

符号化開口を用いたバーコード画像のぼけ除去

河本 悠^{†1} 日浦 慎作^{†1} 浅田 尚紀^{†1}

画像センサを用いたバーコード読み取り装置はレンズによりぼけが発生するため、バーコードにピントを合わせる必要がありレーザー走査方式に比べ効率が低い。そこで本研究では、レンズの開口形状を符号化し、画像処理によりバーコード画像のぼけを除去する。ぼけの大きさはレンズから被写体までの距離によって変化するため、復元画像の輝度ヒストグラムを用いてぼけの大きさを推定する。バーコードは二値画像であるため、原画像のヒストグラムは明部と暗部に2つのピークを持つ。そこで復元画像のヒストグラムの分離度を用いて正しい復元であるかどうかを判定する。実験では、画像に占めるバーコードの面積が十分大きい場合に正しく距離推定を行うことが出来ることを確認した。

Barcode Image Deblurring using Coded Aperture

YU KAWAMOTO,^{†1} SHINSAKU HIURA^{†1}
and NAOKI ASADA^{†1}

Since a barcode reader with an image sensor introduces defocus of input image caused by the lens, it needs physical focusing to the object and the efficiency of the reader is lower than laser-beam scanning readers. In this paper, we propose a method to recover a focused image by image processing using a lens with a coded aperture. In prior to the deblurring process, it is necessary to estimate the distance between the lens to the barcode, because the amount of defocus depends on the distance. To solve the problem, we use the characteristic of the histogram of barcode which consists of black and white areas. If the parameter for deblurring is correct, the degree of separation of the intensity histogram is larger than the one with wrong parameters. We confirmed that the method is feasible if the area of the barcode in the input image is sufficiently large.

1. はじめに

バーコードは流通や在庫管理などのため、世界各国で広く用いられている。これを読み取るための装置には、レーザー光の走査によるものと、カメラを用いたものがある。レーザー光の走査による方式では、多角形ミラーなどにより様々な方位へレーザーを照射し、その反射光の強度変化によりバーコードを読み取る。レーザー光は距離が進んでも広がらないため、バーコードの位置に関わらず読み取りを行うことが出来る特徴を持つが、多角形ミラーの回転機構など可動部を有するためコストが高い。一方、カメラによる読み取りはコストが低く、2次元バーコードを読み取ることが出来るという利点もあり、携帯電話などにも搭載され広く用いられている。しかし、レンズの駆動によりバーコードにピントを合わせるか、ピントが合うように読み取り部とバーコードの位置を合わせる必要があり（バーコードリーダーをバーコードに押し当てる、または読み取り面のガラスにバーコードを押し当てるなど）、量販店のレジ端末など多くのバーコードを迅速に読み取る必要がある場面には不向きである。

一方、撮影画像からぼけを除去する研究が近年広く行われている。この技術により、ピント合わせを行うことなくバーコードの安定な読み取りが実現されれば、読み取りの迅速性や操作性とコストの低減を両立させることが出来ると考えられる。しかし一般に、通常のレンズが備える円形開口では特定の空間周波数に関する情報が失われるため、安定なぼけ除去を行うことが困難であるという問題があった。そこで本研究では、符号化開口を用い、カメラで撮影した画像中のバーコード画像からぼけの除去を行う。ぼけの大きさはカメラから被写体までの距離によって変化するため、ぼけを適切に除去するためにはぼけの大きさを推定が必要となる。本研究ではバーコードに特有な輝度ヒストグラムの性質を用いることにより、1枚の画像から自動的に適切なぼけの大きさを求め、ぼけ除去を行う手法を提案する。

2. 符号化開口

画像からのぼけ除去についてはさまざまな研究が行われている。その多くは既存のカメラにより撮影した画像に対する処理方法に関するものであるが、近年では、ぼけ除去が容易となるような光学系の設計に関する研究が注目を集めている。符号化開口はそのような手法の1つであり、レンズにより生じる画像のぼけの形状を、その後の処理に適するように設計する。本節では、ぼけ画像の性質について述べた後に、符号化開口に関する既存の研究について述べる。

^{†1} 広島市立大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University

2.1 ぼけの発生と除去

カメラの被写界深度内に存在しない被写体を撮影すると、その被写体はぼけた像として出力される。また、そのぼけの大きさはレンズから物体までの距離により変化する。このようなぼけはレンズと絞りからなるレンズ光学系により劣化した画像であるとみなすことができ、この劣化過程はぼけカーネル $h(x, y)$ と原画像 $f(x, y)$ の畳み込みにより以下のように表される。

