

リングングの発生を抑えたブラー画像復元

神田 崇史[†] 田中 正行[†] 奥富 正敏[†]

[†] 東京工業大学大学院 理工学研究科

E-mail: †{tkanda,mtanaka}@ok.ctrl.titech.ac.jp, ††mxo@ctrl.titech.ac.jp

概要 写真を撮影する際、カメラが動くとき画像にブレが生じる。これはブラーと呼ばれる劣化で、原画像とPSF(点拡がり関数)の畳み込みでモデル化される現象である。PSFを既知として、原画像を復元する手法は数多く提案されている。しかし、多くの手法では、復元画像にリングングなどのアーティファクトが大きく発生してしまう。そこで本論文では、残差画像を利用したブラー画像の漸進的復元手法を提案する。提案手法は、復元すべき画像を参照画像と残差画像に分けて考え、入力画像を直接復元するのではなく、残差画像を復元することに特徴がある。この残差画像と参照画像を繰り返し更新しながら漸進的に復元を行うことにより、リングングを抑えた復元が期待できる。合成画像および実画像を用いた実験により、提案手法の有効性を示す。

Blur Image Restoration with Reducing Ringing

Takafumi KANDA[†], Masayuki TANAKA[†], and Masatoshi OKUTOMI^{††}

[†] Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

E-mail: †{tkanda,mtanaka}@ok.ctrl.titech.ac.jp, ††mxo@ctrl.titech.ac.jp

Abstract Camera shake during exposure blurs images. The blurring process can be modeled as an image convolution by point spread function (PSF) which describes the motion path. A deblurring from a single blurred image is challenging problem, even if the PSF is known. The deblurred images usually include unexpected ringing artifacts. In this paper, we proposed a progressive image deconvolution method using a residual image. In the proposed method, the input blurred image is decomposed into the reference image and the residual image. Then, the blurred residual image is deblurred instead of the input blurred image. The reference image is updated based on the deblurred residual image. We demonstrate the effectiveness of the proposed method using synthetic images and real images.

1. はじめに

カメラで撮影する際、露光の間にカメラが動くとき全体的にぶれた写真が撮影される。これはブラーと呼ばれる現象で、写真が劣化する原因の一つになっている。ブラーは原画像とPSF(Point Spread Function; 点拡がり関数)の畳み込み積分でモデル化される。ブラー画像から原画像を復元する場合、PSFの推定と推定されたPSFを利用した画像復元をする必要がある [1]。

PSF推定はそれ単独で困難な問題である。そのため、多くの手法では、直線的なぶれを仮定してPSF推定を行っている [2, 3]。しかし、現実には発生するブラーのPSFはこれらの仮定では表現できない複雑な形をしていることが多く [4]、十分な推定結果を得られない場合がある。近年、複雑な形状のPSFを推定する手法も提案されており、小さ

いPSFであれば良好な推定結果が得られることが報告されている [4, 5]。

PSFが既知であるとしても、画像の復元は依然として困難な問題である。ブラー画像は高周波成分や特定の周波数成分が欠如しており、復元画像にリングングなどのアーティファクトが発生してしまうことが多い。また同時に、劣化した周波数成分を復元する過程で、ノイズの成分が増大されてしまう。画像復元手法としてはRichardson-Lucy (RL)法 [6, 7] やウィナーフィルタ [8] がよく知られている。しかし、これらの手法を利用して先鋭な結果が得られるように復元パラメータを調節して画像復元を行うと、復元結果に大きなノイズやリングングが含まれてしまう。

また、複数の画像を利用して、画像復元を行う方法も提案されている [9, 10]。Luらは、ノイズが大きく含まれるがぶれの小さい画像と、ノイズは小さいもののぶれの大き

い画像を組み合わせて利用することにより、リングングを抑えた復元画像を得られる手法を提案している [11]。また、ぶれ復元の問題に限らずとも複数の画像を利用した画質改善手法は提案されており、例えばフラッシュ有りと無しの画像ペアを用いてノイズを抑える手法 [12] などが挙げられる。画像ペアを用いる手法では、一枚の画像のみを利用した復元よりも結果の向上が期待される。しかし、異なる性質の画像間で位置合わせを行わなければならない、さらに、そもそも、一つの撮影対象に対して複数の画像を撮影する必要はある。

