

NAIST-IS-DT1061017

博士論文

撮像装置の電子式手ぶれ補正に関する研究

畑中 晴雄

2011年 2月 17日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士（工学）授与の要件として提出した博士論文である。

畑中 晴雄

審査委員：

千原 國宏 教授 (主指導教員)

横矢 直和 教授 (副指導教員)

加藤 博一 教授 (副指導教員)

眞鍋 佳嗣 教授 (千葉大学) (副指導教員)

撮像装置の電子式手ぶれ補正に関する研究*

畑中 晴雄

内容梗概

手ぶれによる画像劣化を低減する手ぶれ補正技術がデジタルカメラの重要な機能として注目されている。手ぶれ補正には大きく2つの方式がある。1つは光学式と呼ばれる方式である。光学式では、カメラの動きをジャイロセンサで検出しながら、その動きがキャンセルされるようにレンズまたは撮像素子を駆動することで手ぶれを低減する。もう1つは電子式と呼ばれる方式である。電子式では、撮影後に画像処理で手ぶれを低減する。両方式にはそれぞれ長所と短所があるが、特に電子式は、光学駆動系が不要なため、サイズ、コスト、消費電力の点で有利である。

現在デジタルカメラに実用化されている静止画向けの電子式手ぶれ補正は、画像復元式と画像重ね合わせ式の2種類である。画像復元式は、ジャイロセンサで撮影中の手ぶれを画像劣化関数として検出し、撮影画像に対して画像劣化関数の逆変換フィルタを適用することで撮影画像の手ぶれを補正する。しかしながら、ジャイロセンサによる手ぶれ検出精度が低い(画素単位の検出誤差が発生する)ため、補正画像にリングングノイズが発生するという問題がある。また研究段階の技術として、1枚の画像から手ぶれを推定する手法が提案されているが、手ぶれ推定精度が低い、処理時間が膨大、という問題があり、実用化には至っていない。画像重ね合わせ式では、通常よりも短い露光時間の画像を連写し、それらの画像を位置合わせし、加算合成することで手ぶれを短露光画像程度に低減する。しかしながら、通常露光画像に比べて、合成画像のノイズが $\sqrt{\text{連写枚数}}$ 倍に増大するという問題がある。

そこで今回、上記課題を解決する2つの新技術、「長短露光画像復元式」、「長短露

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 博士論文，
NAIST-IS-DT1061017, 2011年2月17日。

光画像合成式」を提案する。「長短露光画像復元式」は、通常露光画像と短露光画像を連写し、それらの画像から通常露光画像の手ぶれを高速・高精度に検出し、画像復元により手ぶれを補正する手法である。本方式により、従来の画像復元式手ぶれ補正に対して、リングングノイズの低減、および完全電子化(ジャイロセンサの不要化)を実現した。「長短露光画像合成式」は、通常露光画像と短露光画像を連写し、ぶれが気になるエッジ部はぶれの少ない短露光画像から画素値を取得し、ノイズが気になる平坦部はノイズの少ない通常露光画像から画素値を取得するというコンセプトに基づき、2枚の画像を加重加算合成する手法である。本方式により、従来の画像重ね合わせ式の課題である、手ぶれ補正効果とノイズ低減の両立を実現した。

さらに、上記2種類の提案方式を実装したデジタルカメラの試作機をそれぞれ製作し、性能評価実験を行った。その結果、「長短露光画像復元式」の補正段数は0.7～1.4段、「長短露光画像合成式」の補正段数は0.8～2.1段であり、従来手法と比較して、補正性能が大幅に向上することを実証した。

本研究開発により、高性能な電子式手ぶれ補正の応用研究が加速され、民生カメラの小型化・低価格化・低消費電力化に大きく貢献できると考える。

キーワード

手ぶれ, デジタルカメラ, 画像復元, PSF, リングング, 画像合成, ノイズ除去

A Study on Electronic Image Stabilization for Digital Imaging Devices *

Haruo Hatanaka

Abstract

The functionality to reduce blur from camera shake is highly anticipated as a prominent feature of digital cameras. There are two methods in image stabilization. One is the optical method where gyro sensors detect camera movement and either the lens or the image sensor is driven accordingly as to cancel such motion and reduce blur. The other is the electronic method that reduces blur after image capture by image processing. Either method has its drawback and advantage, but the electronic method, free of optics-driving mechanisms, is favorable in terms of size, cost and power consumption.

Presently, there are two electronic image stabilization techniques implemented on digital cameras—restoration and multi-capture. Restoration can remove blur from the image by creating blur kernel, PSF: Point Spread Function, associated with the camera motion from gyro sensors and applying the inverse filter of the PSF to the blurred image. However, as the PSF detected from gyro sensors is inaccurate, artifacts like ringing often occur in restored images. Another approach which estimates PSF from a single image by analyzing the image is proposed. However, its inaccurate PSF and long processing times have made implementation on a digital still camera impractical. In contrast, multi-capture is a scheme to shoot consecutive images with shorter and the same exposure after one shutter press, register and blend the images to yield one image with less blur. Based on this scheme, the blur in the blended image can be reduced to the reciprocal of captured frame

*Doctoral Dissertation, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT1061017, February 17, 2011.

number, though more frames also increase noise.

We propose innovative two image stabilization technologies using long- and short-exposure images to address these issues, “Blind deconvolution-based method”, “Blending-based method”. “Blind deconvolution-based method” removes blur from the image by shooting long- and short-exposure images consecutively, estimating a PSF of the long-exposure image with high accuracy in a short time while referring the short-exposure image, and deconvolving the image with an inverse filter of the PSF. This method has reduced the ringing noise on the restored image and eliminated the gyro sensors over conventional methods. “Blending-based method” reduces blur by blending long- and short-exposure images based on a basic idea that it takes the pixel values for edge regions where blur is noticeable from the short-exposure image and the values for flat regions with less noise from the long-exposure image. This method has achieved the blur level of the short-exposure image and the noise level of the long-exposure image. Moreover, we have implemented these methods in a prototype digital still camera respectively and evaluated the performance of the camera. The results show that we have achieved a 0.7-1.4 EV exposure time step in “Blind deconvolution-based method” and 0.8-2.1 EV exposure time step in “Blending-based method”.

The findings from this study will accelerate an application study on electronic image stabilization and contribute to smaller, lower-cost and lower-power consumption consumer cameras.

Keywords:

Blur, Digital camera, Deblurring, PSF, Ringing, Image blending, Noise reduction

目次

1	序論	1
1.1	手ぶれ補正の歴史 ～光学式～	1
1.2	手ぶれ補正の歴史 ～電子式～	2
1.2.1	電子式動画手ぶれ補正	3
1.2.2	電子式静止画手ぶれ補正	5
1.3	手ぶれ補正の課題と本研究の概要	9
2	長短露光画像復元式手ぶれ補正	11
2.1	はじめに	11
2.2	過去の研究	12
2.2.1	PSF推定	12
2.2.2	画像復元	12
2.3	提案手法	13
2.3.1	長短露光画像によるPSF推定	13
2.3.2	画像復元フィルタの縮小化	17
2.3.2.1	復元フィルタ係数のトリミング	17
2.3.2.2	窓関数による復元フィルタ係数の凝縮化	18
2.3.3	エッジ強度に基づくリングング除去	19
2.4	性能評価	21
2.4.1	ぶれ検出性能	21
2.4.2	画像復元性能	22
2.4.3	リングング除去性能	24
2.5	まとめ	26
3	長短露光画像合成式手ぶれ補正	27
3.1	はじめに	27
3.2	過去の研究	27
3.3	提案手法	28
3.3.1	基本アルゴリズム	28
3.3.2	ノイズにロバストなVisual Blur Map	30

3. 3. 3	エッジ形状を考慮したノイズ除去	31
3. 3. 4	ぶれを考慮した高精度位置合わせ	33
3. 4	性能評価	35
3. 4. 1	基本アルゴリズム	35
3. 4. 2	ノイズにロバストなV i s u a l B l u r M a p	37
3. 4. 3	エッジ形状を考慮したノイズ除去	38
3. 4. 4	ぶれを考慮した高精度位置合わせ	38
3. 5	まとめ	39
4	各方式の性能比較	41
4. 1	実験内容	41
4. 2	実験結果	43
4. 2. 1	手ぶれ量と補正性能	43
4. 2. 2	ノイズ量と補正性能	45
4. 3	まとめ	49
5	デジタルカメラへの実装	51
5. 1	試作カメラ	51
5. 2	性能評価	54
5. 2. 1	手ぶれ	54
5. 2. 2	ノイズ	57
5. 2. 3	処理時間	59
5. 2. 4	まとめ	59
6	結論	65
	謝辞	67
	参考文献	69
	付録	73
	研究業績	77

図目次

1	画像切り出し式動画手ぶれ補正の原理	4
2	画像切り出し式動画手ぶれ補正搭載ムービーカメラ	4
3	PC用動画手ぶれ補正ソフトウェア	5
4	重ね合わせ式静止画手ぶれ補正の原理	6
5	重ね合わせ式静止画手ぶれ補正搭載ムービーカメラ	6
6	重ね合わせ式静止画手ぶれ補正 (ロール対応)	7
7	重ね合わせ式静止画手ぶれ補正 (動被写体ぶれ補償)	7
8	画像復元式静止画手ぶれ補正の処理概要	8
9	長短露光画像による PSF 推定の処理概要	14
10	トリミング閾値の最適化実験概要	18
11	窓関数の適用例	19
12	エッジ強度に基づくリングング除去の処理概要	20
13	ぶれ検出性能評価の概要	21
14	画像切り出し式動画手ぶれ補正の原理	24
15	リングング除去結果画像例	25
16	長短露光画像合成式手ぶれ補正の基本アルゴリズム	29
17	提案 Visual Blur Map の適用例	30
18	エッジ上のノイズ例	31
19	エッジ形状を考慮したノイズ除去	33
20	位置合わせ精度と合成結果画像	34
21	基本アルゴリズムの性能評価概要	36
22	基本アルゴリズムの性能評価結果	36
23	提案 Visual Blur Map の性能評価概要	37
24	提案 Visual Blur Map の性能評価結果	37
25	エッジ形状を考慮したノイズ除去の性能評価結果	38
26	実験画像	42
27	手ぶれ量と PSNR	43
28	手ぶれ量と補正画像例	44
29	補正結果画像例 (手ぶれ $B = 16$ 画素, ノイズ $\sigma = 4$)	45