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

ただし、 $n(x, y)$ は観測される画像に含まれるノイズである、

入力画像 g から畳み込みの影響を除去することをデコンボリューションという。畳み込みの逆演算を直接的に行うことは容易ではないが、以下のようにフーリエ変換を用いると簡単にぼけ除去を行うことが出来る。畳み込みはフーリエ変換により積に写されるため、式 (1) のフーリエ変換は次式のようになる。

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) + N(u, v) \quad (2)$$

ただし、 G, H, F, N はそれぞれ g, h, f, n のフーリエ変換である。この式から、推定原画像のフーリエ変換 \hat{F} は以下のように求められる。

$$\hat{F} = \frac{G}{H} = F + \frac{N}{H} \quad (3)$$

これを逆フィルタと呼び、 \hat{F} を逆フーリエ変換することで、ぼけ除去画像 \hat{f} を復元することができる。しかし、一般的なレンズの開口形状は円形であり、ぼけカーネル $h(x, y)$ は開口形状に対して相似となることから、 H は 0 もしくは非常に小さい値を多く含む。そのため式 (3) の右項に示すようにノイズが強調されるために、復元画像 \hat{F} の解は不安定となる。

ぼけカーネル $h(x, y)$ は前述のように、レンズの開口形状に対して相似の図形であり、以下のように表すことが出来る。

$$h(x, y) = \frac{1}{M^2} a\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right) \quad (4)$$

ここで $a(x, y)$ はレンズの開口形状である。また、 M は $a(x, y)$ に対する $h(x, y)$ の倍率であり、レンズから被写体までの距離によって変化する。 $\frac{1}{M^2}$ の項はレンズの通過光量がぼけの大きさに関わらず一定であることを表す。またこの式のフーリエ変換は

$$H(\omega_x, \omega_y) = A(M\omega_x, M\omega_y) \quad (5)$$

となり、ぼけカーネルのフーリエ変換 H は、開口形状のフーリエ変換 A を倍率の逆数で拡大・縮小した図形となる。ただし、 ω_x, ω_y は空間周波数である。

2.2 符号化開口

前述のように、一般的なレンズの開口形状は円形またはそれに近い形状であり、そのフーリエ変換には 0 やごく小さな値を持つ領域が大きい。そのため、デコンボリューションによる復元が不安定となる。そこで、レンズの開口形状を変化させ、デコンボリューションによる復元画像の精度を向上させる方法が研究されている。これを符号化開口と呼ぶ。

日浦ら¹⁾ は、異なる距離に合焦した複数枚の画像を同時に撮影する装置（多重フォーカスカメラ）に符号化開口を組み合わせ、それらの画像から被写体の形状を求めると同時に、入力画像からぼけを除去できることを示した。それに対し Veeraraghavan ら²⁾ や Levin³⁾ からは、符号化開口を備えたレンズにより撮影した 1 枚の画像から、被写体までの距離推定とぼけ除去を行っている。しかし、単一の画像から奥行きを求めること、つまり倍率 M を求めることは容易ではなく、一般には原画像の統計的性質に何らかの仮定をおく必要がある。例えば Veeraraghavan ら²⁾ は輝度ヒストグラムの尖度に関する仮定を、また Levin ら³⁾ はエッジ強度ヒストグラムに関するモデルを用いて奥行き推定を行っている。しかしこれらの手法は必ずしも安定ではなく、Levin らは人手による補助が必要であったことを報告している。そもそも単一の画像からの奥行き推定が難しいことは、シャープなテキストチャに対してピントを外して撮影した場合と、ぼかしたテキストチャにピントを合わせて撮影した場合の画像とに差がないことから、明らかに不良設定問題である。

一方、本論文で扱う被写体はバーコードに限られており、一般の写真撮影を課題とした上記のような研究に比べ、被写体に対してより強力な仮定をおくことが出来る。本研究では特に、原画像の輝度分布に注目し、1 枚のみの撮影画像から倍率 M を求め、原画像の復元を行う。

3. 符号化開口を用いたバーコード画像のぼけ除去

符号化開口は適切に穴を開けた板をレンズに装着するだけで実現することができるため、実装が非常に容易であり、本研究の目的である低コスト性を達成しやすい。しかし前節で述べたように、デコンボリューションによるぼけ除去では、ぼけカーネルの倍率 M を求める必要がある。そこでこの章では、原画像の輝度分布が持つ性質をもとに、倍率を推定する手法について述べる。