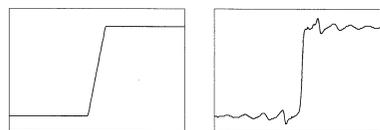
そこで本論文では、このような画像ペアの考え方を取り入れつつ、一枚のブラー画像のみから復元を行うことができる手法を提案する。Lu らは、ノイズが大きく含まれるがぶれの小さい画像をデノイジングし、この画像を復元画像のヒントとなる参照画像として利用している [11]。一方、一枚のブラー画像のみから復元を行う場合には、観測されたブラー画像以外に参照画像のようなものは存在しない。そこで、提案手法では、参照画像を観測のブラー画像から生成する。生成された参照画像に基づき、原画像と参照画像との残差画像に対する画像復元問題が定式化される。提案手法では、この残差画像を復元することにより画像復元を行う。さらに、復元された残差画像を利用して参照画像を漸進的に更新し、繰り返し画像復元を行う。このように参照画像を漸進的に更新することにより、ブラー画像一枚のみで、複数の画像を利用した Lu らの手法と同様に復元画像のリングングを抑える効果が期待できる。

提案手法では、残差画像に対する画像復元問題においてウィナーフィルタに相当する手法で画像復元を行うが、この際の拘束パラメータを参照画像に基づき空間的に変化させる手法も提案する。この手法は、リングングの特徴に基づいてパラメータ分布を適応的に変化させるものであり、エッジを保存しながらもリングングを抑えた復元が期待できる。

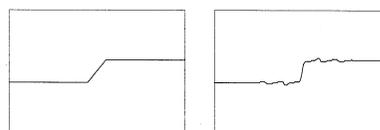
なお、本論文では、ぶれは画像において均一であると仮定し、PSF は既知または米司ら [3] の手法により推定したものを採用することにする。以下に、本論文の以降の構成を示す。まず、第 2 章で残差画像を利用した画像復元について説明し、定式化を行う。次に、第 3 章で繰り返しを用いたブラー画像の漸進的復元手法を提案する。また、第 4 章で拘束パラメータを空間的に変化させる方法を提案する。その後、第 5 章で提案手法を用いた復元の実験結果を示す。

2. 残差画像を利用した画像復元

本章では、残差画像を利用した画像復元について、その概念を説明する。PSF は既知または既に推定されているとして画像復元の問題を考える。特にブラー画像からの画像復元では、復元画像に発生してしまうリングングと呼ばれ



(a) ブラー画像 (b) 復元画像
図 1 1次元画像におけるリングングの例



(a) ブラー画像 (b) 復元画像
図 2 振幅の小さい画像におけるリングング

るアーティファクトが問題となる。

図 1 に、一次元画像におけるブラー画像と復元画像に発生するリングングの例を示す。復元画像のエッジ周辺にリングングと呼ばれる波状のアーティファクトが発生している。リングングは、エッジなどの不連続点で顕著に表れるアーティファクトであり、一種のギブス現象であると考えられている。このリングングの大きさは、エッジなどの不連続点のギャップの大きさに比例するという特徴がある。このため、図 2 のように復元すべき画像の不連続点でのギャップが小さければ、リングングの影響もまた小さくなる。つまり、復元すべき画像の振幅を小さくすることができれば、リングングを小さくすることができる。Lu らは、復元すべき画像の振幅を小さくするために、ノイズは多く含むもののぶれていない画像をデノイジングし、その画像を参照画像として利用している [11]。Lu らは、原画像と参照画像との差分を残差画像として定義し、残差画像に対して画像復元を行っている。残差画像はももとの原画像に比べて振幅が小さいため、結果としてリングングの影響も小さくなることが期待される。

2.1 残差画像を利用した復元問題の定式化

残差画像を利用した復元問題の定式化を行う。 \mathbf{u} を画像上の座標を表すベクトルとして、原画像を $F(\mathbf{u})$ 、ブラー画像を $G(\mathbf{u})$ とする。このとき、ぶれによる劣化は次式で表すことができる。

$$G(\mathbf{u}) = B(\mathbf{u}) \otimes F(\mathbf{u}) + N(\mathbf{u}) \quad (1)$$