30	ノイズ量とPSNR	46
31	ノイズ量と補正画像例	47
32	補正結果画像例 (手ぶれ $B=8$ 画素, ノイズ $\sigma=1$)	48
33	試作カメラA (Hand-blur Refiner搭載)	52
34	試作カメラAの処理ブロック図	52
35	試作カメラB (LS-Blender搭載)	53
36	試作カメラBの処理ブロック図	54
37	手ぶれ量とMTF	55
38	露光時間-MTF面積グラフ	55
39	試作カメラAのMTF測定結果	56
40	試作カメラBのMTF測定結果	57
41	マクベスチャート	58
42	補正結果画像例1 (Hand-blur Refiner)	60
43	補正結果画像例2 (Hand-blur Refiner)	61
44	補正結果画像例1 (LS-Blender)	62
45	補正結果画像例2 (LS-Blender)	63
46	CZPチャート	74
47	輝度曲線	74
48	MTF面積値	76

表目次

1	静止画手ぶれ補正の方式と課題	9
2	ぶれ検出性能評価結果	22
3	画像復元性能評価結果	23
4	リングング除去性能評価結果	25
5	ぶれを考慮した高精度位置合わせの性能評価結果	39
6	試作カメラAの仕様	39
7	試作カメラBの仕様	52
8	SN比測定結果	53
9	性能評価結果 (まとめ)	59

第1章 序章

撮影した画像のぶれを低減する手ぶれ補正機能が様々なカメラに搭載されており、もはやカメラの標準機能として認知されている。手ぶれ補正は、レンズや撮像素子を駆動する「光学式」と、画像処理で補正する「電子式」という2つの方式に大別される。本章では、光学式と電子式手ぶれ補正の歴史をそれぞれ述べた後、手ぶれ補正の現状課題についてまとめ、今回の研究の目的と概要について説明する。

1.1 手ぶれ補正の歴史 ～光学式～

手ぶれ補正の歴史は古い[1]。アクチュエータを用いて積極的にぶれを補正する「アクティブ方式」の手ぶれ補正技術は、1960年代には映画撮影用途で既に実用化されていた。民生用カメラ向けの手ぶれ補正技術は、1983年に松下電器（現パナソニック）がそのメカニズムを発明した[1]。その後、1987年には、キヤノンがレンズシフト方式（光学系に組み込んだ一部のレンズを駆動して手ぶれをキャンセルする方式）の試作カメラを発表し[2]、1988年には、松下電器が全体チルト方式のビデオカメラを製品化した[3]。

フィルムカメラ用の本格的な手ぶれ補正としては、1994年にニコンがコンパクトカメラ向けにステップモータ駆動によるレンズシフト方式を実用化した[4]。また、1995年には、キヤノンが一眼レフの交換レンズにムービングコイル駆動によるレンズシフト方式を搭載した[5]。

その後、レンズシフト式が手ぶれ補正の主流となり、2000年には、オリンパスがレンズシフト式手ぶれ補正搭載のデジタルカメラを製品化した[6]。そして、

さらに小型化が進み、2003 年には、松下電器が手のひらサイズのコンパクトデジタルカメラに本方式を搭載した[7].

レンズシフト方式の次に新しく登場したのが、同 2003 年、当時のミノルタ（現コニカミノルタ）が開発したイメージセンサシフト方式である[8]. イメージセンサシフト方式とは、2 軸（ヨー、ピッチ）のジャイロセンサで手ぶれを検出し、それらの手ぶれをキャンセルするように撮像素子を X, Y ステージで移動させる方式である. 本方式は、レンズシフト式のように複雑なレンズ設計技術が不要であり、既存レンズとの組み合わせも可能というメリットがある.

さらにコニカミノルタは、2005 年にコンパクトデジタルカメラ向けにレンズユニットスイング式を開発した[9]. レンズユニットスイング式は、イメージセンサを含むレンズユニット全体を手ぶれを抑えるように回転制御するものである. 本方式もイメージセンサシフト式と同様に複雑なレンズ設計技術が不要であるという利点があるが、レンズがカメラ筐体からせり出す機種（一眼レフや沈胴式レンズなど）への適用は機構的に不向きであるため、屈曲光学系を採用したレンズユニット完全内蔵タイプのコンパクトデジタルカメラにしか採用されていない.

これらの技術革新により、手ぶれ補正機能は、光学 5 倍ズーム以上のクラスのデジタルカメラに一挙に普及した. そして現在では、国内で発売されているデジタルカメラの 9 割以上の機種に手ぶれ補正機能が標準搭載されている.

1.2 手ぶれ補正の歴史 ～電子式～

前述のように、手ぶれ補正は光学系駆動方式がいち早く民生用カメラに製品化されたが、その一方で、カメラの小型・低コスト化を図るため、画像信号処理による解決策も模索されてきた. 一般に、光学系駆動方式が光学式と呼ばれるのに対して、画像信号処理による方式は電子式と呼ばれる. 電子式では、動画向けと静止画向けとで異なる技術開発が行われてきた. それぞれの歴史について述べる.

1. 2. 1 電子式動画手ぶれ補正

1985 年に NHK は、ハイビジョン放送の MUSE 方式 (Multiple Sub-Nyquist-Sampling Encoding system) 用として、実用的な回路規模で画像間の動き量を高速に (60fps で) 検出可能な代表点マッチング法と呼ばれる動き検出技術を開発した[10].

代表点マッチング法は、ブロックマッチング法的一种である。ブロックマッチング法とは、フレーム間の重ね合わせ位置をずらしながら、対応する画素値の差分絶対値の総和 (SAD: Sum of Absolute Difference) を計算し、SAD が最小となる位置をマッチング位置として検出する手法である。代表点マッチング法は、ブロックマッチング法の一方向のフレームの参照画素を一定間隔で読み飛ばしたものである。このサブサンプリングした参照画素のことを代表点と呼ぶ。これにより、通常のブロックマッチングに比べ、計算コスト、使用メモリ量を大幅に低減できる。

そして、1990 年に松下電器は、この代表点マッチング法を利用した画像切り出し式の手ぶれ補正技術を開発し、ビデオカメラに実用化した[11][12].

画像切り出し式手ぶれ補正の原理を図 1 を用いて説明する。まず、代表点マッチング回路により、1 フレーム前の映像と現フレームの映像との動き量と方向 (手ぶれにより発生した動きベクトル) を検出する。代表点マッチング回路では、図に示した 5 つの検出領域を設け、各検出領域で前フレームの代表点をメモリ上に記憶しておき、前フレームと現フレームの重ね合わせ位置をずらしながら、前フレームの代表点と現フレームの対応画素の SAD を計算し、この SAD が最小となる位置を動きベクトルとして検出する。そして、検出された 5 つの動きベクトルの平均値または中央値に応じて、撮像エリアからその一部を切り出す枠を移動させる。このように動きに応じた切り出し枠の移動により、フレーム間の動き (手ぶれ) を補正する。

また、この切り出した映像をそのまま出力するとモニタ出力画面に余白ができてしまうため、切り出した映像信号に対して、電子ズーム処理を施し、モニタ画面のフルサイズまで拡大する。

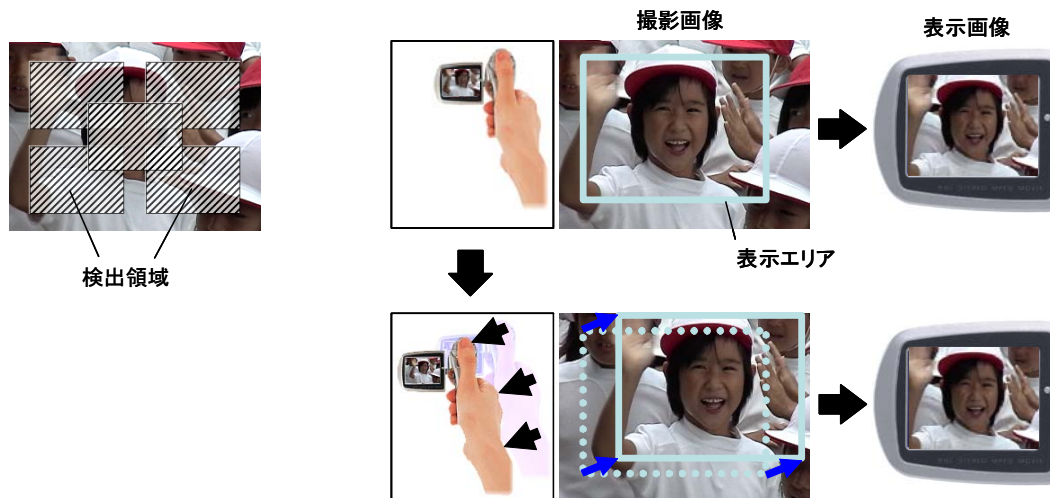


図 1 画像切り出し式動画手ぶれ補正の原理

この製品化を皮切りに、多くのビデオカメラメーカーが比較的安価なモデルにこの画像切り出し方式を採用するようになった。筆者が所属する三洋電機も 2004 年に、デジタルムービーカメラ DMX-C4 に本方式を搭載した(図 2)。さらに、筆者は、この開発の中で、光学ズーム倍率に応じて補正する手ぶれ周波数帯を変化させることにより、手ぶれ補正の効果とカメラワークの操作性を両立させる新しい補正制御技術を開発した[13]。



図 2 画像切り出し式動画手ぶれ補正搭載ムービーカメラ(DMX-C4)

その後、画像切り出し式はさらなる進化を遂げる。同 2004 年、三洋電機にて、著者らは、オプティカルフローによる特徴点ベースの動き検出技術と、射影変換による補正技術とを用いることにより、6 自由度(X, Y, X, ヨー, ピッチ, ロール)の手ぶれ運動に対応する画像切り出し式技術を開発し、撮影後の動画ファイルから PC で手ぶれ補正を行うアプリケーションソフトウェアを世界で初めて製品化した(図 3)。



図 3 PC用動画手ぶれ補正ソフトウェア
(Motion Director)

2006 年には、モルフォが、4 自由度(X, Y, Z, ロール)対応の画像切り出し式を携帯電話に搭載した[14]。2009 年には、ソニーが、ヨー, ピッチ方向の手ぶれは光学式で、ロール方向の手ぶれは電子式(切り出し式)でそれぞれ補正を行うハイブリッド方式を開発している。

1. 2. 2 電子式静止画手ぶれ補正

ビデオカメラ(動画)向け手ぶれ補正の小型・低コスト化手段として画像切り出し式の技術開発が進む一方、静止画向け手ぶれ補正の電子化も同時に検討されてきた。最も代表的なものは、1990 年代から提案されている重ね合わせ式である[15]。

重ね合わせ式は、1 度のシャッター操作で通常よりも短い露光時間の画像を連写し、それらの画像を位置合わせしながら加算合成することで、手ぶれ

の少ない1枚の画像を生成する方式である(図4). 本手法により, 原理的には, 通常露光画像に比べて, 合成画像の手ぶれ量は“ $1/\text{露光分割数}$ ”に低減される.

