大できる．WFC を Fig. 3.1 の考え方に基づき投影系に応用した技術と位置付けることができる．

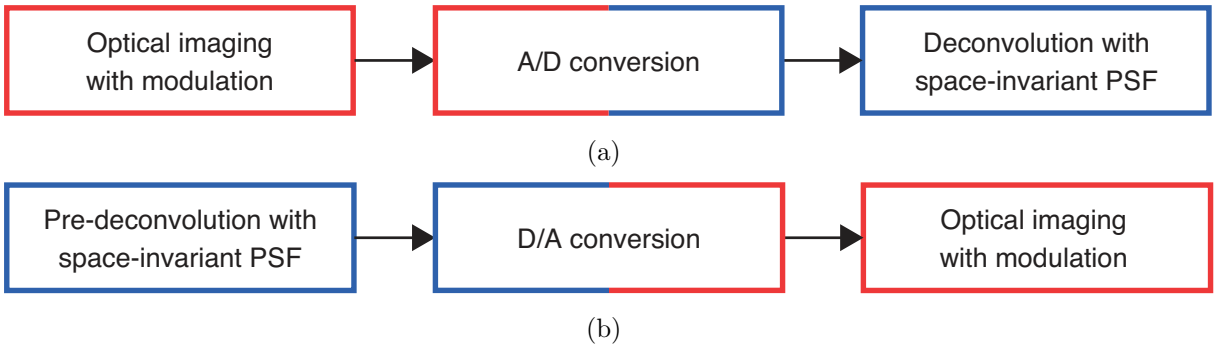


Fig. 3.2　Schematics of (a) computational superposition camera and (b) computational superposition projector.

撮像系と同様に，三次元的な物体空間における任意物体に対する鮮明な投影を非計測で実現するためには，被写界深度と視野を同時に拡大する技術が必要である．一方，2 章で述べたように，像の重畳により PSF は三次元空間不変化できる．本章では，重畳イメージングを投影系に応用することで，計測の不要な被写界深度・視野同時拡大プロジェクションを実現する．

3.4　重畳イメージングの投影系への適用

重畳イメージングの投影応用である重畳プロジェクションでは，結像距離及び光軸の異なる投影像を物体空間上で重畳する．重畳投影像は，三次元空間不変 PSF と入力画像のコンボリューションと近似できる．PSF の広がりは，投影前に原画像をデコンボリューションすることで補償する．PSF は投影面の三次元位置に対して不変であるため，用いるデコンボリューションフィルタは一枚で良い．そのため，投影面の形状計測は省略できる．重畳イメージングに基づく撮像と投影の関係性を Fig. 3.2 に示す．重畳プロジェクションでは結像の方向の逆転に合わせ，重畳結像と光電変換及びデコンボリューションの順序が逆向きに入れ替わっている．

重畳プロジェクションは次式のようにモデル化される．

$$\begin{aligned}\bar{\boldsymbol{o}} &= \sum_{x_\mathrm{f}}\sum_{y_\mathrm{f}}\sum_{z_\mathrm{f}} \boldsymbol{o}_{x_\mathrm{f},y_\mathrm{f},z_\mathrm{f}} \\ &= \sum_{x_\mathrm{f}}\sum_{y_\mathrm{f}}\sum_{z_\mathrm{f}} \boldsymbol{H}_{x_\mathrm{f},y_\mathrm{f},z_\mathrm{f}}\boldsymbol{i} \\ &\approx \bar{\boldsymbol{h}} * \boldsymbol{i}.\end{aligned} \tag{3.2}$$

ここで，$\bar{\boldsymbol{h}}$ は空間不変 PSF を表す．表現の簡潔さのため，ノイズは無視して考える．投

影したい無収差画像 (原画像) を $\boldsymbol{t}$ と置くと，$\boldsymbol{t}$ は重畳 PSF $\bar{\boldsymbol{h}}$ を用いて次式のようにデコンボリューションされ投影系への入力画像 $\boldsymbol{i}$ に変換される．

$$\boldsymbol{i} = \bar{\boldsymbol{h}}^{-1} * \boldsymbol{t}. \tag{3.3}$$

ここで, $\bar{\boldsymbol{h}}^{-1}$ は逆フィルタを表す．実際は, 逆フィルタに限らず任意のデコンボリューションフィルタを用いることができる．式 (3.3) の事前デコンボリューション結果を式 (3.2) の重畳投影における入力として用いることで，次式の投影結果を得る．

$$\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{o}} &= \bar{\boldsymbol{h}} * \boldsymbol{i} \\ &= \bar{\boldsymbol{h}} * (\bar{\boldsymbol{h}}^{-1} * \boldsymbol{t}) \\ &= \boldsymbol{t}. \end{aligned} \tag{3.4}$$

式 (3.4) は，事前デコンボリューションにより PSF の広がりが打ち消されることを表現している．これにより，投影の被写界深度・視野が同時に拡大される．結果，任意の三次元投影面上で非計測でありながら鮮明な像を映し出すことが可能となる．

重畳プロジェクションでは，撮像の場合と同様に様々な実装方式を選択できる．実装方式例を Fig. 3.3 に示す．重畳プロジェクションは，最も直接的には Fig. 3.3(a) に示す光学系の機械走査により実装できる．結像距離及び光軸を人間の残像時間内に機械的に走査することで，観察者に重畳画像を提示する [134]．残像時間とは観察者の知覚において同じ視覚が存続する時間であり，この時間内の観察像の変化は積分されて知覚される．人間の残像時間は 50 ミリ秒程度と知られている [134, 161]．機械走査の他に，Fig. 3.3(b) のように投影系のアレイ化によっても重畳を実装できる．各投影系間の隔壁の模式図は，投影系間が光学的に分離されている状態を表している．この場合，各投影系は異なる結像距離及び光軸位置を持つ．投影系が大型化するが，一度の投影で重畳像を形成できる．また，撮像系と同様に，Fig. 3.3(c) のように重複像眼を用いることでも重畳プロジェクションを実装できる．この場合，投影系のコンパクトさを保ったまま重畳像形成のシングルショット化を達成できる．また，各レンズ–センサ対が光学的に統合されているため，明るいイメージングを実装できる．

3.5 原理実証実験

光学系の機械走査に基づく実装法を用いて，重畳プロジェクションの原理実証実験を行った．実験系を Fig. 3.4 に示す．三次元投影面を表現するため，二つの異なる距離に平面スクリーンを配置した．視野拡大のため，3LCD プロジェクタ (EB-1910 by EPSON)

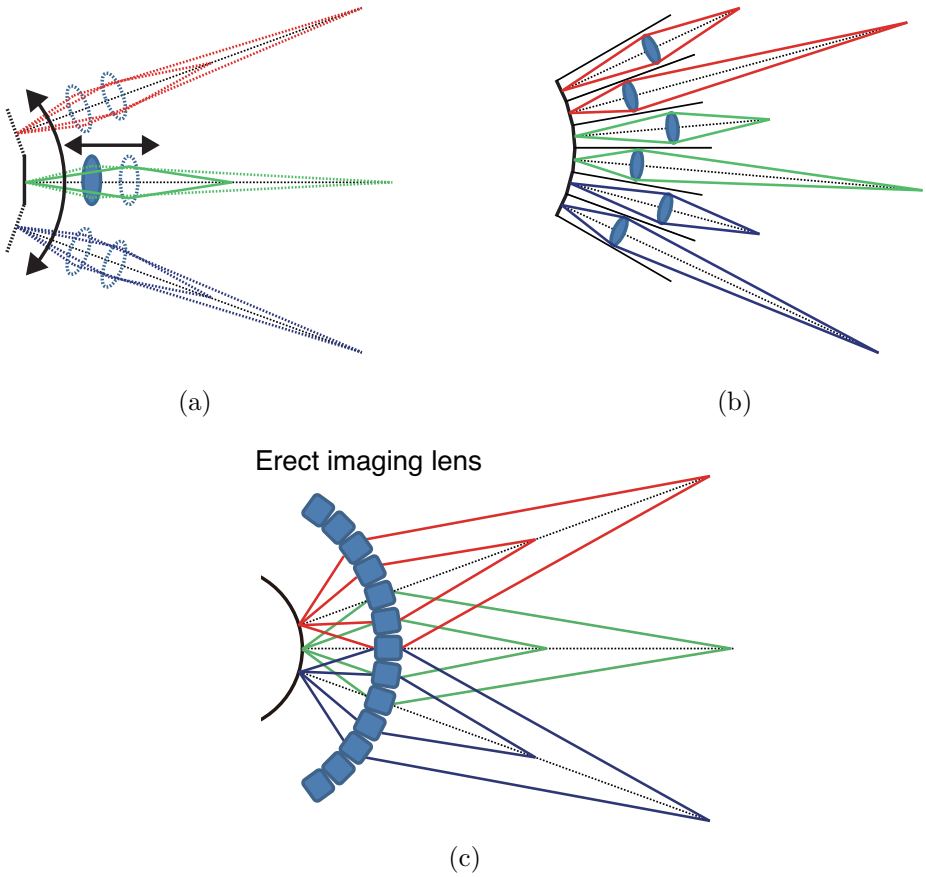


Fig. 3.3　Implementations of a superposition projector. (a) Mechanical scanning, (b) an array of projectors, and (c) an array of erect imaging optics.

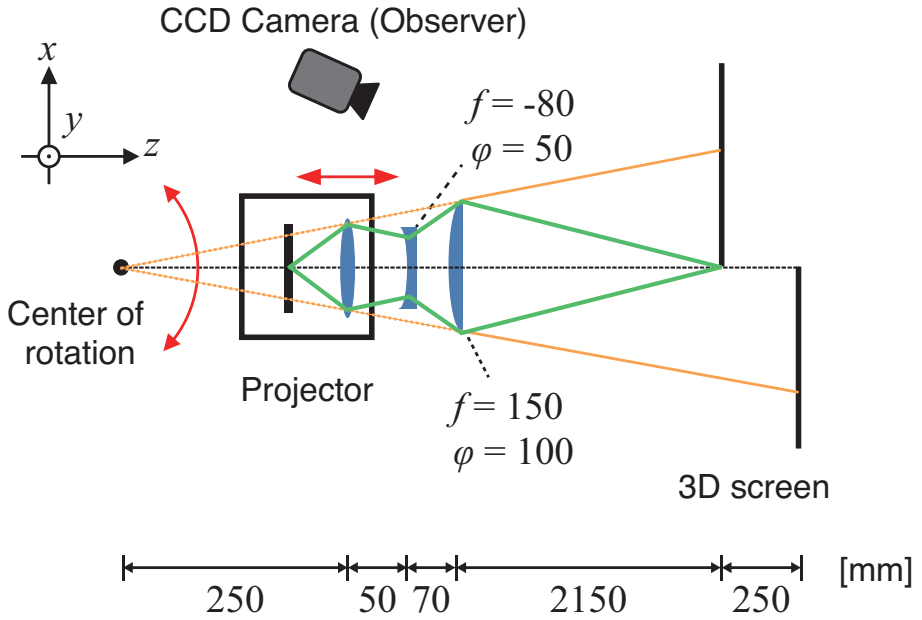


Fig. 3.4 Optical setup of the experimental verification of a superposition projector.

の前方に凹レンズを配置した．また，収差未補正光学系を模擬するために，凹レンズの前方に大きな口径を有する凸レンズを配置した．モノクロ CCD カメラ (CoolSNAP$_{fx}$ by Photometrics) を配置し，観察者の代わりとした．観察者の残像を模擬するため，複数の投影像を計算機上で積分した．投影面距離に対する視差変化を不変化するため，投影系の主点を中心とした系の回転により光軸位置を走査した．結像距離は二つのスクリーンの距離範囲の二倍の範囲を等間隔に三距離走査した．スクリーン距離は未知として実験を行ったため，走査中はいずれのスクリーンもフォーカスされていない．光軸は視野内を等間隔に七点走査した．

本実験ではインコヒーレント光源を持つプロジェクタを用いてデコンボリューション結果を投影する．一方，デコンボリューション結果は負の輝度値等プロジェクタのダイナミックレンジを超える輝度値を持ち得る．このような場合，プロジェクタによるデコンボリューション結果の正確な表現が不可能である．PSF 計測に基づく既存研究ではプロジェクタのダイナミックレンジ外の輝度値を切り捨てる手法が取られているが [154]，このような修正処理を適用する場合式 (3.3)–式 (3.4) が成立しないため，投影像にアーティファクトが発生する．そのため，本実験では次式で表現される非負最適化問題を解くこと

でデコンボリューションを行い，その結果画像を入力画像 $\boldsymbol{i}$ として用いた．

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{i}} &= \underset{\boldsymbol{i}}{\operatorname{argmax}}\, \mathcal{L}[\boldsymbol{i}|\bar{\boldsymbol{o}} = \boldsymbol{t}], \\ &\text{subject to } 0 \leq \hat{\boldsymbol{i}}(p) \leq c,\ \forall p. \end{aligned} \tag{3.5}$$

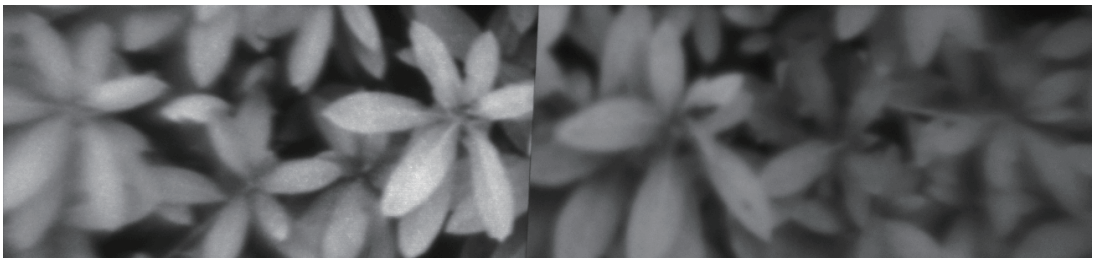
ここで，$\mathcal{L}[\cdot]$ は尤度関数，$\hat{\boldsymbol{i}}(p)$ は $\hat{\boldsymbol{i}}$ の p 番目の画素，c はプロジェクタが表現できる最大輝度値である．式 (3.5) は RL 法により解いた [31, 32]．重畳 PSF $\bar{\boldsymbol{h}}$ は点光源の重畳プロジェクションにより実験的に取得した．

実験結果を Fig. 3.5 に示す．Fig. 3.5(a) と Fig. 3.5(b) は式 (3.4) の原画像 $\boldsymbol{t}$ 及び入力画像 $\hat{\boldsymbol{i}}$ である．式 (3.1) で表現される通常の投影による投影結果を Fig. 3.5(c) に示す．ここで，プロジェクタは前面スクリーンにフォーカスしており，光軸は視野の中心に調節されている．投影像からデフォーカス，軸外収差，口径食の影響が確認された．式 (3.2) の重畳プロジェクションにおいて，原画像をそのまま入力画像として用いた場合の投影結果を Fig. 3.5(d) に示す．収差や口径食の影響がスクリーン全面に渡って均一化された重畳投影像が確認された．式 (3.2) の重畳プロジェクションにおいて，原画像を式 (3.5) に基づきデコンボリューションした結果を入力画像として用いた場合の重畳投影像を Fig. 3.5(e) に示す．非計測の三次元投影面全面に渡って，収差が除去された投影結果が確認された．つまり，重畳プロジェクションによる被写界深度・視野の同時拡大効果が実験的に実証された．

次に，投影像の重畳数が結果に与える影響を Fig. 3.6 に示す．重畳数解析では入力画像は全てデコンボリューション結果画像を用いた．単一の投影像を Fig. 3.6(a) に示す．デコンボリューションによるエッジの過強調によるアーティファクト，及び収差の影響が表れている．結像距離のみ三点走査し重畳した結果を Fig. 3.6(b) に示す．近軸領域の前面スクリーン及び背面スクリーンを比べた場合，デフォーカスの影響が均一化されていることが確認できる．ただし，軸外収差が均一化されていないため，近軸領域では過強調によるアーティファクトが，軸外領域では軸外収差の影響が表れている．次に，Fig. 3.6(c)–Fig. 3.6(e) に光軸走査の影響を示す．いずれも結像距離は三点走査し，光軸を Fig. 3.6(c) では三点，Fig. 3.6(d) では五点，Fig. 3.6(e) では七点視野内で等間隔に走査した．走査回数の増加とともに，視野全体で投影像が鮮明化されていることが確認できる．特に，Fig. 3.6(c) ではエッジ過強調効果が目立つ箇所と軸外収差の影響が目立つ箇所が視野内でまばらに分布しているが，Fig. 3.6(e) では視野全体でこれらがバランスよく相殺され，滑らかかつ鮮明な投影像が得られている．これらの結果から，走査の高密度化と共に重畳投影像のアーティファクトが軽減される性質が確認されたといえる．

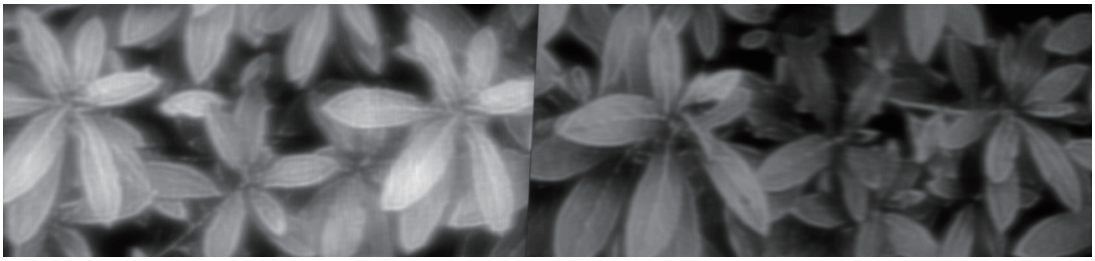
(a)

(b)



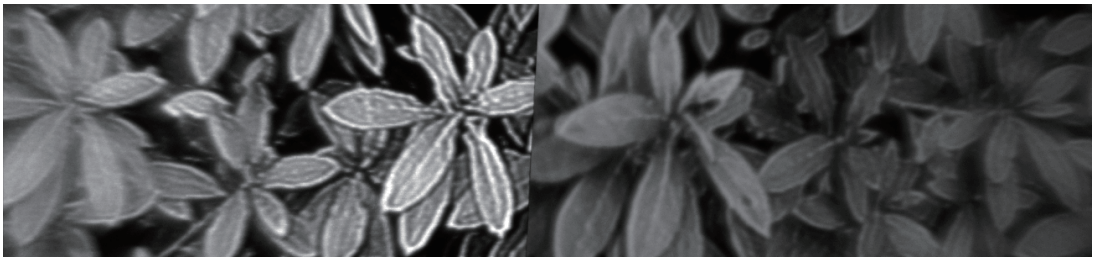
(c)

(d)

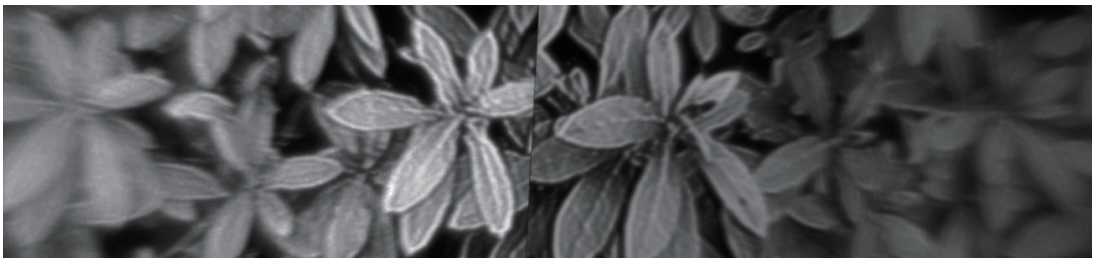


(e)

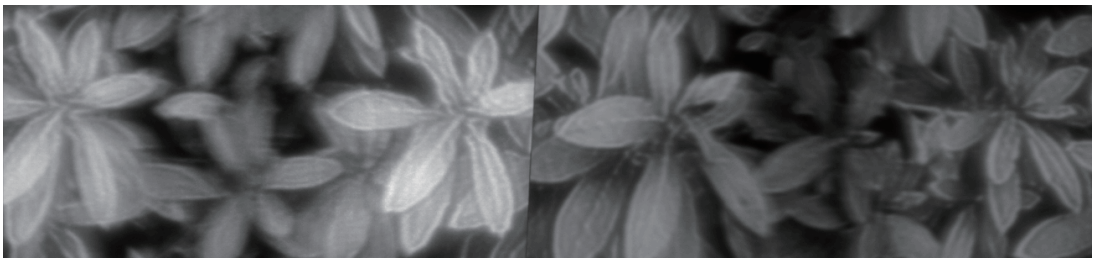
Fig. 3.5 Experimental results. (a) A target image and (b) the deconvolved image. The output images (c) without and (d) with superposition of the target image. (e) The output image with superposition of the deconvolved image.



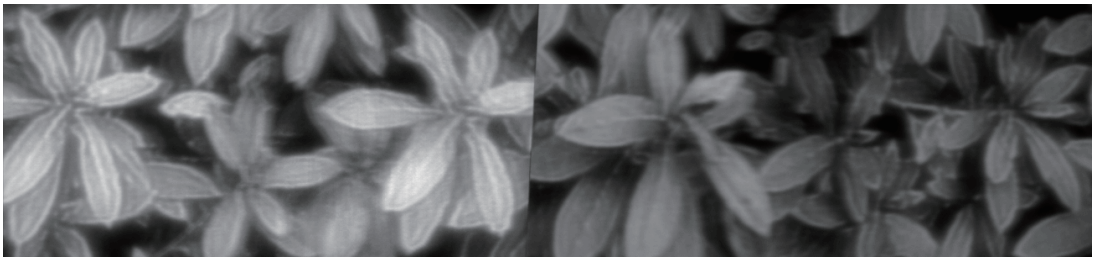
(a)



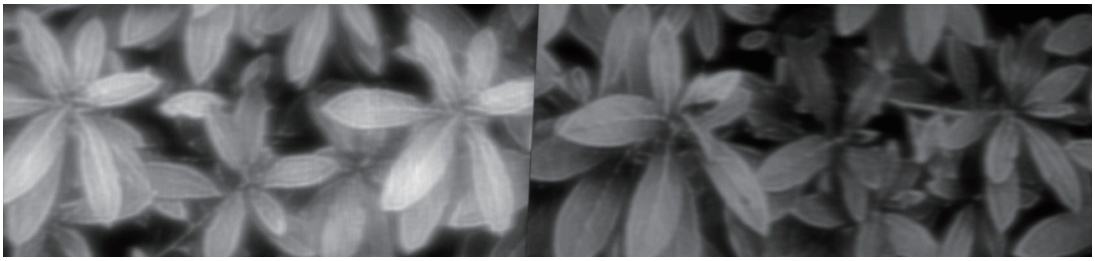
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 3.6　Experimental results. The output images of the deconvolved input image (a) without scanning, (b) with scanning of three focusing distances, and with additional scanning of optical axis of (c) three, (d) five, and (e) seven directions, respectively.

