

ぶれ画像復元のためのリングング検出器の提案

井下 智加 向川 康博 八木 康史^{†1}

画像撮影の際にカメラや被写体が動くことで生じるぶれを補正する手法は数多く提案されている。ぶれ画像を復元することによりぶれのない原画像を推定する際に問題となるのが、復元画像に生じるリングングと呼ばれる波模様のアーティファクトである。本研究では、このリングングと自然画像を持つテクスチャを区別するためのリングング検出器を提案する。検出器を設計する際に着目したのが、リングングはぶれの過程で失われる周波数成分が原因となり発生することである。この周波数成分に相当する正弦波が、復元画像全体に渡って同じ位相で存在しているかどうかを調べることで、リングングの有無を判定する。本検出器をぶれ画像復元と組み合わせることでリングングを抑えた復元画像を求めることができる。自然画像に対するリングング検出器の適用実験及び、合成画像、実画像を用いたぶれ画像復元実験を行ないリングング検出器の有効性を示した。

Proposal on Ringing Detector for Image Restoration

CHIKA INOSHITA, YASUHIRO MUKAIGAWA and YASUSHI YAGI^{†1}

A lot of methods have been proposed for restoring blurred images due to motion of the camera or subjects. The major problem of the restoration process is that the deblurred images include wave-like artifacts called ringing. In this paper, we propose a ringing detector for distinguishing the artifact from some textures included in natural images. To design the ringing detector, we focused attention on the fact that the ringings are caused by null frequency of the point spread function. Ringings are detected by evaluating whether the deblurred image includes sine waves corresponding the null frequencies across the entire image with uniform phase. By combining the ringing detector with a deblurring process, we can reduce ringing artifacts in the restores images. We demonstrate the effectiveness of the proposed ringing detector by some experiments using synthetic images and real images.

^{†1} 大阪大学 産業科学研究所
Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

1. はじめに

画像のぶれは撮像面上での被写体の位置が露光時間内に変化することにより生じ、カメラ自身が動くことによる手ぶれと、被写体が動くことによる被写体ぶれの2つに分けることができる。前者は三脚に固定することで解決できる。また、光学的に手ぶれを軽減する補正機構を備えるカメラも一般的になりつつある。一方、後者を防ぐためには露光時間を短くしたりフラッシュを用いるなどの工夫が必要となる。しかし、露光時間を短くすると撮像素子に入る光量が少なくなるために暗くノイズが目立つ画像となる。フラッシュを使用すると平面的な陰影となってしまう、撮影風景の奥まで光が届かないために近距離の被写体だけが明るくなる不自然な画像となってしまう。

以上のように、ぶれはカメラの設定のみで完全に抑えることができない。理論的にはカメラや被写体のぶれ方が既知であれば、ぶれのない画像に復元できる。しかし、動きが既知であってもぶれにより特定の周波数成分が失われ、その成分を正しい値に復元することができない場合も存在する。これが、復元画像に誤った波模様のパターンが現れるリングングと呼ばれる現象を引き起こす原因である。

ぶれ画像復元の研究では、リングングが生じないように復元するさまざまな手法が試みられている。Shan ら¹⁾ は平坦部分のリングング発生を抑えるため、ぶれ画像中での平坦部分を除いて復元処理を行っている。Yuan ら²⁾ は画像の解像度を上げながら各解像度において復元を行うことでリングングの発生を抑え、エッジの特徴も残す復元処理を提案している。この他にもさまざまな手法が提案されているが、リングングの統計的性質を利用したものがほとんどであり、なぜリングングが生じるのかという理由を厳密に解析したものではなかった。実際、復元した画像のみからリングングの原因となる波模様が存在するかを判断するのは難しい。

そこで本研究では、リングングが発生する原因はぶれにより失われる周波数成分であることに着目し、その成分の空間的性質に基づくリングング検出器を提案する。本検出器は画像と周波数を与えることで、その周波数に対応する正弦波が画像に対してリングングの性質を持つテクスチャとして現われているかを調べるものである。本検出器により、自然画像における波模様のテクスチャとリングングを区別することができる。また、ぶれを表すPSFが既知の場合の復元問題において、リングングを抑えた復元画像を得ることができる。

2. 関連研究

2.1 統計的性質の利用

自然画像の統計的性質に、画像の勾配ヒストグラムはヘビーテールと呼ばれる分布になることが知られている。Shan ら¹⁾ は前述の勾配ヒストグラムを多項式でモデル化し、復元に利用している。また、平坦部を復元対象から外すことで平坦部でのリングングを抑えている。この手法は画像の一般的な性質を利用しているが、画像に含まれるテクスチャへの影響が考慮されていない。本研究で提案するリングング検出器を用いたぶれ画像復元では、リングングの原因となる周波数成分を補正操作の対象とするため、原画像に存在する周波数成分への影響を少なくすることができる。