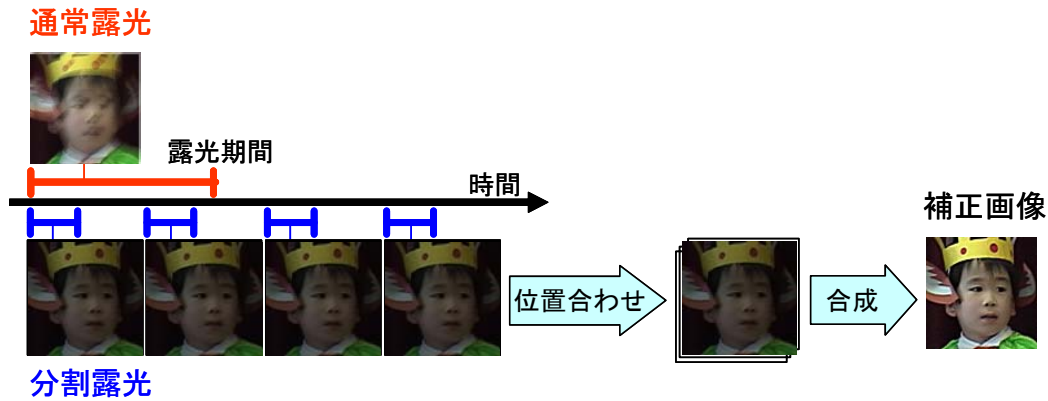


図4 重ね合わせ式静止画手ぶれ補正の原理

2003年ソニーは, 4枚の連写画像による2自由度(X, Y)対応の重ね合わせ式をデジタルカメラに搭載した. 筆者らも, 2004年に, 三洋電機にて, 3自由度(X, Y, ロール)対応の重ね合わせ技術を開発した. その後, この技術をASIC化し, 2007年にデジタルムービーカメラDMX-HD1000に製品化した(図5). また, この開発の中で, 筆者は, 短露光画像の合成比率を変えることにより, 動被写体ぶれによる多重像を低減する技術も開発した(図6, 図7)[16].



図5 重ね合わせ式静止画手ぶれ補正搭載ムービーカメラ(DMX-HD1000)

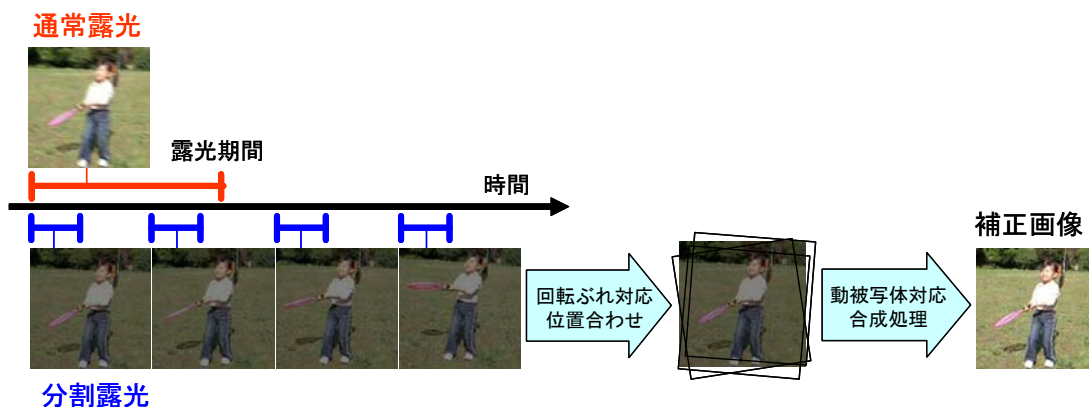


図 6 重ね合わせ式静止画手ぶれ補正(ロール対応)

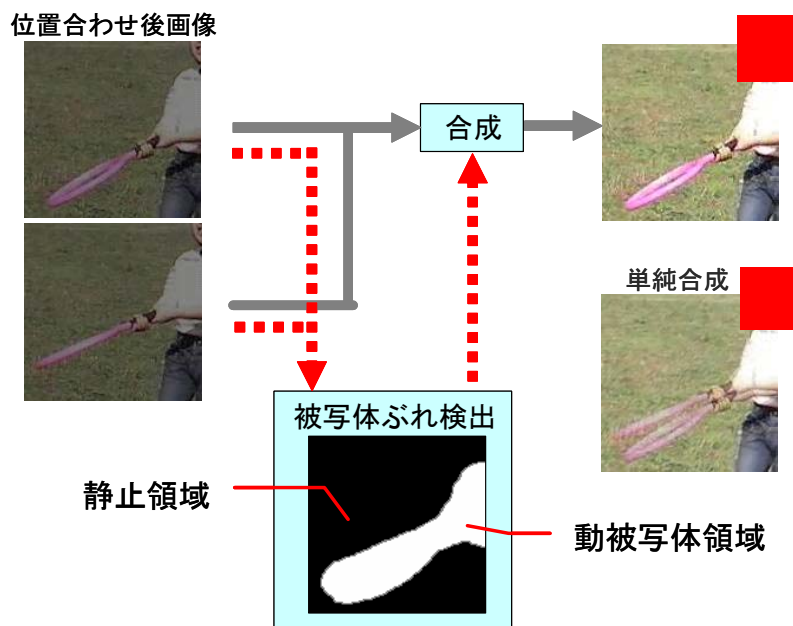


図 7 重ね合わせ式静止画手ぶれ補正(動被写体ぶれ補償)

前述のように、重ね合わせによる手ぶれ補正性能は、露光分割画像枚数に依存する。従って、重ね合わせ式は、高速連写可能な CMOS イメージセンサと大容量メモリを備えたシステムで利用されることが多い。

重ね合わせ式の次に新しく開発されたのが画像復元式である。これは、古くから研究されている画像復元技術を手ぶれ補正に適用したものであるが、2005 年に、三洋電機にて、筆者らが初めてデジタルカメラに実用化した [17][18][19]。

当時開発した画像復元式手ぶれ補正システムの処理概要を図 8に示す。まず、露光中の手ぶれを 2 軸(ヨー, ピッチ)のジャイロセンサで検出し、画像面上の水平, 垂直方向の動きベクトルにそれぞれ換算する。次に、動きベクトルから画像の劣化関数 (PSF: Point Spread Function)を導出し、その PSF の逆変換となる復元フィルタを生成する。そして、手ぶれ画像にこの復元フィルタを適用することで、手ぶれによる画像劣化を修復する。

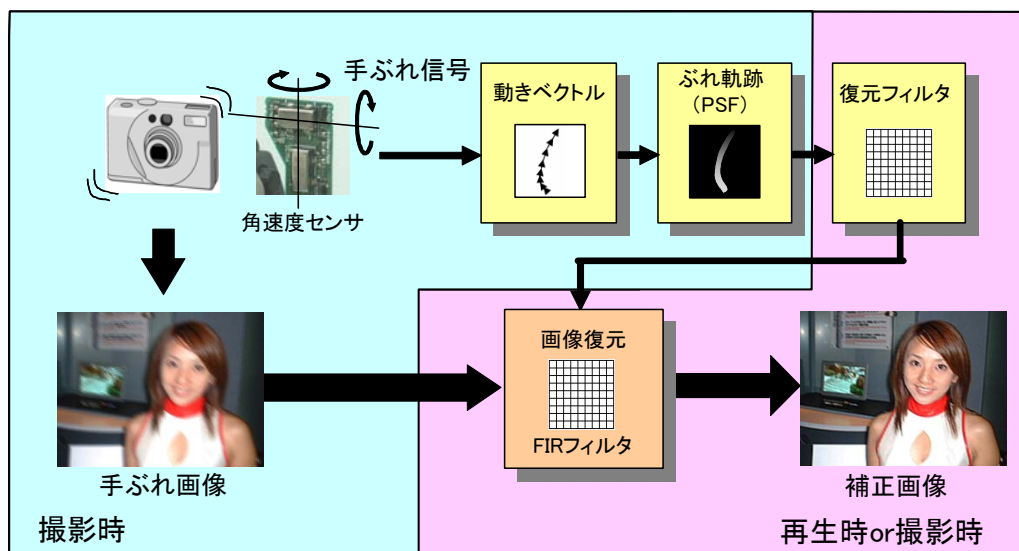


図 8 画像復元式静止画手ぶれ補正の処理概要

2006 年以降、本画像復元式を採用するデジタルカメラが多数登場するが、ジャイロセンサによる PSF 検出精度の補償が難しい(数画素の検出誤差があると、補正画像に大きなリングングが発生する)ため、現在では手ぶれ補正の主流にはなっていない。

その他、高感度撮影や、シャッタータイミング制御による手ぶれ低減策も提案されているが、これらの手ぶれ低減策は、一般的には、手ぶれ補正機能としては認知されていない。

1.3 手ぶれ補正の課題と本研究の概要

本研究では，民生カメラへの実用化の歴史が比較的浅く，普及率が低い電子式静止画手ぶれ補正に注目する．現在，民生カメラに実用化されている静止画手ぶれ補正の方式と課題を表 1にまとめる．光学式に対して電子式には大きく 2 つの課題がある．1つ目は，手ぶれ低減効果が小さく，また手ぶれ低減の代償としてノイズが増加するという画質面での課題である．2 つ目は，画像重ね合わせ式では通常，画像 4 枚分以上のメモリが必要，画像復元式ではぶれ検出にジャイロセンサが必要というようにシステム構成面での優位差が不十分という課題である．これらの課題が電子式普及の阻害要因になっていると考えられる．