重複像眼の撮像応用と同様に，達成被写界深度は結像距離の走査範囲により制限される．2.6 節で触れたように，被写界深度拡大法における達成被写界深度は，結像距離走査に基づく手法では走査範囲の 1/2 程度，重複像眼を用いた手法では走査範囲の 1/8 程度と見積もることができる [54, 24]．そのため，システムを実利用する際は，目標とする達成被写界深度と採用する実装法から結像距離の走査範囲を決定できる．

3.6 結言

本章では，重畳イメージングを投影系に応用し，投影における被写界深度及び視野を拡大した．重畳プロジェクションにより，任意の三次元面に対して合焦する投影を，投影面を計測する必要なく実現できる．

3.2 節では，撮像と投影の技術的な関係について述べた．これらは結像の方向のみが異なる類似性の高い系である点を指摘し，従来撮像系を中心に開拓されてきた種々の CI 技術が投影系にも応用可能であることを述べた．

3.3 節では，CI に基づく投影系の被写界深度・視野拡大技術について既存研究を整理した．PSF の広がりや歪みを事前デコンボリューションで打ち消すことで，投影系の被写界深度あるいは視野拡大を拡大できる．これらを同時に拡大するためには，PSF の三次元的な空間不変化が必要であることを述べた．

3.4 節では，2 章で提案した重畳イメージングを投影系に応用した．重畳プロジェクションは結像距離及び光軸位置の異なる投影像の重畳と投影前のデコンボリューションにより実現されることをモデルとともに示した．また，この原理は光学系の機械走査，投影系のアレイ化，球状重複像眼により実装できることを説明した．

3.5 節では，重畳プロジェクションの原理実証実験について述べた．重畳プロジェクションにより未知の三次元面に対する鮮明な投影が実現されたことを実験的に確認した．すなわち，投影の被写界深度・視野の同時拡大効果が実証された．また，走査及び重畳の数が最終投影像の画質に影響することを示した．

第 4 章

ライトフィールドイメージングに基づく位相変調の仮想化

4.1　緒言

2 章及び 3 章で述べた被写界深度・視野拡大技術を含め，多くの CI 技術の本質は変調光学系の設計にあるといえる．変調光学系は 1.3 節で示したように様々な方法で物理実装されるが，基本的には達成したい機能及び性能に応じた変調光学素子の実装が必要となる．このことは，CI の利便性を低下させる要因となっている．単一の光学系で様々な変調光学系の機能を実現できれば，様々な CI の機能を簡便かつ柔軟に実現できるようになると考えられる．

本章では，従来位相変調光学素子で実装されていた位相変調を，1.4.2 節で述べた LF イメージングの枠組みの上で仮想的に実現する技術を提案する．これにより，任意の変調光学系が単一の光学系で実現できるようになる．まず，4.2 節では，提案研究の基礎となる LF イメージングについて原理とモデルを示す．次に，4.3 節では，LF イメージングに基づく位相変調の仮想化技術について概念及びモデルを示す．次に，4.4 節では，位相変調を高精度に仮想化するために必要となる LF のサンプリング条件を定式化する．LF のサンプリング定理である Plenoptic sampling 理論 [162] を元に，提案システムの設計条件を明らかにする．また，数値シミュレーションにより設計条件の妥当性を検証する．最後に，4.5 節では，光学実験により原理を実証する．位相変調の題材として三次位相変調を取り上げ，撮像及び投影における被写界深度拡大が位相変調光学系を用いずに実現できることを示す．

4.2　ライトフィールドイメージング

1.4.2 節で述べたように，LF は光線の伝搬を記述する関数である．パラメータ定義を Fig. 4.1(a) に再度まとめる．LF は通過する二平面の座標 (s, t) 及び (u, v) を用いて

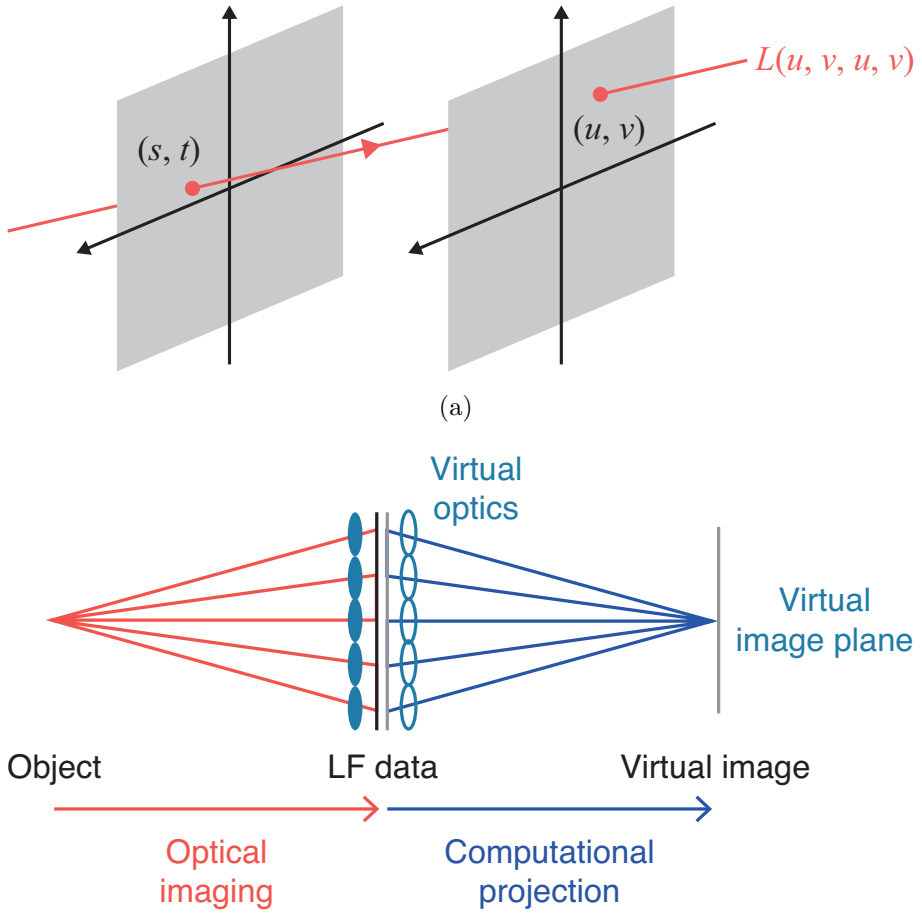


Fig. 4.1　(a) Parameters definition for LF and (b) schematics of LF imaging.

$L(s,t,u,v)$ と表現できる [121]．LF を計測し，それを再構成することで画像を取得でき，このイメージング技術は LF イメージングと呼ばれる．LF は，1.4.2 節で示した様々な実装法により計測できるが，基本的にはレンズあるいは変調素子のアレイ化により光線を符号化取得する．本章では，LF をシングルショットで取得するための最も簡素な光学系として，1.3.5 節で述べた TOMBO の使用を仮定し議論を行う．ただし，光学系の差異は LF を計測する手段の違いに過ぎず，LF の計測と再構成でイメージングを実装するという LF イメージングの概念そのものには影響しない．TOMBO に基づく LF イメージングの概念図を Fig. 4.1(b) に示す．図はレンズアレイと単一像面による LF の分離取得過程と，計算機上の画像再構成過程を表している．計算機上では仮想光学系を用いた光線追跡により LF を仮想像面上に投影することで画像再構成を実現している．

1.4.2 節で言及したように，LF イメージングは光学結像の一部を仮想化したものと見る

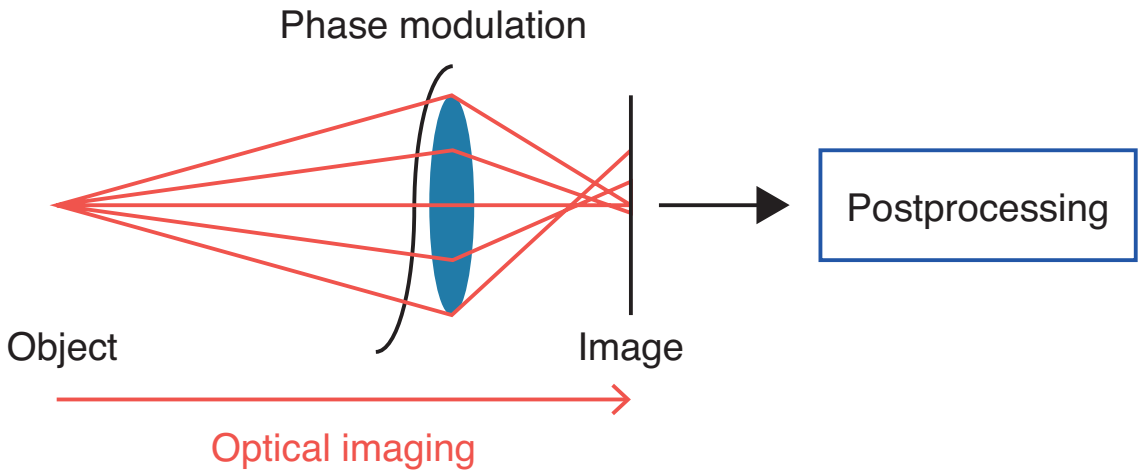


Fig. 4.2 Schematic diagram of computational imaging based on phase modulation.

ことができる．そのため，結像距離やF値，視点等の撮像条件を撮像後に変更できる．ただし，LFから忠実な物体像を復元するためには，対象の三次元情報を知ることが重要となる．しかし，三次元情報を取得するためには不良設定逆問題を解く必要があり，演算コストの増加や解の不定性が問題となる[163, 164]．また，シングルショット型のLFイメージングでは一般的に空間解像度を犠牲にして角度情報を取得する．そのため，失われた空間解像度を回復するディジタル超解像は重要な要素技術となる．しかし，この場合においても，取得LFデータの画素を正しく再配置するためには物体の正確な三次元情報を知る必要が生じる[163, 164, 69, 165, 126, 166, 72]．光学系の工夫に基づく超解像LFイメージング技術も提案されているが，空間光変調器等の光学素子を系に追加する必要が生じる[127, 167, 168]．

4.3 位相変調の仮想化

1.4.1節で述べたように，位相変調はCIを実現するための重要な要素技術である．Fig. 4.2に位相変調を用いたCIの概念図を示す．図は，位相板による瞳面での位相変調と撮像後の後処理の組合せによるCIを模式的に表現している．位相変調を含む撮像と後処理の組み合わせにより，被写界深度拡大や距離計測，ディジタル超解像等，既存の結像系では実現困難な機能を実現することができる．ただし，Fig. 1.6から示唆されるように，達成したい機能及び性能ごとに位相変調素子を設計及び物理実装する必要が生じる．このことは，CIの利便性及び実装コストを低下させる要因となる．任意の位相変調を単一の光学系と信号処理の切り替えにより実現できれば，CIをより簡便かつ柔軟に実装できる．

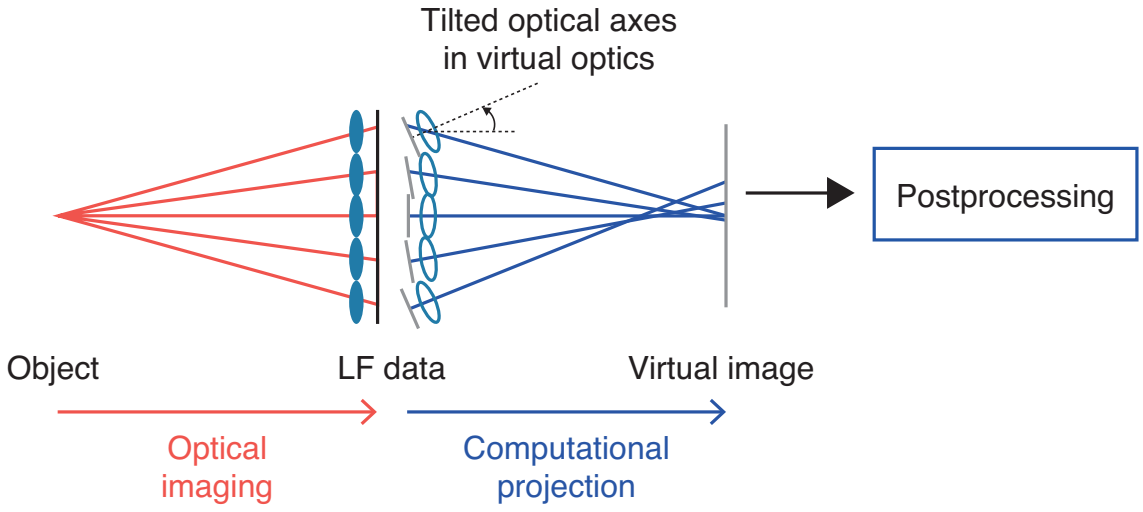


Fig. 4.3　Schematic diagram of phase-modulated LF camera.

本章では，LF イメージングが結像の一部を仮想化している点に着目し，位相変調を計算機上で仮想的に実装する．LF イメージングの既存研究では，再構成処理において理想結像の再現が前提とされてきた．一方，本来 LF イメージングは，理想結像だけでなく任意の光線伝搬を再現できる能力を有している．この点に着目し，提案手法では，光線追跡時に位相変調を再現する．これにより，位相変調光学素子を必要としない位相変調イメージングが実現できる．

提案手法では，Fig. 4.3 に示すように，LF イメージングの光線追跡計算で用いられる仮想光学系を変調することで位相変調を仮想的に実現する．本論文では，WFC 等の CI 分野における既存研究と同様に，位相変調という言葉を式 (1.10) の位相差項 kW の変調という意味で用いる．波動光学的には等位相面の変調を意味し，幾何光学的には光線の伝搬角度の変調に相当する．提案手法では，位相変調は仮想空間上の各要素光学系の光軸角の変調により実装する．本節では，目的とする位相変調を実現するために必要となる仮想光学系の光軸の変調量を定式化する．

Fig. 4.4 に解析に用いるシステムパラメータの定義を示す．レンズ面の座標系を (s, t)，各仮想光学系の仮想センサ面の局所座標系を (u, v) と定義する．要素光学系のレンズ–センサ間距離を要素レンズの焦点距離 f と設定し，レンズ面に直交する軸上距離を z とする．解析の簡略化のため，v 軸と t 軸は除去する．要素光学系番号 k を Fig. 4.4 のように定義する．k の順序は世界座標 s の増加に伴って増加するとする．アレイ光学系における要素光学系の総数を N と定義する．

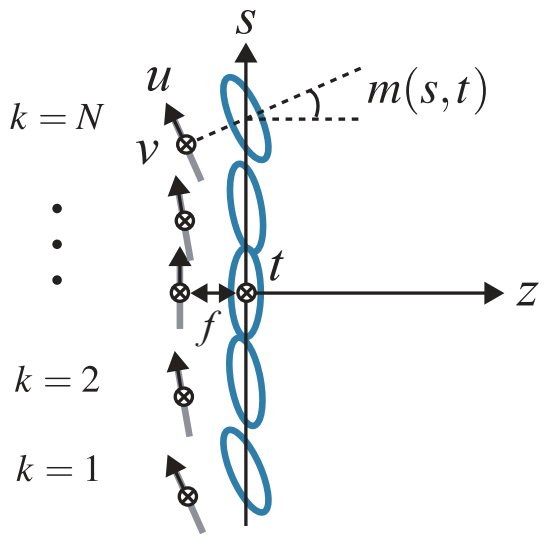


Fig. 4.4 Definitions of system parameters.

目的とする位相変調光学素子 (目的素子) を，屈折率 n と形状関数 $z = g(z)$ で構成される均質なガラスとしてモデル化する．屈折により，光線出射角は Fig. 4.5(a) のように変調される．ここで，LF イメージングで用いられる LF 投影処理における仮想要素光学系の光軸変調により，目的素子による光線出射角変調を実装する．必要となる要素光学系の光軸変調角 $m(s)$ は次のように求まる．

$$m(s) = \phi_{\mathrm{em}} - \phi_{\mathrm{in}}. \tag{4.1}$$

ϕ_{in} と ϕ_{em} は面法線を基準とした光線入射角と出射角を表す．ϕ_{in} と ϕ_{em} はスネルの法則より次のように計算できる．

$$\phi_{\mathrm{in}} = \arctan\left(\frac{\mathrm{d}g(s)}{\mathrm{d}s}\right), \tag{4.2}$$

$$\phi_{\mathrm{em}} = \arcsin\left(n \sin\left(\phi_{\mathrm{in}}\right)\right). \tag{4.3}$$

Fig. 4.5(b) に提案する実装法の概念を示す．$g(s)$ の設計を変えることで，任意の位相変調光学素子を仮想的に実装できる．

4.4 システムの設計条件

アレイ光学系では要素光学系及び画素が有限の幅を持つため，LF は離散的にサンプリングされる．LF のサンプリング定理を満たすようアレイ光学系を設計しなければ，LF イ

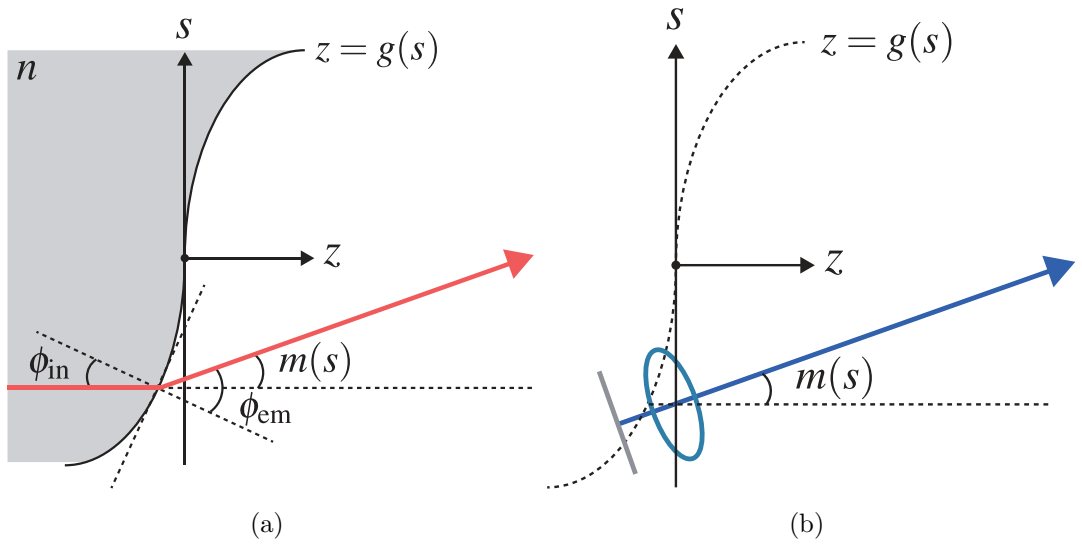


Fig. 4.5　Designs for implementing phase modulation in virtual optics. Phase modulation by (a) using a phase plate, and (b) tilting the optical axes of virtual elemental optics for achieving modulation equivalent to that of a phase plate.

メージングにおいてエイリアシングによるアーティファクトが発生する．既存研究で LF イメージングにおけるサンプリング条件が定式化されており，Plenoptic sampling 理論と呼ばれる [162]．本節では，Plenoptic sampling 理論を位相変調型 LF イメージングシステムに拡張し，提案研究におけるアレイ光学系の設計条件を定式化する．また，導出した条件の妥当性を光線追跡に基づくシミュレーションにより検証する．

4.4.1　LF のサンプリング条件

LF をオーバーサンプリングするために必要な，イメージングシステムの画素と要素光学系のナイキストピッチをそれぞれ定式化する．

画素のナイキストピッチ

LF のサンプリング条件を満たす要素光学系の最小ピッチ (画素のナイキストピッチ) Δu を定式化する．センサ面での物体像の最小構造の幅を Δo と置く．

イメージングシステムの分解能は，センサの画素ピッチだけでなく回折や収差等光学的な影響によっても制限される．このような光学的分解能を Δa と定義し，センサによるサンプリング分解能を Δu と定義する．ディジタル超解像処理を前提とした場合，サンプリング分解能は実センサの画素幅 Δu ではなく仮想センサの画素幅 δu で制限される．ディ

ジタル超解像では，仮想センサの画素幅を実センサの画素幅より小さく設定し，光線追跡を小数画素精度で計算することでサンプリング解像度を向上させる．このディジタル超解像後のサンプリング分解能 δu を次式で定義する．

$$\delta u = \frac{\Delta u}{n_{\mathrm{sr}}}. \tag{4.4}$$

ここで，n_{sr} は解像度の向上度合い (超解像倍率) を表す．ただし，$n_{\mathrm{sr}} > 0$ である．n_{sr} の理論的上限は要素光学系の総数 N である．しかし現実的には，解像度は光学分解能 Δa によっても制限されるため，n_{sr} は N より小さくなる [126]．最小構造 Δo の物体像をオーバーサンプリングするためには，Nyquist–Shannon のサンプリング定理より次の条件を満たす必要がある．

$$\max(\Delta a, \delta u) \leq \frac{\Delta o}{2}. \tag{4.5}$$

一般的にイメージングシステムでは $\delta u > \Delta a$ となる．この場合，実センサの画素ピッチ Δu が満たすべき条件は次式で表すことができる．

$$\Delta u = n_{\mathrm{sr}} \delta u \leq n_{\mathrm{sr}} \frac{\Delta o}{2}. \tag{4.6}$$

要素光学系のナイキストピッチ

位相変調 LF イメージングにおける要素光学系のナイキストピッチを決定する．一般的に LF イメージングでは，要素光学系のピッチはイメージングにおける視差が画素幅より小さくなるよう設計する必要がある [162]．この条件を，位相変調 LF イメージングに適用できるよう拡張する．

LF の再構成処理では，取得 LF データは仮想像面に光線追跡により投影される．本研究では，Fig. 4.6 に示すように，仮想像面画素と仮想光学系画素の対応関係を幾何光学的に計算することで投影処理を実装する．ここで，仮想像面の中心画素から見たサンプリング条件を定式化する．本節では，他の画素から見たサンプリング条件も中心画素から見たサンプリング条件に近軸近似できると考える．$s^{(k)}$ に位置する k 番目の要素光学系から光線を投影することで，仮想像面の中心画素は座標 u_{s} の画素から出射した光線を受光するとする．u_{s} は幾何光学的に次式で求まる．

$$u_{\mathrm{s}}\left(s^{(k)}, z_{\mathrm{v}}, m\left(s\right)\right) = f \tan\left(\theta_{\mathrm{ray}} + \theta_{\mathrm{mod}}\right). \tag{4.7}$$

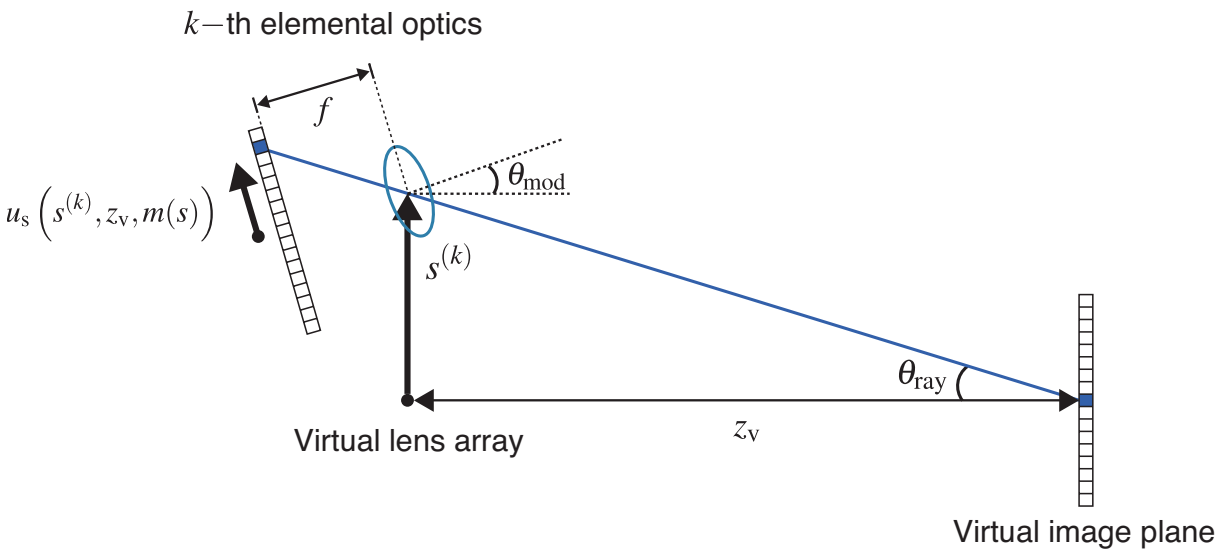


Fig. 4.6　Geometrical relation between pixels on a sensor and pixels on a virtual image plane in virtual space.

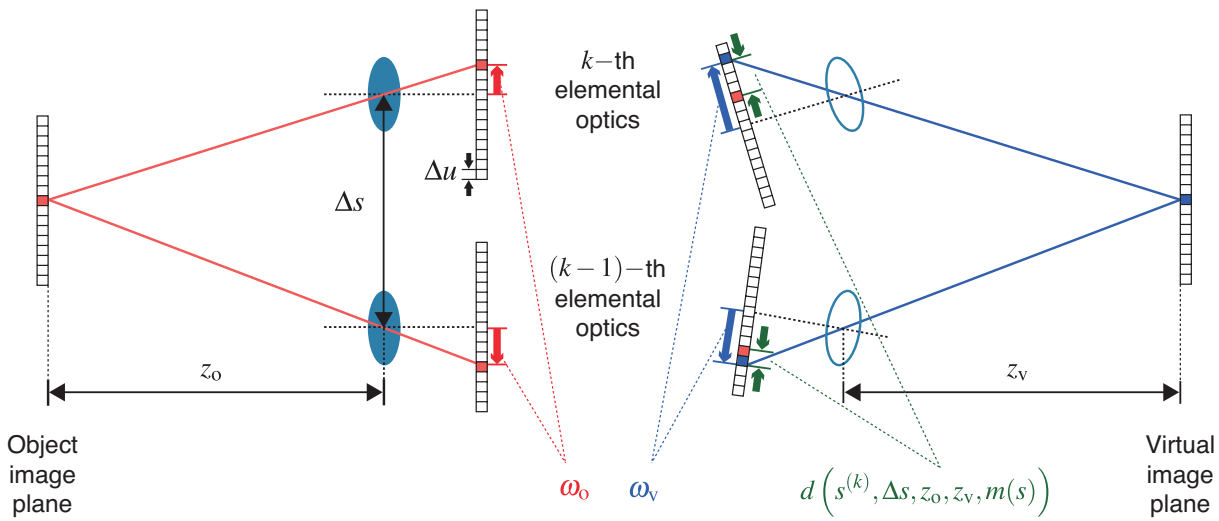


Fig. 4.7　Geometrical representation of the disparity.