3.1 ぼけカーネルの倍率の推定

デコンボリューションはぼけ関数の逆関数 H^{-1} が既知であるという前提で成り立っている。しかし、被写体とカメラの距離により倍率 M が変わるため、ぼけ関数はその大きさが

未知である。そこで本研究では、倍率 M を様々に変化させ、それによって復元した画像が適切であるかどうかにより倍率 M を定める。

式 (4) において、レンズの合焦距離に対して前と後ろにある被写体では倍率 M の符号が反転する。一般のレンズが備える円形の開口は、 M の絶対値が同じであれば $h(x, y)$ は同じ図形となる。しかし符号化開口ではそれが成り立たないため、探索すべき M の範囲には正と負の値が含まれる。実際のバーコード読み取りではレンズが合焦している時が最も望ましい状態であるため、それをバーコードが置かれる範囲の中央付近の距離に設定することが考えられる。バーコードが置かれる範囲の距離の最小値と最大値から、 M の探索範囲を予め定めておく必要がある。

3.2 輝度ヒストグラムの分離度

この節では、自動でぼけの倍率 M を推定するために、画像の輝度値ヒストグラムの分離度を用いる手法を提案する。

バーコードは一般に背景色とインク色の二値から構成されており、中間の反射率は用いられない。これは JAN コード⁴⁾ のような縞模様⁵⁾ の 1 次元バーコードだけでなく、QR コード⁵⁾ 等の 2 次元バーコードでも同様である。この場合、バーコードを撮影した画像の輝度のヒストグラムは、背景色とインク色の 2 つのピークを持つ。一方、バーコードを撮影したときにレンズによるぼけが発生すると、背景色とインク色が光学的に重ね合わされて、中間の輝度が多く観察される。このことから、バーコードのヒストグラムの分離度は合焦しているときに高く、ぼけている場合には低くなると考えられる。この性質を用い、適切な復元が行われているかどうか判定する。

ヒストグラムの分離度は判別分析法で最適閾値 t を求める際に使用される値である。今、入力画像が 8bit(256 階調) のモノクロ画像 f であるとする、 t は 0 から 255 までの整数値を取る。そこで、次式の t を 0 から 255 まで反復計算し、分離度 S が最大となるとき t を求める。ここで、クラス 1 を輝度値 $[0, t-1]$ 、画素数を n_1 、平均輝度値 \bar{f}_1 、クラス 2 を輝度値 $[t, 255]$ 、画素数を n_2 、平均輝度値 \bar{f}_2 、輝度値 i を持つ画像の数を $f(i)$ とすると、それぞれのクラスの分散 σ_1^2 、 σ_2^2 は以下のように求められる。

$$\sigma_1^2 = \frac{\sum_{i=0}^t f(i) \cdot (i - \bar{f}_1)^2}{n_1} \quad (6)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{\sum_{i=t}^{255} f(i) \cdot (i - \bar{f}_2)^2}{n_2} \quad (7)$$

また、全体の平均値を \bar{f} とするとクラス間分散 σ_B^2 とクラス内分散 σ_W^2 および分離度 S は次式で表される。

$$\sigma_B^2 = \frac{n_1\sigma_1^2 + n_2\sigma_2^2}{n_1 + n_2} \quad (8)$$

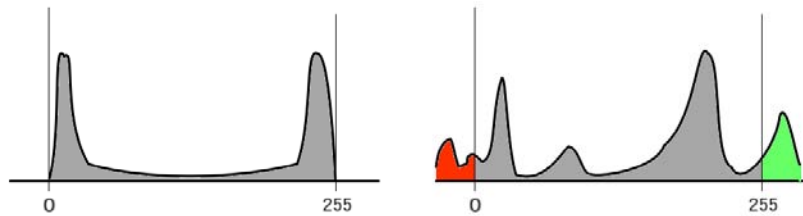
$$\sigma_W^2 = \frac{n_1(\bar{f}_1 - \bar{f})^2 + n_2(\bar{f}_2 - \bar{f})^2}{n_1 + n_2} \quad (9)$$

$$S = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_W^2} \quad (10)$$

クラス間分散はクラス 1 とクラス 2 がより離れているほど大きくなり、クラス内分散は σ_1^2 および σ_2^2 が小さいと小さくなる。つまり、ヒストグラムに山が大きくふたつに分かれていると分離度は高くなる。バーコード画像は縞模様のため、ヒストグラムに大きな山がふたつできる。よって、バーコード画像のヒストグラムの分離度の値は大きくなる。