表 1 静止画手ぶれ補正の方式と課題

方式	ぶれ検出	ぶれ補正	補正性能		サイズ	コスト	課題	
			手ぶれ	ノイズ				
光学式	レンズシフト式	ジャイロセンサ	レンズ駆動	◎	○	△	△	サイズ，コスト，専用レンズ
	イメージセンサシフト式	ジャイロセンサ	撮像素子駆動	◎	○	△	△	サイズ，コスト，耐久性，駆動音
	レンズユニットスイング式	ジャイロセンサ	レンズユニット駆動	◎	○	△	△	サイズ，コスト，耐久性，駆動音
電子式	画像重ね合わせ式	画像処理	画像処理	△	△	◎	○	ノイズ，撮影時間，メモリ使用量大
	画像復元式	ジャイロセンサ	画像処理	△	△	○	○	リングングノイズ，ジャイロセンサ必要

そこで，本論文では，電子式静止画手ぶれ補正の主要課題である補正性能の向上とシステム構成要素の低減につながる新しい補正方式を提案する．具体的には，まず第 2 章では，長短露光画像を用いることでジャイロセンサを不要とする新しい画像復元式静止画手ぶれ補正技術を提案し，シミュレー

シオン実験によりその有効性を示す。第 3 章では、長短露光画像を合成する新しい静止画手ぶれ補正技術を提案し、第 2 章と同様にシミュレーション実験により性能検証を行う。第 4 章では、上記 2 つの提案手法と従来の重ね合わせ式との総合性能評価を行い、各方式の特徴と課題についてまとめる。第 5 章では、上記提案手法をデジタルカメラへ実装し、実写による性能評価を行う。最後に、第 6 章で、本論文の結論を述べ、今後の展開について考察する。

第2章 長短露光画像復元式手ぶれ補正

2.1 はじめに

古くから画像復元の研究が数多くなされておき[20], 最近では, カメラ撮影時の手ぶれ補正への応用が提案されている[23][24][26][27][29]. しかし, 従来の画像復元技術では, ぶれの検出精度が不十分, 膨大な計算コスト, リンギングノイズの発生, などの問題のため, 民生用カメラでの実用化は困難であった.

そこで今回, 上記画像復元の主要課題を解決する, ブラインドデコンボリューション(画像の劣化情報が未知の状態, 劣化画像だけから劣化のない画像を復元するアプローチ)に基づく新しい静止画手ぶれ補正技術(Hand-blur Refiner)を提案する. 本技術は下記3つの要素技術からなる.

- ①長短露光画像によるPSF推定技術
- ②画像復元フィルタの縮小化技術
- ③エッジ強度に基づくリンギング除去技術

本章では, まず, 画像復元における過去の研究事例と課題について述べ, 次に, 提案手法の各要素技術について詳しく説明し, 最後にそれらの性能評価結果についてまとめる.

2.2 過去の研究

ブラインドデコンボリューションは2つの処理ステップからなる。第1ステップは、カメラの揺れによって生じた画像劣化関数 (PSF : Point Spread Function) を推定する処理、第2ステップは、そのPSFと手ぶれ画像から手ぶれのない画像を復元する処理である。

2.2.1 PSF 推定

撮影画像1枚からPSFを推定するアプローチとして、手ぶれを直線的なぶれと仮定し、画像の周波数特性の解析からPSFを推定する手法が提案されている[21][22][23][24]。しかし、実際の手ぶれは複雑な形状をしているため実シーンでは十分な補正効果が得られない。これに対して、反復最適化処理により複雑なPSFを推定する手法も提案されている[25][26][27]。しかし、収束に時間がかかるためカメラへの実用化は困難である。最近では、Lim[28]とYuan[29]が、複数の撮影画像からPSFを推定するアプローチを提案しているが、Limの手法はPSFの推定精度が低く、Yuanの手法は反復最適化処理のため処理時間が長い。

2.2.2 画像復元

画像復元手法としては、Richardson-Lucy法[30][31]とWiener法[32]がよく知られている。しかし、これらの手法では補正効果を高くすればするほどリングングノイズが増大する。また、Richardson-Lucyの手法は反復処理のため処理時間がかかる。また、Chalkov[33]は画像のエッジに基づいてリングング領域を推定し、除去する方法を提案しているが、リングング除去効果が低い。Yuan[29]は長短露光画像の残差画像を復元することでリングングを低減する手法を提案しているが、長短露光画像間で被写体が動く場合は従来手法よりもリングングが増大する。

2.3 提案手法

デジタルカメラに画像復元技術を適用する場合, 3つの課題がある. 第1にジャイロセンサを使用せずに高精度にぶれを推定すること, 第2に処理時間を短縮すること, 第3に画像復元効果を低下することなく復元画像のリンギングを抑制すること, である. これらの課題を解決するために, 新しいアルゴリズム Hand-blur Refiner を提案する. Hand-blur Refiner は以下の3つの独自技術から構成される. それぞれの技術について説明する.

- ①長短露光画像による PSF 推定
- ②画像復元フィルタの縮小化
- ③エッジ強度に基づくリンギング除去

2.3.1 長短露光画像による PSF 推定

手ぶれによって生じる画像劣化は式(1)で表される. g はぶれ画像, f はぶれない画像, h は劣化関数 (PSF), n はノイズ, \otimes は畳み込み演算. 式(1)は周波数空間では, 式(2)となる. ここで, G, F, H, N はそれぞれ g, f, h, n をフーリエ変換したものである.

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

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

g と f から h の推定値である \hat{h} を導出する方法が幾つかある. 中でも Wiener filter は \hat{h} と h 間の平均誤差を最小化するという意味で最適である. 具体的には, 式(3)により \hat{h} を計算する. ここで α は正則化係数, $*$ は共役転置行列, $InvFT$ は逆フーリエ変換を表す.

$$\hat{h}(x, y) = \text{InvFT} \left(\frac{G(u, v) \cdot F^*(u, v)}{|F(u, v)|^2 + \alpha} \right) \quad (3)$$

同様に式(4)を用いて, g と h から f の推定値 \hat{f} を計算する. ここで β は正則化係数である.

$$\hat{f}(x, y) = \text{InvFT} \left(\frac{G(u, v) \cdot H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \beta} \right) \quad (4)$$

Ayers[25]は, 1枚の手ぶれ画像から手ぶれ PSF を推定する手法を提案した. Ayers の手法では, まずランダム画像を手ぶれ補正画像の初期推定値とする. そして, 推定補正画像と手ぶれ画像から式(3)により手ぶれカーネルを計算し, 式(4)により手ぶれ補正画像を生成する. そして, 推定 PSF が収束するまで, これらの処理を繰り返し, 最終 PSF を確定する. しかし, この手法は反復最適化手法であるため, (a)収束に時間がかかる, (b)局所解に陥る場合が多いという問題があった.

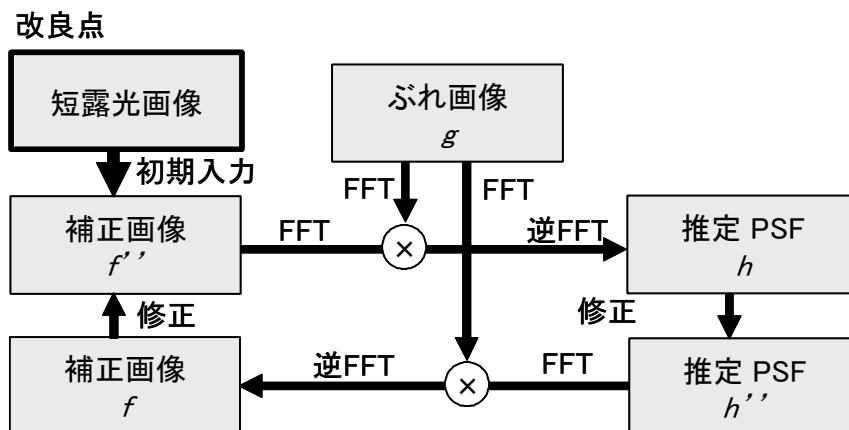


図 9 長短露光画像による PSF 推定の処理概要

そこで、手ぶれ補正画像の初期推定値として、ランダム画像の代わりに、理想的なぶれなし画像に近い画像を適用する手法を提案する。提案手法のブロック図を図 9 に示す。まず最初に、1 回のシャッター操作で通常露光画像と短露光画像の写真を撮影する。短露光画像は手ぶれがほとんど発生しないと言われている安全な露光時間とする(具体的には $1/\text{焦点距離}$ (35mm 換算))。次に、通常露光画像と平均輝度が同じになるように短露光画像の信号をゲインアップする。そして、この短露光画像をぶれ補正画像の初期推定値とする。次に、通常露光画像 g (手ぶれ画像) と短露光画像 f'' (初期手ぶれ補正画像) から式(3)により PSF h を計算し、式(5)、式(6)により PSF h を修正する。次に、手ぶれ画像 g と修正後の PSF h'' を用いて、式(4)で手ぶれ補正画像 f を生成する。そして、式(7)、式(8)で f を修正することにより手ぶれ補正画像 f'' を得る。PSF が収束するまで、同処理を繰り返し、最終 PSF を確定する。本手法により、手ぶれ補正画像の初期推定値が理想的な手ぶれなし画像に近いため、少ない反復回数で、かつ局所解に陥る確率が大幅に低減され、正確な PSF を導出できる。

$$h'(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } h(x, y) > 1 \\ h(x, y), & \text{if } 0 \leq h(x, y) \leq 1 \\ 0, & \text{if } h(x, y) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$h''(x, y) = \frac{h'(x, y)}{\sum h'(x, y)} \quad (6)$$

$$f'(x, y) = \begin{cases} I_{\max}, & \text{if } f(x, y) > I_{\max} \\ f(x, y), & \text{if } 0 \leq f(x, y) \leq I_{\max} \\ 0, & \text{if } f(x, y) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$f''(x, y) = f'(x, y) \cdot \frac{\sum f(x, y)}{\sum f'(x, y)} \quad (8)$$