ここで，Fig. 4.6 に示すように，

$$\theta_{\mathrm{ray}} = \arctan\left(\frac{s^{(k)}}{z_{\mathrm{v}}}\right), \tag{4.8}$$

$$\theta_{\mathrm{mod}} = m\left(s^{(k)}\right), \tag{4.9}$$

となる．ここで，z_{v} は仮想像面と仮想要素光学系の距離である．θ_{ray} は座標 $s^{(k)}$ のレンズを通過する光線の伝搬角度，θ_{mod} は位相変調のために実装された仮想要素光学系の光軸の変調角を表す．センサ画素と物体面画素の幾何関係は，式 (4.7) の z_{v} を物体面と要素光学系間距離 z_{o} に代替することで計算できる．ただし，実空間上では位相は変調されていないため $m(s) = 0$ となる．

ここで視差 d を，実空間の隣接要素光学系間における受光画素の局所座標差と，仮想空間の隣接要素光学系間における受光画素の局所座標差の絶対差として定義する．各受光画素の局所座標 u_{s} は式 (4.7) から求まる．対応関係を Fig. 4.7 に示す．視差は位相変調 $m(s)$ にも依存して変化する．k 番目及び $k+1$ 番目の要素光学系における視差 d は次式で計算できる．

$$d\left(s^{(k)}, \Delta s, z_{\mathrm{o}}, z_{\mathrm{v}}, m\left(s\right)\right) = \left|\omega_{\mathrm{o}} - \omega_{\mathrm{v}}\right|. \tag{4.10}$$

ここで，Fig. 4.7 に示すように，

$$\omega_{\mathrm{o}} = u_{\mathrm{s}}\left(s^{(k)}, z_{\mathrm{o}}, 0\right) - u_{\mathrm{s}}\left(s^{(k-1)}, z_{\mathrm{o}}, 0\right), \tag{4.11}$$

$$\omega_{\mathrm{v}} = u_{\mathrm{s}}\left(s^{(k)}, z_{\mathrm{v}}, m(s)\right) - u_{\mathrm{s}}\left(s^{(k-1)}, z_{\mathrm{v}}, m(s)\right), \tag{4.12}$$

$$\Delta s = s^{(k)} - s^{(k-1)}, \tag{4.13}$$

となる．ω_{o} は実空間の二つの要素光学系の局所画素座標 u_{s} の差，ω_{v} は仮想空間上の局所画素座標差，Δs は要素光学系のピッチである．k 番目の要素光学系の視差 d は，ω_{o} と ω_{v} の絶対差として定義される．

アレイ光学系におけるナイキストピッチ導出のために，平均視差 $\overline{d}$ を次式で定義する．

$$\overline{d}\left(\Delta s, z_{\mathrm{o}}, z_{\mathrm{v}}, m\left(s\right)\right) = \frac{\sum_{k=2}^{N} d\left(s^{(k)}, \Delta s, z_{\mathrm{o}}, z_{\mathrm{v}}, m\left(s\right)\right)}{N-1}. \tag{4.14}$$

LF をオーバーサンプリングするために，平均視差が画素幅以下となるよう要素光学系のピッチを設計する．この条件は次式で表される．

$$\overline{d}\left(\Delta s, z_{\mathrm{o}}, z_{\mathrm{v}}, m\left(s\right)\right) \leq \frac{\Delta u}{n_{\mathrm{sr}}} = \delta u. \tag{4.15}$$

平均視差 $\overline{d}$ は要素光学系ピッチ Δs の増加とともに単調増加するので，式 (4.15) を満たす最大要素光学系ピッチは一意に求まる．

LF イメージングに基づく位相変調イメージングにおいては再構成画像のエイリアシングを避けるためは，センサ画素ピッチと要素光学系ピッチは想定する全ての仮想像面距離 z_{v} で式 (4.6) 及び式 (4.15) を満たすよう設計される必要がある．

4.4.2　光線追跡に基づく検証

本節では，式 (4.7) に基づき，投影処理における LF データのサンプリング特性を解析する．また，式 (4.15) のサンプリング条件の影響を示すために，シミュレーション結果を示す．シミュレーションでは，位相変調イメージングの例として被写界深度拡大イメージングを実証する．

サンプリング特性

解析のため，2.6 節で導入した式 (2.20) のデフォーカスパラメータ Ψ を再度用いる．本章のパラメータ定義を用いて Ψ は次式で表される．

$$\Psi = \frac{\pi A^2}{4\lambda}\left(\frac{1}{f_{\mathrm{LF}}} - \frac{1}{z_{\mathrm{o}}} - \frac{1}{z_{\mathrm{v}}^{\Psi}}\right). \tag{4.16}$$

ここで，z_{v}^{Ψ} はデフォーカス Ψ に対応する仮想像面距離，λ は波長，A はアレイ光学系全体の直径，f_{LF} は系全体の焦点距離を表す．A と f_{LF} は次式で与えられる．

$$A = (N-1)\Delta s, \tag{4.17}$$

$$f_{\mathrm{LF}} = \frac{1}{\frac{1}{z_{\mathrm{o}}} + \frac{1}{z_{\mathrm{v}}^{\Psi=0}}}. \tag{4.18}$$

本研究では次式のように，仮想像面のインフォーカス距離 $z_{\mathrm{v}}^{\Psi=0}$ を物体距離 z_{o} と同一になるよう定義する．

$$z_{\mathrm{v}}^{\Psi=0} = z_{\mathrm{o}}. \tag{4.19}$$

Table 4.1 のシステムパラメータを式 (4.7) に代入して求めた，仮想像面中心画素の LF データのサンプリングパターンを Fig. 4.8 に示す．シミュレーションでは，被写界深度拡大実証のため仮想像面距離 z_{v} を変化させた．また，式 (4.15) の設計条件の効果を検証するため，要素光学系ピッチ Δs を各 z_{v} において変化させた．位相変調のない通常の LF イメージングのサンプリングパターンを Fig. 4.8(a) に示す．また，三次位相板，球面収差を

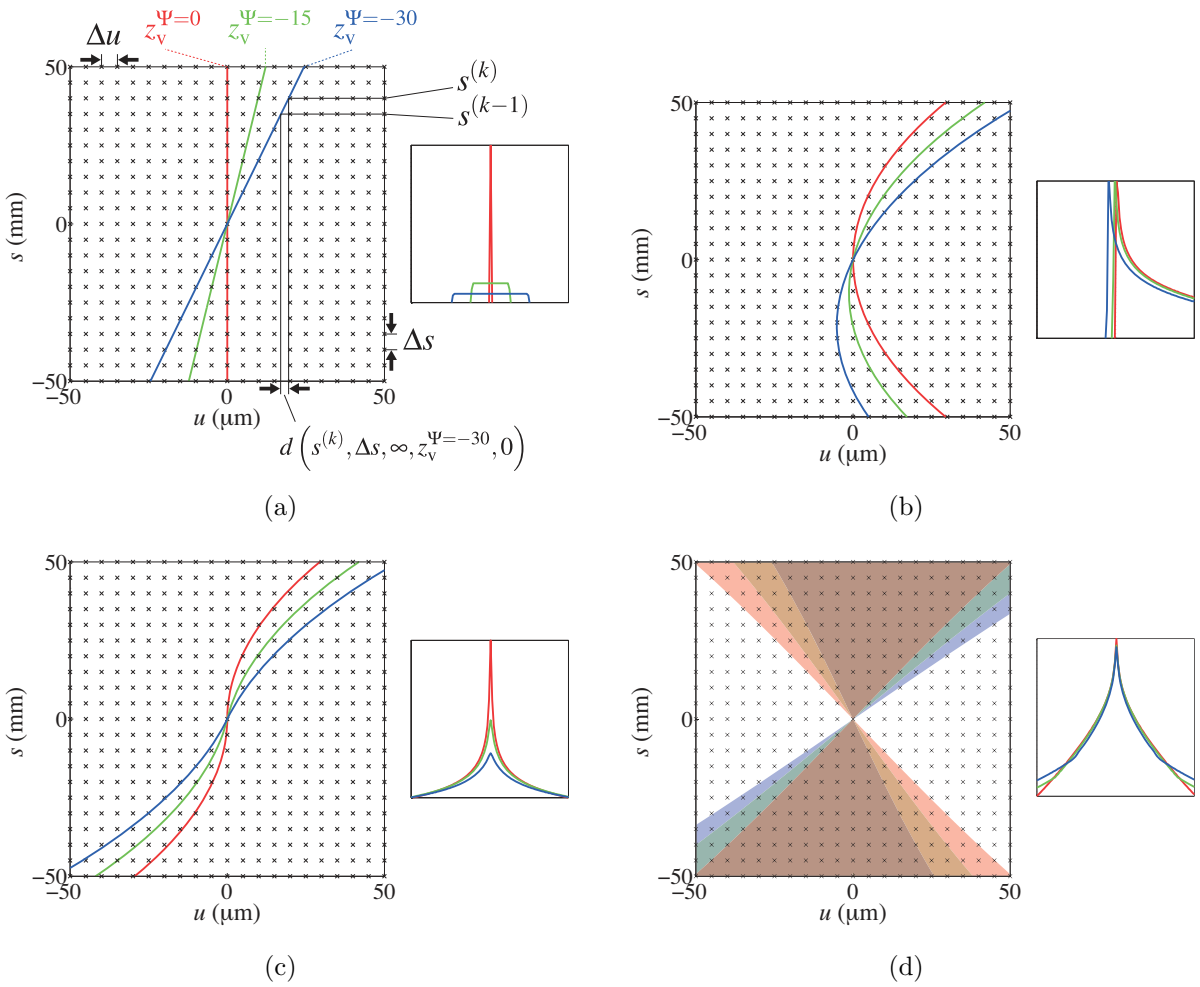


Fig. 4.8 Sampling patterns of LF data and PSFs in the systems (a) without and (b)–(d) with phase modulation. The modulations were designed by emulating (b) a cubic phase plate (CPP), (c) spherical optics, and (d) a radially symmetric kinoform diffuser.

Table 4.1　System parameters used in simulations.

	Parameter	Input value
Refractive index of phase plate	n	1.6
Free-space wavelength	λ	550 [nm]
Diameter of whole array-based optics	A	100 [mm]
Distance of object image plane	z_{o}	∞
Focal length of elemental optics	f	0.26 [mm]
Number of pixels of elemental optics	-	256×256
Pitch of pixels	Δu	1 [μm]
Pitch of elemental optics	Δs	variable
Distance of virtual image plane	z_{v}	variable

含む結像系，キノフォーム型回転対称拡散板を仮想的に実装した際のサンプリングパターンを Fig. 4.8(b)–Fig. 4.8(d) に示す．前述の位相変調素子を模擬するために，式 (4.2) と式 (4.3) の形状関数 $g(s)$ を次式で与えた [20, 105, 110]．

$$g(s) = \alpha s^3, \tag{4.20}$$

$$g(s) = \beta\sqrt{1 - \left(\frac{s}{\gamma}\right)^2}, \tag{4.21}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s} g(s) \sim P. \tag{4.22}$$

ここで，α，β，γ は撮像環境を考慮して設計する任意定数 [169]，P は任意の確率密度関数である．Fig. 4.8 の罰点はアレイ光学系で得られた LF データである．LF 空間上の線分及び領域は，式 (4.7) の再構成処理でサンプリングする LF データを表す．但し，LF データは離散サンプリングを可視化するため実際よりも疎に表示した．それぞれ，赤，緑，青は $z_{\mathrm{v}}^{\Psi=0}$，$z_{\mathrm{v}}^{\Psi=-15}$，$z_{\mathrm{v}}^{\Psi=-30}$ のサンプリングパターンに対応する．Fig. 4.3 の光線投影処理は線上及び領域上の LF データの積分に対応する．Fig. 4.8(d) の拡散板の場合では，LF データは設計した確率密度関数に基づき領域内で確率的にサンプリングされる [110]．

通常の LF イメージングでは，積分領域は Fig. 4.8(a) のように直線である．直線の勾配が仮想像面距離 z_{v} に対応する．一方，位相変調を含む LF イメージングでは，直線は曲線あるいは領域に置き換わる．Fig. 4.8 の各図の右部は積分で得られる各 PSF を表す．被写界深度拡大のための位相変調 LF イメージングでは，位相変調が無い場合と比較して PSF の距離不変性が増加する．

Fig. 4.8(a) に式 (4.10) の光線投影処理で用いられる画素ピッチ Δu，要素光学系ピッ

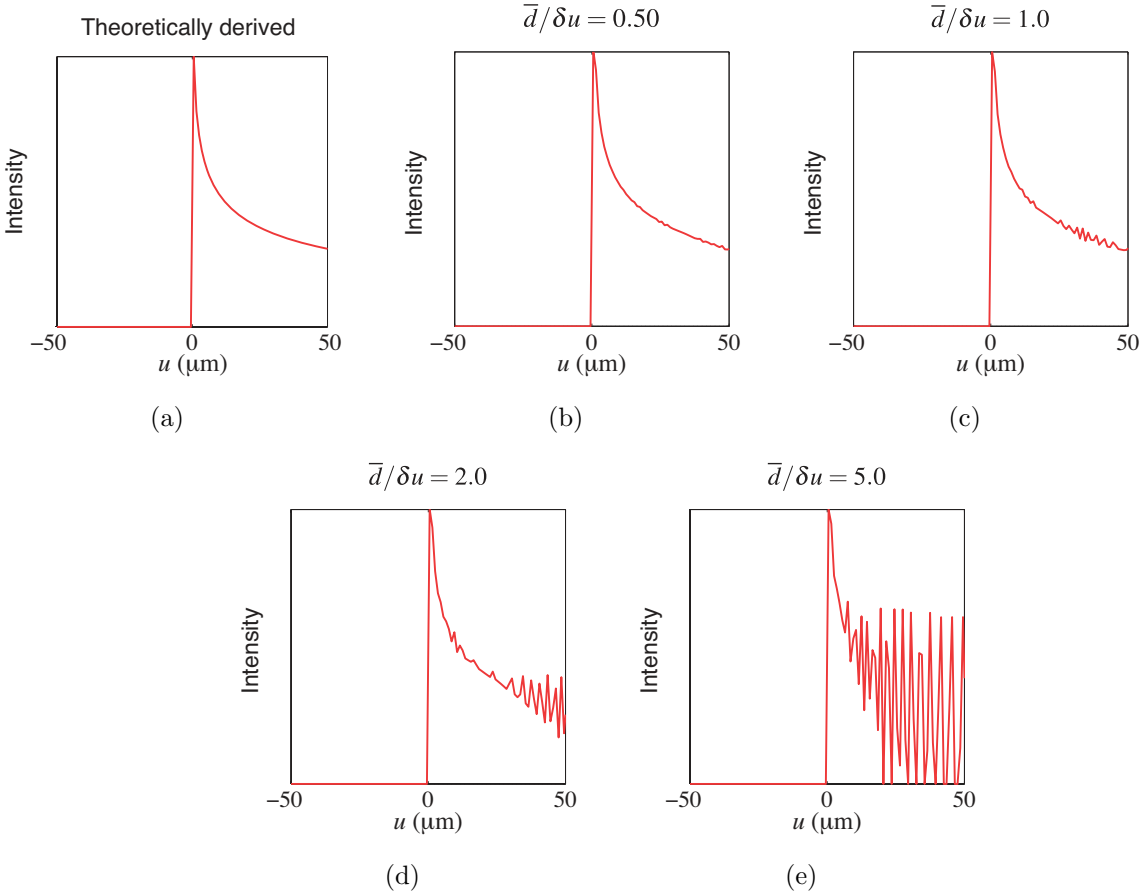


Fig. 4.9 The PSFs in CPP-based WFC obtained by (a) analytical derivation and (b)–(e) numerical simulations. In the simulations, the pitch of the elemental optics was determined to make the mean disparity (b) half of the pixel pitch, (c) equal to the pixel pitch, (d) double the pixel pitch, and (e) five times larger than the pixel pitch at $z_{\mathrm{v}}^{\Psi=0}$

.

チ Δs，視差 d を同時に示す．視差 d は隣接要素光学系のサンプリングされた u 座標の差に対応し，平均視差 $\overline{d}$ は全要素光学系の視差の平均に対応する．式 (4.15) の要素光学系の設計条件は，平均視差 $\overline{d}$ と超解像処理後の画素ピッチ δu の比較で表現できる．

PSF 解析

提案手法の設計条件の妥当性を検証するため，要素光学系ピッチを変えながら PSF を取得した．被写界深度拡大イメージングの例として，式 (4.20) で表現される三次位相板を用いた WFC を実証した．$\alpha = 40$ とした．簡略化のため，t 軸及び v 軸は無視した．

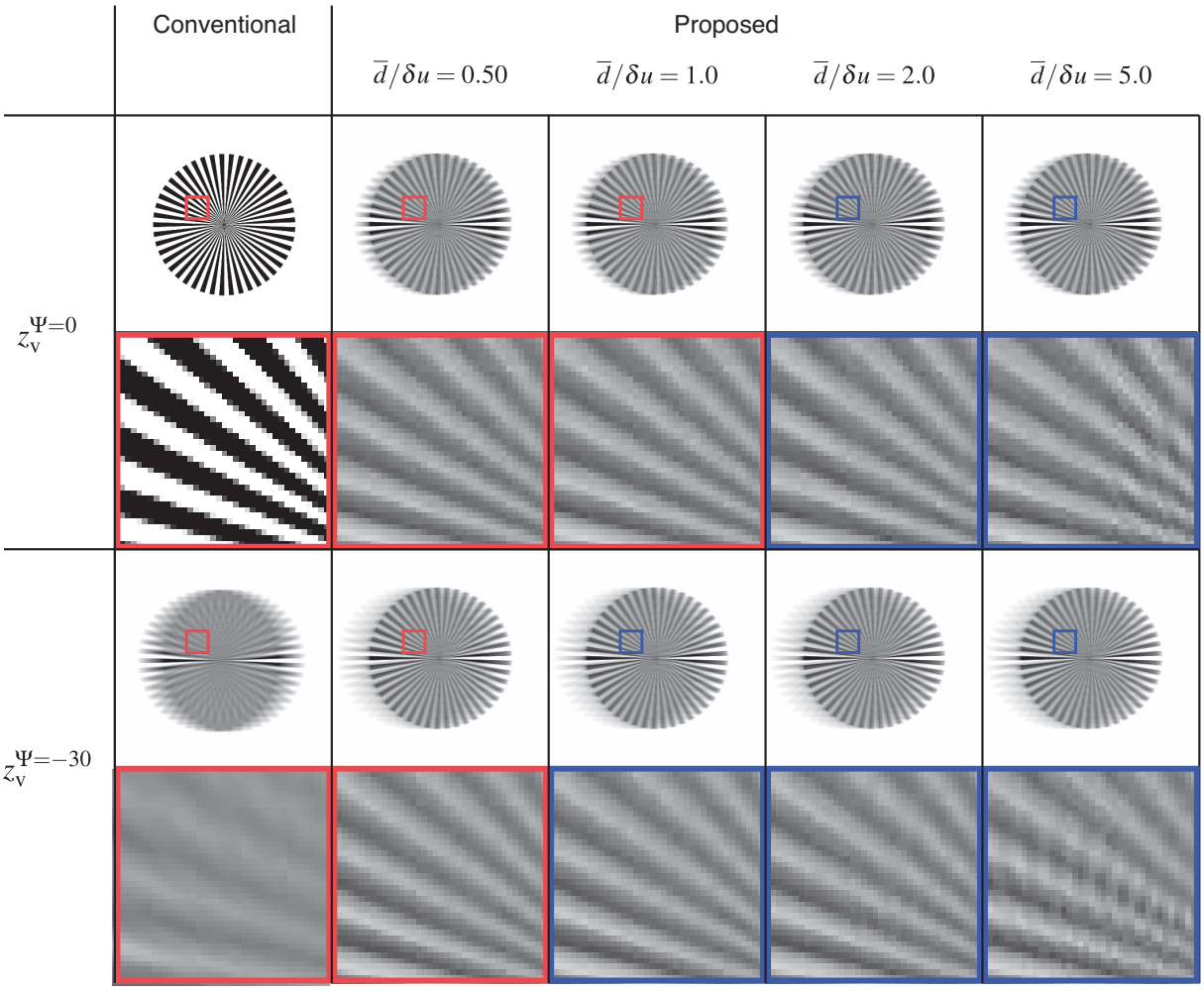


Fig. 4.10　Simulations with two-dimensional image. Computationally projected images obtained with the conventional and proposed LF cameras with the CPP while changing the element pitch and the object distance. Red and blue rectangles mean over- and under-sampling conditions, respectively.

三次位相板に基づく WFC の PSF は次式で解析的に表される [20, 170]．

$$h\left(u, W_{20}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \int_{-1}^{+1} \exp\left(j\alpha s_{\mathrm{p}}^{3} + jkW_{20}s_{\mathrm{p}}^{2} - j2\pi u s_{\mathrm{p}}\right) \mathrm{d}s_{\mathrm{p}} \right|^{2}, \tag{4.23}$$

$$W_{20} = \frac{\lambda\Psi}{2\pi}, \tag{4.24}$$

$$s_{\mathrm{p}} = \frac{s}{A}. \tag{4.25}$$

ここで，s_{p} は規格化瞳面座標である．式 (4.23) から解析的に求まる $\Psi = 0$ の幾何光学的 PSF を Fig. 4.9(a) に示す．LF イメージングでは光線投影処理は幾何光学に基づいて計算されるため，Fig. 4.9(a) の PSF は有限開口による回折を考慮しないモデルを用いて計算した．

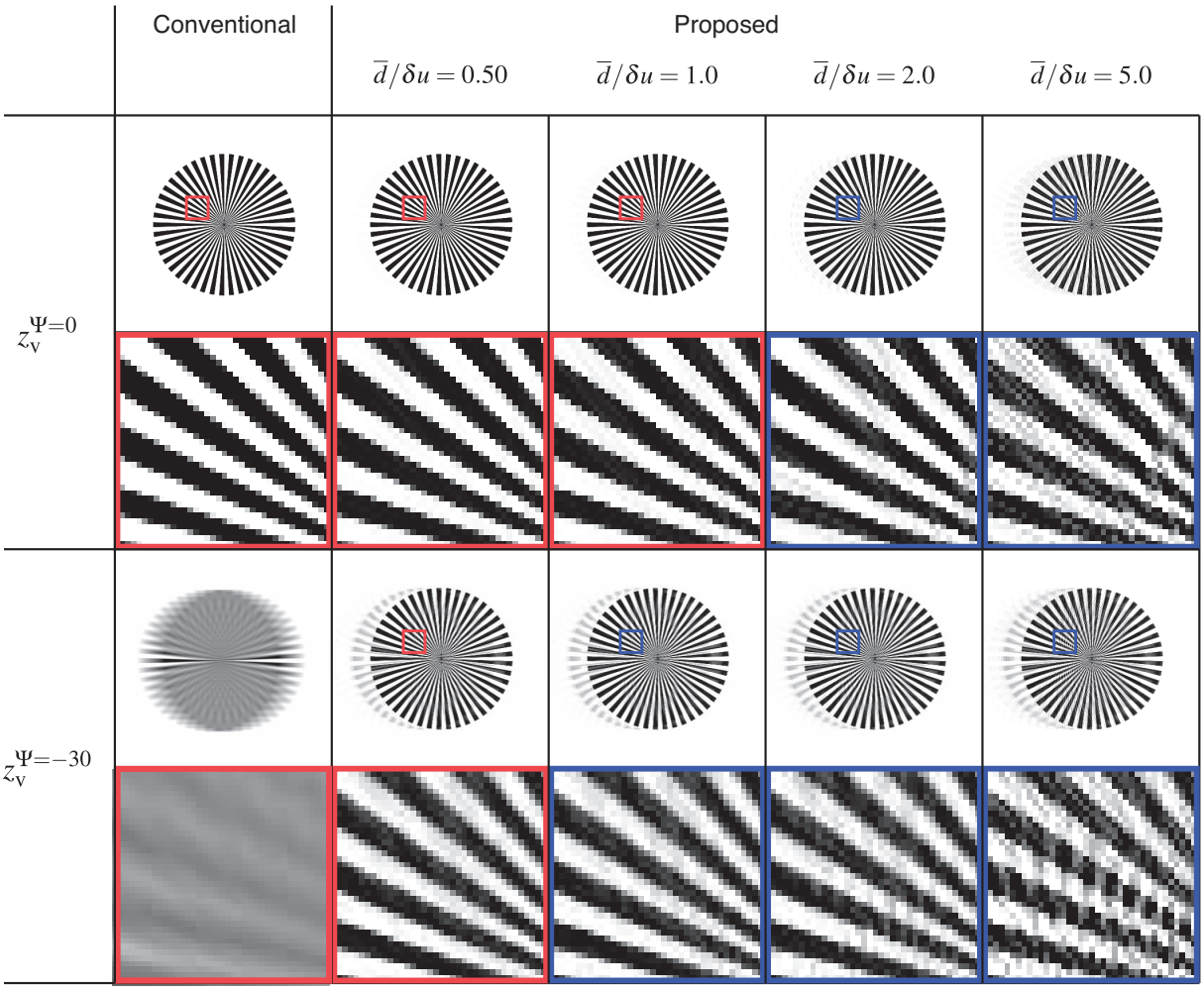


Fig. 4.11 Simulations with two-dimensional image. Final images obtained with the conventional and proposed LF cameras with the CPP while changing the element pitch and the object distance. Red rectangles and blue rectangles mean over-sampling and under-sampling conditions, respectively.

要素光学系のピッチを変えながら取得した PSF を Fig. 4.9(b)–Fig. 4.9(e) に示す．それぞれ式 (4.14) の平均視差 $\overline{d}$ を 0.5 画素，1 画素，2 画素，5 画素とした．要素光学系ピッチを式 (4.15) のサンプリング条件を満たすよう設計した場合，取得 PSF は Fig. 4.9(a) の解析的に得られた PSF と近似的に一致した．一方，アンダーサンプリングの条件下では，PSF のサイドローブが振動した．要素光学系ピッチに対応する PSF 変化は，サンプリング条件近傍 ($\overline{d}/\delta u = 1.0$ の近傍) で僅かであった．しかし，サンプリング条件は PSF を解析的 PSF と近似するための基準として有効に機能しているといえる．

Table 4.2　The pitch of optics and the achieved sampling pitch.