2.2 残差画像の利用

リングングは、その大きさが画像中のエッジの大きさに比例するという特徴を持つ。そこで未知の原画像に対して既知の参照画像を準備し、原画像と参照画像の差分に対して復元を行うことで最終的な復元画像を求める方法が提案されている²⁾³⁾。この手法ではリングングの大きさを小さくすることはできるが、2.1 節で述べた手法のように画像に含まれるテクスチャへの影響が考慮されていない。

2.3 複数の画像の利用

1 枚のぶれ画像のみで精度の良い復元を行うことは難しいため、複数枚の画像を用いる手法も提案されている。Yuan ら⁴⁾ は高感度で露光時間を短くして撮影した画像と、低感度で露光時間を長くして撮影した画像を、Ancuti ら⁵⁾ はぶれ画像に加え、復元対象となる被写体が含まれる参照画像を、Agrawal ら⁶⁾ は露光時間の異なる複数枚の画像を用いた。一般的なカメラで撮影した画像には、これらの手法を適用できない。本研究で提案するリングング検出器を用いた復元手法では復元画像以外の参照画像を必要としない。

2.4 特殊な撮影装置の利用

条件のよいぶれ画像を得たり、ぶれ方の推定を容易にするために、特殊な撮影装置を使用する手法も提案されている。Ben-Ezra ら⁷⁾⁸⁾ はぶれ推定を高精度なものにするために、低解像度のビデオカメラと高解像度のカメラを組み合わせたハイブリッドカメラを提案している。Raskar ら⁹⁾ はぶれによる周波数成分の損失の影響を小さくするために、露光時間中のシャッターの開閉をコード化したカメラを提案している。これらは特殊な撮影装置を必要とするため、一般的なカメラで撮影した画像には適用することができない。本研究では、一般的なカメラで撮影されたぶれ画像復元の問題を扱う。

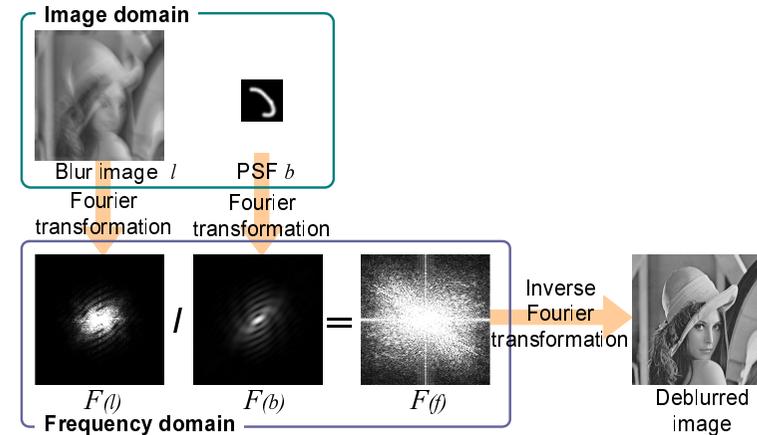


図1 フーリエ変換に基づくぶれ画像復元の流れ

3. ぶれ画像復元の原理

撮像面に対してシーンの動きが一樣である場合、撮像面で得られるぶれ画像は、次式のようにぶれの無い原画像と点広がり関数 (以下 PSF と呼ぶ) の畳み込みでモデル化される。

$$l = f * b \quad (1)$$

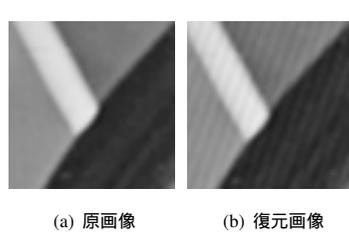
ここで、 $*$ は畳み込み、 f は原画像、 b は PSF、 l はぶれ画像を表す。PSF が既知であれば、式 (1) を逆演算することにより原画像が求められる。しかし、畳み込みの逆演算は一般に難しい計算である。ここで、式 (1) をフーリエ変換すると畳み込みは積の形で表される。

$$\mathcal{F}(l) = \mathcal{F}(f)\mathcal{F}(b) \quad (2)$$

$\mathcal{F}(g)$ は関数 g のフーリエ変換を表す。式 (2) より、周波数空間上においてぶれ画像を PSF で除算することにより原画像の周波数特性が求まり、その周波数特性を逆フーリエ変換することでぶれ画像を原画像に復元することができる。

$$r = \mathcal{F}^{-1}\left(\frac{\mathcal{F}(l)}{\mathcal{F}(b)}\right) \quad (3)$$

$\mathcal{F}^{-1}(g)$ は関数 g の逆フーリエ変換を表す。 r は復元画像である。以上のことから、PSF が既知である場合、式 (3) を用いた復元が行える。実際の復元の流れを図 1 に示す。



