2 次元コードリーダーの読取り 深度拡大技術*

Depth of Field Extension Technology for Two-Dimensional Code Reader

長嶋千恵**

塚田敏彦**

伊藤邦彦***

北角善美†

小松進一††

Chie NAGASHIMA, Toshihiko TSUKADA, Kunihiro ITOH, Yoshimi KITAZUMI and Shinichi KOMATSU

Key words

two-dimensional code reader, QR code, reading distance, depth extension, wavefront coding method, image processing, phase mask

1. はじめに

物流や小売り業界で多く使われている二次元コードリーダーでは、手元の数 cm から数 m 先の範囲にある二次元コードを 1 台のリーダーで素早く読取りたいという強いニーズがある。これまでに、ズームレンズやモードの切り替えによる方法が提案されているが、耐久性、コスト、手間の問題があり、読取り焦点深度が広い撮像光学系の開発が強く望まれている。

撮像系の読取り深度を拡大させる方法は、いくつかある。まず単純には、レンズの絞りを絞り込む (F 値を大きくする) ことによって被写界深度を拡大させることができるが、それによって画像が暗くなってしまい、さらにあまりにも絞り込むと回折の影響で像がぼけるという問題が起きる。現状の市販二次元コードリーダーの光学系は、すでに回折の影響を受けない限界の大きさまで絞り込まれており、絞り値によるこれ以上の被写界深度の拡大は難しい。色収差レンズにカラーフィルタと専用の信号処理を組み合わせた焦点深度の深いワイドフォーカスシステムの提案¹⁾もあるが、二次元コードリーダーに用いられる撮像系はモノクロであり、RGB データを扱うこの方法は不向きである。また、マイクロレンズアレイを用いた Light Field Camera 方式による撮像技術も提案されているが、光学系が高価で処理時間も長くなるため、二次元コードリーダーの光学系として採用することはできない。

そこでわれわれは、これらの課題に対処して読取り深度を拡大するために、モノクロカメラに適用が可能な波面符号化法による二次元コードリーダーの読取り深度拡大技術の開発に取り組んだ。波面符号化法については、1995

年に Dowski らによって提唱²⁾されて以来、読取り深度拡大について多くのシミュレーションベースの報告^{3)~5)}がなされている。ただし、実在光学系への適用については、携帯電話用のカメラに採用され被写界深度が深い画像の撮像が可能となったとの報告はあるが詳細は明らかでなく、情報が乏しい。そこでわれわれは、市販 CMOS カメラのレンズを改造して波面符号化光学系を搭載し、この撮像系によって撮像した画像から被写界深度が広い画像を復元するための画像復元アルゴリズムを開発した。そして、この撮像系を用いて波面符号化法による撮像・復元実験を行った。実験により、実在環境においては撮像素子で生じるノイズが読取り性能に大きく影響を与えることが判明した。

本解説ではまず、波面符号化法による被写界深度拡大方法の原理と、位相板の形状、画像の復元方法について述べる。そして、被写界深度拡大光学系を実際に試作し、市販 CMOS カメラや二次元コードリーダーに搭載して行った評価実験とその結果を示す。

図1 通常光学系と深度拡大光学系

*原稿受付 平成 27 年 11 月 20 日

** (株) 豊田中央研究所材料・プロセス 1 部計測・解析研究室 (愛知県長久手市横道 41-1)

*** (株) デンソーウェーブ開発部開発 1 室 (愛知県知多郡阿久比町大字草木字芳池 1 番地)

† (株) デンソーウェーブ開発部 (愛知県知多郡阿久比町大字草木字芳池 1 番地)

†† 早稲田大学先進理工学部応用物理学科 (東京都新宿区大久保 3-4-1)

図2 位相板形状とスポットダイアグラムの関係

2. 読取り深度拡大方法

2.1 波面符号化法

図1に、通常光学系と波面符号化法による被写界深度拡大光学系の焦点前後での結像の様子を比較して示す。通常のレンズ系は、焦点位置で一点に結像するように光学系が設計されるが、被写界深度拡大光学系では、特殊な形状をもつレンズ（位相板）を挿入することで焦点位置とその前後で同じようなボケ方が得られるように、かつ必要な空間周波数情報が残るように光学系を設計する。これにより、焦点位置前後でのボケ方が一様な画像が撮像されることになる。焦点位置前後でボケ方が一様であるということは、対象物までの距離によらずボケ方が等しいことと等価である。ここで、ボケ方は位相板形状によって決まり、それを事前に測定することができるので、撮像した画像に対象物までの距離に依存しない一様なボケの逆変換処理を行うことにより、焦点が合った画像を復元することができる。