$B(\mathbf{u})$ は PSF を、 $N(\mathbf{u})$ はノイズを、 \otimes は畳み込み積分をそれぞれ表す。ここで何らかの参照画像 $R(\mathbf{u})$ が得られているとすると、原画像 $F(\mathbf{u})$ は、参照画像 $R(\mathbf{u})$ と残差画像 $X(\mathbf{u})$ の和として次のように表される。

$$F(\mathbf{u}) = R(\mathbf{u}) + X(\mathbf{u}) \quad (2)$$

式 (2) を利用し、式 (1) の原画像を復元する問題を、残差画像を復元する問題として次のように書き直すことができる。

$$Y(\mathbf{u}) = B(\mathbf{u}) \otimes X(\mathbf{u}) + N(\mathbf{u}) \quad (3)$$

ここで、 Y を残差ブラー画像を呼ぶこととし、次のように定義する。

$$Y(\mathbf{u}) = G(\mathbf{u}) - B(\mathbf{u}) \otimes R(\mathbf{u}) \quad (4)$$

参照画像 $R(\mathbf{u})$ が既知であるとしているので、式 (3) に基づき残差画像を復元することにより、原画像を復元することができる。つまり、式 (1) の原画像に対する復元問題を、参照画像を介して、式 (3) の残差画像を復元する問題に再定義することになる。

残差画像に対する復元では、残差画像の振幅が原画像の振幅よりも小さいため、発生するリングングも小さくなることが期待される。また、式 (1) と式 (3) を比較すると、原画像と残差画像の違いはあるものの形式的には全く同じである。つまり、残差画像の復元に対しても、従来から研究されている通常の画像復元手法をそのまま適用することができる。

3. 参照画像の生成と更新

本章では、一枚のブラー画像のみを利用して、残差画像を利用した画像復元を行う方法を提案する。

まず、参照画像に望まれる性質を考えた場合、リングングやノイズが含まれていないことが望ましい。また、参照画像は原画像のおおよその形状を表していることが望まれる。参照画像と原画像は近いほうが望ましいが、一致する必要はなく、大まかな構造やエッジが似通っていればよい。我々は、このような性質の参照画像の生成を考える上で復元画像に注目する。復元画像は、多少のノイズやリングングを含んでいるが先鋭なエッジを保持しており、観測のブラー画像よりも原画像に近い画像だと考えられる。そこで、復元画像に基づき参照画像を更新し、新たな参照画像で再び復元を行う、という繰り返し手法を提案する。

初期の参照画像については後で議論することにし、まず、 n 回目の繰り返し参照画像 $R_n(\mathbf{u})$ を $n+1$ 回目の参照画像 $R_{n+1}(\mathbf{u})$ に更新することを考える。参照画像の更新は復元画像に基づいて行うが、復元画像をそのまま $n+1$ 回目の参照画像とすることは望ましくない。残差画像を利用した画像復元において、復元画像は参照画像 $R_n(\mathbf{u})$ と復元された残差画像 $\hat{X}_n(\mathbf{u})$ の和である。復元残差画像は、振幅が比較的小さいとはいえリングングやノイズの影響を含んでいる。そのため復元画像には、復元残差画像に由来するノイズやリングングが含まれている。そこで我々は、復元残差画像に含まれるリングングやノイズの影響を除去

または低減してから参照画像に加え、新たな参照画像とすることを考える。リングングやノイズの影響を低減する方法は様々な手法が考えられるが、本論文では参照画像を利用したジョイントバイラテラルフィルタを利用する [12]。ジョイントバイラテラルフィルタは画像ペアの画質改善に効果的であると言われており、次式で定義される。

$$f(X(\mathbf{u}); R(\mathbf{u})) = \frac{1}{Z_{\mathbf{u}}} \sum_{\mathbf{u}' \in W(\mathbf{u})} G_d(\mathbf{u}-\mathbf{u}') G_r(R(\mathbf{u})-R(\mathbf{u}')) X(\mathbf{u}') \quad (5)$$

ここで、 $f(\cdot)$ はジョイントバイラテラルフィルタを表す関数であり、 G_d 、 G_r はそれぞれ分散が σ_d 、 σ_r のガウス関数である。また、 $W(\mathbf{u})$ は \mathbf{u} の近傍ウィンドウを表し、 $Z_{\mathbf{u}}$ は正規化項を表す。