(a) 原画像 (b) 復元画像

図 2 原画像と復元画像の拡大図

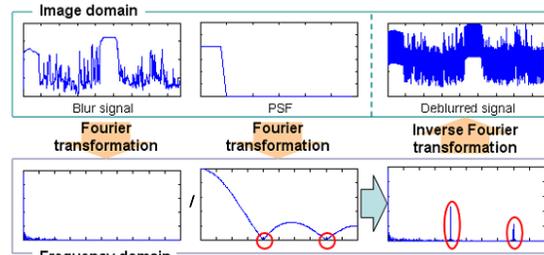


図 3 1次元信号でのぶれ信号復元

4. リンギング検出器

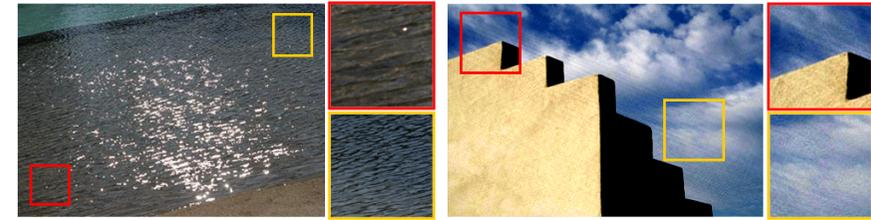
4.1 復元画像に含まれるリンギング

理論的には3章で示したフーリエ変換に基づく復元によりぶれのない画像へ復元することが可能である。しかし、現実には完全な復元画像を得ることは難しい。図2は3章の復元の流れの例で用いた原画像と復元画像の一部を拡大したものである。図2に示す復元画像には原画像にはない波模様が含まれていることがわかる。

この現象は原画像がぶれ画像に変換される過程において、原画像に含まれる特定の周波数成分が失われるために起こる。PSFが周波数空間上において極めて小さい強度となる成分を持つ場合、式(2)より、ぶれ画像は対応する周波数成分を失ってしまう。小さい値同士の除算は不安定な計算であり、真値との誤差が大きく生じてしまうために元に戻らなくなる。以降、大きな誤差が生じてしまう周波数を不可逆周波数と呼ぶ。図3に示すのは1次元信号における復元の例である。ここで使用するPSFは周波数特性から不可逆周波数を2つ持つことが読みとれる。式(3)に従い復元を行った結果、復元信号の周波数特性では不可逆周波数の強度が非常に大きな値に復元されることがわかる。そのため、復元信号には不可逆周波数に対応する正弦波が信号全体に対して含まれる。これがリンギングの正体である。

4.2 リンギングの性質

リンギングはPSFの不可逆周波数に対応する正弦波として復元画像に現れることは前節で述べた。PSFが既知である場合、周波数特性において極めて小さい強度となる成分からリンギングを構成する正弦波(以降、誤成分と呼ぶ)の周波数と方向を予想することができる。この誤成分は復元画像に対して、波の方向や位相が変化することなく一様に含まれることから、リンギングを持つ復元画像を以下のような原画像と誤成分との和で表すことができる。



(a) 自然画像のテクスチャ例

(b) リンギングの例

図 4 自然画像における波のテクスチャとリンギング

$$r(x, y) = f(x, y) + \sum_i e_i(x, y) \quad (4)$$

$r(x, y)$ は復元画像, $f(x, y)$ は原画像, $e_i(x, y)$ は誤成分を表す。この誤成分は不可逆周波数に対応する正弦波であるため、式(5)のように定義できる。

$$e_i(x, y) = k_i \cos(2\pi(a_i x + b_i y) + c_i) \quad (5)$$

a_i は x 軸方向の周波数, b_i は y 軸方向の周波数であり PSF の不可逆周波数と一致する。 k_i は振幅, c_i は位相を表す。この2つは未知の値である。

式(4)より、誤成分を復元画像から取り除くことでリンギングのない原画像が求められることがわかる。この誤成分を検出するのが本研究で提案するリンギング検出器である。

4.3 リンギングの検出法

撮影するシーンによっては、リンギングに類似するテクスチャを見ることができ。画像に含まれる波状のテクスチャが自然環境から得られたものであるか、リンギングによるものであるかをその画像だけから判断することは難しい。しかし、リンギングを構成する誤成分の性質に注目すると自然環境におけるテクスチャとリンギングを区別することができる。

図4に示すのは自然画像における波模様のテクスチャとリンギングの例である。図4(a)は画像全体に渡る波模様を持つが、画像の各領域において方向や位相、周波数が変化していることがわかる。このように自然画像は様々な周波数の波がいろんな方向に重なって作られており、方向や位相が変化しない特定の周波数が画像全体に含まれることは稀である。一方、リンギングを構成する誤成分の性質は前節より次の2点にまとめられ、図4(b)に示すリンギングの例でもこの性質が満たされていることが確認できる。

