ぶれ画像復元のためのリンギング検出器

井下 智加† 向川 康博† 八木 康史†

† 大阪大学 産業科学研究所 〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1 E-mail: †{inoshita,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし 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ギングと呼ばれる 波模様のアーティファクトである.本研究では,このリンギングと自然画像が持つテクスチャを区別するためのリン ギ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,リンギ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,リンギ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ギング 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ギ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ギング検出器の有効性を示した.

キーワード ぶれ画像復元,リンギング除去,PSFの周波数解析

Ringing Detector for Image Restoration Chika INOSHITA[†], Yasuhiro MUKAIGAWA[†], and Yasushi YAGI[†]

† Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University 8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, JAPAN
E-mail: †{inoshita,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract 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 distinguish 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 debluring 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.

Key words deblurring, reduction of ringing artifacts, frequency analysis of PSF

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 となり,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,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 リンギ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,リンギ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]は平坦部分のリンギ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ギングの発生を抑え,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,リンギングの経験的性質を利 用したものがほとんどであり,なぜリンギングが生じる 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ギ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,リンギ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ギ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ギングの性質を持つ 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 とリンギ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,リンギングを 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として,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ギングを抑えている. 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ギング検出器を用いたぶれ画像復元 では,リンギ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

リンギングは,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].この手法ではリンギングの 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 するリンギ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.

ぶれ画像復元の原理

撮像面に対してシーンの動きが一様である場合,撮像 面で得られるぶれ画像は,次式のようにぶれのない原画 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.

$$l = f * b \tag{1}$$

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 リエ変換し周波数空間上で表すと畳み込みは積の形で表 される.

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

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.

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

デ⁻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.

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



図1 フーリエ変換に基づくぶれ画像復元の流れ







図3 1次元信号でのぶれ信号復元

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 されていることがわかる.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 こととなる.これがリンギングの正体である.



図4 自然画像における波のテクスチャとリンギング

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 元画像は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.

$$r(x, y) = f(x, y) + \sum_{i} e_i(x, y)$$
 (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.

$$e_i(x, y) = k_i \cos(2\pi(a_i x + b_i y) + c_i)$$
(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る.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 グを表すテクスチャ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るものであり,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が持つ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ギング検出器である.

リンギ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(式(6)).

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

$$w(x,y) = \frac{1}{2\pi d^2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2d^2}} \cos(2\pi (ax + by))$$
(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ギ 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周波数 パターンとなって現れる.また,その周波数は与えられ た周波数と一致する.

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. 変換結果のそれぞれ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一致する.また,その周 波数と位相は誤成分と同じであることもわかる.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.



(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

以上から,問題(2)についてはガボール変換結果と誤 成分を用いることで評価できることがわかる.具体的に は周波数や位相の変化の状態を数値で表すためにガボー 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.

$$C_{i}(c) = \frac{\sum_{x,y} (g_{i}(x,y) - \overline{g_{i}(x,y)})(e_{i}(x,y,c) - \overline{e_{i}(x,y,c)})}{\sqrt{\sum_{x,y} (g_{i}(x,y) - \overline{g_{i}(x,y)})^{2}} \sqrt{\sum_{x,y} (e_{i}(x,y,c) - \overline{e_{i}(x,y,c)})^{2}}}$$
(8)

ここで,

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

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

$$e_i(x, y, c) = \cos(a_i x + b_i y + c) \tag{11}$$

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

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

とする.Nは画像の総画素数である.

リンギング検出器は 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.リンギ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表す.検出器の出力が0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 するためにリンギングの性質は満たさない成分であるこ 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 ガボール変換結果と誤成分がほぼ重なるために1 に近い 値が, 誤成分が含まれない場合はガボール変換結果と誤 成分が重ならないために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ることができる.



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,判断されない場合は2に 戻り他の不可逆周波数の探索を行う.

4. 次に示す処理により, 誤成分の未知パラメータで ある位相 *c_i* 及び振幅 *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.

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 まず予備実験として,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.多様な自然画像と周波数をリンギング検出 器の入力とし,その出力値から判断する.

適用する周波数としては式(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 ての組み合わせで作られるパターンを設定した.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frickf^(注1)か ら適当なキーワードで検索を行ってダウンロードした 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 natural, 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と する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におけるテクスチャの性質 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.

5.2 合成画像によるぶれ画像復元検証

本実験ではリンギング検出器を用いた復元の有効性を

⁽注1): http://www.flickr.com/



- 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)
- 表1 データセットから得られたリンギング検出器の最大出 力値

	x-axis frequency a					
		0	0.1	0.125	0.2	0.25
	0	-	0.16	0.19	0.21	0.26
y-axis frequency b	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

(c) road

図8 復元実験に用いる画像データ

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	検出器		ウィナー
	基づく復元	適用後	RL 法	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

確認するためのぶれ画像復元を行う.復元対象とする画 像は既知の PSF と原画像を用いて式 (1) に従い合成した 画像である.これは,誤差を含まない PSF による復元を 行うためである.図8に示すのは使用した原画像,図9 に示すのは使用した PSF とその周波数特性である.ま た,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 づく復元とリンギング検出器を適用した復元,また比較 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,





(a) PSF1 (b) PSF1 の周波数特性





(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 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	検出器		ウィナー
	基づく復元	適用後	RL 法	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





図 10 PSF1 の場合の復元結果の拡大図

PSF2 ともに,全ての原画像において提案手法であるリ ンギ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 ていることがわかる、リンギング検出器を適用した後の 復元画像ではフーリエ変換による復元では含まれていた 波模様が除去されている.PSF2 でのフーリエ変換によ



(a) 検出器から高い出力が得ら (b) 対応する誤成分 れた周波数成分

図 12 PSF1 の場合の誤成分

る復元では細かい複雑な模様が発生しているが,リンギ 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ギング検出器 を用いて誤成分であると判断された部分を示したものと それに対応する正弦波(誤成分)である.なお,誤成分は 図 10 のサイズに合わせて拡大している.この誤成分は 図 10(a)に見られる波模様と一致しており,リンギング 検出器によ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リンギング 検出器を用いた復元手法が有効であることが確認できる.

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.リンギング検出器を 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



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

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 に撮影したぶれ画像,図 14 にぶれ画像から得られた点光源の軌跡をそれぞれ示す.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,リンギング検出器を用いたぶ れ画像復元を行なった結果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,リンギング除去を 行なった画像ではリンギングが軽減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、リンギ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,リンギングを 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.リンギング検出器を用いた画像復元はリンギングの 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,リンギ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はできない. 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グを軽減することには成功し





(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

ているため,リンギ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る.

5.4 適用範囲

リンギング検出器は PSF が持つ不可逆周波数に対して 適用するものである.そのため, 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ないため検出器 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パターンを含むこ とはないことを示したが,これは一般的な話であり,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 たときにリンギング検出器を用いたリンギング除去を行 なうと,原画像が持つテクスチャも取り除く恐れがある.

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,リンギング除去を 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ギングを 区別するためのリンギング検出器を提案した.この検出 器はリンギ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ギングを構成す 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,リンギングが 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,リンギング除 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,リンギングやノイズ 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.

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 Interscale 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,"リンギ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