通常のバイラテラルフィルタは残差画像の画素値の差に基づく重みを利用する。一方、ジョイントバイラテラルフィルタは参照画像の画素値の差 ($R(\mathbf{u}) - R(\mathbf{u}')$) に基づく重みを利用する。本手法では、参照画像は原画像のおおよその形状を表しており、リングングやノイズの影響が少ないと仮定した画像である。そのため、ジョイントバイラテラルフィルタを利用することにより、効果的に残差画像に含まれるリングングやノイズの影響を低減できると考えられる。ジョイントバイラテラルフィルタを利用すると、 $n+1$ 回目の参照画像 $R_{n+1}(\mathbf{u})$ は次式のように更新される。

$$R_{n+1}(\mathbf{u}) = R_n(\mathbf{u}) + f(\hat{X}_n(\mathbf{u}); R_n(\mathbf{u})) \quad (6)$$

ここで、 $\hat{X}_n(\mathbf{u})$ は n 回目に復元された残差画像である。この更新された参照画像を利用して、 $n+1$ 回目の残差画像が復元される。このように参照画像を漸進的に更新することにより、一枚のブラー画像のみを利用して画像復元が行われる。なお、 n 回目の繰り返しに対応する復元画像 $\hat{F}_n(\mathbf{u})$ は次のように表される。

$$\hat{F}_n(\mathbf{u}) = R_n(\mathbf{u}) + \hat{X}_n(\mathbf{u}) \quad (7)$$

次に初期参照画像の生成方法について述べる。提案手法では参照画像を漸進的に更新していくため、初期の参照画像はそこまで原画像に近いものである必要はない。リングングやノイズを含まず、原画像のおおよその形状が表されていればよい。そこで、観測のブラー画像にバイラテラルフィルタを適用し、その結果画像を初期参照画像とする。

図 3 に、提案手法の全体図を示す。提案手法では、まず入力画像 $G(\mathbf{u})$ にバイラテラルフィルタを適用し、初期参照画像とする。そして、以下の手順を繰り返して、参照画像を更新していく。なお、復元画像は繰り返しにおいて毎回求める必要はなく、適当な繰り返し回数にて求めればよい。

(1) 入力画像 $G(\mathbf{u})$ と参照画像 $R_n(\mathbf{u})$ から残差ブラー画像 $Y_n(\mathbf{u})$ を求める。

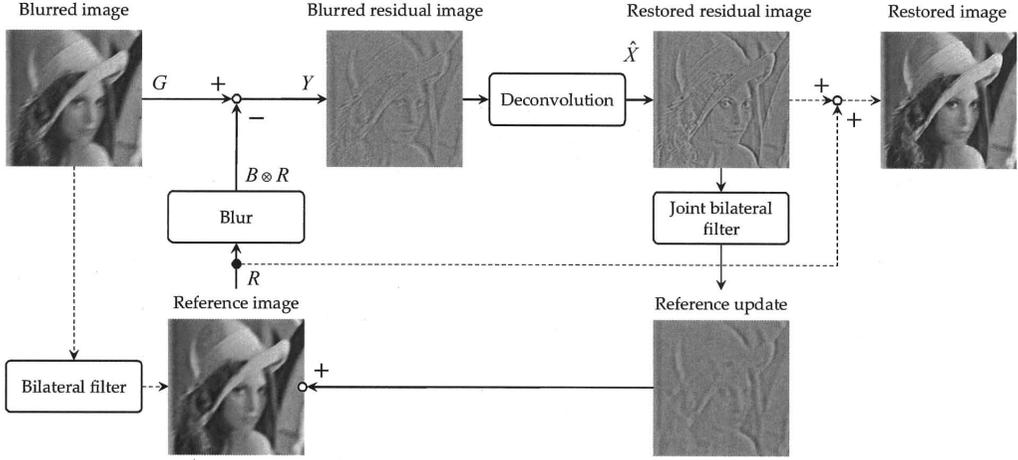


図 3 提案手法の全体図

(2) 残差ブラー画像 $Y_n(\mathbf{u})$ に対して画像復元を行い、残差画像 $\hat{X}_n(\mathbf{u})$ を復元する。

(3) 参照画像 $R_n(\mathbf{u})$ に復元残差画像 $\hat{X}_n(\mathbf{u})$ を足し、 n 回目の復元画像を求める。

(4) 復元残差画像 $\hat{X}_n(\mathbf{u})$ にジョイントバイラテラルフィルタを適用し、参照画像の更新成分を求める。

(5) 参照画像 $R_n(\mathbf{u})$ にこの更新成分を足し、 $n+1$ 回目の参照画像とする。

4. 適応的拘束パラメータによる画像復元

前章で提案した漸進的繰り返し手法は、残差画像に対する画像復元を繰り返し行う方法である。残差画像に対する画像復元は、通常のブラー画像の復元と同様に行うことができる。そこで我々は、ウィナーフィルタ [8] に相当する手法に基づき、残差画像の画像復元を行うことにする。