(a) 周波数と方向は不可逆周波数と一致する

(b) 復元画像の各領域において位相が変化しない

不可逆周波数は PSF の周波数特性において極めて小さい強度となる周波数から求められる。問題は不可逆周波数に対応する正弦波が画像全体に対して位相が変化することなく含まれているか否かである。このことを調べるのが本研究で提案するリングング検出器である。

リングング検出器は画像と注目する周波数を入力とし、与えられた周波数に対応する正弦波が画像において誤成分の性質 (b) を満たしているかの度合いを 0 から 1 の値で出力する。ここで与える周波数は不可逆周波数であるため、実際には誤成分に対する処理となる。検出器では誤成分の性質 (b) を抽出するために、問題を次に示す 2 つに分割して処理を行う。

- (1) 画像の各領域に対し、与えられた周波数に対応する正弦波がどのように含まれるか
- (2) 画像の各領域で、与えられた周波数に対応する正弦波の位相は一定か

問題 (1) については局所的な周波数解析が行える式 (6) に示すガボール変換を用いて調べる。ガボール変換は式 (7) に示すガボールフィルタとの畳み込みで表される。

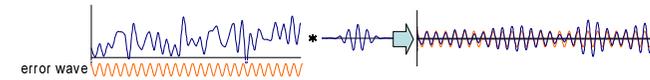
$$g(x, y) = \sum_{s,t} r(x-s, y-t)w(s, t) \quad (6)$$

$$w(x, y) = \frac{1}{2\pi d^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2d^2}} \cos(2\pi(ax + by)) \quad (7)$$

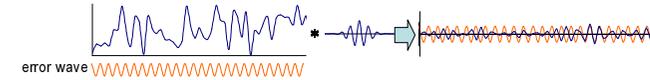
d は分散, a は x 軸方向の周波数, b は y 軸方向の周波数を表す。このガボールフィルタの周波数としてリングングに対応する周波数を設定することで、その周波数の正弦波が画像の各部に対してどのように含まれているかを調べることができる。ここで、入力された周波数に対応する正弦波が画像全体に位相の変化なしに含まれる場合、ガボール変換結果 $g(x, y)$ は位相の変化のない与えられた周波数と一致するパターンとなって現れる。

図 5 に示すのは誤成分が含まれる場合と含まれない場合の 1 次元信号を用いてガボール変換を行った例である。変換結果に与えられた周波数に対応する正弦波を重ねると、誤成分が信号に含まれる場合は、振幅に違いは見られるが周波数と位相は誤成分と一致することがわかる。一方、誤成分が信号に含まれない場合、ガボール変換結果と正弦波が完全に重ならないことから、周波数や位相が画像の各領域において変化していることが確認できる。

以上から、問題 (2) についてはガボール変換結果と誤成分の類似度により評価できることがわかる。具体的にはガボール変換結果と誤成分の相関係数を用いる。しかし、誤成分 $e_i(x, y)$ の位相 c_i と振幅 k_i は未知であるため、振幅 k_i は 1 に固定し、ガボール変換結果との相関係数 $C_i(c)$ が最大となる位相 c を探索することで求める。



(a) 信号に誤成分が含まれる場合



(b) 信号に誤成分が含まれない場合

図 5 ガボール変換結果の例

$$C_i(c) = \frac{\sum_{x,y} (g_i(x, y) - \overline{g_i(x, y)})(e_i(x, y, c) - \overline{e_i(x, y, c)})}{\sqrt{\sum_{x,y} (g_i(x, y) - \overline{g_i(x, y)})^2} \sqrt{\sum_{x,y} (e_i(x, y, c) - \overline{e_i(x, y, c)})^2}} \quad (8)$$

ここで、

$$g_i(x, y) = \sum_{s,t} r(x-s, y-t)w_i(s, t) \quad (9)$$

$$w_i(x, y) = \frac{1}{2\pi d^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2d^2}} \cos(2\pi(a_i x + b_i y)) \quad (10)$$

$$e_i(x, y, c) = \cos(a_i x + b_i y + c) \quad (11)$$

$$\overline{g_i(x, y)} = \sum_{x,y} \frac{g_i(x, y)}{N} \quad (12)$$

$$\overline{e_i(x, y, c)} = \sum_{i,x,y} \frac{e_i(x, y, c)}{N} \quad (13)$$

とする。 N は画像の総画素数である。

リングング検出器は $C_i(c)$ の最大値を最終的な出力とする。出力値の範囲は相関係数の最大値を採用するため、0 以上 1 以下となる。リングング検出器の出力が 1 に近い値である場合、画像の各領域において位相や周波数が変化していないことを、0 に近い場合、画像の各領域において位相や周波数が変化するためにリングングの性質は満たさないことを表す。