画像全体で上記処理を行うと、膨大な処理時間が必要である。そこで、小さな特徴領域を抽出し、その特徴領域だけでPSFを推定するようにした[34]。具体的には、短露光画像に対して、エッジ強度の強い64x64画素の小領域を切出し、通常露光画像に対して、その小領域に対応する領域をブロックマッチングで見つける。m個の対応小領域ペアから、式(9)のようなm個の方程式が得られる。

$$g_i(x, y) = f_i(x, y) \otimes h(x, y) + n_i, \quad (i = 1, \dots, m) \quad (9)$$

ここで、 f_i は短露光画像のi番目の小領域、 g_i は通常露光画像の対応する小領域、 h は手ぶれカーネル、 n_i はノイズ。m個の方程式を周波数空間に変換し、統合することで式(10)となる。

$$\begin{bmatrix} G_1(u, v) \\ G_2(u, v) \\ \dots \\ G_m(u, v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(u, v) \\ F_2(u, v) \\ \dots \\ F_m(u, v) \end{bmatrix} H(u, v) + \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \dots \\ N_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで、 G_i, F_i, N_i はそれぞれ g_i, f_i, n_i のフーリエ変換。G, F, Nの転置行列をそれぞれ $[G_1, G_2, \dots, G_m]^T, [F_1, F_2, \dots, F_m]^T, [N_1, N_2, \dots, N_m]^T$ とすると、式(10)は式(2)となる。従って、式(3)により、手ぶれカーネル h の推定値 \hat{h} が得られる。

2.3.2 画像復元フィルタの縮小化

推定 PSF が特異零点を持たなければ、手ぶれカーネルの逆フィルタをぶれ画像に適用することで、完全なぶれ補正画像が得られる。しかし、ぶれカーネルから得られる逆フィルタは特異であることが多く、不良設定問題である。従って、ぶれ補正カーネル(デコンボリューションフィルタ)のサイズと係数は一意に決まらない。そこで、小サイズで効果的なぶれ補正カーネルを決定するアルゴリズムを提案する。アルゴリズムは次の2つの技術からなる。

2.3.2.1 復元フィルタ係数のトリミング

最初に、式(11)で閾値以下の係数を無効化することでデコンボリューションフィルタをトリミングする。この閾値が大きいほどフィルタサイズは小さくなるが、ぶれ補正効果は低下する。そこで、この閾値とぶれ補正効果の関係を検証することにより、最適な閾値を抽出した。実験概要を図 10に示す。まず、ぶれなし画像に既知の PSF を適用することで擬似手ぶれ画像を生成する。次に、前記閾値を変えながら擬似手ぶれ画像をぶれ補正する。そして、ぶれなし画像とぶれ補正画像間の PSNR を計算する。結果を図 10のグラフに示す。PSNR が大きいほどぶれ補正効果が高いことを意味する。図より、閾値の増加に対して、PSNR が急激に低下するポイントがあるのがわかる。このポイントを最適な閾値とする。本手法により、PSNR を維持しながらデコンボリューションフィルタを小さくすることが可能となる。

$$coeff(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{if } |coeff(x, y)| \leq threshold \\ coeff(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

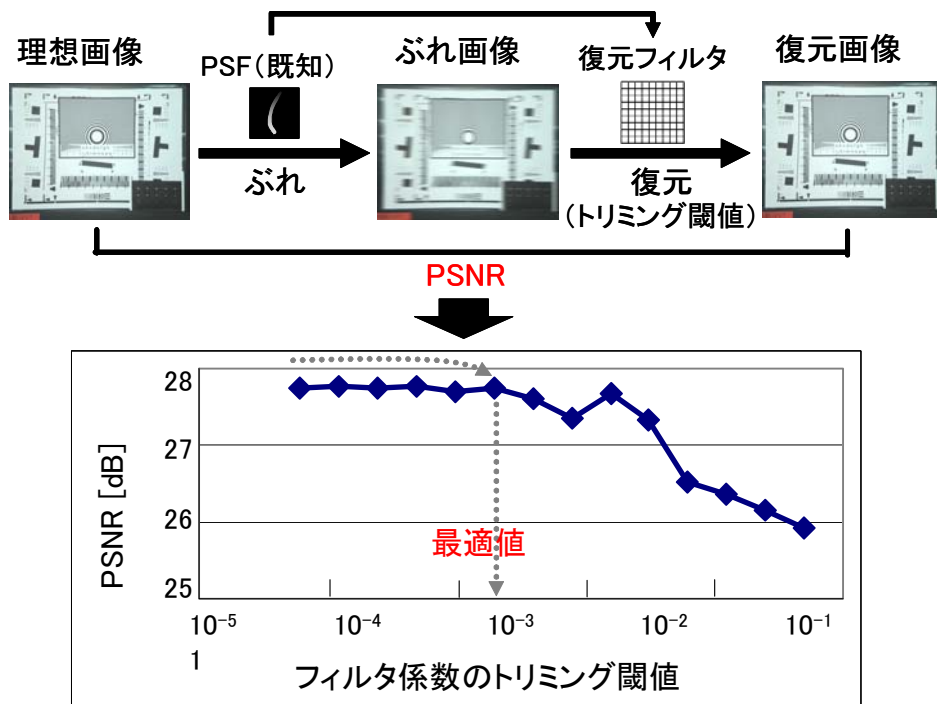


図 10 トリミング閾値の最適化実験概要

2. 3. 2. 2 窓関数による復元フィルタ係数の凝縮化

第2のアプローチはデコンボリューションフィルタを凝縮化することである。一般的に、フィルタに窓関数を適用することで周波数特性を変えることなくフィルタのリプルを抑制できる。そこで、デコンボリューションフィルタに対して、代表的な窓関数であるハミング窓を適用する手法を提案する。ハミング窓関数を式(12)に示す。ここで、 D はフィルタのサイズ、 d はフィルタ中心からの距離を表す。1次元のデコンボリューションフィルタにハミング窓を適用した例を図11に示す。図より、ハミング窓によりフィルタ両端のリプルが抑制されていること、ハミング窓の適用前後でフィルタ特性がほとんど同じであることがわかる。従って、本手法により、フィルタ特性(手ぶれ補正特性)の変化なく、フィルタサイズを縮小することができる。

$$w(d) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{\pi(2d + D)}{D}\right), & \text{if } -\frac{D}{2} \leq d \leq \frac{D}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

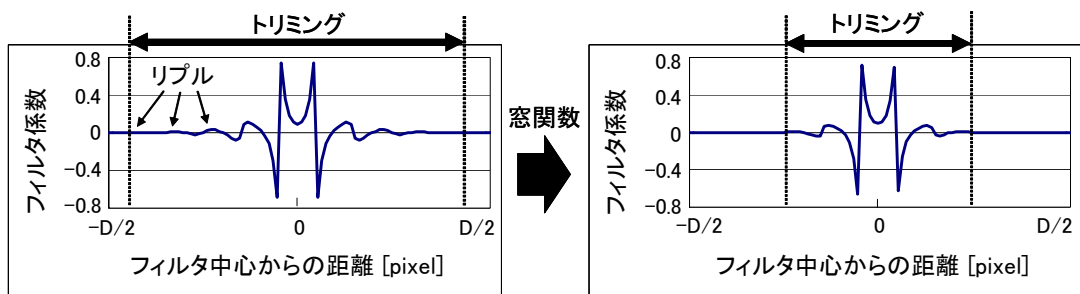


図 11 窓関数の適用例

2.3.3 エッジ強度に基づくリングング除去

冒頭で述べたように、リングングノイズを抑制する手法が幾つか提案されているが、いずれの手法においても手ぶれ補正効果が大幅に低下するという問題があった。そこで、リングングは特徴の少ない(低周波成分の多い)画像領域で知覚され、手ぶれによる劣化は特徴の多い(高周波成分の多い)画像領域で知覚されるという人間の視覚特性を利用することにより、手ぶれ補正効果を低下することなくリングングを低減する新しい手法を提案する。提案手法の処理概要を図 12に示す。まず、前節までの手法を用いて、手ぶれ画像から手ぶれ補正画像を生成する。次に、手ぶれ画像のエッジ抽出画像を生成する。そして、そのエッジ抽出画像の画素値に基づく重みで、手ぶれ画像と手ぶれ補正画像を式(13)で加重加算する。ここで、 r 、 b 、 d 、 e は、それぞれ最終補正画像、手ぶれ画像、手ぶれ補正画像、エッジ抽出画像を示す。また、 w は加重加算係数、 e_{max} 、 e_{min} はエッジ抽出画像の最大値、最小値を示

す. 本手法により, 手ぶれ補正効果の指標であるエッジの鮮鋭度を低下することなく, リンギングが気になる低コントラスト領域のリングングを効果的に除去できる.

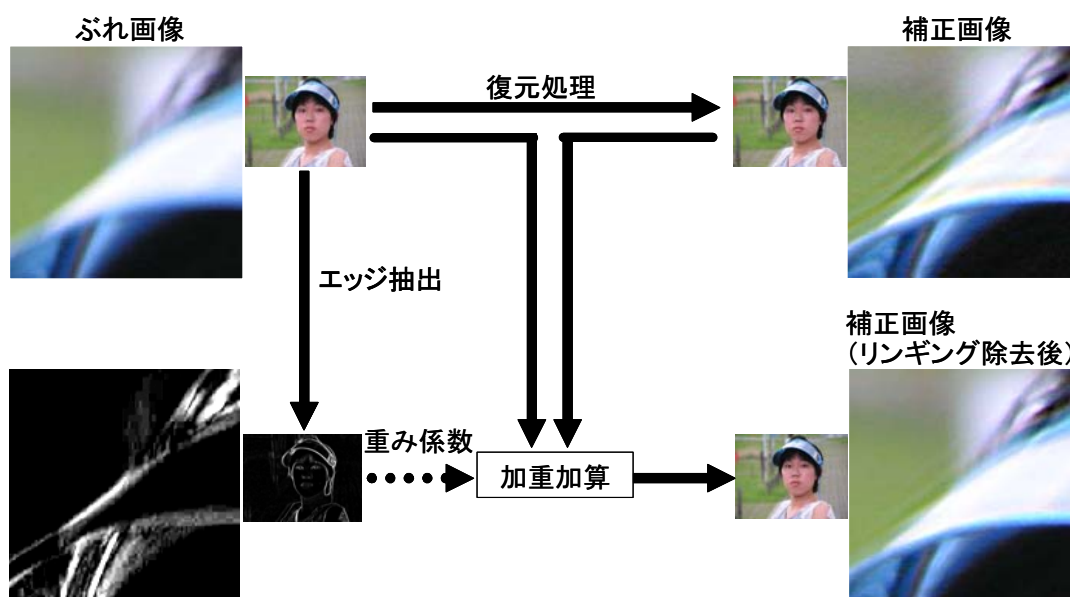


図 12 エッジ強度に基づくリングング除去の処理概要

$$r(x, y) = (1 - w(x, y)) \cdot b(x, y) + w(x, y) \cdot d(x, y)$$

$$w(x, y) = \frac{e(x, y) - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (13)$$

2.4 性能評価

Hand-blur Refiner の 3 つの技術について, それぞれ PC シミュレーションによる性能評価を行った.