ブラー画像復元におけるウィナーフィルタは、ノイズのパワースペクトルと原画像のパワースペクトルの比を一定と仮定すると、次式の評価関数の最適化問題として表される。

$$E = \|X(\mathbf{u}) - B(\mathbf{u}) \otimes Y(\mathbf{u})\|_2^2 + \alpha \|X(\mathbf{u})\|_2^2 \quad (8)$$

ここで、 α は拘束の強さを決めるパラメータである。拘束パラメータを小さくすれば、復元効果が強くなり、先鋭な復元画像を得ることができる。しかし、拘束パラメータを小さくすると、復元画像に大きなリングングが含まれてしまう。

そこで、拘束パラメータを定数で固定するのではなく、適応的に変化させることを考える。リングングは、人間の視覚として、テクスチャの豊富な領域においては知覚され

にくい。テクスチャのない領域では顕著に知覚されるという特徴を持つ。ここでは、このリングングの特徴に基づいて、テクスチャの豊かさに応じてパラメータを変化させる。つまり、テクスチャの豊富などでは拘束パラメータを小さくして、エッジを先鋭に復元する。一方、テクスチャのないところでは拘束パラメータを大きくして、リングングを抑えて復元する。

拘束パラメータを適応的に変化させる場合、評価関数は次式のように表される。

$$E = \|X(\mathbf{u}) - B(\mathbf{u}) \otimes Y(\mathbf{u})\|_2^2 + \alpha(\mathbf{u}) \|X(\mathbf{u})\|_2^2 \quad (9)$$

$\alpha(\mathbf{u})$ が空間的に変化する拘束パラメータである。上述したような拘束パラメータの設計方法は様々考えられるが、本論文では次式のような拘束パラメータを用いる。

$$\alpha(\mathbf{u}) = \gamma \exp \left[-\frac{|\nabla R(\mathbf{u})|}{2\lambda^2} \right] \quad (10)$$

ここで、 $\nabla R(\mathbf{u})$ は参照画像の勾配を表す。また、 γ 、 λ は拘束パラメータ設計のためのパラメータである。式 (9) をベクトル表現し、解析的に復元画像を求めることも理論的には可能であるが、未知数が画素数と同じ大規模な問題となってしまう。本論文では、共益勾配法により復元画像を求めている。

5. 実験結果

本章では、シミュレーション実験と実画像実験により、提案するブラー画像復元手法の効果を示す。

5.1 シミュレーション実験

復元効果を定量的に確認するため、既知の原画像を利用してぶれ画像を作成し、復元する実験を行った。原画像

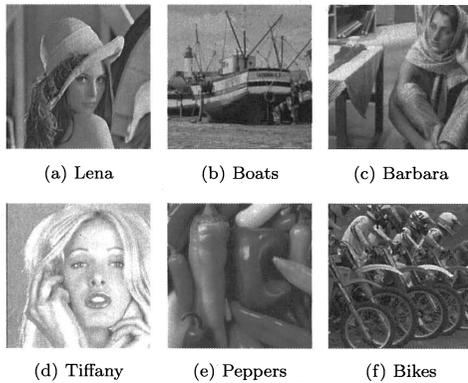


図 4 復元実験に用いた原画像

表 1 シミュレーション画像における復元効果 (RMSE) の比較

	提案手法 (適応的パラメータ)	提案手法 (定数パラメータ)	RL 法	ウィナー フィルタ
Lena	18.69	21.01	21.45	22.25
Boats	22.12	23.46	25.82	25.32
Barbara	26.46	27.60	28.13	28.32
Tiffany	14.55	15.60	16.63	17.99
Peppers	11.06	13.03	13.72	14.83
Bikes	36.34	36.81	37.33	38.44

には図 4 に示す画像を利用した。ぶれの PSF として角度 30[deg], 長さ 20[画素] の直線ぶれを, またノイズとして標準偏差 3 のガウシアンノイズを R, G, B 独立に加えた。