図 5 に示す信号においても、誤成分が含まれる場合は 1 に近い値が、誤成分が含まれない場合は 0 に近い値が検出器の出力となることがわかる。この出力値から与えられた周波数に対応する正弦波が誤成分の性質 (b) を満たす状態で画像に含まれているかを調べられる。

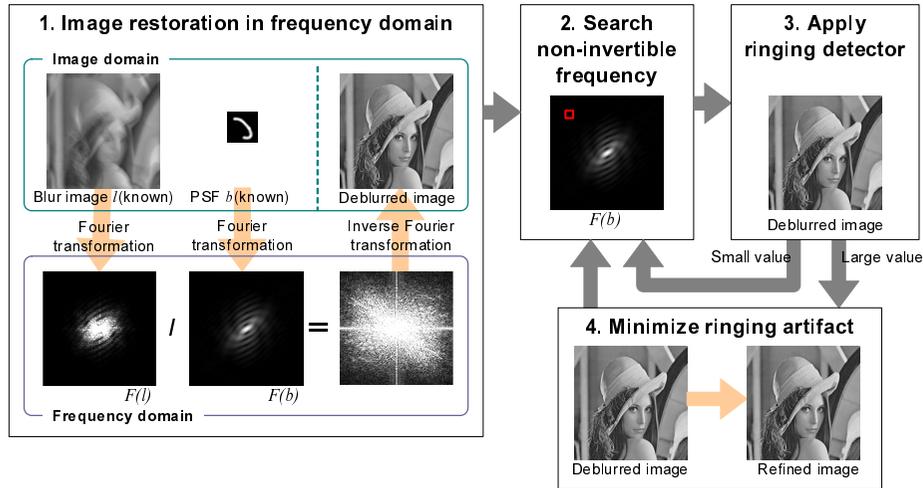


図 6 リンギング検出器を用いたぶれ画像復元の流れ

4.4 リンギング検出器によるぶれ画像復元

リンギング検出器は PSF の不可逆周波数に対して使用するものであるため、不可逆周波数を知るために PSF が既知である問題に対してのみ本手法を適用することができる。実際にリンギング検出器を用いたぶれ画像復元の流れを図 6 に示す。

各段階における計算内容を説明する。

1. 式 (3) に従いぶれ画像の復元を行う。
2. PSF の周波数特性において非常に小さい強度となる成分を探索する。
3. 復元画像と不可逆周波数を入力とするリンギング検出器を適用する。検出器の出力から誤成分と判断される場合は誤成分の除去操作を行い、判断されない場合は 2 に戻る。
4. 誤成分の位相 c_i 、振幅 k_i を推定し復元画像から誤成分を除去する。
 - 4-1. 誤成分 $e_i(x, y)$ の位相 c_i に式 (8) が最大となるときの c を採用する。
 - 4-2. 誤成分の振幅 k_i を変化させながら生成した仮の原画像と誤成分の周波数をリンギング検出器への入力とし、出力が最小となる k_i を求める。
 - 4-3. 推定した誤成分の位相 c_i と振幅 k_i を用いて、復元画像を誤成分を取り除いた画像に更新し、不可逆周波数の探索に戻る。

2~4 の操作は PSF の不可逆周波数の探索が終わるまで繰り返し行う。

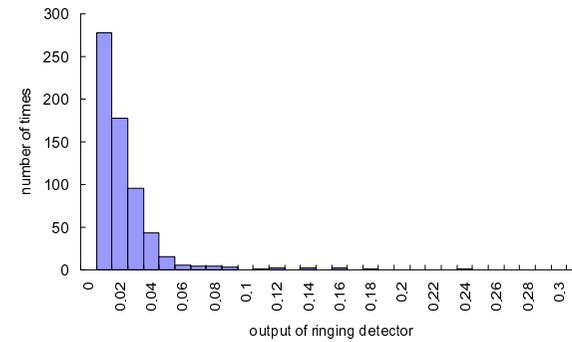


図 7 リンギング検出器の出力のヒストグラム ($a=0.125, b=0.125$)

5. 実験結果と適用範囲

5.1 自然画像に含まれるテクスチャの特徴解析

まず、自然画像のテクスチャに対しては、リンギング検出器が小さな値しか出力しないことの確認を行う。方法としては、リンギング検出器の入力に多様な自然画像と周波数を与え、その出力値から判断する。適用する周波数には式 (10) の x 軸と y 軸方向の周波数 a_i, b_i をそれぞれ $0, 0.1, 0.125, 0.2, 0.25$ としたときの全ての組み合わせを設定した。ただし、 x 軸方向、 y 軸方向ともに周波数が 0 となるパターンは単なる平面であるため、適用する周波数からは外している。なお、ここで言う周波数とは波の 1 周期にあたる画素数の逆数を表す。解析対象のデータセットには frickr(<http://www.flickr.com/>) から適当なキーワードで検索を行いダウンロードした 600 枚の画像を用いた。画像検索を行う際のキーワードには scene, flower, animal, building, human などを指定し、多様性のあるデータセットとした。