	$\Delta s = 0.26$ mm	$\Delta s = 0.51$ mm	$\Delta s = 1.0$ mm	$\Delta s = 2.6$ mm
$z_{\mathrm{v}}^{\Psi=0}$	$\overline{d}/\delta u = 0.50$	$\overline{d}/\delta u = 1.0$	$\overline{d}/\delta u = 2.0$	$\overline{d}/\delta u = 5.0$
$z_{\mathrm{v}}^{\Psi=-30}$	$\overline{d}/\delta u = 0.55$	$\overline{d}/\delta u = 1.1$	$\overline{d}/\delta u = 2.2$	$\overline{d}/\delta u = 5.5$

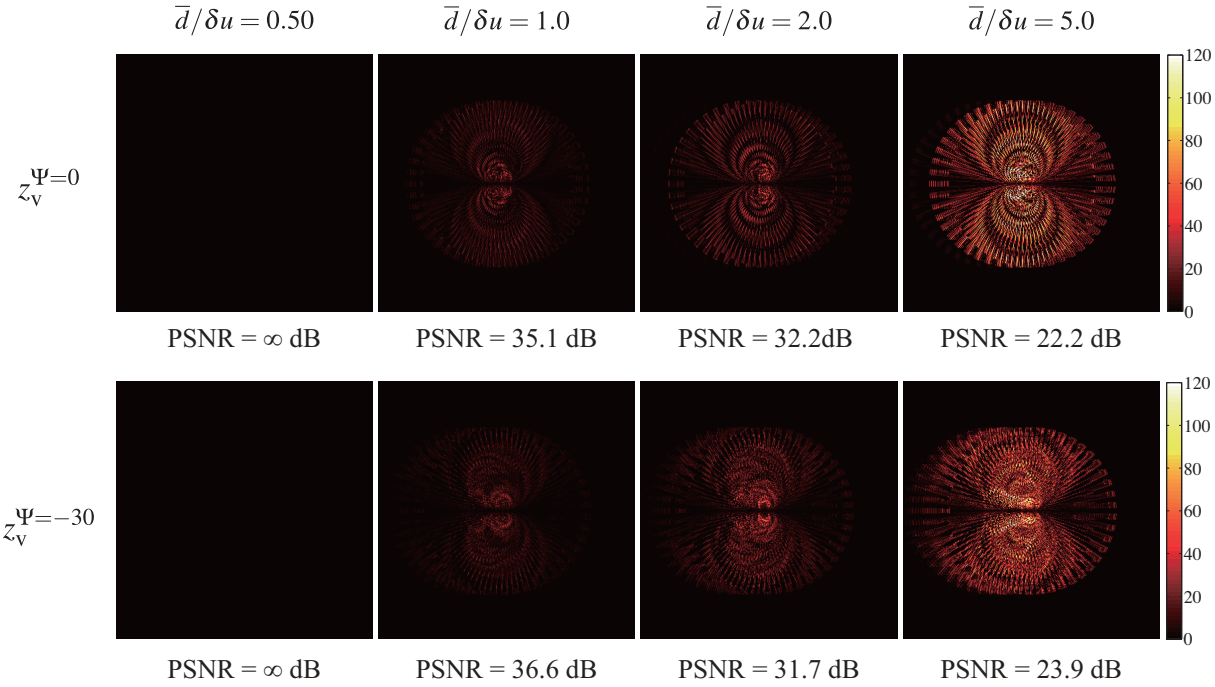


Fig. 4.12　Differences between deconvolved images with $\overline{d}/\delta u = 0.5$ and others at $z_{\mathrm{v}}^{\Psi=0}$ and $z_{\mathrm{v}}^{\Psi=-30}$, and their corresponding PSNRs.

画像による解析

式 (4.15) のサンプリング条件の影響を Table 4.1 のシステムパラメータを用いた撮像シミュレーションにより検証した．シミュレーションでは，物体像の最も細かい構造 Δo をセンサの画素ピッチ δu の二倍とし，式 (4.6) の画素に関するサンプリング定理を満たしているとした．また，$n_{\mathrm{sr}} = 1$ とした．PSF 解析と同様に，三次位相板を用いた被写界深度拡大イメージングを位相変調イメージングの例として検証を行った．

三次位相板を模擬した提案システムに基づき，要素光学系ピッチ Δs を変えながら $z_{\mathrm{v}}^{\Psi=0}$，$z_{\mathrm{v}}^{\Psi=-30}$ の仮想像面に対する撮像を光線追跡に基づきシミュレーションした．二つの仮想像面における要素光学系ピッチと平均視差 $\overline{d}$ の関係を Table 4.2 に示す．

式 (4.7) に基づき仮想像面上で再構成された画像を Fig. 4.10 に示す．通常の LF イメージングでは，インフォーカス距離 $z_{\mathrm{v}}^{\Psi=0}$ において合焦像が再構成され，デフォーカス距離 $z_{\mathrm{v}}^{\Psi=-30}$ においてデフォーカス像が再構成された．一方，位相変調を含む LF イメージングでは，両方の仮想像面で距離不変 PSF により劣化した画像が再構成された．式 (4.15) でアンダーサンプリングとなっている場合では，再構成画像にエイリアシングによるアーティファクトが確認された．

位相変調が無い場合及びある場合の LF イメージングの最終画像を Fig. 4.11 に示す．位相変調が無い場合の最終画像は Fig. 4.10 の取得画像と同一であり，有る場合の最終画像は Fig. 4.10 の取得画像のデコンボリューション結果である．デコンボリューションフィルタとして $\overline{d}/\delta u = 0.5$ 及び $z_{\mathrm{v}}^{\Psi=0}$ の PSF より生成したウィナーフィルタを用いた．これらの PSF は Fig. 4.9(b) の解析的に得られる PSF と近似的に同一である．LF のサンプリング条件による影響を示すため，理想的な PSF としてこの PSF をフィルタに用いた．提案手法で式 (4.15) の条件が満たされる場合，被写界深度が良好に拡大された画像の生成が確認された．アンダーサンプリングの場合，デコンボリューション結果はインフォーカス距離 $z_{\mathrm{v}}^{\Psi=0}$ でおいてもアーティファクトが確認された．オーバーサンプリング条件下での $z_{\mathrm{v}}^{\Psi=-30}$ の場合のデコンボリューション結果におけるアーティファクトは，PSF の僅かな距離変化によって生じたものである．WFC 法の原理に由来するアーティファクトであり [111]，LF の離散サンプリングによる影響とは異なる．

また，$\overline{d}/\delta u = 0.5$ の場合のデコンボリューション結果とその他の場合のデコンボリューション結果の差分を距離ごとに Fig. 4.12 に示す．差分画像と PSNR が示すように，アーティファクトは要素光学系ピッチとともに増加する．

本節の解析から，エイリアシングによるアーティファクトを避けるために，式 (4.6) と

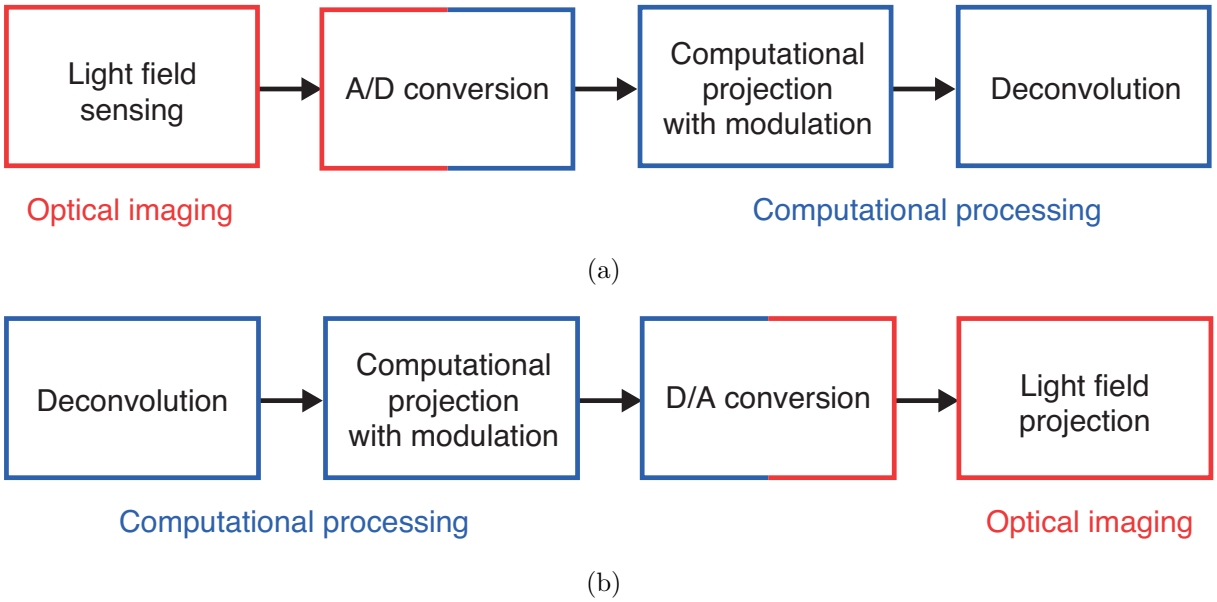


Fig. 4.13　Schematic diagram of (a) extended-depth-of-field (EDOF) camera and (b) EDOF projector based on phase-modulated LF imaging.

式 (4.15) の条件を満たすようシステムが設計される必要があるといえる．

4.5　原理実証実験

提案手法の効果を撮像系及び投影系において実験的に実証した．実験では，位相変調イメージングの例として被写界深度拡大イメージング及び超解像イメージングを位相板を用いずに実装した．実験におけるシステムのフローを Fig. 4.13 に示す．撮像系においては，Fig. 4.13(a) のように物体空間の LF をアレイ光学系により取得し，取得した LF データを計算機上の仮想像面上に投影することで物体像を再構成する．光線投影処理において位相変調を模擬することで，距離不変 PSF による再構成画像を生成し，デコンボリューションにより全焦点画像を生成する．実験では，被写界深度拡大のための位相変調として式 (4.20) で表現される三次位相板による位相変調を模擬した．一方，投影系では，Fig. 4.13(b) のように投影の前にデコンボリューション及び投影処理を行い，投影系に入力する LF データを生成する．この投影処理の際に位相変調を模擬する．変調されたデコンボリューション画像の LF データをアレイ光学系で投影することで，全焦点画像を投影面に投影する．

位相変調の仮想化に基づく被写界深度拡大イメージングの既存手法に対する位置付けを Fig. 4.14 に示す．既存の LF イメージングにおける被写界深度拡大画像生成法では，直

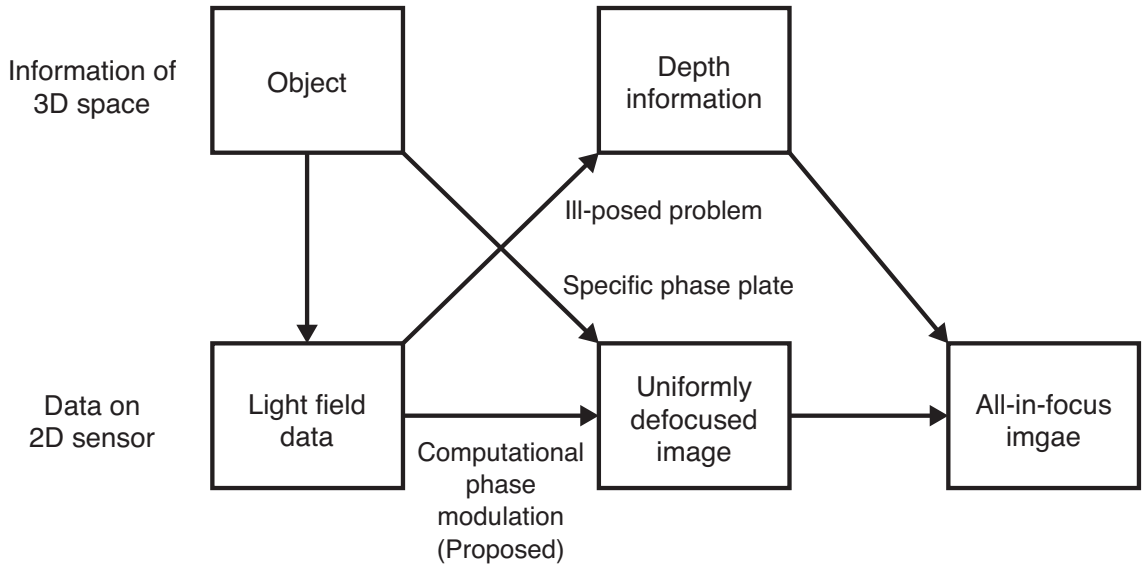


Fig. 4.14 Comparison of methods for EDOF imaging.

接的あるいは間接的に取得した対象の三次元情報を元に画素を再配置することで全焦点画像を生成する [171, 163, 172, 164]．二次元画素アレイで計測したデータを用いて三次元情報を推定するためには不良設定逆問題を解く必要があるため，演算コストや解の不定性が問題となる．提案手法ではイメージングの被写界深度自体を拡大しているため，対象の三次元情報を推定する必要がない点が優位となる．また，位相板を用いる被写界深度拡大法と比較して，位相板を物理実装する必要がない．そのため，単一の光学系による撮像データから，計算の切り替えのみで被写界深度拡大効果の有無や量を変更できる．これにより，実装の簡便化やコストの削減が達成される．

4.5.1 撮像系における位相変調イメージング

被写界深度拡大

Fig. 4.15 の系を用いて撮像における被写界深度拡大を実証した．実験では，画素幅 4.65×4.65 μm，画素数 1200×768 のセンサを含むモノクロ CCD カメラ (PL-B953U by PIX-ELINK) を機械的に走査してアレイ光学系を模擬した．シミュレーションと同様に，t 軸の走査は省略した．三次元物体として，印刷紙をアレイ光学系の光軸に対して奥行方向に傾けて配置した．

実験では，カメラを s 軸に沿って等間隔に走査しながら対象を撮像した．走査間隔は物体距離範囲内で式 (4.15) のサンプリング条件を満たすよう 0.2 mm とした．本実験では被

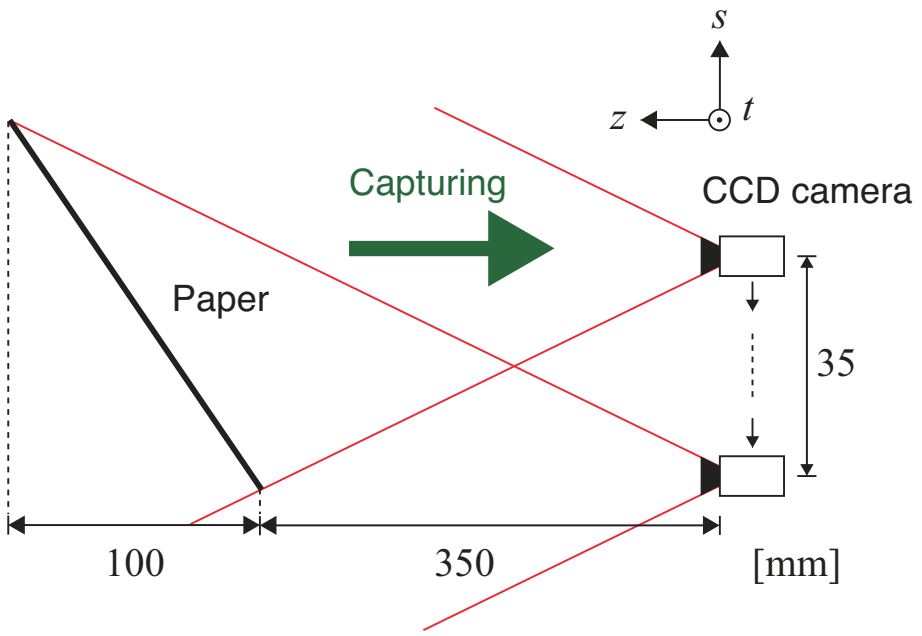
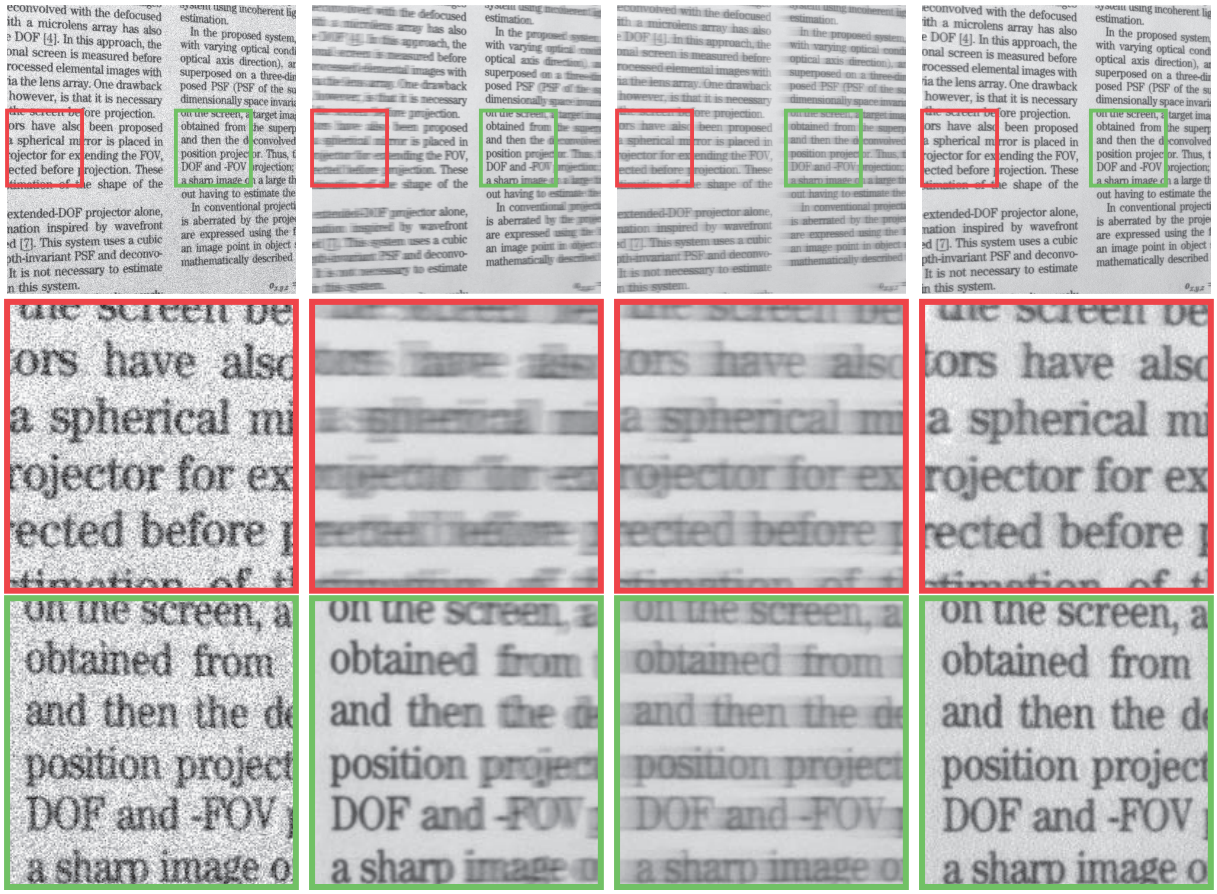


Fig. 4.15　Setup used for experimental verification of the EDOF camera.

写界深度拡大効果を検証するため，式 (4.15) の超解像倍率 n_{sr} は 1 とした．$n_{\mathrm{sr}} = 1$ の条件下において，センサは式 (4.6) の画素ピッチに関するサンプリング条件を満たす．

要素光学系の取得画像 (要素画像) を Fig. 4.16(a) に示す．画素値は再構成画像を基準に正規化した．ノイズ耐性の検証のため，撮像画像には 10 dB の加法性ガウシアンノイズを加えた．次に，LF データに対して投影処理を適用した．位相変調を加えない既存の LF 再構成画像を Fig. 4.16(b) に示す．対象の距離分布が未知であるため，単一の物体距離を仮定して光線投影を行った．投影処理による要素画像群の重畳により，要素画像と比較してノイズが抑制されるが，被写界深度の浅い画像が生成された．光線投影において位相変調を模擬した場合の再構成画像を Fig Fig. 4.16(c) に示す．ノイズが抑制され，かつ対象と距離不変 PSF のコンボリューションと近似できる再構成画像が生成された．位相変調を含む再構成画像をウィナーフィルタでデコンボリューションした結果を Fig. 4.16(d) に示す．Fig. 4.16(b) の従来手法と比較して，被写界深度が拡大された画像の生成が確認された．既存の WFC 法と同様に，最終画像においては Fig. 4.16(c) の再構成画像に含まれるノイズがデコンボリューションにより僅かに増幅されている．しかし，Fig. 4.16(d) の再構成画像におけるノイズは Fig. 4.16(a) の低光量の要素画像におけるノイズと比較して明らかに小さいといえる．演算コストの増加が許容される場合は，画像の先見情報を利用



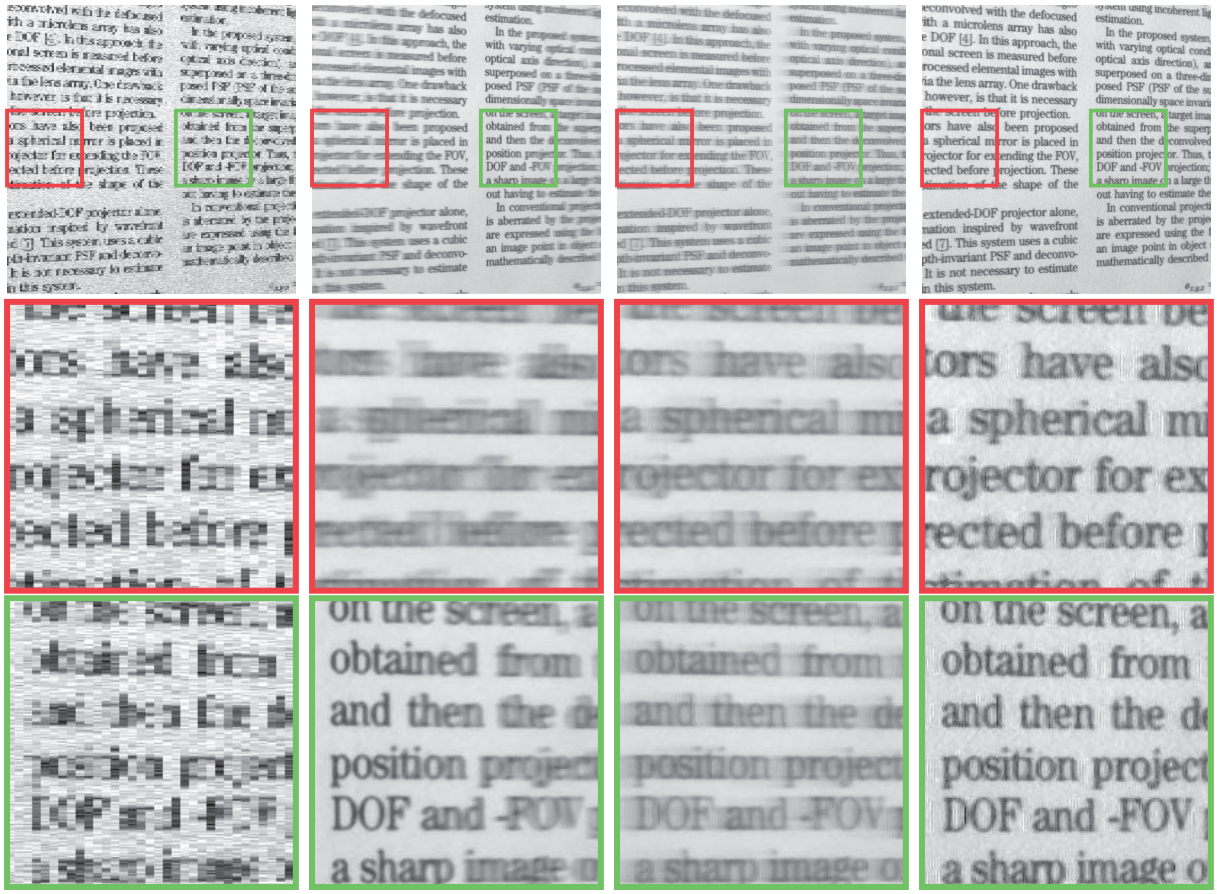
(a) (b) (c) (d)

Fig. 4.16 Results obtained with the EDOF camera based on phase-modulated LF imaging. (a) A single captured image, the computationally projected images (b) without and (c) with computational phase modulation, and (d) the deconvolution of Fig. (c).

した反復型デコンボリューションアルゴリズム [49] やノイズ除去処理を統合した反復型デコンボリューションアルゴリズム [146] を用いることで最終画像のノイズをさらに抑制することができる．

ディジタル超解像

次に，被写界深度拡大イメージングにおける超解像効果を検証した．低解像度カメラを模擬するため，水平方向の画素数を式 (4.4) の超解像度パラメータ n_{sr} を用いて $1/n_{\mathrm{sr}}$ に削減した．実験では $n_{\mathrm{sr}} = 3$ とした．ダウンサンプリングされた画像の画素ピッチは $n_{\mathrm{sr}}\Delta u$ となる．取得画像には 15 dB の加法性ガウシアンノイズを加えた．取得要素画像を Fig. 4.17(a) に示す．印刷紙の文字がダウンサンプリングによるエイリアシングの影



(a)　(b)　(c)　(d)

Fig. 4.17　Results obtained with super-resolved EDOF camera based on phase-modulated LF imaging. (a) A single low-resolution captured image, the computationally projected images (b) without and (c) with computational phase modulation, and (d) the deconvolved image of Fig. (c).