2.4.1 ぶれ検出性能

ぶれ検出性能評価の概要を図 13 に示す. 解像度チャートの前にドットパターンが印刷されたパネルをセットし, 露光時間 1/15 秒, 焦点距離 105mm (35mm 換算) という撮影条件で 100 枚の画像を撮影した. そして, それらの画像に対して, Ayers の手法と長短露光画像による PSF 推定手法とを適用し, 推定 PSF とドットパターンの実際のぶれ(正解 PSF)との比較から, PSF 推定の成功率を測定した.

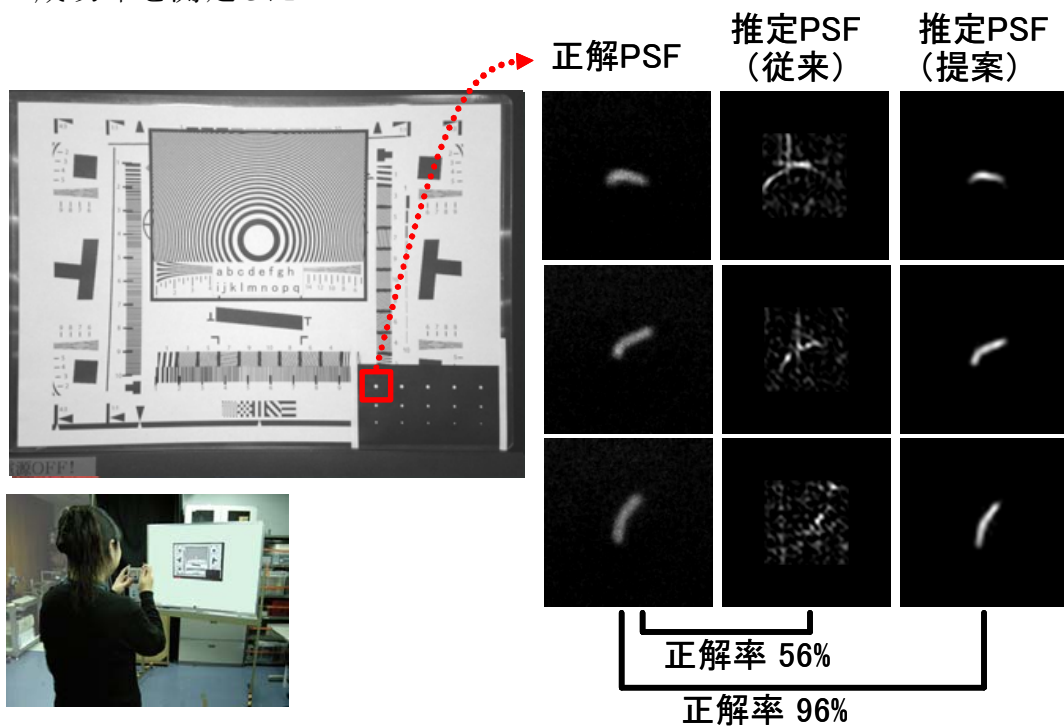


図 13 ぶれ検出性能評価の概要

具体的には、式(14)で示す D を推定 PSF と正解 PSF との差分評価値として、その評価値 D が 0 の場合、PSF 推定は成功と判定した。ここで、 h_1 と h_2 は推定 PSF と正解 PSF を表す。また、 Dil は 3x3 の膨張処理、 Bin は 2 値化をそれぞれ示す。成功率と処理時間を表 2 に示す。提案手法により、処理時間が 1/100 に短縮されるだけでなく、成功率が 40% 改善された。

$$D = \sum \begin{cases} 1, & \text{if } Dil(h'_1(x, y)) < h'_2(x, y) \\ & \text{or } Dil(h'_2(x, y)) < h'_1(x, y) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (14)$$

$$h'_1(x, y) = Bin(h_1(x, y)),$$

$$h'_2(x, y) = Bin(h_2(x, y))$$

表 2 ぶれ検出性能評価結果

	従来手法	提案手法
成功率	56 %	96 %
処理時間 (反復回数)	30 sec (平均 200 回)	0.3 sec (平均 2 回)

画像サイズ: 800 万画素, 露光時間: 1/15 秒, PC: Pentium4 (3 GHz)

2.4.2 画像復元性能

手ぶれの無い理想的なテストチャート画像に 20 種類の異なる手ぶれパターンを与えた擬似手ぶれ画像, その擬似手ぶれ画像を従来手法と提案手法とで画像復元を行った手ぶれ補正画像を用意し, 理想画像と各手ぶれ補正画像との PSNR を計算した。PSNR とは, Peak Signal-to-Noise Ratio の略で, 画像間のピーク信号とノイズの比率を表す指標である。PSNR はその値が大きいほど補正結果が良好であることを意味する(一般的に 0.2dB の差があれば)

ば主観的にも画質差を認識できると言われている). PSNRの計算式は式(15)を用いて計算する. Max は画像がとりうる最大値, MSE は平均二乗誤差 (Mean Square Error), m と n は画像の横, 縦サイズ, I_1, I_2 は比較する画像を表す.

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{Max}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (15)$$

$$MSE = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} \|I_1(x, y) - I_2(x, y)\|^2$$

ここで, 従来手法のフィルタサイズは, 補正効果が最大となるように 512x512 画素とした. 提案手法は, トリミング法だけを適用したもの (提案手法 1)とトリミング法と窓関数と両方を適用したもの (提案手法 2)とをそれぞれ評価した. 処理時間は PC シミュレーションで計測した. 結果を表 3に示す. 提案手法 1 と 2 により, 従来手法と比較して, PSNR を維持しながら, 処理時間がそれぞれ約 1/60, 1/100 に短縮された.

表 3 画像復元性能評価結果

	従来手法	提案手法 1 (トリミング)	提案手法 2 (トリミング+窓関数)
復元フィルタ サイズ	512 x 512	67 x 67	47 x 47
処理時間	2101 sec	36 sec	18 sec
PSNR	27.8 dB	27.7 dB	27.6 dB

画像サイズ: 800 万画素, 露光時間: 1/15 秒, PC: Pentium4 (3 GHz)

2.4.3 リンギング除去性能

リンギング除去手法の評価手順を図 14に示す. 手ぶれの無い理想的なテストチャート画像に 20 種類の異なる手ぶれパターンを与えた擬似手ぶれ画像, その擬似手ぶれ画像をリンギング除去なしとリンギング除去ありとで画像復元を行った手ぶれ補正画像を用意し, 理想画像と各手ぶれ補正画像との PSNR を計算した. 結果画像例を図 15に, PSNR の結果を表4に示す. 提案手法を適用することにより, 平均 PSNR が 5dB 向上した.