図 7 に示す例は x 軸と y 軸方向の周波数を共に 0.125 とする周波数パターンとデータセットの各画像を入力したリンギング検出器から得られた出力のヒストグラムである。図 7 からほとんどの画像において 0.1 以下の小さな値の出力が得られていることがわかる。よって、この周波数においては自然画像でのテクスチャの性質が満たされていることが確認できる。

解析を行なった周波数パターンとデータセットから得られたリンギング検出器の出力の最大値を表 1 にまとめる。表 1 より、最大値として小さい値が得られているため、データセット全体としても自然画像のテクスチャを表す低い出力値が得られることがわかる。

表 1 データセットから得られたリングング検出器の最大出力値

		x-axis frequency a				
		0	0.1	0.125	0.2	0.25
y-axis frequency b	0	-	0.16	0.19	0.21	0.26
	0.1	0.23	0.07	0.09	0.09	0.10
	0.125	0.34	0.10	0.23	0.11	0.22
	0.2	0.23	0.07	0.09	0.06	0.10
	0.25	0.29	0.10	0.23	0.10	0.07



(a) building (b) desk (c) road

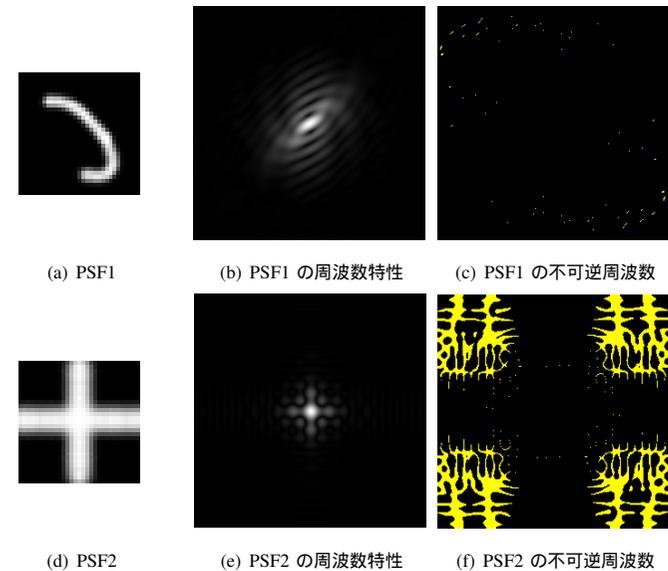
図 8 復元実験に用いる画像データ

5.2 合成画像によるぶれ画像復元検証

本実験ではリングング検出器を用いた復元の有効性を確認する。復元対象の画像は誤差を含まない PSF による復元を行うために、既知の PSF と原画像を用いて式 (1) に従い合成した画像を用いる。図 8 に使用した原画像、図 9 に使用した PSF とその周波数特性を示す。図 9(c) と図 9(f) は各 PSF の不可逆周波数にあたる周波数を黄色で可視化したものである。各復元画像の評価指標には原画像との PSNR を用いる。フーリエ変換に基づく復元とリングング検出器を適用した復元、比較対象として既存の復元手法である RL 法¹⁰⁾ とウィナーフィルタ¹¹⁾ により復元した画像を用いて提案手法の有効性を評価する。

表 2、表 3 に各復元結果と原画像の PSNR を示す。PSF1、PSF2 とともに、全ての復元においてリングング検出器を適用した場合の PSNR がもっとも高い値となっている。従来法と比較しても、復元精度が大幅に向上していることがわかる。

図 10 は building に対して PSF1 を用いた場合、図 11 は PSF2 を用いた場合の復元結果の拡大図である。PSF1 でのフーリエ変換による復元では斜めの波模様が含まれているが、リングング検出器を適用した後の復元画像では波模様が除去されている。PSF2 でのフーリエ



(a) PSF1 (b) PSF1 の周波数特性 (c) PSF1 の不可逆周波数
(d) PSF2 (e) PSF2 の周波数特性 (f) PSF2 の不可逆周波数

図 9 復元実験に用いる PSF データ

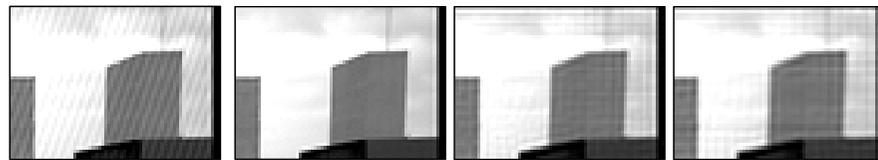
表 2 PSF1 を用いた場合の復元結果に対する PSNR[dB]