響及びノイズにより判別不能となった．位相変調が無い場合，有る場合の再構成画像を Fig. 4.17(b) と Fig. 4.17(c) に示す．超解像画像生成のため，光線追跡は小数画素精度で計算した．結果，解像度が向上されノイズの抑制された画像が生成された．Fig. 4.17(b) では被写界深度が制限され，Fig. 4.17(c) では距離不変 PSF により画像が劣化している．Fig. 4.17(c) をウィナーフィルタでデコンボリューションした結果を Fig. 4.17(d) に示す．Fig. 4.17(a)，Fig. 4.17(b)，Fig. 4.17(c) と比較して，解像度の向上とノイズの抑制，被写界深度の拡大効果が確認された．これらの結果から，被写界深度拡大イメージングにおける超解像効果が良好に実証されたといえる．

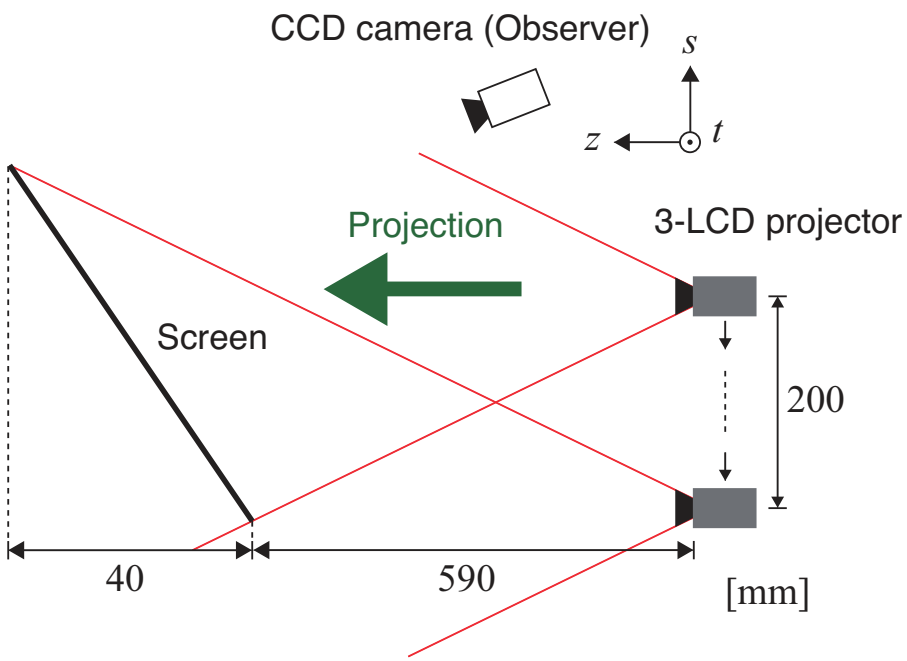
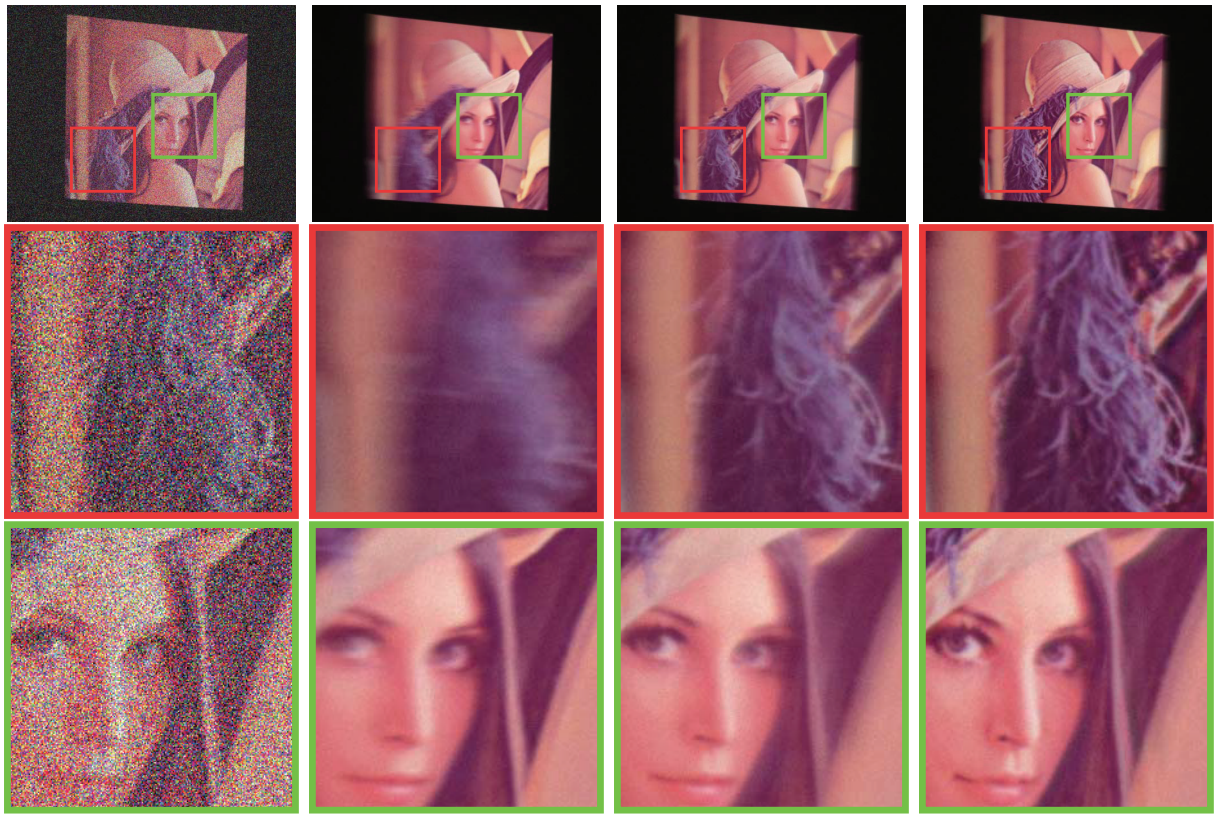


Fig. 4.18 Setup used for experimental verification of EDOF projector.

(a) (b)

Fig. 4.19 (a) An input Lena image and (b) its deconvolved image.

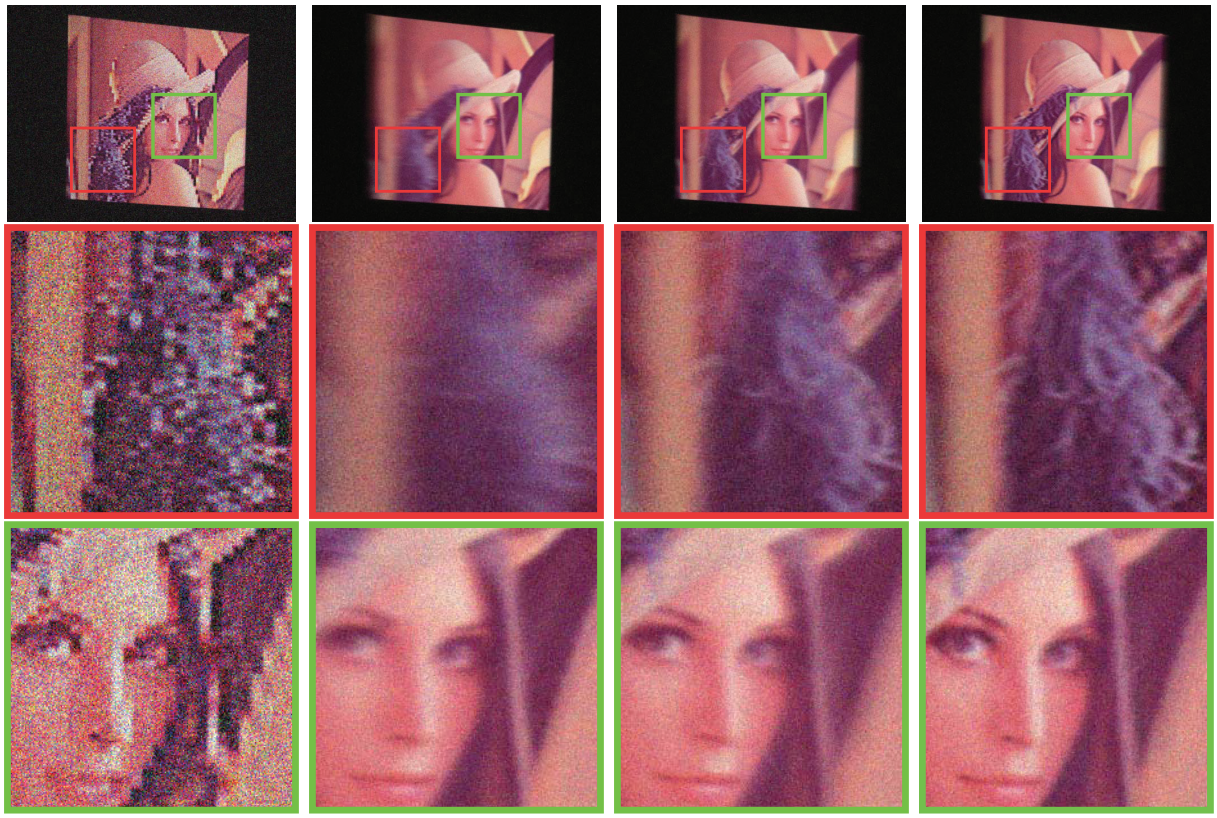


(a)　(b)　(c)　(d)

Fig. 4.20　Results obtained with the EDOF projector based on phase-modulated LF imaging. The optically projected images of the Lena image in Fig. 4.19(a) based on (a) the conventional single projector and the LF projector (b) without and (c) with computational phase modulation. (d) The optically projected image of the deconvolved Lena image in Fig. 4.19(b) based on the LF projector with computational phase modulation.

4.5.2　投影系における位相変調イメージング

提案手法に基づく投影系を実証した．実験系を Fig. 4.18 に示す．アレイ光学系を物理実装して用いる代わりに，画素幅 5.93×7.12 μm，画素数 1280×800 の 3LCD パネルを含むプロジェクタ (EH-TW400 by EPSON) を s 軸に沿って走査した．観測者として CCD カメラ (PL-B953U by PIXELINK) を配置した．三次元スクリーンとして，光学系から見た奥行方向に対して傾けた平面スクリーンを投影系の前方に配置した．



(a) (b) (c) (d)

Fig. 4.21 Results obtained with the super-resolved EDOF projector based on phase-modulated LF imaging. Optically projected images of the Lena image in Fig. 4.19(a) based on (a) the conventional single projector and the LF projector (b) without and (c) with computational phase modulation. (d) An optically projected image of the deconvolved Lena image in Fig. 4.19(b) based on the LF projector with computational phase modulation.

被写界深度拡大

初めに，入力画像を仮想空間上で投影処理し，LF データを生成した．この時，位相変調を模擬しない投影，模擬する投影をそれぞれ計算した．Fig. 4.13(b) で示される被写界深度拡大プロジェクションの効果を実証するため，Fig. 4.19(a) に示される原画像及び Fig. 4.19(b) に示される原画像のデコンボリューション結果を入力画像として用いた．インコヒーレントプロジェクタのダイナミックレンジ及び輝度の非負性を考慮し，3.5 節の式 (3.5) と同様に次式の最適化問題を解くことでデコンボリューションを実装した．

$$\begin{aligned} &\hat{\boldsymbol{i}} = \underset{\boldsymbol{i}}{\operatorname{argmax}}\, \mathcal{L}[\boldsymbol{i}|\bar{\boldsymbol{o}} = \boldsymbol{t}], \\ &\text{subject to } 0 \leq \hat{\boldsymbol{i}}(p) \leq c,\ \forall p. \end{aligned} \tag{4.26}$$

式 (3.5) と同様に，$\hat{\boldsymbol{i}}$ は入力画像 $\boldsymbol{i}$ として用いられるデコンボリューション結果，$\mathcal{L}[\cdot]$ は尤度関数，$\bar{\boldsymbol{o}}$ は投影面に生成される画像，$\boldsymbol{t}$ は原画像，$\hat{\boldsymbol{i}}(p)$ は $\hat{\boldsymbol{i}}$ の p 番目の画素の画素値，c はプロジェクタの最大強度である．実験では，原画像 $\boldsymbol{t}$ として Fig. 4.19(a) の画像を用いた．実験では式 (4.26) を RL 法 [31, 32] により解いた．デコンボリューション結果を Fig. 4.19(b) に示す．生成された LF データはプロジェクタの等間隔走査と共に傾斜スクリーンに投影された．走査間隔は (4.15) のサンプリング条件を満たすよう 1.3 mm とした．超解像倍率 n_{sr} は 1 とした．ノイズ耐性を検証するため，各要素投影像に 1 dB の加法性ガウシアンノイズを付加した．

要素光学系による投影像 (要素投影像) を Fig. 4.20(a) に示す．画素値は LF プロジェクタの投影像の明るさで規格化した．要素投影像は暗い像となるため，Fig. 4.20(a) では規格化によりノイズが増幅されている．Fig. 4.19(a) の入力画像を用いた場合の，位相変調を考慮しない場合及び考慮する場合の LF プロジェクタの投影像を Fig. 4.20(b) 及び Fig. 4.20(c) に示す．撮像系と同様に，高い光量によりノイズが抑制された，被写界深度の浅い像及び均一デフォーカス像が生成された．Fig. 4.19(b) のデコンボリューション画像を入力として用いた場合の，位相変調を考慮した LF プロジェクタの投影像を Fig. 4.20(d) に示す．ノイズの抑制された被写界深度の深い投影像が，距離分布が未知である三次元スクリーン上に生成された．

ディジタル超解像

被写界深度拡大プロジェクションにおいても超解像効果を検証した．撮像系と同様に，投影に用いる要素光学系への入力画像を超解像倍率 n_{sr} を用いて水平方向にダウンサンプリングし，低解像度の投影を模擬した．$n_{\mathrm{sr}} = 3$ とした．要素投影像には 5 dB の加法性ガウシアンノイズを付加した．要素投影像を Fig. 4.21(a) に示す．解像度及び光量の低い投影像が確認された．Fig. 4.19(a) の原画像を入力とした時の LF プロジェクタによる投影像を，位相変調を考慮しなかった場合を Fig. 4.21(b)，考慮した場合を Fig. 4.21(c) に示す．超解像の実装のため，事前投影処理は小数画素精度の光線追跡により計算した．実験結果から，超解像効果及びノイズ抑制効果が確認された．また，Fig. 4.21(b) においては被写界深度制限，Fig. 4.21(c) においては距離不変デフォーカス特性が確認された．Fig. 4.19(b) のデコンボリューション画像を入力として用いた際の，位相変調を考慮した LF プロジェクタの投影像を Fig. 4.21(d) に示す．ノイズが抑制され，解像度が向上し，被写界深度が拡大された投影像が三次元スクリーン上に生成されていることが確認された．

4.6 結言

本章では，LF イメージングに基づき，位相変調を仮想的に実現する手法を提案した．

4.2 節では，LF イメージングについて原理とモデルを示した．LF イメージングでは光線情報，すなわち LF を取得し，これを再構成することで像を形成する．このイメージング法は，結像光学系の一部を仮想化していることに相当する．

4.3 節では，LF イメージングに基づく位相変調の仮想化技術について，概念とモデルを示した．LF イメージングにおける光線追跡計算時に位相変調を再現することで，位相変調を計算機上で実装できる．

4.4 節では，LF のサンプリング条件を定式化した．系の平均視差が仮想センサの画素幅内に収まるようアレイ光学系を設計することで，エイリアシングの影響を受けない画像生成が可能となる．モデル化した設計条件が妥当であることを，数値シミュレーションに基づく画質評価により確認した．

4.5 節では，光学実験により原理を実証した．未知の三次元面に対し WFC を模擬した撮像及び投影を行い，被写界深度が良好に拡大されることを実験的に示した．また，被写界深度拡大イメージングにおいてデジタル超解像も同時に達成できることを示した．

第 5 章

散乱体設計に基づくレンズレス広視野イメージング

5.1　緒言

光学系の視野とサイズは正の相関を持つ．すなわち，広視野光学系のサイズは，収差補正のための光学設計により制限される．1.3.5 節で言及したように，点対称光学系を用いた CI はこの制限を打破するアプローチとして有効である [21, 90, 24]．しかし，これらのイメージング技術においても，光学系のサイズは依然として光学結像や収差補正による制限を受ける．

一方，式 (1.2) の撮像モデルから示唆されるように，CI では究極的には結像光学系を必要としない．このことに着目した，符号化光学系を用いたレンズレスイメージング技術が近年活発に研究されている [94, 95, 173, 95]．ここでは，光学系は物体光強度分布の符号化素子として用いられる．これらの研究で用いられる非結像光学素子を広視野イメージングに対して最適設計することで，広視野を高い光量で撮像できるレンズレスカメラが実現できると考えられる．

本章では，このような広視野イメージングを前提とした散乱体の設計法を検討する．まず，5.2 節では，散乱体を用いた CI の概要を述べる．原理と特徴を述べ，既存研究をまとめる．次に，5.3 節では，広視野イメージングのための散乱体の設計法を提案する．概念及びモデルを示し，散乱体の設計条件を検討する．最後に，5.4 節では，光伝搬の数値計算に基づく原理実証シミュレーションの結果を示す．設計された散乱体により，広視野で高い光量を達成する小型撮像系が構成できることを示す．

5.2　散乱体を用いたコンピュテーショナルイメージング

信号処理の活用により光学設計に課される要求を軽減することで小型な撮像系を実現する CI 技術が近年研究されている．例えば，収差を許容する簡素なレンズ系 [174]，複眼

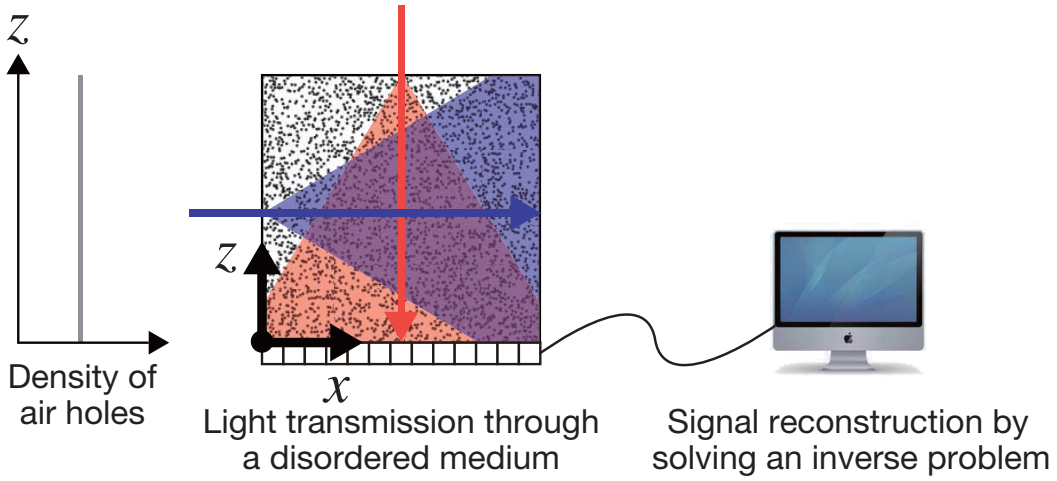


Fig. 5.1　Computational imaging using a disordered medium.

光学系 [68, 70]，回折光学素子 [95]，散乱体 [173]，ランダム配置された微小鏡片のセット [94] 等の非結像光学素子を用いた CI 技術が提案されている．1.2 節で述べたように，インコヒーレント光の伝搬は強度に関して線形であるため，光伝搬の順問題はノイズを無視した場合次式で書ける [6]．

$$\boldsymbol{g} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{f}. \tag{5.1}$$

ここで，$\boldsymbol{g}$ は透過光強度ベクトル，$\boldsymbol{H}$ はシステム行列，$\boldsymbol{f}$ は物体光強度ベクトルである．散乱体を用いた CI の研究分野では慣習的にシステム行列を透過行列 (TM: Transmission Matrix) と呼ぶため，本章でも同じ用語を用いる．式 (5.1) における TM は，光伝搬の強度に関する入出力関係を表す．CI では，撮像後に式 (5.1) でモデル化される撮像の逆問題を解くことで物体の光強度分布を取得する [175, 176]．なお，コヒーレント光を用いる場合は，光伝搬は光の振幅及び位相に関して線形に記述される．本研究では一般的なシーンでの撮像応用を想定し，インコヒーレント光源を用いる．

上記の CI では，既存のイメージングと異なり原信号が撮像後に再構成されるため，単位行列となるような TM を物理実装する必要が無くなる．すなわち，光学素子が光学結像や収差補正の機能を果たす必要が無くなる．代わりに，CI では光学素子は物体空間の光情報分布を符号化する機能を果たす．光学素子に必要とされる機能が一般化されるため，より自由度の高い光学設計が可能となる．そのため，既存の光学系のサイズに関する物理制約を打破することができる．

散乱体の散乱特性は光の入射角度に依存して急峻に変化するため，システムの光入射

角依存インパルス応答間の相関を減少させる．この散乱符号化効果により，異なる空間座標の光情報を計算で分離することが容易となる．つまり，逆問題が良条件となり，信号再構成の精度が向上する．そのため，散乱体は回折光学素子やランダム鏡片等と共に CI の実装に適した光学素子であるといえる．散乱体を用いた場合の CI [177, 92, 178] の概念図を Fig. 5.1 に示す．図は，センサによる散乱光の取得と再構成処理の組合せによる撮像を表現している．散乱体を用いた CI では，TM は撮像前に予め計測される．撮像後は計測された TM の情報を用いて，原画像の再構成を行う．これまで散乱体は，高開口数広視野イメージング [177, 178]，距離計測 [91]，単一マルチモードファイバを用いた内視鏡の実現 [179]，分光法 [180, 181] 等に応用されている．また，散乱体は 1.4.3 節で紹介した CS を実現するための光学系としても適している．CS は 1.4.3 節で述べたように，符号化光学系とスパース再構成技術に基づきセンサのナイキスト周波数を超える量のデータを取得する技術である [16]．ランダムな TM は良好な RIP を達成できるため，高精度な CS の実装に適している [138]．既存研究でも，散乱体に基づく CI 技術と CS の統合に基づくイメージング技術が報告されている [94, 98, 182]．

多重散乱は一般的な光学システムでは光情報の劣化の要因となるため忌避されるが，前述のように CI においては有用である側面を持つ．従来研究により散乱体を用いた CI 技術が提案されており [173]，Fig. 5.1 のように散乱角の広がりがイメージングの広視野化に寄与することも知られている [178]．しかし，散乱の強さと透過エネルギー量はトレードオフの関係にあるため，これらの CI 技術では光量の減少が問題となる．特に，Fig. 5.1 からも示唆されるように，視野の拡大量と散乱の強さは正の相関を持つため，実用的な視野を達成するためには原理上光量を著しく減少させる必要がある [178]．この散乱体における視野と光量のトレードオフは，無秩序な散乱体を受動的に使用していることに起因する．一方，CI に用いることを前提として散乱体を積極的に設計すれば，広視野と高い光量を両立する CI を実現できると考えられる．この考えに基づき，本章では散乱体を積極設計することで，光学系の小型さ，広い視野，高い光量を同時に達成する CI システムを実現する．

5.3 散乱体の設計に基づく広視野イメージング

5.3.1 原理

屈折率分布 (GRIN: GRaded INdex) 媒質を透過する光は，等位相面変調効果によりその伝搬方向が変調されることが知られている．この光線軌道は，Fig. 5.2 のパラメータ定

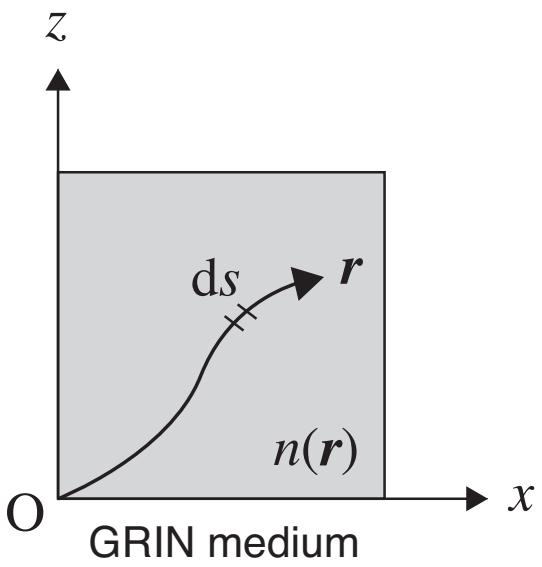


Fig. 5.2　Parameters definition of ray equation.