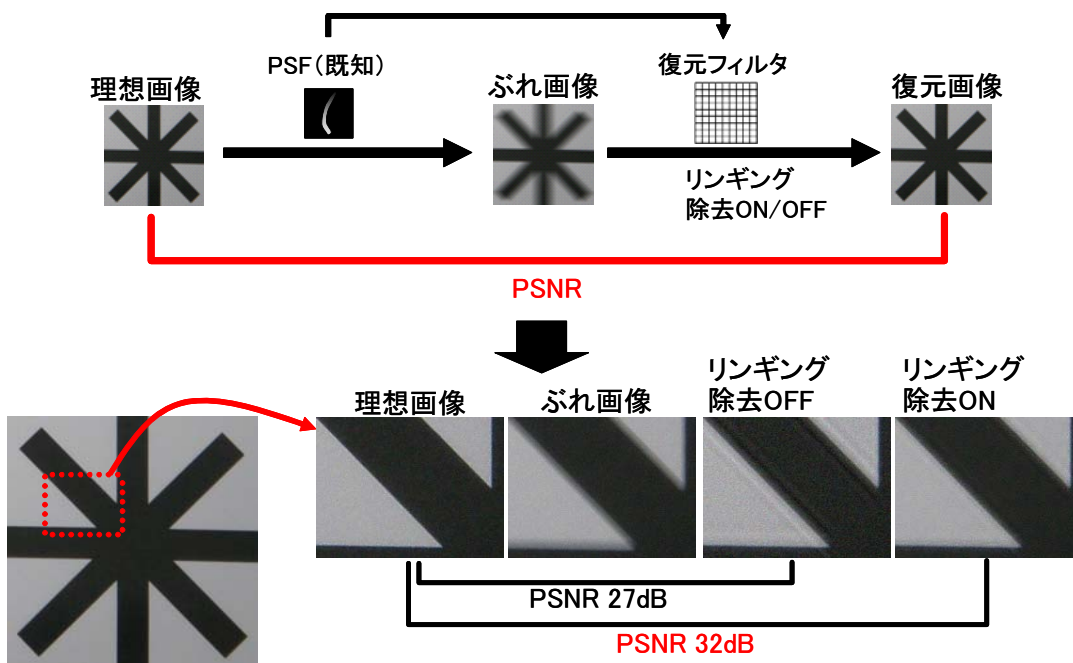


図 14 リンギング除去性能評価の概要

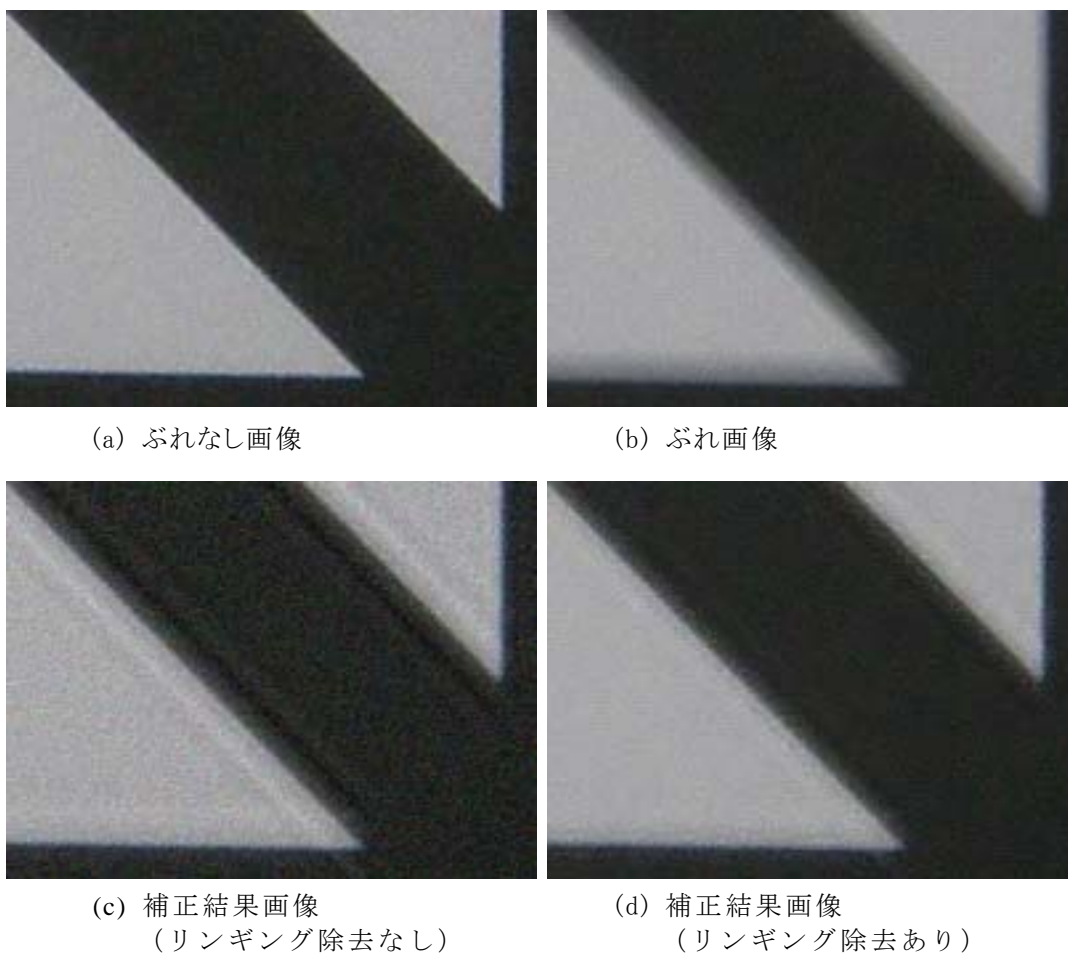


図 15 リングング除去結果画像例

表 4 リングング除去性能評価結果

	リングング除去なし	リングング除去あり
PSNR	27 dB	32 dB

2.5 まとめ

画像復元技術を手ぶれ補正に適用する場合、ぶれ(PSF)検出精度の向上, フィルタ処理時間の短縮, リンギングノイズの低減, という3つの主要課題がある. これに対して, 今回, 長短露光画像を用いた新しい画像復元式手ぶれ補正技術を提案した. 提案手法は下記3つの要素技術から構成される.

- ①長短露光画像を用いた PSF 推定技術
- ②画像復元フィルタの縮小化技術
- ③エッジ強度に基づくリンギング除去技術

これらの提案手法により, 上記3つの主要課題が大幅に改善されることをシミュレーション実験で確認した.

第3章 長短露光画像合成式手ぶれ補正

3.1 はじめに

短露光画像を連写し、位置合わせして合成することで手ぶれの少ない1枚の画像を生成する、画像重ね合わせ式静止画手ぶれ補正技術がデジタルカメラやカメラ付き携帯電話に実用化されている。本手法により、手ぶれ量は通常露光画像に比べて“ $1/\text{露光分割数}$ ”に低減できる。しかし、露光分割数を増やすほどノイズが増加してしまうという問題がある。

そこで今回、露光時間の異なる2枚の画像を合成することで、ノイズの増加を抑制しながら手ぶれを低減する新方式の電子式静止画手ぶれ補正技術を提案する。

本章では、まず提案手法の基本アイデアについて述べ、次に、さらにノイズを低減するための応用技術について説明し、最後にそれらの性能評価結果を報告する。

3.2 過去の研究

通常よりも短い露光時間の画像(短露光画像)を複数枚撮影し、位置合わせしながら加算合成することで、手ぶれの少ない1枚の画像を生成する方式(画像重ね合わせ式)は、比較的処理が簡単なため、古くから提案されている[15][39]。本方式により、原理的に N 枚の短露光画像を合成することで、手ぶれ量は通常露光画像に比べて $1/N$ に低減できる。しかし、逆にノイズは通常露光画像の \sqrt{N} 倍に増加してしまうという問題がある。

一方、短露光(高感度撮影)画像に対してノイズ除去を行うことで手ぶれを低減するという考え方もある。ノイズ除去は古典的な技術であり、平滑化フィルタ、メディアンフィルタなどがよく知られている。しかし、いずれの手法も解像度が低下するという問題があった。これに対して、エッジ保存型のノイズ除去手法が幾つか提案されている。バイラテラルフィルタ[34]は有名であるが、その性能を上回る、wavelet ベースの手法[36]や同一画像内の類似小領域を用いるパターン認識ベースの手法[37][38]なども報告されている。しかし、いずれの手法も通常感度画像のノイズレベル(画質)には及ばない。

3.3 提案手法

3.3.1 基本アルゴリズム

一般に、撮影時の露光時間が長いほど、撮影画像の手ぶれは大きくなり、露光時間が短いほどノイズが大きくなる。また、人間の視覚特性として、エッジ部では手ぶれが目立ち、平坦部ではノイズが目立つという傾向がある。そこで、今回、エッジ部はぶれの小さい短露光画像から、平坦部はノイズの少ない長露光画像から画素値を取得するように長短露光画像を適応的に合成する新しい静止画手ぶれ補正手法 LS-Blender を提案する。提案手法の基本アルゴリズムを図 16に示す。まず最初に、1 回のシャッター操作で短露光画像と長露光画像(通常露光画像)を撮影する。短露光画像は手ぶれがほとんど発生しないと言われている安全な露光時間とする。次に、長露光画像と平均輝度が同じになるように、短露光画像の信号をゲインアップする。次に、それら長短露光画像のエッジ抽出結果を用いて長短露光画像の位置合わせを行う。そして、位置合わせした長短露光画像の差分絶対値画像を生成する。差分絶対値画像は、ぶれにより劣化した長露光画像のエッジ部(図 16中央画像の青色箇所)は大きな値となり、逆に、ぶれても変化のない平坦部(緑色箇所)は小さな値となる(以降、この見た目のぶれ度合いを示す画像を Visual Blur Map と呼ぶ)。そして最後に、Visual Blur Map に基づく重み付

けで画素毎に長短露光画像を加重加算する(式(16)). 本アルゴリズムにより, 手ぶれもノイズも少ない画像を取得することができる

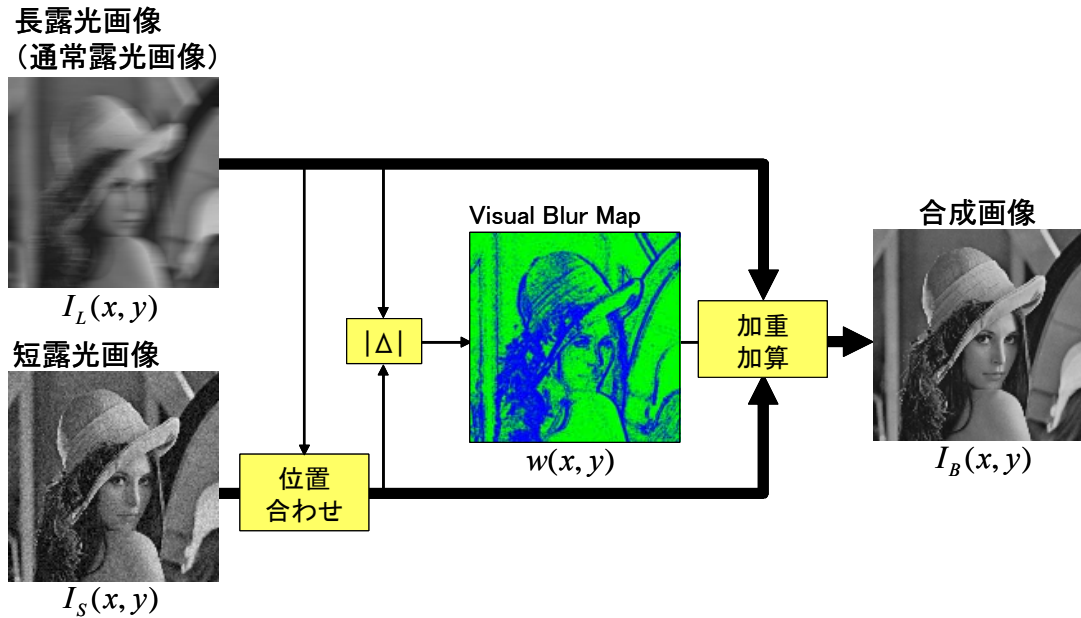


図 16 長短露光画像合成式手ぶれ補正の基本アルゴリズム

$$I_B(x, y) = w(x, y) \cdot I_S(x, y) + (1 - w(x, y)) \cdot I_L(x, y)$$

$$w(x, y) = \frac{|I_S(x, y) - I_L(x, y)|}{\text{Max}(|I_S(x, y) - I_L(x, y)|)} \quad (16)$$

今回さらに, 合成画像のノイズを低減するために, 以下の 3 つの応用技術を提案する. それぞれの技術について説明する.