2.2 位相板形状と深度拡大性能の関係

位相板の基本的な形状は $z = a(x^3 + y^3)$ で表される三次曲面である。市販の光学シミュレーションソフトを用いて、位相板の形状パラメータを変化させたときのスポットダイアグラム（点光源像の幾何光学的な広がり分布）を計算により求めることができる。形状パラメータ a の値を0, 1, 2と変化させた場合のピンポイント位置前後でのスポットダイアグラムを図2に示す。 $a=0$ の場合には位相板は平板、つまり通常の光学系となるので、ピンポイント位置では一点に集まり、その前後では丸く一様に広がる。 a の値を大きくすると位相板の形状変化が大きくなるため、ピンポイント位置での集光度合いは悪く（像の広がりが大きく）なるが、像の形（ボケ方）が同じであるといえる被写界範囲も大きくなる。同じボケ方の画像であれば単一の逆変換にて復元が可能であるため、波面符号化法では a の値が大きいほど被写界深度拡大範囲が大きくなる。

図3 ピンポイント位置での輝度レベル鳥瞰図

◆通常の撮像プロセス

◆画像復元プロセス

図4 逆関数による画像復元

しかし、図3のピンポイント位置での輝度レベル鳥瞰図に示されるように、位相板の形状パラメータ a が大きいと、入射した光は受光素子の広い範囲にばらまかれて、各画素の輝度値は相対的に低くなる。撮像素子の出力値には必ずノイズが存在し、輝度値がノイズレベル以下になると、輝度情報はノイズに埋もれて失われてしまう。また、輝度の量子化誤差による影響も相対的に大きくなる。つまり、 a の値をむやみに大きくして深度拡大の幅を広げようとしても、情報が欠落するため画像が復元できないという結果になる。

上記に説明したように、位相板による被写界深度の拡大幅と、画像復元時の耐ノイズ性能は、トレードオフの関係にある。波面符号化による被写界深度拡大を現実の光学系に適用する場合には、撮像素子のノイズの大きさを見積もった上で、位相板の形状パラメータを決定することが必要である。

2.3 画像復元処理

図4に、逆フィルタによる画像復元の原理を、通常の撮像プロセスと比較して示す。通常の撮像プロセスでは、撮像対象に撮像系がもつボケ関数の成分が重畳されて撮像画像が生成される。ここで、ボケの逆関数を作り、撮像した画像に畳み込み積分を行うと、ボケのない画像を復元することができる（逆関数の畳み込みの代わりに、両辺をフーリエ変換し、周波数領域にて除算を行ってもよい）。ただし、ボケ関数がある空間周波数以上の情報をもっていない（カットオフ周波数がある）場合、その周波数より高周

図5 異なる位相板形状による対象物距離ごとのスポットダイアグラム

図6 市販二次元コードリーダへの実装

波な領域の情報は復元することができない。また、撮像素子の画素による空間情報の量子化のため、復元できるのは「1ラインペア当たり2画素」、影響を受けないのは「1ラインペア当たり4画素」以下の周波数に制限される。

なお、ボケ関数は位相板の設計値からも求められるが、実際の光学系で点光源を撮影することによっても得られる。また、現実の光学系では撮像した画像にノイズが含まれるため、単純な逆フィルタではなく、それにノイズ対策を加えたウィナーフィルタ⁶⁾が適している。

3. 撮 像 実 験

3.1 実験方法

読み取り深度拡大の原理検証と、位相板形状と深度拡大・耐ノイズ性能の関係を実証するための実験を行った。実験は、筆者らがこれまでに報告⁵⁾した位相板形状を基に形状パラメータ $\alpha=0.7, 1.8, 5.0$ の3種類の位相板を試作して、その性能を比較して行った。図5に各形状パラメータの位相板による、各対象物距離でのスポットダイアグラムを示す。この位相板を、市販二次元コードリーダの光学系に実装した(図6)。

位相板形状と深度拡大・耐ノイズ性能の関係を実証するための実験では、セルサイズ1mmのQRコードを1200mmの距離に設置して、各形状パラメータの位相板を用いたときの読み取り可否を調べた。このときQRコードの1

表1 位相板形状と読み取り可否の関係

	撮影画像	復元画像	ノイズ除去画像
設計1 $\alpha=0.7$			
	読み取り NG	読み取り NG	読み取り NG
設計2 $\alpha=1.8$			
	読み取り NG	読み取り NG	読み取り OK
設計3 $\alpha=5.0$			
	読み取り NG	読み取り NG	読み取り OK

表2 位相板形状と耐ノイズ性能の関係

紙面照度	1300ルクス	500ルクス	200ルクス
設計2 $\alpha=1.8$	データなし		
		読み取り OK	読み取り OK
設計3 $\alpha=5.0$			データなし
	読み取り OK	読み取り NG	

セルは、撮像素子の2画素×2画素の大きさに結像する関係にあり、これは2.3で示した画素による量子化の影響を受けない上限の空間周波数に相当する。また、撮像素子のノイズレベルと画素の輝度値の関係は、撮影対象の紙面照度に依存するため、紙面照度を変化させたときの読み取り可否についても調べた。