	フーリエ変換に基づく復元	検出器適用後	RL 法	ウィナーフィルタ
building	35.43	51.21	35.25	32.85
desk	45.78	53.51	35.10	35.61
road	40.65	53.02	29.93	29.01

表 3 PSF2 を用いた場合の復元結果に対する PSNR[dB]

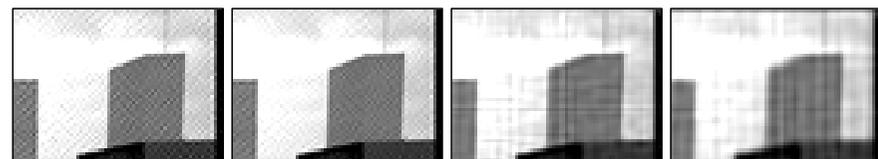
	フーリエ変換に基づく復元	検出器適用後	RL 法	ウィナーフィルタ
building	32.23	35.45	33.24	30.09
desk	30.42	35.92	33.26	31.07
road	31.69	34.92	27.77	25.79

変換による復元では細かい複雑な模様が発生しているが、リングング検出器適用後ではその模様が軽減されていることがわかる。また、RL 法やウィナーフィルタを用いた復元と比較



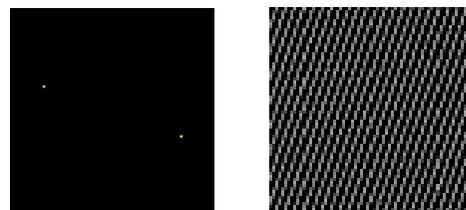
(a) フーリエ変換に基づく復元 (b) 検出器適用後 (c) RL 法 (d) ウィナーフィルタ

図 10 PSF1 の場合の復元結果の拡大図



(a) フーリエ変換に基づく復元 (b) 検出器適用後 (c) RL 法 (d) ウィナーフィルタ

図 11 PSF2 の場合の復元結果の拡大図



(a) 検出器から高い出力が得られた周波数成分 (b) 対応する誤成分

図 12 PSF1 の場合の誤成分

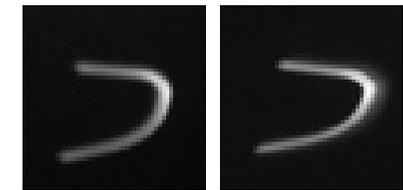
しても PSF1, PSF2 の場合共に原画像に近い画像に復元されていることが確認できる。

図 12 は PSF1 の不可逆周波数からリングング検出器により誤成分と判断された部分とそれに対応する正弦波 (誤成分) である。この誤成分は図 10(a) に見られる波模様と一致しており、誤成分となる周波数パターンを検出できていることがわかる。

以上から、PSF に誤差が含まれない場合に提案手法が有効であることが確認できる。



図 13 撮影画像



(a) 左の点光源の軌跡 (b) 右の点光源の軌跡

図 14 光源の軌跡

5.3 実画像によるぶれ画像復元検証

実際に撮影したぶれ画像の復元を行ない、検出器を用いた復元手法の有効性を確かめた。リングング検出器を適用するには正確な PSF を知る必要があるが、撮影したぶれ画像の PSF を同時に推定するのは難しい問題である。そのため、被写体の両隣に点光源を置き、その軌跡を用いて PSF 推定を行った。また、撮影時にはカメラを三脚上でパンチルトさせることで、光軸周りの回転を含まないようなぶれが起こるようにした。なお、レンズ自体が持つ手ぶれ補正機能は用いず、シャッタースピードは 0.2 秒とした。図 13 に示すのは撮影したぶれ画像、図 14 に示すのはぶれ画像から得られた点光源の軌跡である。復元の際に用いる PSF は、撮影された点光源の軌跡を基にして、複数の候補を作成し、フーリエ変換に基づいたぶれ画像復元を行った結果、視覚的に良い状態に復元できたものを採用した。

実際の撮影画像に対し、リングング検出器を用いたぶれ画像復元を行なった結果の一部を拡大したものを図 15 に示す。フーリエ変換による復元に対し、リングング除去を行なった画像ではリングングが除去され、改善されていることがわかる。これはフーリエ変換による復元では鮮明ではない右側の本の模様が、リングング除去後の画像でははっきりと確認できることからわかる。しかし、リングングを完全に取り除くことはできていない。これは、そもそも正確な PSF が得られていないことが原因として考えられる。リングング検出器を用いた画像復元はリングングの原因となる周波数成分に対して操作を行なうものであるため、リングングの原因ではない周波数成分は扱わない。つまり、不可逆周波数ではない周波数成分が正しい値に復元されない場合に対処することができない。PSF の推定はそれだけで難しい問題であり、少し値を変化させただけで復元結果に大きな影響を及ぼしてしまう。本実験では PSF の誤差の影響で完全にはぶれを復元できなかったが、復元画像のリンギン