3.3 輝度範囲の制約

入力画像 g に対してデコンボリューションを行うとき、ぼけ関数 H を定めるときの倍率 M が正しくないと、復元画像 \hat{F} の逆フーリエ変換 \hat{f} には画素値が 0 未満または 256 以上の画素が多く現れる。その様子を図 1(b) に示す。このような場合、一般には画素値をそれぞれ 0 と 255 に丸めることが多い。しかしこのとき、丸められる画素が多いと、ヒストグラムの 0 と 255 の度数が大きくなり、分離度が大きくなってしまふ。一方で、正しい倍率 M で復元した画像では原画像が求められるため、図 1(a) のように輝度の範囲を逸脱する画素は少ないと考えられる。そこで、輝度範囲を逸脱した画素による悪影響を避けるために、その逸脱画素の割合を用いて分離度を修正する。具体的には、ヒストグラムから得た分離度 S (式 (10)) に対し、全画素数を $n = n_1 + n_2$ 、輝度範囲外の画素数を n_o としたとき、修



(a) 正しく復元できたバーコード画像のヒストグラム (b) 正しく復元できていないバーコード画像のヒストグラム

図 1 理想的なバーコード画像のヒストグラム

正分離度 S_m を

$$S_m = \frac{n - n_o}{n} S \quad (11)$$

のように求め、範囲内画素数の割合を分離度に重みとして積算する。

3.4 ぼけ除去のアルゴリズム

本研究で提案するシステムの処理の概要を以下に示す。

準備:

- 開口形状の取得
レンズを通して点光源を撮影し、開口形状 $a(x, y)$ を求める。
- 倍率の範囲の取得
点光源の位置を動かすなどして、被写体が置かれる奥行き範囲における最小と最大の倍率 M_{min}, M_{max} を求める。

復元処理:

- (1) 入力画像 g の取得
- (2) 開口形状 $a(x, y)$ のフーリエ変換 A の取得
- (3) 最大倍率 M_{max} から最小倍率 M_{min} になるまで繰り返し
 - 1 開口形状のフーリエ変換 A を倍率の逆数で拡大 (式 (5))
 - 2 デコンボリューション (式 (3))
 - 3 復元画像 \hat{F}_n の逆フーリエ変換
 - 4 復元画像 \hat{f}_n の輝度値ヒストグラムの分離度 S_m の計算
 - 5 分離度が最大値を更新した時、最適復元画像として保存



図 2 シミュレーション実験で用いる原画像 (分離度:4.88)

- (4) 最適復元画像の出力

4. 実験

本論文の提案手法を実装したシステムを構築し、動作を確かめる。これにより、提案手法の有効性を実験的に確認する。

4.1 シミュレーション実験

カメラを用い、ぼけが生じないように撮影した画像を取得する (図 2)。その画像に対し、符号化開口と円形開口のそれぞれの形状を縮小したものを畳み込み、ぼけ画像を作成した (図 3(a), 図 3(b))。符号化開口の開口形状には Zhou⁶⁾ が提案したものをを用いた。続いて提案手法の手順でぼけ除去を施し、復元画像を取得する実験を行った。このとき、円形開口の開口面積は、符号化開口の開口面積と同じとした。つまり、実カメラでは両者の開口形状において、同じ露光時間で撮影すると露光量も同一となる。この実験では、畳み込みに使用した開口画像の縮小倍率は符号化開口に対して 0.198 倍、円形開口では 0.143 倍とした。

符号化開口を用いたぼけ除去の結果を図 4(a), 5(a) に示す。また、円形開口を用いたぼけ除去の結果を図 4(b), 5(b) に示す。ここで、図 5(a) および 5(b) 中の赤線で示した normal Separation は式 (10) で求められるヒストグラム分離度 S であり、それに対し緑線で示し



(a) 符号化開口の形状と、それによるぼけ画像 (倍率 $M = 0.198$)
(b) 円形開口の形状と、それによるぼけ画像 (倍率 $M = 0.143$)