3.2 実験結果

位相板形状と深度拡大性能の関係については、紙面照度を十分明るくしたときの読み取り可否の結果を表1にまとめて示す。 $\alpha=1.8$ と $\alpha=5.0$ の位相板ではノイズ除去画像で読み取りができていたが、 $\alpha=0.7$ の位相板ではできていない。これは、図5からも分かるように、 $\alpha=0.7$ の位相板でのスポットダイアグラムの形状が焦点位置と距離1200mmとではかなり異なり、単一のボケ関数による復元処理では画像が適切に復元できないためである。つまり、 $\alpha=0.7$ の位相板では被写界深度を1200mmまで拡大することができない。

位相板形状と耐ノイズ性能の関係については、 $\alpha=1.8$

と $\alpha=5.0$ の位相板で紙面照度を変化させたときの読み取り可否の結果を表 2 に示す。 $\alpha=5.0$ の位相板に比べて $\alpha=1.8$ の位相板では、より暗い照明環境下でも読み取りが可能であることが分かる。図 4 で示したように $\alpha=1.8$ の位相板では $\alpha=5.0$ の位相板よりも像の広がり小さいため、紙面照度が低くても画素の輝度情報がノイズに埋もれることなく復元できるのだと考えられる。なお、 $\alpha=5.0$ の位相板は像の広がり大きい、図 5 で示した距離範囲より外側でもスポットダイアグラムが似た形状を保っている、ノイズが十分小さい環境下であれば、 $\alpha=1.8$ の位相板よりも広い距離範囲で読み取りが可能であることが予想される。

以上の結果から、 $\alpha=1.8$ の位相板形状を採用し、その読み取り範囲を従来の光学系（250～450 mm）と比較したところ、200～1200 mm での読み取りが可能であり、読み取り範囲は 200 mm から 1000 mm へと約 5 倍に拡大した（被写界深度としては逆数を取り、2.3 倍となる）。

4. お わ り に

二次元コードリーダの読み取り焦点深度の拡大を目的に、波面符号化法を実在光学系へ適用するための設計手法と画像復元アルゴリズムを開発した。シミュレーションと試作装置による実験の結果、撮像素子のノイズの影響を考慮した位相板の設計が重要であることが分かった。試作した深度拡大光学系では、読み取り範囲を従来の光学系の約 5 倍に拡大することが確認できた。

なお、本稿は SSII2015（第 21 回画像センシングシンポジウム）講演予稿集 IS1-33 より改変して転載した。

参 考 文 献

- 1) 江川佳孝, 飯塚智明: CMOS イメージセンサ Dynastron™ とカメラモジュール, 東芝レビュー, **63**, 7 (2008) 22-26
- 2) E.R. Dowski, Jr. and W.T. Cathey: Extended depth of field through wave-front coding, Appl. Opt., **34** (1995) 1859-1866
- 3) W.T. Cathey and E.R. Dowski: New paradigm for imaging systems, J. Opt. A, Pure Appl. Opt., **41** (2002) 6080-6092
- 4) 小松進一: 撮像システムの被写界深度を拡大する Wavefront Coding 技術: 物理的な仕掛けと最近の動向, 映像メディア学会誌, **63**, 3 (2009) 279-283

- 5) Y. Takahashi and S. Komatsu: Optimized free-form phase mask for extension of depth of field in wavefront-coded imaging, Opt. Lett., **33** (2008) 1515-1517
- 6) 吉村武晃: 光情報工学の基礎, コロナ社, (2000) 201-211

長嶋千恵

2002 年名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程満了, 博士 (理学)。名古屋大学ポスドク研究員等を経て, 2008 年 (株) 豊田中央研究所入社, 現在に至る。各種光学検査装置, 車載センサ等の光学設計, 試作機の開発に従事。

塚田敏彦

1986 年名古屋工業大学情報工学科卒, 1988 年名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了, 同年, (株) 豊田中央研究所入社, 現在に至る。1998 年名古屋工業大学電気情報工学科博士後期課程満了, 工学博士, FA 等センシング技術の開発に従事。

伊藤邦彦

1993 年静岡大学機械工学科修士課程修了, (株) デンソー入社, 現在, (株) デンソーウェーブ, 2 次元コードおよびその読み取りに関する研究に従事。

北角善美

1982 年東京理科大学物理学科卒, 同年, (株) デンソー入社, 現在, (株) デンソーウェーブ, 新事業探索および認識・見守りに関する先行技術開発に従事。

小松進一

早稲田大学大学院修士課程 (物理・応物専攻) を 1974 年に修了後, 理化学研究所を経て 1978 年から早稲田大学に勤務, 理学博士 (早稲田大学)。最近, 補償光学, 超解像, 長深度イメージングの研究に従事。『光学技術の事典』(朝倉書店; 分担執筆) ほか。