義を用いた次式の光線方程式でモデル化される [183]．

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left(n\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}s}\right) = \nabla n. \tag{5.2}$$

ここで，$\mathrm{d}s$ は微小光線軌道長，$\boldsymbol{r}$ は光線位置ベクトル，n は屈折率である．式 (5.2) は，GRIN 媒質内で屈折率が相対的に低い領域から高い領域に光線が誘導される性質を表現している．

提案手法では，散乱体をガラスと空気の混合媒体とみなし，媒体の実効屈折率の分布 (実効 GRIN) を制御することでセンサが取得できる光量を増加させる．ここで，実効屈折率とは，混合媒体における巨視的な屈折率を指す [184]．大域的な光伝搬方向がセンサ面となるよう実効 GRIN を制御する．概念図を Fig. 5.3 に示す．本研究では，Brandon らの研究 [181] と同様に，均一な屈折率を持つガラスにサブ波長サイズの空気孔を付与することで散乱体を実装する．このような散乱体は電子ビームリソグラフィを用いることで物理実装できる [185]．本研究では実効 GRIN を，散乱空気孔の空間的な密度分布を制御することで実装する．

実効屈折率の概念は主にフォトニック結晶の研究分野で広く用いられており，二次元的な媒体を考える場合ガラスと空気の面積比率を用いて次式でモデル化される [184, 186]．

$$n' = n_{\mathrm{b}} - N\pi r^2(n_{\mathrm{b}} - 1). \tag{5.3}$$

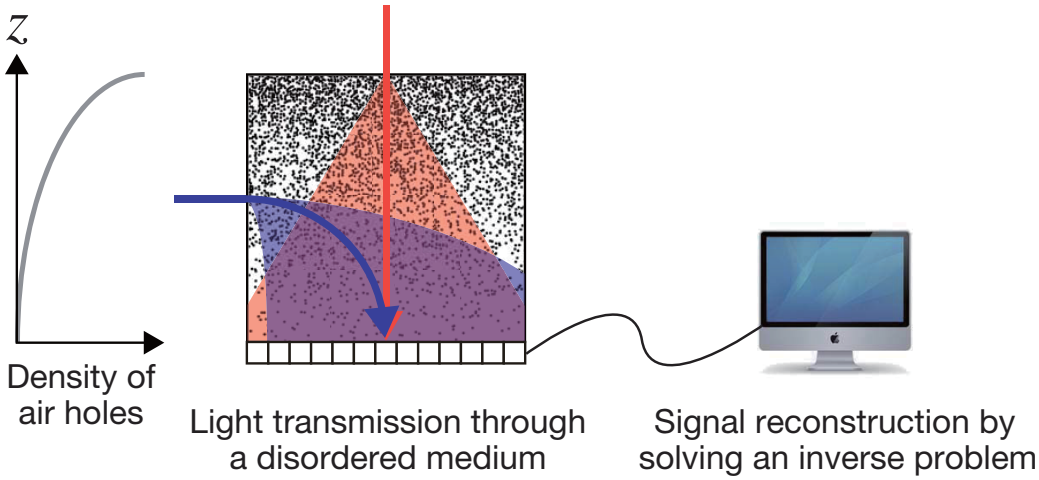


Fig. 5.3 Computational wide-FOV imaging using a designed disordered medium.

n' は実効屈折率，N は単位体積当たりの空気孔数，r は空気孔の半径，n_{b} はガラスの屈折率を表す．式 (5.3) の実効屈折率近似は，空気孔のサイズがサブ波長規模であれば成り立つ [187, 188, 186]．本研究ではフォトニック結晶分野の既存研究と異なり，空気孔を実効 GRIN の実装だけでなく散乱の実装にも利用する．言い換えれば，単一の光学素子で散乱と実効 GRIN を同時に実装する．これにより，超小型撮像系による広視野 CI を実現する．

実効 GRIN による光伝搬経路の変調の例を示す．Fig. 5.4 に，z 軸に対して実効 GRIN が線形に減少する散乱体における光伝搬の例を可視化する．光波の伝搬は，有限差分時間領域 (FDTD: Finite Difference Time Domain) 法により数値的に計算した．FDTD 法は，電磁場の振る舞いを決定する最も基礎的な方程式であるマクスウェル方程式 [6] から光波の伝搬を数値計算する電磁場解析法である [189, 190]．これにより，波源及び空間を満たす媒質を与えた際の任意時間及び空間の電磁場を求めることができる．原理上計算領域の境界で電磁場の反射が発生するが，境界吸収条件 (PML: Perfectly Matched Layer) を適用することでこの問題は解決できる [190]．空間及び時間が次式の安定化条件を満たすよう差分化される場合，良好な精度で光伝搬を計算できる [191, 192]．

$$\delta t \leq \frac{1}{\sqrt{(\delta x)^{-2} + (\delta y)^{-2} + (\delta z)^{-2}}}. \tag{5.4}$$

ここで，δt は時間の離散化間隔，δx，δy，δz は空間の離散化間隔である．FDTD 法はマクスウェル方程式を数値計算するアルゴリズムであるため，波動光学的影響を考慮した光伝搬の計算が可能である．

Fig. 5.4 では屈折率が 1.43 の蛍石を用いて散乱体を設計した．空気孔のサイズが 23.8 nm

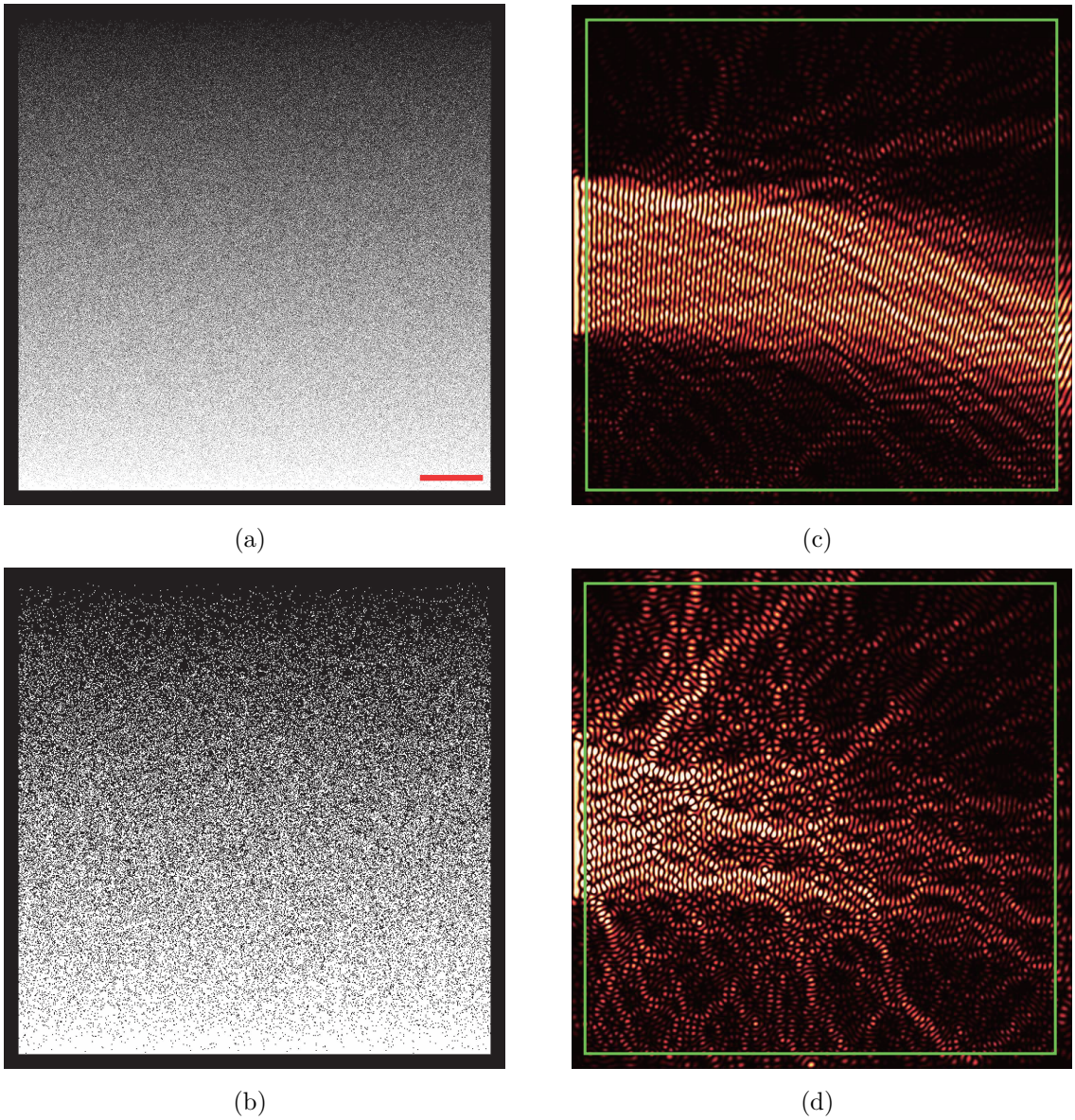


Fig. 5.4　Examples of disordered media with graded density distribution of air holes whose sizes are (a) 23.8 nm and (b) 71.4 nm, and (c)–(d) the intensities of transmitting light through them, respectively. A green rectangle indicates the boundary of the medium, and the scale bar indicates 5 μm.

の散乱体を Fig. 5.4(a)，71.4 nm の散乱体を Fig. 5.4(b) に示す．これらの散乱体を用いて FDTD 法に基づき光伝搬を計算した結果をそれぞれ 5.4(c) 及び 5.4(d) に示す．光源は波長 700 nm の単色平面波を仮定した．TM 波の伝搬における E_{z} 場の強度を可視化した．結果より，光伝搬の大域的な方向が変調されていることが明らかである．また，散乱体は散乱粒子のサイズにより散乱の強さが制御される．5.2 節で述べたように，散乱の強さと光量はトレードオフの関係を持つ．CI への応用を考えた場合，必要な信号再構成の精度を達成する範囲内で最も高い光量を達成する空気孔のサイズが望ましいといえる．

5.3.2 設計

実効 GRIN の概念を用いて，小型広視野撮像系を設計した．設計した撮像系を Fig. 5.5(a) に示す．設計ではラジアル型 GRIN レンズの GRIN を実現するよう空気孔の密度を制御し，広視野の入射光のセンサ取得効率を向上させた．設計に用いたラジアル型 GRIN レンズの実効 GRIN は次式でモデル化される [183]．

$$n(x) = n_{\mathrm{max}} \left(1 - \frac{1}{2}\alpha^2 x^2\right). \tag{5.5}$$

ここで，x はセンサ面に対して平行な軸，n_{max} は最大屈折率，α は定数である．ラジアル型 GRIN レンズでは一般的に結像のために GRIN が設計される．一方本研究では，GRIN を大域的光伝搬方向変調のために用いる．そのため，通常の GRIN レンズでは x 軸に沿って設計される屈折率傾斜を，z 軸に沿うよう設計した．z 軸は，Fig. 5.1 に示すようにセンサ面に直交する軸である．式 (5.5) のラジアル型 GRIN を仮定した場合，Fig. 5.3 に示されるような入射画角が約 90 度となる光線の軌道は，式 (5.2) の光線方程式に近軸近似を導入することで次式のように簡潔に記述できる [183]．

$$z(x) = z_0 \cos \alpha x + \frac{\theta_0}{\alpha} \sin \alpha x. \tag{5.6}$$

ここで，z_0 と θ_0 は媒質に対する入射光線の入射位置及び角度である．本研究では，光線は $z = 0$ のセンサ面で吸収されるとする．

Fig. 5.5(a) の広視野撮像のための散乱体の設計条件を，センサが画角 90 度の入射光線を検出できる条件として定式化する．この条件は，式 (5.6) と $\theta_0 = 0$ を用いて次のように求まる．

$$z(l_{\mathrm{x}}) = \frac{z_{\mathrm{t}} + z_{\mathrm{b}}}{2} \cos \alpha' l_{\mathrm{x}} \leq z_{\mathrm{b}}, \tag{5.7}$$

$$\alpha' = \frac{1}{l_{\mathrm{z}}} \sqrt{\frac{2\left(n_{\mathrm{max}} - n_{\mathrm{min}}\right)}{n_{\mathrm{max}}}}. \tag{5.8}$$

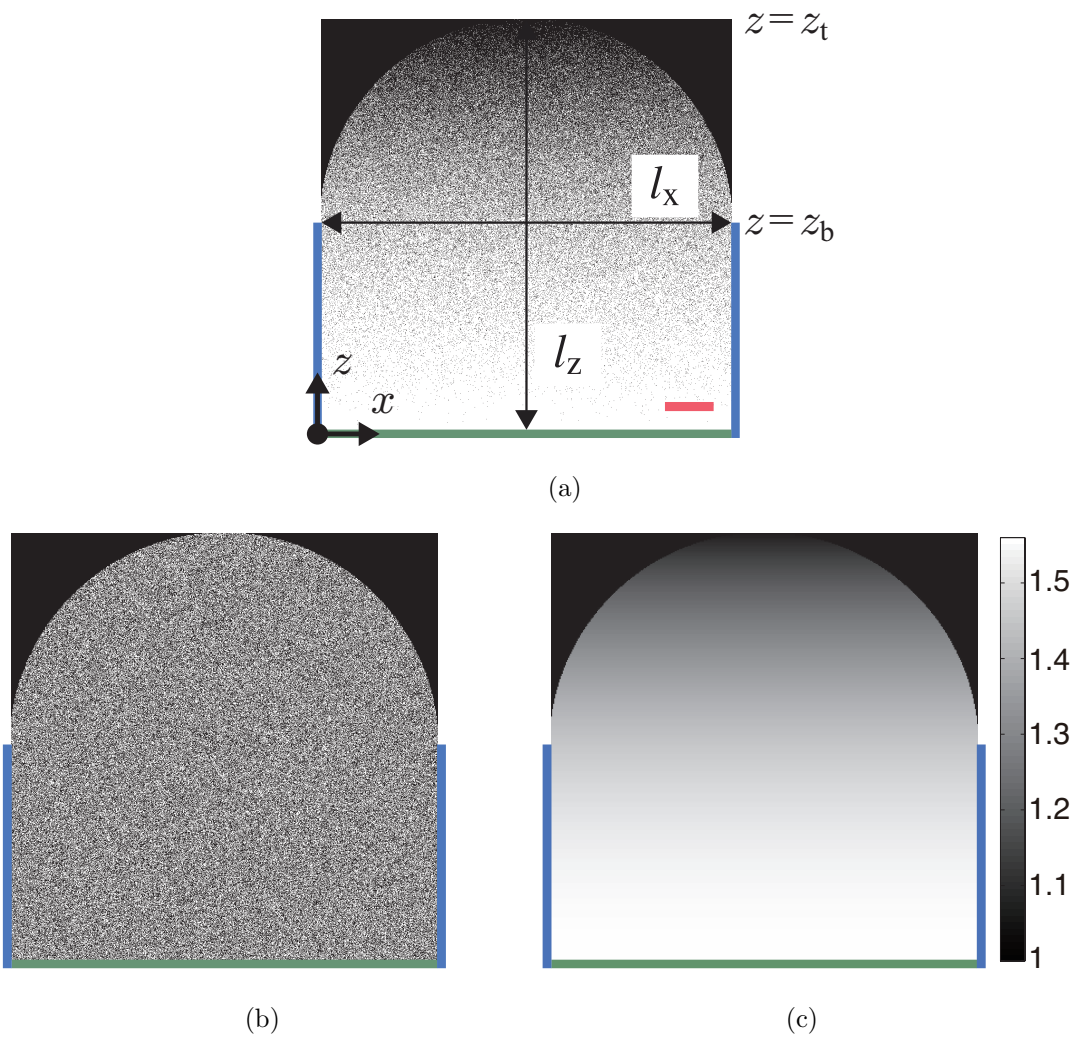


Fig. 5.5　Media used for simulations. (a) A designed disordered medium, (b) a random medium, and (c) a GRIN medium. The depth of color in Fig. (c) indicates a refractive index from 1.0 to 1.56. The blue lines are mirrors, and the green line is the sensor. The scale bar indicates 5 μm.

ここで，Fig. 5.5(a) に示すように，l_z と l_x は散乱体の z 軸及び x 軸方向の長さ，z_t と z_b は物体空間に露出している媒体表面のセンサ面から見た最大高さ及び最小高さである．n_min は実効屈折率の最小値である．本研究では，z_t と z_b をそれぞれ l_z，$l_\mathrm{z}/2$ とする．式 (5.8) は式 (5.5) に $x = l_\mathrm{x}$ 及び $n(l_\mathrm{x}) = n_\mathrm{min}$ を代入して導出した．空気孔の半径 $r > 0$ とガラス屈折率 $n_\mathrm{b} > 1$ を用いて実効屈折率 $n' \in [1, n_\mathrm{b}]$ を実現する際に必要な単位体積当たりの空気孔数 N は，式 (5.3) と式 (5.5) を用いて一意に求まる．

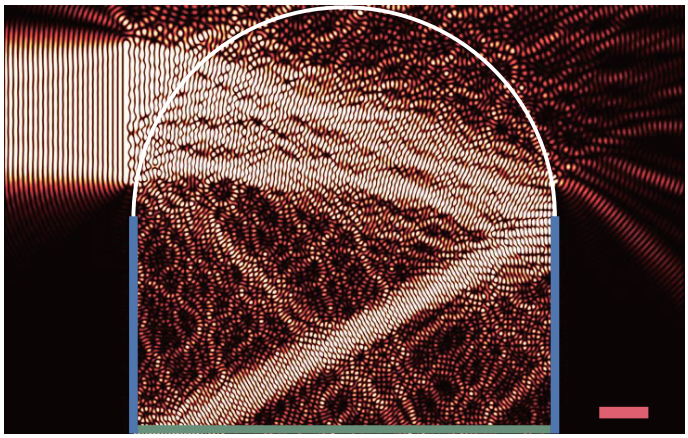
5.4 原理実証シミュレーション

散乱体を用いた光量損失の少ない広視野 CI をシミュレーションにより実証する．シミュレーションではまず TM と光量を計測する．次にこれらのデータとノイズを用いて撮像をシミュレーションする．最後に，式 (5.1) の逆問題を解くことで原信号を再構成する．光伝搬は FDTD 法により計算した．FDTD 法の計算に用いる光源等に関する仮定は 5.3.1 節と同様とした．物体距離は無限遠とした．

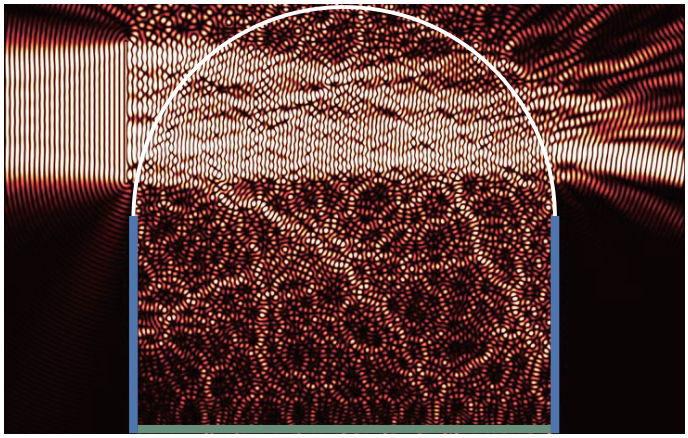
式 (5.7) の設計条件を考慮して，一つの設計散乱体と二つの参照実験用媒体を生成した．Fig. 5.5(a) の設計散乱体では，空気孔の密度分布を制御することでラジアル型 GRIN レンズの実効 GRIN を実装した．Fig. 5.5(b) の無秩序散乱体では，空気孔をランダムに分布させた．この無秩序散乱体は，実効 GRIN による光量増加効果を示すために用いる．Fig. 5.5(c) の非散乱ラジアル型 GRIN 媒体では，屈折率を z 軸に沿って 1.56 から 1.0 に変調させた．この非散乱 GRIN 媒体には空気孔を付与していない．この非散乱媒体は，散乱による光入射角情報の符号化効果が再構成精度に与える影響を示すために用いる．全ての媒体において，一般的な広視野撮像系における光学設計法と同様に，表面形状を円形にした．また，系の小型さを維持しつつ実効 GRIN の影響を強調するため，各媒体の表面を除く境界面を鏡により包囲し，斜入射時の表面–センサ面間光路長を拡大した．

散乱体は屈折率 1.56 のガラスにより実装し，空気孔のサイズは 47.6 nm とした．空気孔のサイズは，散乱の強さと光量のバランスを考慮して実験的に調節することで決定した．非散乱媒体の GRIN と設計散乱体の実効 GRIN は同一となるよう設計した．l_z と l_x はそれぞれ 42.0 μm とした．

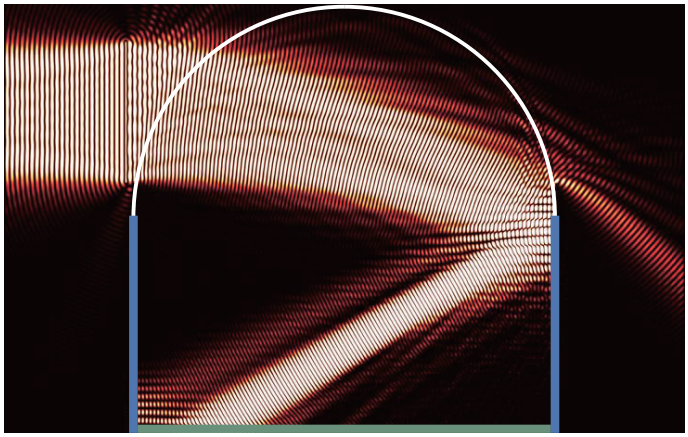
TM を取得するために，それぞれの媒質において入射角を変えながら平面波を入射させ，その取得画像，すなわちインパルス応答を計測した．計測は，光源の入射角を変えながら FDTD 法に基づき光伝搬を数値計算することで実行した．センサ面に対して −90 度から 90 度まで画角範囲を想定し，これを等間隔に 31 分割して光入射の走査を行った．画素に



(a)

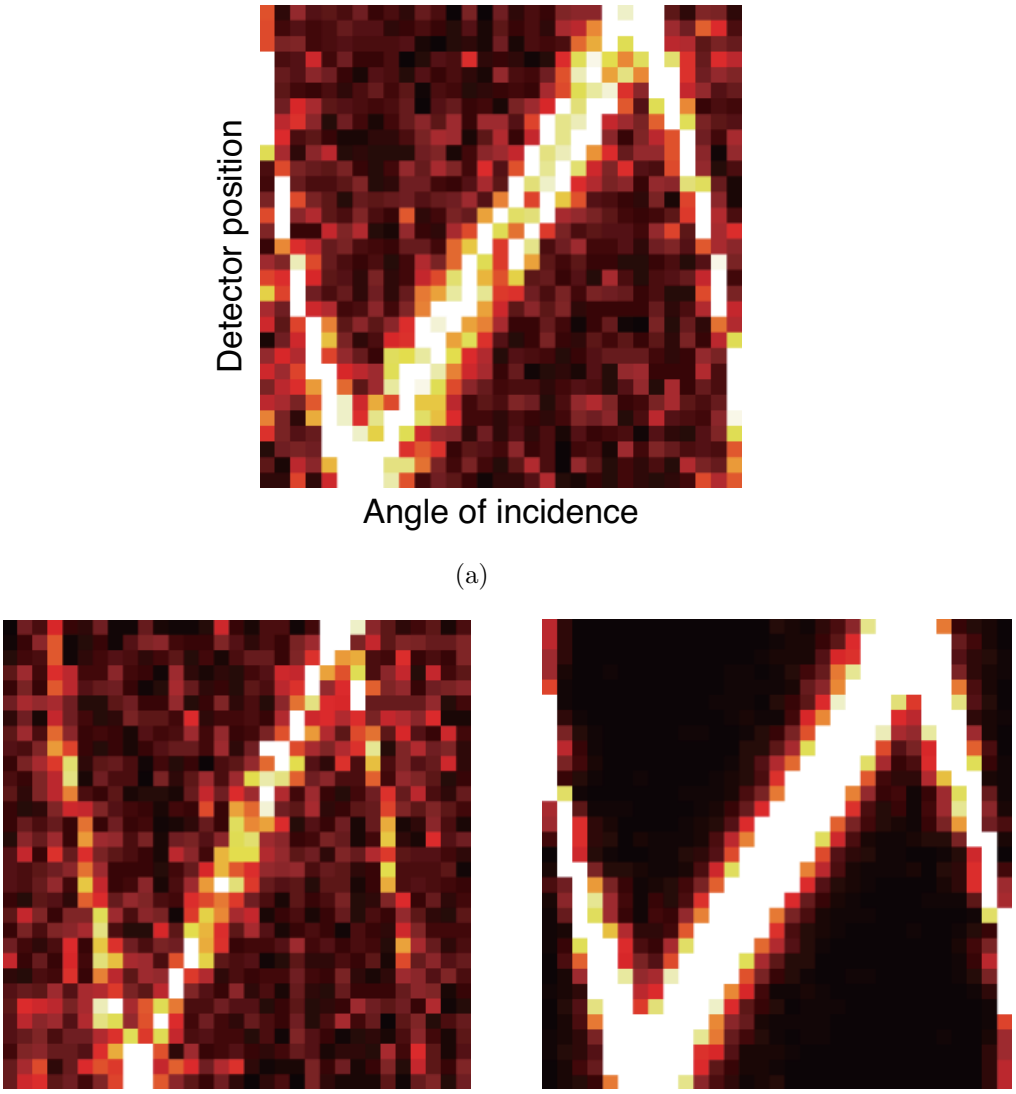


(b)



(c)

Fig. 5.6　Intensities of transmitted light through (a) a designed disordered medium, (b) a random medium, and (c) a GRIN medium calculated by the FDTD method. Here the lights were irradiated with 90° to the normal axis of a sensor plane. The scale bar is 5 μm.



(a)

(b) (c)

Fig. 5.7 TMs with (a) the designed disordered medium, (b) the random medium, and (c) the GRIN medium.

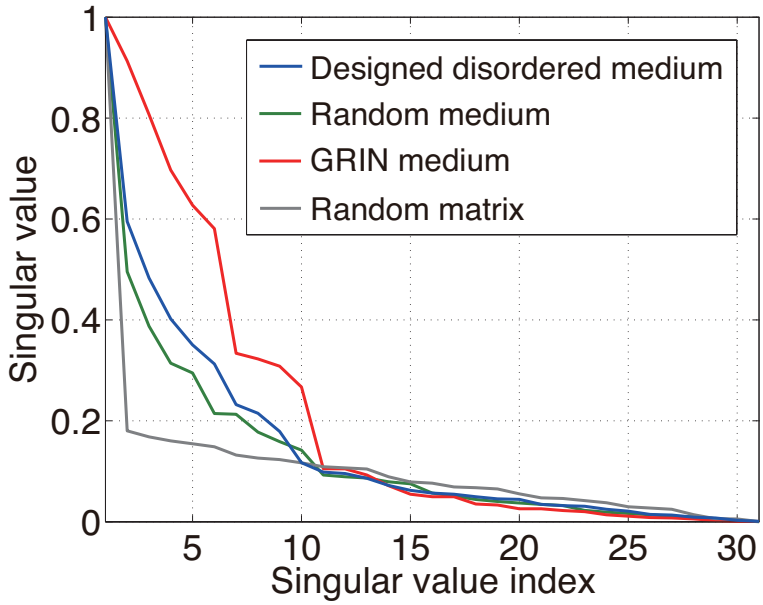


Fig. 5.8　Singular values of measured TMs and a numerically generated random matrix.