図 3 符号化開口を用いたシミュレーション実験に用いた画像

た modified Separation は 3.3 節で述べた、ヒストグラムの輝度範囲の制約により重み付けられた修正分離度 S_m (式 (11)) である。

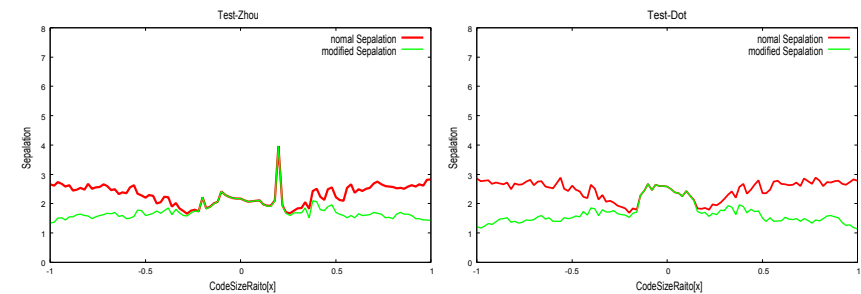
図 4(a) と図 4(b) を見比べると、符号化開口を用いた図 4(a) は正しく復元され、符号化開口を用いなかった図 4(b) は正しく復元できていないことが分かる。符号化開口を用いた時の復元倍率 0.200 は正解倍率 0.198 に近く、正しい倍率が求められていると言える。なお、先に述べたように Zhou コードは対称の図形ではないため、図 5(a) のように復元倍率が正の領域と負の領域で分離度のグラフの形状が異なることもわかる。これにより、バーコードが合焦距離 (復元倍率が 0) に対して手前であるか奥であるのかが求められることになる。図 5(a) において、分離度 S (赤線) は正解倍率付近で高くなるが、正解倍率よりも大きな復元倍率で復元したときにも分離度は高い。これは、実際のぼけに対し高周波成分が過度に強調されるためリングングが発生し、画像における最小輝度 0 と最大輝度 255 の割合が増えるためである。それに対し、修正分離度 S_m (緑線) には正解倍率付近に現れた明瞭なピークに対し、より大きな復元倍率の時の値が上昇せずに、安定に復元倍率を求めることが出来ることわかる。

一方、円形開口を用いた場合については、正解倍率 0.143 に対し復元倍率は -0.1 であり、正しい倍率が求められていない。図 4(b) からは、復元された画像がぼけを含んでおり、バー



(a) 符号化開口を用いた復元画像 (分離度:3.97, 復元倍率:0.200)
(b) 円形開口を用いた復元画像 (分離度:2.67, 復元倍率:-0.1)

図 4 シミュレーション実験によるぼけ除去画像



(a) 符号化開口を用いた場合

(b) 円形開口を用いた場合

図 5 復元に用いた倍率 M に対する分離度の変化



分離度:2.102692
図6 円形開口の正解倍率での復元画像

コードを構成する線のうち明瞭でない線も多く見られる。またバーコードの左右にリングングによる縞模様も現れている。図5(b)を見ると、分離度が正解倍率付近で明瞭なピークを持たず、そのために正解倍率に近い倍率が求められていないことがわかる。なお、円形開口を用いたときに、正解倍率を用いて復元した画像を図6に示す。円形開口は空間周波数領域において零点を多く持つため高周波成分が過度に強調され、リングングが生じ、正しく原画像を復元出来ていない。このことから、円形開口を用いると復元倍率を正しく決定することが出来ず、また仮に復元倍率が正しくても、原画像を正しく復元することが難しいことがわかる。それに対し、符号化開口を用いたものでは復元倍率を安定に求めることができ、かつ復元画像も明瞭となることが分かった。

4.2 実画像実験

一眼レフカメラ (Nikon D700) に装着したレンズ (Ai Micro-Nikkor 105mm F2.8S) の先端に Zhou が提案した開口形状⁶⁾ の通りに穴をあけた板を設置し、画像を撮影した。図7(a) に撮影により得た入力画像を、図7(b) に復元された画像を示す。また、図8(a) に復元倍率に対する分離度の変化を、さらに図8(b) に輝度範囲を逸脱した画素の画素数を示す。