提案手法の漸進的な復元方法では, 拘束パラメータを定数にする場合と適応的に設計する場合の二つの方法を利用した。また, 比較のため, 既存手法である Richardson-Lucy (RL) 法とウィナーフィルタを適用した。なお, 復元結果の評価手法としては原画像との RMSE (Root Mean Square Error) を用い, パラメータや繰り返し回数を設定する必要がある手法では, 復元結果が最良となるように値を調整して設定した。

表 1 に, 復元結果と正解画像の RMSE を示す。行は画像の種類を表し, 列は復元手法を表す。提案手法と既存手法の RMSE を比較すると, すべての画像で提案手法が二つの既存手法よりも良い結果を示している。また, 二つの提案手法どうしを比較すると, 拘束パラメータを適応的に変える手法の方が定数を用いる手法よりも良い結果を示している。特に, Lena や Peppers など, テクスチャの少ない領域を広めに持つ画像において, 適応的パラメータによる RMSE の向上が大きい。

図 5 に, Lena の復元結果の拡大図を示す。エッジの周辺に発生しているリングングを比較すると, 提案手法を用いた結果画像は, 既存手法のものに比べてリングングを格段に抑えられていることが分かる。特に, 拘束パラメータ

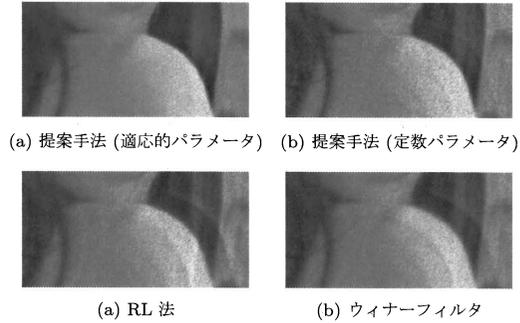


図 5 復元結果の拡大図 (Lena)

を適応的に用いた手法 (図 5(a)) では, ほぼ完全にリングングの発生を抑えている。

以上の結果から, 提案手法である漸進的復元手法を用いることにより, リングングを抑えつつ RMSE の良好な復元画像を得ることができると考えられる。また, 画像復元において拘束パラメータを適応的に設計することで, テクスチャの少ない領域を中心として復元結果の向上が確認できる。