よる離散サンプリングを模擬するため，計算により求まったセンサ面上の光強度分布を画素ごとに画素幅内で空間積分した．画素数は 31，画素幅は 1.36 μm とした．また，サンプリングの際，光源の周期を超える時間幅でセンサ面上の光強度信号を時間積分した．

FDTD 法により得られた光伝搬の例を Fig. 5.6 に示す．ここでは，センサ直交軸に対して 90° の角度から入射した光の強度を可視化している．Fig. 5.6(a)–Fig. 5.6(c) はそれぞれ設計散乱体，ランダムな散乱体，GRIN 媒体を透過する光を表す．Fig. 5.6(a) 及び Fig. 5.6(b) が示すように，散乱体においては散乱特性が確認された．散乱はシステムの光入射角依存インパルス応答間の相関を減少させるため，再構成精度の向上に寄与する．一方，Fig. 5.6(a) 及び Fig. 5.6(c) が示すように，GRIN 特性を持つ媒体では光の大域的な伝搬方向の変調が確認された．この光変調効果は，センサの取得光量の増加に寄与する．これらの結果から，設計散乱体のみが，高光量での広視野情報取得と高精度な信号再構成を両立できると考えられる．

計測された TM を Fig. 5.7 に示す．各 TM は 31 × 31 の要素により構成される．行要素は 31 個の画素に対応し，列要素は 31 の入射角に対応する．Fig. 5.7(a) の設計散乱体の TM と Fig. 5.7(b) の無秩序散乱体の TM における各列の強度分布のばらつきは，散乱特性に相当する．各行列の特異値を Fig. 5.8 に示す．設計散乱体の特異値の収束は，数値的に生成したランダム行列の特異値の収束とほぼ同等となった．つまり，設計散乱体を用い

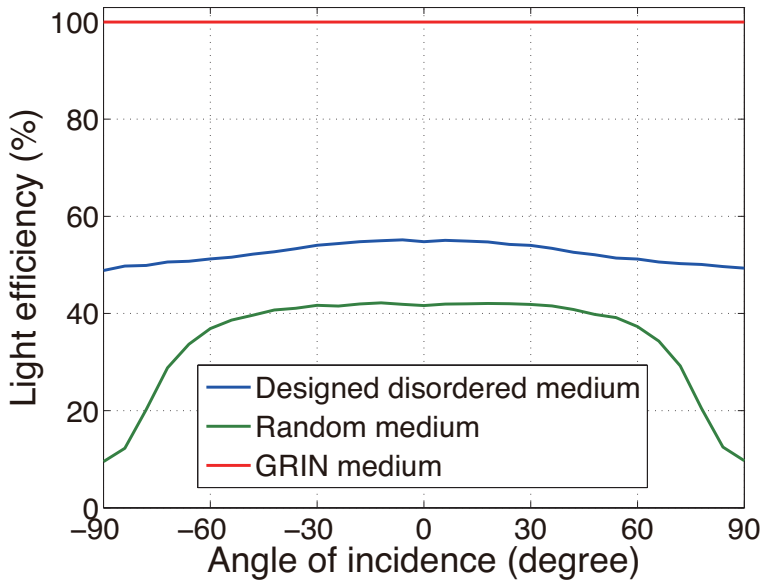


Fig. 5.9 Light efficiencies depending on angles of the light incidence.

た信号再構成のノイズに対する安定性は，数値的に生成したランダム行列とほぼ同等といえる．

次に，各媒体で入射角を変えながら平面波パルスを入射させ，この光源強度とセンサが取得した信号強度の比を計算することで光量効率を計測した．Fig. 5.9 に得られた光量効率を示す．散乱による光量損失を評価するため，各媒質の光量は非散乱媒質の光量で規格化した．設計された散乱体は，無秩序散乱体と比較して斜入射時に大きな光量を示した．結果，設計散乱体は全ての画角で約 50% 程度の光量を達成した．この光量は，符号化開口を用いたイメージングシステムにおける光量損失とほぼ同等であるため [49]，CI の実装においては許容し得る値であると考えられる．

最後に，取得した TM と光量を用いて，各媒体を用いた撮像をシミュレーションした．シミュレーションでは，物体を表す原信号の例として Fig. 5.10(a) の信号を用いた．Fig. 5.5(a)–Fig. 5.5(c) の媒体の取得信号強度を Fig. 5.10(b)–Fig. 5.10(d) に示す．取得信号は原信号に TM を作用させ，光量に応じた光子雑音を付加することで生成した．SNR はそれぞれ 11.4 dB，8.07 dB，15.6 dB となった．ノイズを含んだ取得信号から，TM を用いて式 (5.1) の逆問題を解くことで原信号を再構成した．再構成の精度を向上させるため，逆行列を直接用いる代わりに非負拘束付反復アルゴリズムである RL 法 [31, 32, 193] を用いて逆問題を解いた．再構成された信号を Fig. 5.10(e)–Fig. 5.10(g) に示す．PSNR はそれぞれ 26.5 dB，14.4 dB，15.6 dB となった．無秩序散乱体では光量損失の大きさのた

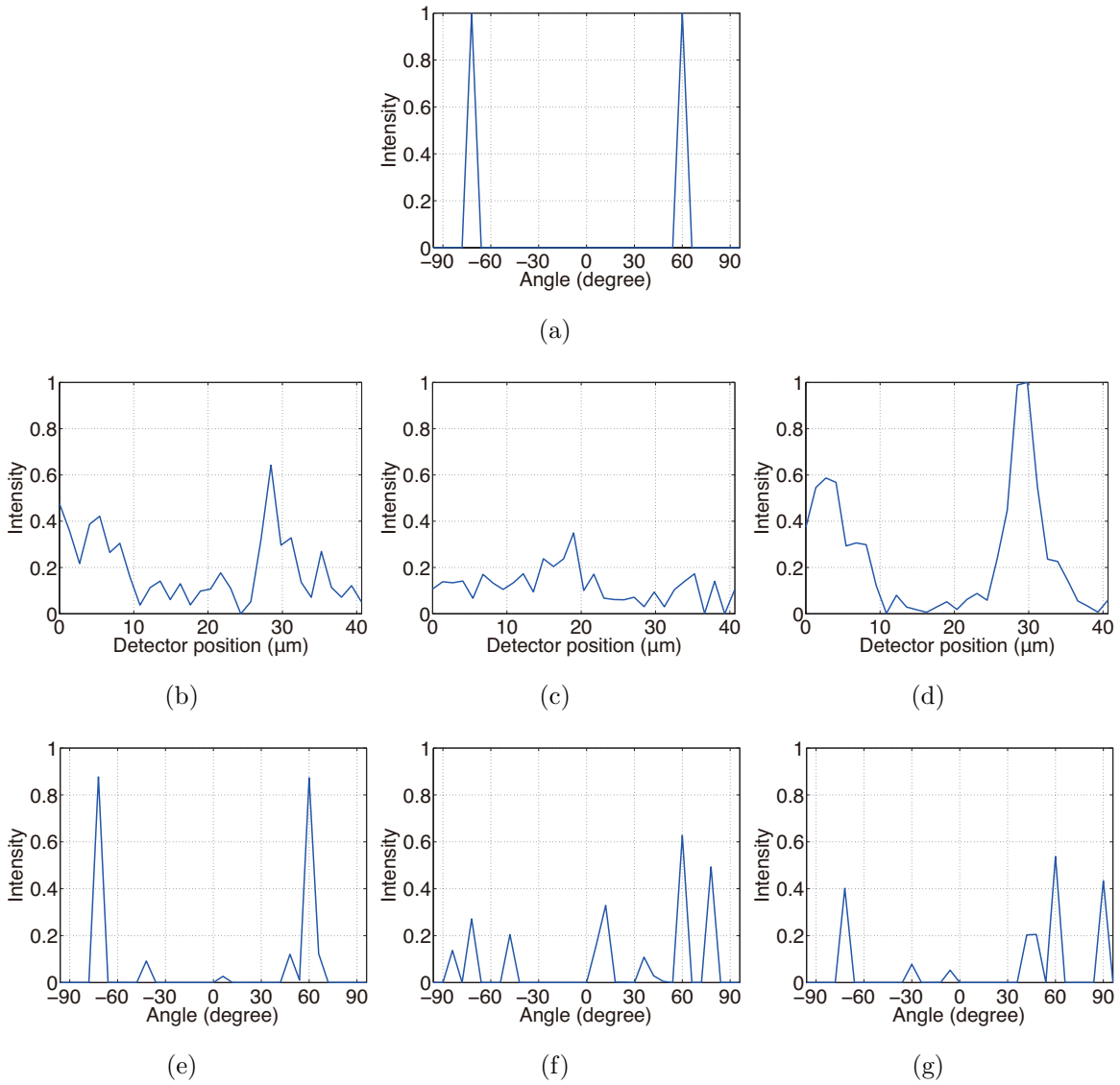


Fig. 5.10　(a) Original input signal, (b)–(d) output signals detected on a sensor with media of Figs. 5.5(a)–5.5(c), respectively, and (e)–(g) reconstructed signals by the RL method.

め，Fig. 5.10(f) のように原信号を精度よく再構成できなかった．また非散乱媒体では，システムの入射角依存インパルス応答間の相関が高く，いくつかの画角成分情報が計算により分離できなかったため，Fig. 5.10(g) のように正しい信号を再構成できなかった．設計散乱体では，Fig. 5.10(e) のように信号を良好に再構成できた．結論として，散乱体における空気孔の積極設計に基づく，光量効率が改善された広視野 CI が実証された．

5.5 結言

本章では小型のレンズレス光学系を用いて広視野を高い光量で撮像する CI 技術を提案し，実証した．提案手法では，広視野撮像のために最適設計された散乱体を用いてイメージングを実装した．

5.2 節では，散乱体を用いた CI に関して，既存研究をまとめた．散乱特性は光の媒体への入射角に依存して変化するため，システムの光入射角依存インパルス応答間の相関を下げる効果を持つ．散乱体を介した撮像の逆問題を解くことで，ノイズに対して安定なレンズレス CI を実現できる．

5.3 節では，広視野イメージングのための散乱体設計法を導入した．ガラス内に空気孔を付与することで散乱体を実装し，その空気孔の空間分布を制御することで，散乱体の実効 GRIN を制御できる．斜入射光線をセンサ面に誘導するような実効 GRIN を実装することで，高い光量を示す広視野撮像系を散乱体を用いて実装できる．

5.4 節では，FDTD 法を用いたシミュレーションに基づき提案手法の効果を実証した．無秩序な散乱体と比較して広い視野で高い光量を達成する散乱体を実現できることが確認された．設計散乱体を用いた高画質な広視野 CI を撮像シミュレーションにより実証した．

総括

本論文では，イメージングシステムにおける被写界深度及び視野を拡大するための CI に関する研究成果をまとめた．CI では，光学系と信号処理系の融合設計によりシステムの設計自由度が飛躍的に拡張される．この新しいイメージングシステムの構成法に基づき，従来の光学設計おける被写界深度及び視野に関する物理制約を打破するイメージング技術を開拓し，その有効性を実証した．

以下，本研究において得られた成果を総括する．

1 章では，本論文で一貫してアプローチとして用いられる CI の概要や従来研究をまとめた．CI は光学系と信号処理系の融合設計に基づくイメージング技術を指す．イメージングシステムの設計自由度を拡張するため，既存のイメージングにおける様々な問題を解決し得る可能性を有している．CI は基本的には光学情報の符号化取得過程と演算による復号過程から成る．符号化は物体面変調，瞳面変調，像面変調，光学系走査，非結像光学系等により実装される．既存研究における CI の代表的な応用例として，位相変調イメージング，LF イメージング，コンプレッシブイメージングについて解説した．また，CI の既存研究と本論文の研究項目との関連について説明した．

2 章では，本研究の目的である被写界深度及び視野の同時拡大を実現するための重畳イメージングを導入し，原理実証を行った．重畳イメージングは PSF の三次元空間不変化とデコンボリューションに基づき，深い被写界深度と広い視野を同時に達成する CI 技術である．まず，CI に基づく既存の被写界深度拡大法及び視野拡大法を紹介した．被写界深度と視野を同時に拡大する技術が存在しないことを指摘し，重畳イメージングの位置付けを明らかにした．次に，重畳イメージングのモデルを示し，原理確認実験の結果を示した．実験ではカメラの走査と重畳処理により重畳イメージングを実装し，三次元物体の鮮明な撮像を実証した．カメラ走査に基づく実装では，時間的に変化する対象を撮像できない．そこで，球状重複像眼複眼光学系を用いたシングルショット重畳イメージング法を提案し，理論的な性能解析を行った．重複像眼では光学的な結像距離走査により被写界深度が拡大され，光学系の対称性により視野が拡大される．達成される被写界深度は複眼光学

系のF値により見積もることができる．次に光線追跡に基づく重複像眼イメージングの原理実証を行った．光学系に課されるサンプリング条件，MTFの距離不変性を検証した．また，ノイズを考慮した撮像シミュレーションと画質評価により，提案手法の効果を実証した．実証実験により，結像距離走査範囲の1/8程度の物体距離範囲内で，5dB以上画質が向上した合焦像が得られることが確認された．

3章では，2章で導入した重畳イメージングを投影系に応用し，その効果を実証した．撮像と投影は，結像の方向が異なるものの類似性の高い技術である．そのため，CIに基づく多くの撮像法は投影に応用可能である．投影前にデコンボリューションを行い，結像距離及び光軸位置の異なる投影像を物体空間において重畳することで，撮像系と同様に投影系の被写界深度及び視野を拡大できる．この重畳プロジェクションに関してモデルを示し，実装法を検討した．インコヒーレントプロジェクタは負の強度を表現できないため，デコンボリューションの際は非負拘束を加味する必要がある．また，光学実験に基づく原理実証を行い，提案手法の被写界深度及び視野拡大効果を確認した．実験では，スクリーンが存在する距離範囲の二倍の距離空間を三等分し，それぞれに合焦した像を投影し，重畳した．また，単一投影像の視野を七等分し，それぞれに光軸中心を合わせた投影像を重畳した．また，走査間隔及び重畳数を変えながら重畳投影像を生成し，走査間隔の縮小に応じてアーティファクトが緩和される性質を確認した．

重畳イメージングを含め多くのCIでは位相変調光学素子が必要となり，このことがCIの実装の簡便さ及び柔軟性を犠牲にする要因となっていた．この問題を解決するため，4章では，LFイメージングの枠組みを応用して，位相変調を仮想的に実現する枠組みを構築した．位相変調は重畳イメージングを含む種々のCI技術で重要となる概念であるが，その実装のためには特殊光学素子が必要となる．光学系で像の代わりにLFを計測することを前提にすれば，この位相変調は信号処理により実装できる．まず，LFイメージングの概念を示し，その特徴をまとめた．LFイメージングは結像の一部を仮想化していることに相当し，LFの再構成の際に位相変調を再現することで変調を仮想的に実装できる．そして，LFを用いた位相変調実装のモデルを示し，実装法を定式化した．LFはアレイ光学系及び画素により離散的にサンプリングされるため，サンプリング定理を加味したシステム設計が必要となる．この設計条件を定式化し，光線追跡に基づく検証を行った．その結果，LFイメージングシステムにおいて生じる平均視差が画素幅以内程度に抑えられる場合，PSNRが30dBを超える良好な再構成結果が得られることを確認した．次に，仮想化位相変調に基づく被写界深度拡大及びディジタル超解像に関する原理実証実験を行い，撮

像系及び投影系において提案手法の効果を実証した．提案手法は，物理的な位相板の実装を必要とせず位相変調イメージングを実現できる点に意義がある．CI の低コストかつ柔軟な実装が可能となる．

結像光学系を用いた CI では，光学系のサイズが光学結像や収差補正の必要性により制限されていた．広角撮像においてこの制約を打破するために，5 章では，超小型散乱体を用いたレンズレス広視野イメージング技術を考案した．散乱体を用いることで超小型光学系による CI を実現できることは従来研究で知られていたが，特に広視野イメージングを想定する場合光量損失が大きいことが課題であった．無秩序な散乱体を受動的に用いるのではなく，散乱体を積極的に設計することで，この広視野イメージングにおける光量損失の問題を解決した．まず，散乱体を用いた CI 技術について概要と課題を述べた．散乱体を用いた CI では，予め計測したシステム行列を用いて撮像の逆問題を解くことで，原画像を取得する．結像や収差補正を考慮した光学設計が不要となるため，撮像系の小型実装が可能となる．一方，特に斜入射の場合，光量損失の大きさが課題となる．次に広視野イメージングのための散乱体の設計法について，考え方とモデルを述べ，具体的な設計法を導入した．提案手法では散乱体内で実効屈折率の分布を制御することで，斜入射の光波をセンサ面に誘導し，光量効率を増加させる．ラジアル型 GRIN レンズの屈折率分布を模倣した散乱体を用いた光伝搬を FDTD 法によりシミュレーションした結果，180 度の画角範囲内で約 50% 程度の光量効率を達成した．提案手法の光量効率を非設計散乱体の光量効率と比較し，提案手法の優位性を確認した．また，光子雑音を考慮した画角 180 度の撮像シミュレーションを行い，提案手法による広視野 CI の効果を実証した．実証では，提案手法による再構成信号と非設計散乱体や非散乱 GRIN レンズを用いた場合の再構成信号を比較した．その結果，提案手法は従来手法と比べて 10dB 以上高画質な信号を再構成できることが確認された．

本論文では，主に静止画像のイメージングを検討対象とした．本論文の成果は，イメージングを時間軸に対して複数フレーム化することで容易に動画像システムに拡張できる．但し，撮像から表示までが一体化されたリアルタイムシステムへの応用を考える場合，処理コストに対する更なる検討が必要となる．その場合，アルゴリズムの高効率化や並列処理の導入が研究課題になると考えられる．

本論文では大きく三方式の新しいイメージング原理を考案し，実証した．重複像眼を用いたイメージングシステムは，被写界深度・視野拡大のための変調を球状の重複像眼で光学的に実装する．結像と変調を光学的に実装しているため，一度物理実装をした後は少な

い処理コストでシステムを稼働できるメリットを持つ．アレイ光学系を用いたLFイメージングシステムでは，結像の一部と変調が信号処理により実装される．重複像眼と比較して，簡便な実装及び柔軟な機能の切り替えが可能となる一方，処理コストは増加する．散乱体を用いたイメージングシステムでは，結像の大部分が信号処理により実装される．LFイメージングシステムと比較してより処理量の大きい再構成処理が必要となるが，より小型な光学系を実現できる利点を持つ．これら三方式は，光学系の複雑さと処理系の複雑さのバランスが異なる点に特徴がある．特に，結像と変調に関して光学系及び処理系が担う役割が大きく異なる．最も適切な実装方式は，応用システムが要求する処理コスト，実装の柔軟性，光学系サイズに依存するといえる．

本論文の成果は，イメージングにおける伝達情報量，実装の柔軟性，システムのサイズに関する物理制約を打破する手法を提供するものであり，情報光学，及びその関連分野の進展に貢献し得る成果であると考えられる．また，成果は，科学計測・医療・安全保障・工業・教育・エンタテインメント等で用いられる種々の映像システムの基本性能の向上に還元できる．本論文における研究項目は新しいイメージング原理の構築及び基礎的な原理実証が中心であったため，物理実装に基づく性能解析及び実際の映像システムへの適用は今後の課題であるといえる．

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ご指導のもとに行ったものである．本研究を遂行するにあたり，終始懇切丁寧なるご指導とご鞭撻を賜りました谷田純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．

本学大学院情報科学研究科藤崎泰正教授，森田浩教授，小倉裕介准教授には，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．

本研究を遂行する際に，終始懇切丁寧なる御指導と御助言を頂きました本学大学院情報科学研究科堀崎遼一助教には，心から御礼を申し上げると共に深く感謝致します．

本学大学院情報科学研究科西村隆弘特任助教には日々の研究活動において親身な御助言を頂きました．深く御礼申し上げます．

静岡大学電子工学研究所香川景一郎准教授には，研究を進めるにあたって有益な御助言，御示唆を頂きましたことを深く感謝致します．

京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科粟辻安浩教授には，光線追跡に関して技術的な御協力を頂きました．心より感謝致します．

共同研究を受け入れて下さいましたDuke UniversityのDavid J. Brady教授に深く感謝致します．また，共同研究をサポートして下さいましたThe Duke Imaging and Spectroscopy Programの皆様に深く感謝致します．

研究遂行にあたり助成して下さいました独立行政法人日本学術振興会，公益財団法人村田学術振興財団，公益財団法人コニカミノルタ科学技術振興財団，大阪大学ヒューマンウェアイノベーション博士課程プログラム，また，研究を表彰して下さいました公益社団法人応用物理学会，一般社団法人日本光学会の皆様に深く感謝致します．

本学博士後期課程の丹羽佑介君，事務補佐員の上山和子様を含む，研究生活を共に過ごした谷田研究室の皆様に感謝の意を評します．

日常生活を支えてくれた家族と友人に深く感謝致します．

最後に，大学院生活を応援してくれた婚約者の真梨に心より感謝致します．

参考文献

[1] Aristotle and W. S. Hett, *Problems, Books 1-21* (Loeb Classical Library, 1936).

[2] J. Needham, *Science and Civilisation in China : Volume 4, Physics and Physical Technology, Part 1, Physics* (Canbridge University Press, 1962).

[3] Alhazen and A. M. Smith, *Alhacen's Theory of Visual Perception* (American Philosophical Society, 2001).

[4] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Pergamon Press, 1959).

[5] J. B. Porta, *Natural Magic* (Kessinger Publishing, 2007).

[6] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, New York, 1996).

[7] M. Laikin, *Lens Design* (CRC Press, 1991).

[8] M. Stokstad and M. W. Cothren, *Art History* (Pearson, 2010).

[9] W. S. Boyle and G. E. Smith, "Charge Coupled Semiconductor Devices," Bell System Technical Journal **49**, 587–593 (1970).

[10] J. Tanida, "Image input in the digital era : Fusion of optical systems and signal processing," OYO BUTURI **81**, 1041–1043 (2012).

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

[12] R. Raskar, J. Tumblin, A. Mohan, A. Agrawal, and Y. Li, "Computational Photography," in "EUROGRAPHICS 2006," (2006).

[13] A. M. Cormack, "Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications," Journal of Applied Physics **34**, 2722–2727 (1963).

[14] B. E. Bayer, "Color imaging array," US Patent **3971065** (1976).

[15] E. Betzig, G. H. Patterson, R. Sougrat, O. W. Lindwasser, S. Olenych, J. S. Bonifacino, M. W. Davidson, J. Lippincott-Schwartz, and H. F. Hess, "Imaging Intracellular Fluorescent Proteins at Nanometer Resolution," Science **313**, 1642–1645

(2006).

[16] D. L. Donoho, "Compressed Sensing," IEEE Transactions on Information Theory **52**, 1289–1306 (2006).

[17] M. Levoy and P. Hanrahan, "Light Field Rendering," in "ACM SIGGRAPH," (1996), pp. 31–42.

[18] A. Greengard, Y. Y. Schechner, and R. Piestun, "Depth from diffracted rotation," Optics Letters **31**, 181–183 (2006).

[19] J. E. Greivenkamp, *Field Guide to Geometrical Optics* (SPIE Publications, 2004).

[20] E. R. Dowski and W. T. Cathey, "Extended depth of field through wave-front coding," Applied Optics **34**, 1859–1866 (1995).

[21] D. J. Brady and N. Hagen, "Multiscale lens design," Optics Express **17**, 2026–2032 (2009).

[22] R. Horisaki, T. Nakamura, and J. Tanida, "Superposition Imaging for Three-Dimensionally Space-Invariant Point Spread Functions," Applied Physics Express **4**, 112501 (2011).

[23] T. Nakamura, R. Horisaki, and J. Tanida, "Experimental verification of computational superposition imaging for compensating defocus and off-axis aberrated images," in "Imaging and Applied Optics," (2012), p. CM2B.4.

[24] T. Nakamura, R. Horisaki, and J. Tanida, "Computational superposition compound eye imaging for extended depth-of-field and field-of-view," Optics Express **20**, 27482–27495 (2012).

[25] T. Nakamura, R. Horisaki, and J. Tanida, "Computational superposition projector for extended depth of field and field of view," Optics Letters **38**, 1560–1562 (2013).

[26] T. Nakamura, R. Horisaki, and J. Tanida, "Extended depth-of-field and field-of-view projection using computational superposition imaging," in "Imaging and Applied Optics," (2013), p. CW3C.4.

[27] T. Nakamura, R. Horisaki, and J. Tanida, "Computational phase modulation in light field imaging," Optics Express **21**, 29523–29543 (2013).

[28] T. Nakamura, R. Horisaki, and J. Tanida, "Extended depth-of-field in superresolved image reconstruction on a compound-eye camera," in "Classical Optics 2014," (2014), p. CTh2C.4.

[29] T. Nakamura, R. Horisaki, and J. Tanida, "Compact Wide-field-of-view Imager with a Designed Disordered Medium," Optical Review (in press) (2015).

[30] H. C. Andrews and B. R. Hunt, *Digital Image Restoration* (Prentice Hall, 1977).

[31] W. H. Richardson, "Bayesian-based iterative method of image restoration," Journal of the Optical Society of America **62**, 55–59 (1972).

[32] L. B. Lucy, "An iterative technique for the rectification of observed distributions," Astronomical Journal **79**, 745–754 (1974).

[33] C. Zhou and S. K. Nayar, "Computational Cameras: Convergence of Optics and Processing," IEEE Transactions on Image Processing **20**, 3322–3340 (2011).

[34] D. J. Brady, "How to Measure Everything," in "Optical Fabrication and Testing," (2014), p. JM1A.

[35] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," Journal of the Optical Society of America **72**, 156–160 (1982).

[36] S. McEldowney, "The Kinect Story," in "Imaging and Applied Optics," (2012), p. AM3A.1.

[37] L. Zhang and S. Nayar, "Projection Defocus Analysis for Scene Capture and Image Display," ACM Transactions on Graphics **25**, 907–915 (2006).

[38] J. Salvi, J. Pagès, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems," Pattern Recognition **37**, 827–849 (2004).

[39] R. J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," Optical Engineering **19**, 139–144 (1980).

[40] S. K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, and R. Raskar, "Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination," ACM Transactions on Graphics **25**, 935–944 (2006).

[41] C. Zhang and I. Sato, "Separating Reflective and Fluorescent Components of an Image," in "IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition," (2011), pp. 185–192.

[42] M. G. Gustafsson, "Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy," Journal of Microscopy **198**, 82–87 (2000).

[43] E. E. Fenimore and T. M. Cannon, "Coded aperture imaging with uniformly redun-

dant arrays," Applied Optics **17**, 337–347 (1978).