この実験では画像全体をフーリエ変換しているため、画像のエッジ部分の輝度の不連続性

によるリングングが現れている。しかし、特に画像の中央付近では良好に原画像が復元できていることがわかる。図8(a)からは、単純に分離度を用いた場合では復元倍率が大きくなると分離度が上昇してしまうのに対し、修正分離度を用いることで正しいピーク位置が検出されていることがわかる。図8(b)からは、復元倍率が大きいほど、輝度範囲を逸脱した画素の画素数が増加することがわかる。これは、復元倍率が大きいと、ぼけカーネルのフーリエ変換に多くの零点が含まれ、推定が不安定となっていることに対応する。

その他の画像についても実験し、それにより推定の安定度を検討した (図9)。その結果として、推定に成功する条件として以下の点が挙げられることが分かった。

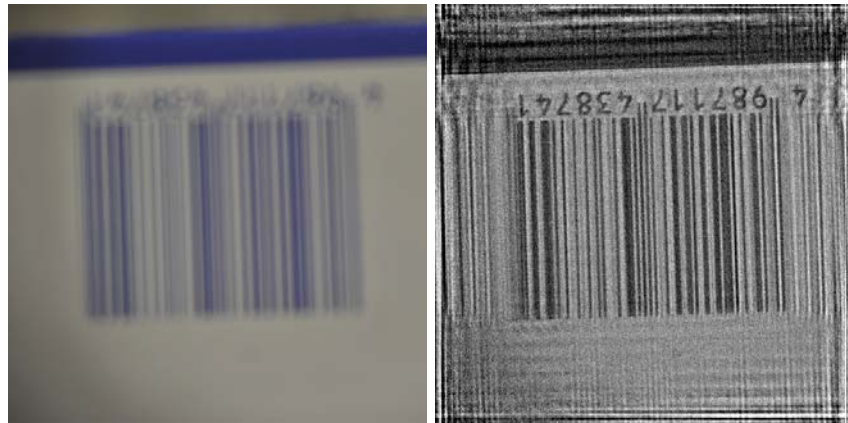
- (1) 撮影した画像内に奥行き異なる複数の被写体が存在しない
- (2) 被写体が、ほぼ二値の反射率により構成される
- (3) 明部 (背景色) と、暗部 (インク色) の面積の比が過大でない

条件(1)は、画像全体で単一の倍率 M を求めていることによって生じる制約である。画像をブロックごとに分割し、それぞれで奥行きを求めることによって解決ができると考えられる。条件(2)と(3)は分離度を用いることによって生じる。普通、バーコードではその内部で明部と暗部の比率はほぼ1:1であるが、バーコードが画像に対して相対的に小さく写っており、背景に明るい部分や暗い部分を大きく含む場合、原画像の分離度が低くなるために安定な推定が出来なくなる。条件(2)が満たされないと推定がうまくいかないことも自明である。

また、復元に対して望ましい画像として、合焦時の暗部の画素値がほぼ0であり、また明部の画素値が255に近い画像が挙げられる。この場合、正しく復元された画像ではそれぞれの画素値が輝度範囲内に収まる一方で、復元倍率が誤っているときに輝度範囲を逸脱する画素が増えることになる。バーコードリーダを設置する場所の明るさに合わせてカメラの露出値を調節し、反射率が1の被写体で画素値が255に近くなるように設定することが望ましいと考えられる。

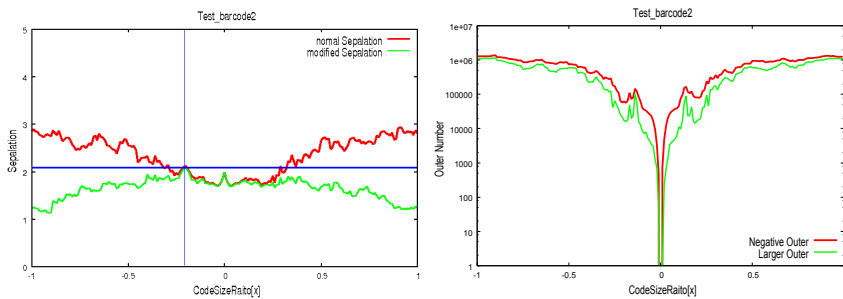
5. おわりに

本稿では符号化開口を用いたバーコード画像のぼけ除去の手法を提案し、画像取得後にぼけの大きさによらずにぼけの除去を行うシステムを構築した。ぼけ除去のためには、開口形状の倍率を求める必要があるが、単一の画像からぼけ除去を行うためには被写体に対する先見の知識が必要であることを述べた。本研究では対象がバーコードに限られるため、画像のヒストグラムの分離度を用いることでぼけの大きさを推定する手法を提案した。このとき、