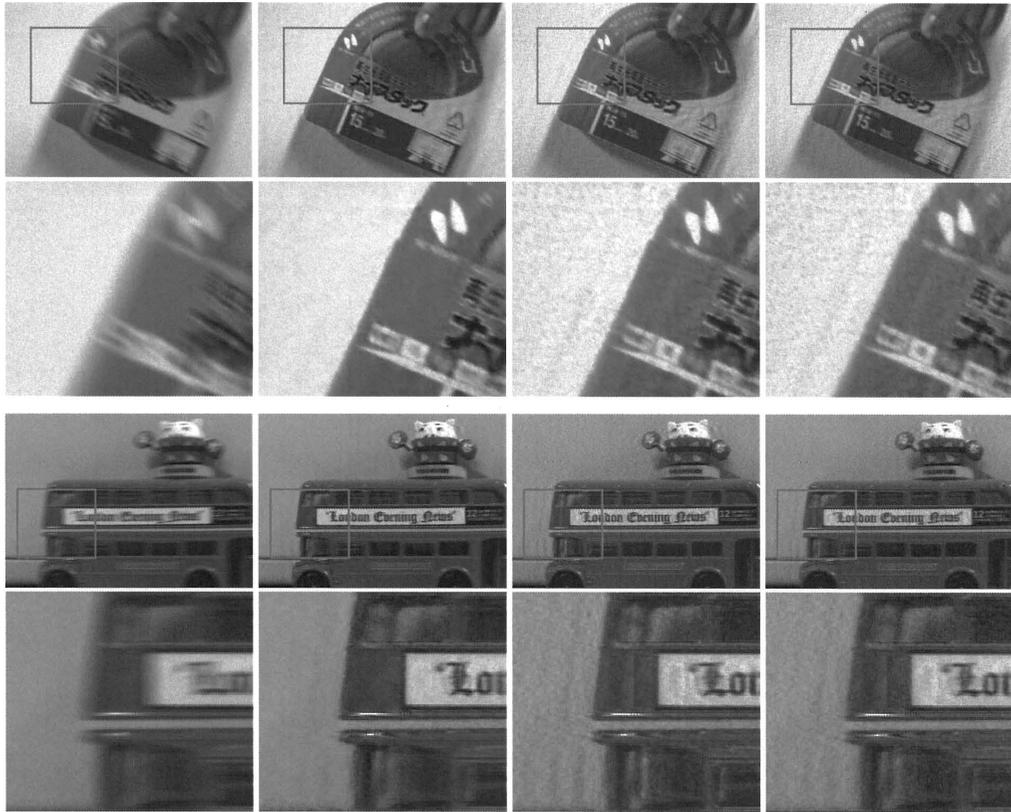
5.2 実画像実験

手持ちカメラにより撮影された実画像に対して提案手法を適用し, 手法の有効性を検証した。提案手法として, 拘束パラメータを適応的に設計する手法を用いた。PSF は, 米司ら [3] の手法により推定したものを用いた。

図 6 に, 2 種類の入力画像とその復元結果をそれぞれ示す。また比較のため, 四角で囲った領域の拡大図もあわせて示す。復元されたエッジの先鋭さは同程度ながら, 提案手法では, 既存手法の復元結果に発生しているリングングを抑えられていることがわかる。また, 既存手法では画像全体で増大されているノイズ成分も, 小さく抑えられている。いずれの画像においても, 特にテクスチャの少ない領域において, これらの効果が顕著に確認できる。リングングやノイズの抑制における提案手法の有効性を示していると考えられる。

6. まとめ

観測されたブラー画像一枚のみを利用した, 残差画像に基づく漸進的画像復元方法を提案した。残差画像を利用した画像復元は, 複数の観測画像を利用した処理に用いられ, リングング抑制効果があることが示された。本論文では, 参照画像を漸進的に更新することにより, ブラー画像一枚のみを利用して, 残差画像を用いた画像復元を可能にした。また, 残差画像の復元においては, 拘束パラメータを参照画像に基づき, 適応的に設計する方法も提案した。拘束パラメータを適応的に設計することにより, リングングの発



(a) 入力画像

(b) 提案手法

(c) RL 法

(d) ウィナーフィルタ

図 6 実画像の復元結果

生を抑制しつつ、エッジを保存した画像復元を行うことができる。

シミュレーション画像と実画像の復元実験を通して、提案手法の有効性を示した。特に、リングングの抑制について効果があることを確認した。

文 献

- [1] D. Kundur and D. Hatzinakos: "Blind image deconvolution", *Signal Processing Magazine, IEEE*, **13**, 3, pp. 43–64 (1996).
- [2] Y. Yitzhaky, I. Mor, A. Lantzman and N. S. Kopeika: "Direct method for restoration of motion-blurred images", *Journal of the Optical Society of America A*, **15**, pp. 1512–1519 (1998).
- [3] 米司, 田中, 奥富: "直線の手ぶれ画像復元のための psf パラメータ推定手法", *情報処理学会研究報告*, **2005**, 38, pp. 47–52 (2005).
- [4] R. Fergus, B. Singh, A. Hertzmann, S. T. Roweis and W. T. Freeman: "Removing camera shake from a single photograph", *ACM Trans. Graph.*, **25**, 3, pp. 787–794 (2006).
- [5] J. Jia: "Single image motion deblurring using transparency", *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007. CVPR '07. IEEE Conference on, pp. 1–8 (2007).
- [6] W. H. Richardson: "Bayesian-based iterative method of image restoration", *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, **62**, pp. 55–59 (1972).
- [7] L. B. Lucy: "An iterative technique for the rectification of observed distributions", *Astronomical Journal*, **79**, pp. 745–754 (1974).
- [8] N. Wiener: "Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series", The MIT Press (1964).
- [9] A. Rav-Acha and S. Peleg: "Two motion-blurred images are better than one", *Pattern Recogn. Lett.*, **26**, 3, pp. 311–317 (2005).
- [10] M. Ben-Ezra and S. K. Nayar: "Motion deblurring using hybrid imaging", *cvpr*, **01**, p. 657 (2003).
- [11] L. Yuan, J. Sun, L. Quan and H.-Y. Shum: "Image deblurring with blurred/noisy image pairs", *SIGGRAPH '07: ACM SIGGRAPH 2007 papers*, New York, NY, USA, ACM, p. 1 (2007).
- [12] G. Petschnigg, R. Szeliski, M. Agrawala, M. Cohen, H. Hoppe and K. Toyama: "Digital photography with flash and no-flash image pairs", *ACM Trans. Graph.*, **23**, 3, pp. 664–672 (2004).