[44] N. Nakajima, "Noniterative Phase Retrieval from a Single Diffraction Intensity Pattern by Use of an Aperture Array," Physical Review Letters **98**, 223901 (2007).

[45] E. Nelson and M. Fredman, "Hadamard Spectroscopy," Journal of the Optical Society of America **60**, 1664–1669 (1970).

[46] S. R. Gottesman and E. E. Fenimore, "New family of binary arrays for coded aperture imaging," Applied Optics **28**, 4344–4352 (1989).

[47] W. T. Welford, "Use of Annular Apertures to Increase Focal Depth," Journal of the Optical Society of America **50**, 749–753 (1960).

[48] A. Veeraraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan, and J. Tumblin, "Dappled Photography: Mask Enhanced Cameras for Heterodyned Light Fields and Coded Aperture Refocusing," ACM Transactions on Graphics **26**, 69 (2007).

[49] A. Levin, R. Fergus, F. Durand, and W. T. Freeman, "Image and Depth from a Conventional Camera with a Coded Aperture," ACM Transactions on Graphics **26**, 70 (2007).

[50] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H.-P. Duiker, W. Sarokin, and M. Sagar, "Acquiring the Reflectance Field of a Human Face," in "ACM SIGGRAPH," (2000), pp. 145–156.

[51] R. Horisaki, Y. Tampa, and J. Tanida, "Compressive reflectance field acquisition using confocal imaging with variable coded apertures," in "Imaging and Applied Optics," (2012), p. CTu3B.4.

[52] A. Ashok and M. A. Neifeld, "Pseudorandom phase masks for superresolution imaging from subpixel shifting," Applied Optics **46**, 2256–2268 (2007).

[53] A. D. Portnoy, N. P. Pitsianis, D. J. Brady, J. Guo, M. A. Fiddy, M. R. Feldman, and R. D. Te Kolste, "Thin Digital Imaging Systems Using Focal Plane Coding," Proceedings of SPIE **6065**, 60650F (2006).

[54] G. Häusler, "A method to increase the depth of focus by two step image processing," Optics Communications **6**, 38–42 (1972).

[55] S. Kuthirummal, H. Nagahara, C. Zhou, and S. K. Nayar, "Flexible Depth of Field Photography," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **33**, 58–71 (2011).

[56] H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou, and S. K. Nayar, "Flexible Depth of Field Photography," in "European Conference on Computer Vision," (2008), pp. 60–73.

[57] Y. Bando, H. Holtzman, and R. Raskar, "Near-Invariant Blur for Depth and 2D Motion via Time-Varying Light Field Analysis," ACM Transactions on Graphics **32**, 13 (2013).

[58] K. N. Kutulakos and S. W. Hasinoff, "Focal Stack Photography : High-Performance Photography with a Conventional Camera," in "International Conference on Machine Vision and Applications," (2009), pp. 332–337.

[59] B. D. Lucas and T. Kanade, "An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision," in "The 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence," (1981), pp. 674–679.

[60] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision* (Cambridge University Press, 2004).

[61] E. Warrant and P. McIntyre, "Limitations to resolution in superposition eyes," Journal of Comparative Physiology A **167**, 785–803 (1990).

[62] M. F. Land, F. A. Burton, and V. B. Meyer-Rochow, "The Optical Geometry of Euphausiid Eyes," Journal of Comparative Physiology A **130**, 49–62 (1979).

[63] S. Laughlin and S. Mcginness, "The Structures of Dorsal and Ventral Regions of a Dragonfly Retina," Cell and Tissue Research **188**, 427–447 (1978).

[64] D. E. Nilsson, "A new type of imaging optics in compound eyes," Nature **332**, 76–78 (1988).

[65] A. Parker, *In the blink of an eye: how vision sparked the big bang of evolution* (Basic Books, 2003).

[66] J. Duparré, P. Dannberg, P. Schreiber, A. Bräuer, and A. Tünnermann, "Artificial apposition compound eye fabricated by micro-optics technology," Applied Optics **43**, 4303–4310 (2004).

[67] Y. M. Song, Y. Xie, V. Malyarchuk, J. Xiao, I. Jung, K.-J. Choi, Z. Liu, H. Park, C. Lu, R.-H. Kim, R. Li, K. B. Crozier, Y. Huang, and J. A. Rogers, "Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye," Nature **497**, 95–99 (2013).

[68] J. Tanida, T. Kumagai, K. Yamada, S. Miyatake, K. Ishida, T. Morimoto, N. Kondou, D. Miyazaki, and Y. Ichioka, "Thin observation module by bound optics

(TOMBO): concept and experimental verification," Applied Optics **40**, 1806–13 (2001).

[69] Y. Kitamura, R. Shogenji, K. Yamada, S. Miyatake, M. Miyamoto, T. Morimoto, M. Yasuo, K. Noriyuki, D. Miyazaki, J. Tanida, and I. Yoshiki, "Reconstruction of a high-resolution image on a compound-eye image-capturing system," Applied Optics **43**, 1719–1727 (2004).

[70] J. Duparré, P. Dannberg, P. Schreiber, A. Bräuer, and A. Tünnermann, "Thin compound-eye camera," Applied Optics **44**, 2949–2956 (2005).

[71] A. Brückner, J. Duparré, R. Leitel, P. Dannberg, A. Bräuer, and A. Tünnermann, "Thin wafer-level camera lenses inspired by insect compound eyes," Optics Express **18**, 24379–24394 (2010).

[72] 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**, 022501 (2010).

[73] K. Venkataraman, D. Lelescu, J. Duparré, A. McMahon, G. Molina, P. Chatterjee, R. Mullis, and S. K. Nayar, "PiCam: An Ultra-Thin High Performance Monolithic Camera Array," ACM Transactions on Graphics **32**, 166 (2013).

[74] J. Tanida, R. Shogenji, Y. Kitamura, K. Yamada, M. Miyamoto, and S. Miyatake, "Color imaging with an integrated compound imaging system," Optics Express **11**, 2109–2117 (2003).

[75] 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," Optics Express **18**, 21–30 (2010).

[76] 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 **2005-02** (2005).

[77] A. Lumsdaine and T. Georgiev, "Full Resolution Lightfield Rendering," Adobe Technical Report (2008).

[78] T. Georgiev, K. C. Zheng, B. Curless, D. Salesin, S. K. Nayar, and C. Intwala, "Spatio-Angular Resolution Tradeoffs in Integral Photography," in "Eurographics Symposium on Rendering," (2006), pp. 263–272.

[79] D. J. Brady, M. E. Gehm, R. A. Stack, D. L. Marks, D. S. Kittle, D. R. Golish, E. M. Vera, and S. D. Feller, "Multiscale gigapixel photography," Nature **486**, 386–389 (2012).

[80] T. Nakamura, D. S. Kittle, S. H. Youn, S. D. Feller, J. Tanida, and D. J. Brady, "Autofocus for a multiscale gigapixel camera," Applied Optics **52**, 8146–8153 (2013).

[81] J. Duparré and F. Wippermann, "Micro-optical artificial compound eyes," Bioinspiration and Biomimetics **1**, R1–R16 (2006).

[82] K. Stollberg, A. Brückner, J. Duparré, P. Dannberg, A. Bräuer, and A. Tünnermann, "The Gabor superlens as an alternative wafer-level camera approach inspired by superposition compound eyes of nocturnal insects," Optics Express **17**, 15747–15759 (2009).

[83] H. R. Fallah and A. Karimzadeh, "MTF of compound eye," Optics Express **18**, 12304–12310 (2010).

[84] M. F. Land and D. E. Nilsson, *Animal Eyes* (Oxford University Press, 2002).

[85] S. Hiura, A. Mohan, and R. Raskar, "Krill-eye: Superposition Compound Eye for Wide-Angle Imaging via GRIN Lenses," IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications **2**, 186–199 (2010).

[86] S. Maekawa, K. Nitta, and O. Matoba, "Transmissive optical imaging device with micromirror array," Proceedings of SPIE **6392**, 63920E (2006).

[87] R. K. Luneburg and M. Herzberger, *Mathematical Theory of Optics* (University of California Press, 1964).

[88] D. Shafer, "Lens designs with extreme image quality features," Advanced Optical Technologies **2**, 53–62 (2013).

[89] O. S. Cossairt, D. Miau, and S. K. Nayar, "Gigapixel Computational Imaging," in "IEEE International Conference on Computational Photography," (2011).

[90] I. Stamenov, I. P. Agurok, and J. E. Ford, "Optimization of two-glass monocentric lenses for compact panoramic imagers: general aberration analysis and specific designs," Applied Optics **51**, 7648–7661 (2012).

[91] P. Potuluri, M. Xu, and D. J. Brady, "Imaging with random 3D reference structures," Optics Express **11**, 2134–2141 (2003).

[92] S. Popoff, G. Lerosey, M. Fink, A. C. Boccara, and S. Gigan, "Image transmission through an opaque material," Nature Communications **1**, 81 (2010).

[93] A. Zomet and S. K. Nayar, "Lensless Imaging with a Controllable Aperture," in "IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition," (2006), pp. 339–346.

[94] R. Fergus, A. Torralba, and W. T. Freeman, "Random Lens Imaging," MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory Technical Report **058** (2006).

[95] P. R. Gill, C. Lee, D.-G. Lee, A. Wang, and A. Molnar, "A microscale camera using direct Fourier-domain scene capture," Optics Letters **36**, 2949–2451 (2011).

[96] W. Harm, C. Roider, A. Jesacher, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte, "Lensless imaging through thin diffusive media," Optics Express **22**, 22146–22156 (2014).

[97] J. H. Shapiro, "Computational ghost imaging," Physical Review A **78**, 061802 (2008).

[98] O. Katz, Y. Bromberg, and Y. Silberberg, "Compressive ghost imaging," Applied Physics Letters **95**, 131110 (2009).

[99] M. F. Duarte, M. A. Davenport, D. Takhar, J. N. Laska, T. Sun, K. F. Kelly, and R. G. Baraniuk, "Single-Pixel Imaging via Compressive Sampling," IEEE Signal Processing Magazine **25**, 83–91 (2008).

[100] B. Sun, M. P. Edgar, R. Bowman, L. E. Vittert, S. Welsh, A. Bowman, and M. J. Padgett, "3D Computational Imaging with Single-Pixel Detectors," Science **340**, 844–847 (2013).

[101] B. I. Erkmen and J. H. Shapiro, "Ghost imaging: from quantum to classical to computational," Advances in Optics and Photonics **2**, 405–450 (2010).

[102] A. Pentland, "A New Sense for Depth of Field," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **9**, 523–531 (1987).

[103] T. Zhao, Z. Ye, W. Zhang, Y. Chen, and F. Yu, "Wide viewing angle skewed effect of the point spread function in a wavefront coding system," Optics Letters **32**, 1220–1222 (2007).

[104] S.-H. Lee, N.-C. Park, and Y.-P. Park, "Breaking diffraction limit of a small f-number compact camera using wavefront coding," Optics Express **16**, 13569–13578 (2008).

[105] P. Mouroulis, "Depth of field extension with spherical optics," Optics Express **16**, 12995–13004 (2008).

[106] C. Dorronsoro, J. A. Guerrero-Colon, M. C. de la Fuente, J. M. Infante, and J. Portilla, "Low-cost Wavefront Coding Using Coma and a Dienoising-based Deconvolution," Proceedings of SPIE **6737**, 67370E (2007).

[107] O. S. Cossairt and S. K. Nayar, "Spectral Focal Sweep: Extended Depth of Field from Chromatic Aberrations," in "IEEE International Conference on Computational Photography," (2010).

[108] S. Liu and H. Hua, "Extended depth-of-field microscopic imaging with a variable focus microscope objective," Optics Express **19**, 353–362 (2011).

[109] E. E. Garcia-Guerrero, E. R. Mendez, and H. M. Escamilla, "Design and fabrication of random phase diffusers for extending the depth of focus," Optics Express **15**, 1495–1507 (2007).

[110] O. S. Cossairt, C. Zhou, and S. K. Nayar, "Diffusion Coded Photography for Extended Depth of Field," ACM Transactions on Graphics **29**, 31 (2010).

[111] Y. Takahashi and S. Komatsu, "Optimized free-form phase mask for extension of depth of field in wavefront-coded imaging," Optics Letters **33**, 1515–1517 (2008).

[112] M. Subbarao and G. Surya, "Depth from Defocus: A Spatial Domain Approach," International Journal of Computer Vision **13**, 271–294 (1994).

[113] S. R. P. Pavani and R. Piestun, "High-efficiency rotating point spread functions," Optics Express **16**, 3484–3489 (2008).

[114] S. Prasad, "Rotating point spread function via pupil-phase engineering," Optics Letters **38**, 585–587 (2013).

[115] Y. Shechtman, S. J. Sahl, A. S. Backer, and W. E. Moerner, "Optimal Point Spread Function Design for 3D Imaging," Physical Review Letters **113**, 133902 (2014).

[116] S. R. P. Pavani, M. A. Thompson, J. S. Biteen, S. J. Lord, N. Liu, R. J. Twieg, R. Piestun, and W. E. Moerner, "Three-dimensional, single-molecule fluorescence imaging beyond the diffraction limit by using a double-helix point spread function," Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **106**, 2995–2999 (2009).

[117] S. Hiura and T. Matsuyama, "Depth measurement by the multi-focus camera,"

in “IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,” (1998), pp. 953–959.

[118] J. Yajima, K. Mizutani, and T. Nishizaka, “A torque component present in mitotic kinesin Eg5 revealed by three-dimensional tracking,” Nature Structural and Molecular Biology **15**, 1119–1121 (2008).

[119] C. Zhou, O. S. Cossairt, and S. K. Nayar, “Depth from Diffusion,” in “IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,” (2010), pp. 1110–1117.

[120] A. Ashok and M. Neifeld, “Information-based analysis of simple incoherent imaging systems,” Optics Express **11**, 2153–2162 (2003).

[121] E. Camahort, A. Lerios, and D. Fussell, “Uniformly Sampled Light Fields,” in “9th Eurographics Workshop on Rendering,” (1998), pp. 117–130.

[122] G. Wetzstein, I. Ihrke, D. Lanman, and W. Heidrich, “Computational Plenoptic Imaging,” Computer Graphics Forum **30**, 2397–2426 (2011).

[123] B. Wilburn, N. Joshi, and V. Vaish, “High Performance Imaging Using Large Camera Arrays,” ACM Transactions on Graphics **24**, 765–776 (2005).

[124] E. H. Adelson and J. Y. A. Wang, “Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **14**, 99–106 (1992).

[125] A. Ashok and M. A. Neifeld, “Compressive Light Field Imaging,” Proceedings of SPIE **7690**, 76900Q (2010).

[126] S. C. Park, M. K. Park, and M. G. Kang, “Super-Resolution Image Reconstruction: A Technical Overview,” IEEE Signal Processing Magazine **20**, 21–36 (2003).

[127] R. Horisaki and J. Tanida, “Full-resolution light-field single-shot acquisition with spatial encoding,” in “Imaging and Applied Optics,” (2011), p. CTuB5.

[128] A. Isaksen, L. Mcmillan, and S. J. Gortler, “Dynamically Reparameterized Light Fields,” in “ACM SIGGRAPH,” (2000), pp. 297–306.

[129] C. Inoshita, S. Tagawa, M. A. Mannan, Y. Mukaigawa, and Y. Yagi, “Full-dimensional Sampling and Analysis of BSSRDF,” IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications **5**, 119–123 (2013).

[130] G. Müller, G. H. Bendels, and R. Klein, “Rapid Synchronous Acquisition of Geometry and Appearance of Cultural Heritage Artefacts,” in “The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage,” (2005), pp.

13–20.

[131] S. Tagawa, Y. Mukaigawa, and Y. Yagi, "8-D Reflectance Field for Computational Photography," in "IEEE International Conference on Pattern Recognition," (2012), pp. 2181–2185.

[132] Y. Tampa, R. Horisaki, and J. Tanida, "Experimental verification of compressive reflectance field acquisition," Applied Optics **53**, 3157–3163 (2014).

[133] G. Lippmann, "Épreuves réversibles donnant la sensation du relief," Journal de Physique Théorique et Appliquée **7**, 821–825 (1908).

[134] J. Geng, "Three-dimensional display technologies," Advances in Optics and Photonics **5**, 456–535 (2013).

[135] M. Hirsch, S. Izadi, H. Holtzman, and R. Raskar, "8D Display: A Relightable Glasses-Free 3D Display," in "ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces," (2012), pp. 319–322.

[136] R. Horisaki and J. Tanida, "Reflectance field display," Optics Express **21**, 11181–11186 (2013).

[137] E. Candès and M. Wakin, "An Introduction To Compressive Sampling," IEEE Signal Processing Magazine **25**, 21–30 (2008).

[138] R. Horisaki, "Compressive Imaging : Image Sensing with Simultaneous Compression and Acquisition of Signals," The Review of Laser Engineering **41**, 1001–1005 (2013).

[139] A. Bourquard, F. Aguet, and M. Unser, "Optical imaging using binary sensors," Optics Express **18**, 7–12 (2010).

[140] G. R. Arce, D. J. Brady, L. Carin, H. Arguello, and D. S. Kittle, "Compressive Coded Aperture Spectral Imaging," IEEE Signal Processing Magagine **31**, 105–115 (2014).

[141] R. Horisaki and J. Tanida, "Multi-channel data acquisition using multiplexed imaging with spatial encoding," Optics Express **18**, 23041–23053 (2010).

[142] A. W. Lohmann, "Scaling laws for lens systems," Applied Optics **28**, 4996–4998 (1989).

[143] D. L. Marks and D. J. Brady, "Gigagon : a Monocentric Lens Design Imaging 40 Gigapixels," in "Imaging Systems," (2010), p. ITuC2.

[144] N. Wiener, *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*

(MIT Press, 1949).

[145] M. Irani and S. Peleg, "Improving Resolution by Image Registration," Graphical Models and Image Processing **53**, 231–239 (1991).

[146] K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, and K. Egiazarian, "Image restoration by sparse 3D transform-domain collaborative filtering," Proceedings of SPIE **6812**, 6812–07 (2008).

[147] G. Black and E. H. Linfoot, "Spherical Aberration and the Information Content of Optical Images," Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **239**, 522–540 (1957).

[148] R. Dinyari, S.-B. Rim, K. Huang, P. B. Catrysse, and P. Peumans, "Curving monolithic silicon for nonplanar focal plane array applications," Applied Physics Letters **92**, 091114 (2008).

[149] D. Dumas, M. Fendler, F. Berger, B. Cloix, C. Pornin, N. Baier, G. Druart, J. Primot, and E. le Coarer, "Infrared camera based on a curved retina," Optics Letters **37**, 653–655 (2012).

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

[151] N. Madamopoulos and F. Papageorgiou, "Laser Based Projection System for Displays, Signage and Illumination," Journal of Display Technology **10**, 804–811 (2014).

[152] K. Konno and N. Kubo, "Laser Scan Ultra Compact Projector," Konica Minolta Technology Report **7**, 130–133 (2010).

[153] M. S. Brown, P. Song, and T.-J. Cham, "Image Pre-Conditioning for Out-of-Focus Projector Blur," in "IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition," (2006), pp. 1956–1963.

[154] Y. Oyamada and H. Saito, "Focal Pre-Correction of Projected Image for Deblurring Screen Image," in "IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition," (2007), pp. 1–8.

[155] M. Grosse, G. Wetzstein, A. Grundhöfer, and O. Bimber, "Coded Aperture Projection," ACM Transactions on Graphics **29**, 22 (2010).

[156] R. Horisaki and J. Tanida, "Compact compound-eye projector using superresolved projection," Optics Letters **36**, 121–123 (2011).

[157] M. Sieler, P. Schreiber, P. Dannberg, A. Bräuer, and A. Tünnermann, "Ultraslim fixed pattern projectors with inherent homogenization of illumination," Applied Optics **51**, 64–74 (2012).

[158] P. Bourke, "Spherical Mirror: A New Approach to Hemispherical Dome Projection," Planetarian **34**, 6–9 (2005).

[159] N. P. Y. Yuen and W. C. Thibault, "Inexpensive Immersive Projection," in "IEEE Virtual Reality Conference," (2008), pp. 237–240.

[160] W. T. Cathey and E. R. Dowski, "Apparatus and methods for extending depth of field in image projection systems," US Patent **6069738** (2000).

[161] M. Coltheart, "The Persistences of Vision," Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B **290**, 57–69 (1980).

[162] J.-X. Chai, X. Tong, S.-C. Chan, and H.-Y. Shum, "Plenoptic Sampling," in "ACM SIGGRAPH," (2000), pp. 307–318.

[163] R. Horisaki, S. Irie, Y. Ogura, and J. Tanida, "Three-Dimensional Information Acquisition Using a Compound Imaging System," Optical Review **14**, 347–350 (2007).

[164] T. E. Bishop and P. Favaro, "The Light Field Camera: Extended Depth of Field, Aliasing, and Superresolution," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **34**, 972–986 (2012).

[165] T. E. Bishop, S. Zanetti, and P. Favaro, "Light Field Superresolution," in "IEEE International Conference on Computational Photography," (2009), pp. 1–9.

[166] S. A. Shroff and K. Berkner, "Image formation analysis and high resolution image reconstruction for plenoptic imaging systems." Applied Optics **52**, D22–D31 (2013).

[167] Z. Xu, J. Ke, and E. Y. Lam, "High-resolution lightfield photography using two masks," Optics Express **20**, 10971–10983 (2012).

[168] K. Marwah, G. Wetzstein, Y. Bando, and R. Raskar, "Compressive Light Field Photography using Overcomplete Dictionaries and Optimized Projections," ACM Transactions on Graphics **32**, 46 (2013).

[169] S. S. Sherif, W. T. Cathey, and E. R. Dowski, "Phase plate to extend the depth of field of incoherent hybrid imaging systems," Applied Optics **43**, 2709–2721 (2004).

[170] W. Zhang, Z. Ye, T. Zhao, Y. Chen, and F. Yu, "Point spread function characteristics analysis of the wavefront coding system," Optics Express **15**, 1543–1552

(2007).

[171] K. Takahashi and T. Naemura, "All in-Focus Light Field Viewer," in "ACM SIGGRAPH," (2004), p. 48.

[172] G. Petrovic, A. K. Shahulhameed, S. Zinger, and P. H. N. D. With, "Region-based all-in-focus light field rendering," in "IEEE International Conference on Image Processing," (2009), pp. 549–552.

[173] Y. Choi, C. Yoon, M. Kim, W. Choi, and W. Choi, "Optical Imaging With the Use of a Scattering Lens," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **20**, 6800213 (2014).

[174] F. Heide, M. Rouf, M. B. Hullin, B. Labitzke, W. Heidrich, and A. Kolb, "High-Quality Computational Imaging Through Simple Lenses," ACM Transactions on Graphics **32**, 149 (2013).

[175] D. J. Brady, "Micro-optics and megapixels," Optics and Photonics News **17**, 24–29 (2006).

[176] R. Athale, D. M. Healy, D. J. Brady, and M. A. Neifeld, "Reinventing the camera," Optics and Photonics News **19**, 32–37 (2008).

[177] I. M. Vellekoop, A. Lagendijk, and A. P. Mosk, "Exploiting disorder for perfect focusing," Nature Photonics **4**, 320–322 (2010).

[178] Y. Choi, T. D. Yang, C. Fang-Yen, P. Kang, K. J. Lee, R. R. Dasari, M. S. Feld, and W. Choi, "Overcoming the Diffraction Limit Using Multiple Light Scattering in a Highly Disordered Medium," Physical Review Letters **107**, 023902 (2011).

[179] Y. Choi, C. Yoon, M. Kim, T. D. Yang, C. Fang-Yen, R. R. Dasari, K. J. Lee, and W. Choi, "Scanner-Free and Wide-Field Endoscopic Imaging by Using a Single Multimode Optical Fiber," Physical Review Letters **109**, 203901 (2012).

[180] Z. Xu, Z. Wang, M. E. Sullivan, D. J. Brady, S. H. Foulger, and A. Adibi, "Multimodal multiplex spectroscopy using photonic crystals," Optics Express **11**, 2126–2133 (2003).

[181] B. Redding, S. F. Liew, R. Sarma, and H. Cao, "Compact spectrometer based on a disordered photonic chip," Nature Photonics **7**, 746–751 (2013).

[182] A. Liutkus, D. Martina, S. Popoff, G. Chardon, O. Katz, G. Lerosey, S. Gigan, L. Daudet, and I. Carron, "Imaging With Nature: Compressive Imaging Using a

Multiply Scattering Medium," Scientific Reports **4** (2014).

[183] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics* (Wiley, 1991).

[184] M. Wang and N. Pan, "Predictions of effective physical properties of complex multiphase materials," Materials Science and Engineering: R: Reports **63**, 1–30 (2008).

[185] M. Altissimo, "E-beam lithography for micro-nanofabrication," Biomicrofluidics **4**, 2–7 (2010).

[186] B. Vasic and R. Gajic, "Self-focusing media using graded photonic crystals: Focusing, Fourier transforming and imaging, directive emission, and directional cloaking," Journal of Applied Physics **110**, 053103 (2011).

[187] E. Centeno and D. Cassagne, "Graded photonic crystals," Optics Letters **30**, 2278–2280 (2005).

[188] H. Kurt and D. S. Citrin, "Graded index photonic crystals," Optics Express **15**, 1240–1253 (2007).

[189] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media," IEEE Transactions on Antennas and Propagation **14**, 302–307 (1966).

[190] J.-P. Berenger, "A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves," Journal of Computational Physics **114**, 185–200 (1994).

[191] A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's Equations," IEEE Transactions on Microwave Theory Technology **MTT-23**, 623–630 (1975).

[192] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method* (Artech House, 2000).

[193] X. Sun and N. P. Pitsianis, "Solving Non-negative Linear Inverse Problems with the NeAREst Method," Proceedings of SPIE **7074**, 7074–02 (2008).