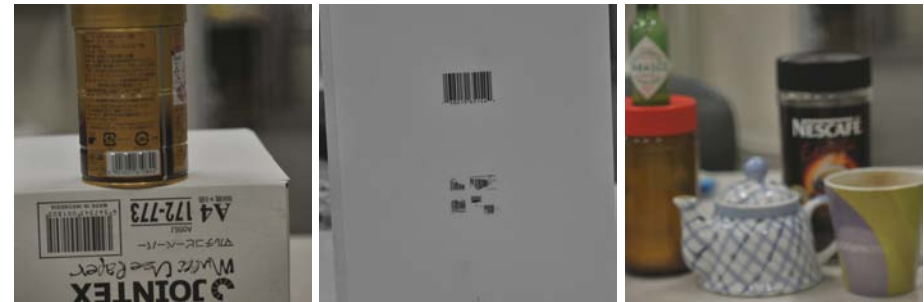
(a) 入力画像 (分離度:1.99) (b) 出力画像 (分離度:2.075, 倍率:-0.200)

図7 実入力画像を用いたぼけ除去の例



(a) 倍率に対する分離度の変化 (b) 倍率に対する輝度範囲外画素数の変化

図8 実入力画像を用いた実験における分離度と輝度範囲外画素数



(a) 様々な輝度の物体を含む場合 (b) バーコードの領域が小さい場合 (c) 様々な奥行きを含む一般シーン

図9 倍率の推定に失敗した例

復元時の輝度範囲の制約を導入することで、誤った倍率で復元したときのリングングによる悪影響を避ける手法を提案した。シミュレーション実験および実画像実験の双方で、正しくぼけ除去が行えることを示したが、画像によっては正しい倍率が求められないことがあったため、その原因について考察した。

今後の課題として、画像の分割処理が挙げられる。奥行きのあるシーンについては、それを小領域に分割し、それぞれの領域ごとに倍率を求めることで対応が出来ると考えられる。目的はバーコードの認識であるため、バーコードが存在する部分で正しく動作すればよく、微小な領域の奥行きを求めることは要求されない。また、現在はフーリエ変換に時間がかかっているため、処理の高速化も課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 日浦慎作, 松山隆司, 構造化瞳をもつ多重フォーカス距離画像センサ, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J82-D-II, No. 11, pp. 1912-1920, 1999.
- 2) 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 Trans. Graph. (SIGGRAPH), Vol. 26, No. 3, 2007.
- 3) A. Levin, R. Fergus, F. Durand, and W. Freeman, Image and depth from a conventional camera with a coded aperture, ACM Transactions on Graphics, no.3, 2007.
- 4) 日本バーコード, <http://n-barcode.com/>
- 5) QRcode.com, 株式会社デンソーウェブ, QR コード, <http://www.qrcode.com/index.html>

- 6) C. Zhou and S. K. Nayar, What are Good Apertures for Defocus Deburring?,
IEEE International Conference on Computational Photography, Apr, 2009.
- 7) 株式会社シフト, カメレオンコード, <http://www.shift-2005.co.jp/>
- 8) Japanese Creative Barcodes,
<http://www.darkroastedblend.com/2008/04/japanese-creative-barcodes.html>
- 9) 富士通株式会社, 富士通フロンテック株式会社, セルフチェックアウトシステム,
<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2005/09/14.html>
- 10) 株式会社キーエンス, コンベアライン用 長距離レーザ式バーコードリーダー,
<http://premium.ipros.jp/keyence/product/detail/7770215/>
- 11) アイニックス株式会社, バーコードリーダーの方式,
http://www.ainix.co.jp/howto_autoid/equipments/553.html
- 12) 長原一, 符号化撮像, 情報処理学会研究報告, Vol.2010-CVIM-171, No.14, pp. 1-9, 2010.
- 13) A. Levin, S. Hasiuff, P. Green, F. Durand, and W. T. Freeman, 4D Frequency Analysis of Computational Cameras for Depth of Field Extension, *SIGGRAPH, ACM Transaction on Graphics*, 2009.
- 14) E. Doski and W. Cathy, Extended depth of field through wave-front coding, *journal of the Optical Society America A*, no. 11, pp. 1859-1866, 1995.
- 15) H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou and S. Nayar, Flexible Depth of Field Photography, *European Conference on Computer Vision*, 2008.