(a) ぶれ画像 (b) フーリエ変換による復元 (c) リンギング除去

図 15 ぶれ画像と復元結果

グを軽減することには成功しているため、リングング検出器を用いることは有効な手法であることが確かめられた。

5.4 適用範囲

リングング検出器は PSF が持つ不可逆周波数に対して適用するものであるため、PSF が未知の場合のぶれ画像復元では不可逆周波数を特定できず、検出器を使用することはできない。また、5.1 節において自然画像は位相の変化のない特定の周波数のテクスチャを含むことはないことを示したが、例外も存在する。画像が持つ位相の変化のないテクスチャの周波数と PSF の不可逆周波数が偶然に一致してしまったときにリングング検出器を用いたリングング除去を行なうと、原画像が持つテクスチャも取り除いてしまう恐れがある。

5.2 節で行なった合成画像に対する復元と 5.3 節の実画像に対する復元の実験から、PSF が既知である場合にも、その PSF に誤差が含まれる場合は完全な復元ができないことが明らかとなった。また、リングング除去を行う際、PSF が多くの不可逆周波数を持つ場合、非常に長い計算時間を要することも明らかとなった。5.2 節の PSF2 を用いた復元の際は、提案手法を MATLAB 上で実装していることもあり、結果を得るまでに半日～1 日の時間を必要とした。検出器としての性能は有効であるが、実用化のためには高速化が必要である。

6. おわりに

本研究では自然画像が持つテクスチャとリングングを区別するためのリングング検出器を提案した。この検出器はリングングの原因となる周波数である PSF の不可逆周波数に着目し、対応する正弦波がリングングを構成する誤成分として画像に現れているかを評価するも

のである。検出器を用いたぶれ画像復元により、リングングが軽減された復元画像が得られることを合成画像と実画像を用いた復元実験を行なうことにより確認した。しかし、PSF が持つ不可逆周波数の数が多い場合、リングング除去が完了するまでに非常に長い計算時間が必要となった。また、PSF が正しいものでないと、リングングやノイズを軽減できても正しい復元画像が得られないこともわかり、PSF 推定の重要性とその難しさが明らかとなった。

今回扱ったぶれ画像復元の問題は、ぶれが画像全体に対して一様である場合のみを対象としている。しかし、現実の撮影画像に発生するぶれは画像全体に対して一様ではなく、被写体ぶれが発生していたり、画像の各部で異なるぶれとなる場合も存在する。今後は、そのようなぶれ画像復元問題においても検出器を適用できるように検討したい。また、フーリエ変換に基づいたぶれ画像復元のみではなく、他の復元手法と検出器を組み合わせることによる復元手法も考えていきたい。

参考文献

- 1) Q.Shan, J.Jia, and A.Agarwala, “High-quality motion deblurring from a single image”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 27, No. 3, Article 73, 2008.
- 2) L.Yuan, J.Sun, L.Quan, and H.-Y.Shum, “Progressive Inter-scale and Intra-scale Non-blind Image Deconvolution”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 27, No. 3, Article 74, 2008.
- 3) 神田崇史, 田中正行, 奥富正敏, “リングングを考慮した漸進的ブラー画像復元”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J92-D, No. 8, pp1208-1220, 2008.
- 4) L.Yuan, J.Sun, L.Quan, and H.-Y.Shum, “Image Deblurring with Blurred/Noisy Image Pairs”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 26, No. 3, Article 1, 2007.
- 5) C.Ancuti, C.O.Ancuti, and P.Bekaert, “Deblurring by Matching”, EUROGRAPHICS, Vol. 28, No. 2, 2009.
- 6) A.Agrawal, Y.Xu, and R.Raskar, “Invertible Motion Blur In Video”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 28, Issue 3, 2009
- 7) M.Ben-Ezra, and S.K.Nayar, “Motion Deblurring using Hybrid Imaging”, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1-8, 2003.
- 8) M.Ben-Ezra, and S.K.Nayar, “Motion-Based Motion Deblurring”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 26, No. 6, 2004.
- 9) R.Raskar, A.Agrawal, and J.Tumblin, “Coded Exposure Photography: Motion Deblurring using Fluttered Shutter”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 25, Issue 3, 2006
- 10) W.H.Richardson, “Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration”, Journal of Optical Society of America, Vol. 62, No. 1, 1972
- 11) N.Wiener, “Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series”, MIT Press, 1964