- ①ノイズにロバストな Visual Blur Map
- ②エッジ形状を考慮したノイズ除去
- ③ぶれを考慮した高精度位置合わせ

3. 3. 2 ノイズにロバストな Visual Blur Map

長短露光画像の差分絶対値 (Visual Blur Map) を計算することで, 手ぶれによる劣化したエッジ部のみを抽出できる. しかし, 低照度時には短露光画像のノイズが増大するため, 平坦部のノイズも Visual Blur Map に抽出され, 結果として合成画像の平坦部にノイズが発生するという問題があった. そこで, ノイズの少ない長露光画像のエッジ情報を用いて Visual Blur Map を補正することで, 平坦部のノイズを除去する手法を提案する.

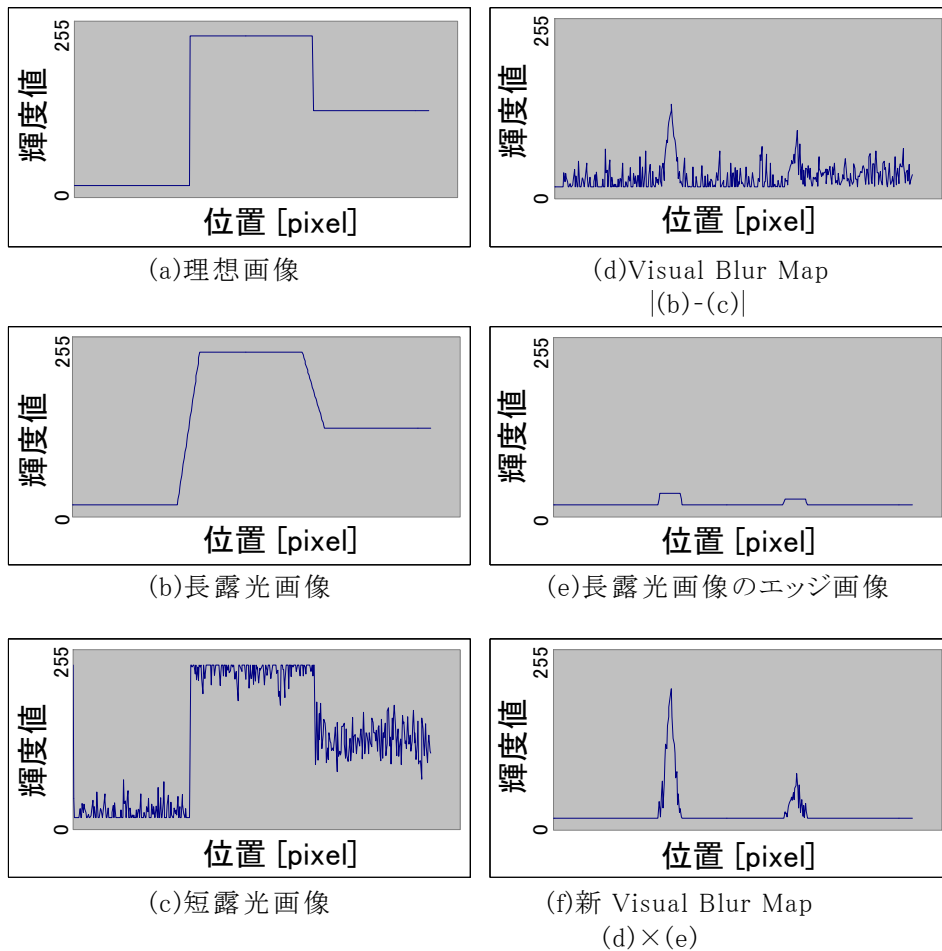


図 17 提案 Visual Blur Map の適用例 (1次元データ)

1次元のステップエッジ画像を用いて提案手法を詳しく説明する(図 17). (a)はぶれもノイズも少ない理想的な画像. 左側のステップエッジは振幅が大きく, 右側のステップエッジは振幅が小さい. (b)は長露光画像(ぶれ画像). (c)は短露光画像(ノイズ画像). (d)は長短露光画像の差分絶対値画像(Visual Blur Map). 図より, ノイズと小振幅エッジの判別が困難であることがわかる. そこで, まず長露光画像のエッジ抽出を行う(2次元画像の場合は, 3×3 タップの sobel フィルタを適用する)(e). 次に, エッジ画像と差分絶対値画像とを積算する(f). この結果を新しい Visual Blur Map として長短露光画像を加加重算することにより, ノイズの少ない合成画像を取得できる.

3.3.3 エッジ形状を考慮したノイズ除去

エッジ部は短露光画像の成分が多くなるため, 合成画像のエッジはノイズで凸凹な形状になる(図 18右上).

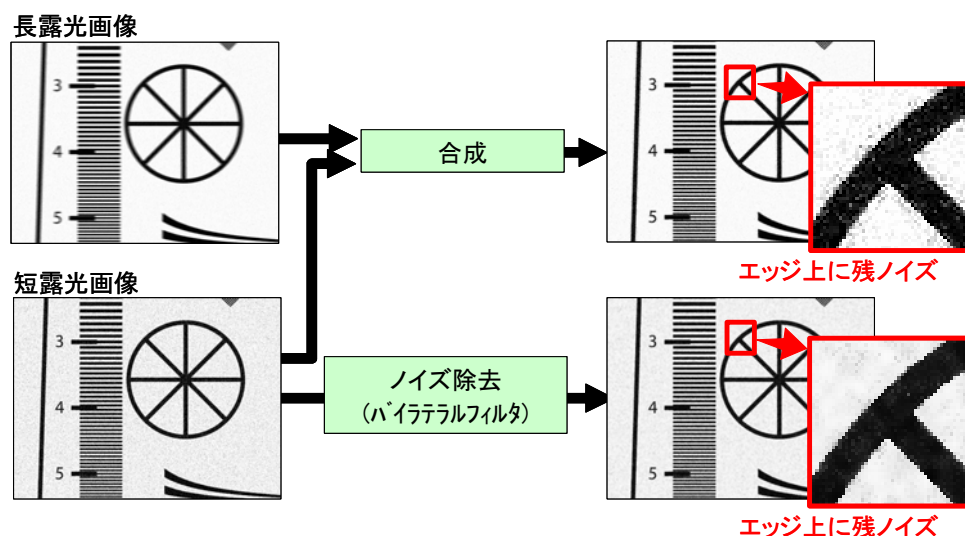


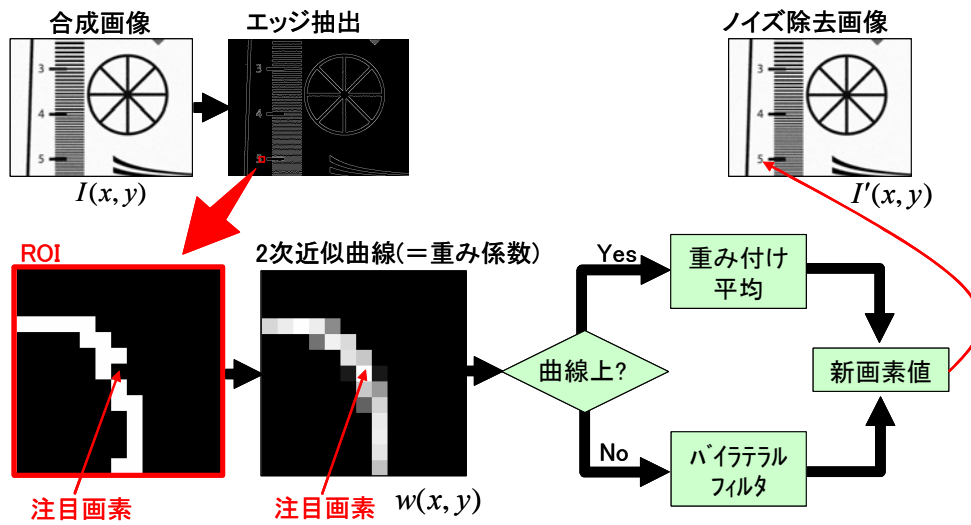
図 18 エッジ上のノイズ例

これに対して, 代表的なエッジ保存型のノイズ除去手法であるバイラテラルフィルタの適用を考える. バイラテラルフィルタは「注目画素からの距離」と「注

目画素値との差」に基づく重み付けで周辺画素を加重加算する手法である [34]. これにより, エッジの鮮鋭度を維持しながらエッジ周辺のノイズを効果的に低減できる. しかし, 依然エッジの凸凹は改善されない(図 18右下).

そこで今回, エッジの形状を考慮した新しいノイズ低減手法を提案する. 提案手法のアルゴリズムを図 19に示す. まず合成結果画像 $I(x,y)$ に 3×3 タップの Canny オペレータを適用し, 2 値化することで 2 値のエッジ画像を生成する. 次に, エッジ画像の注目画素を中心とした 13×13 画素の小領域内のエッジ画素について, 2 次の近似曲線を描く. そして, 注目画素がその 2 次曲線上にある場合は, 2 次曲線を重み係数 $w(x,y)$ として合成結果画像 $I(x,y)$ の画素値を加重加算することで新しい注目画素の値 $I'(x,y)$ を生成する(式 (17)). 注目画素が 2 次曲線上にない場合は, バイラテラルフィルタを適用する. こうして, 注目画素を 1 画素ずつシフトしながら全画素に対して上記処理を適用する. これにより, エッジ周辺のノイズだけでなく, エッジ上のノイズも同時に低減できる. そしてさらに, 得られたノイズ除去画像とノイズ除去前の画像とを Visual Blur Map に基づく重み付けで画素合成する(図 19の Step2). これにより, 短露光成分が大きい画素ほどノイズ除去の強度が高くなるとともに, エッジ部と平坦部間のノイズ境界も滑らかになる. 本手法により, エッジ周辺のノイズだけでなく, エッジ上のノイズも同時に低減できる.

ステップ 1



ステップ 2

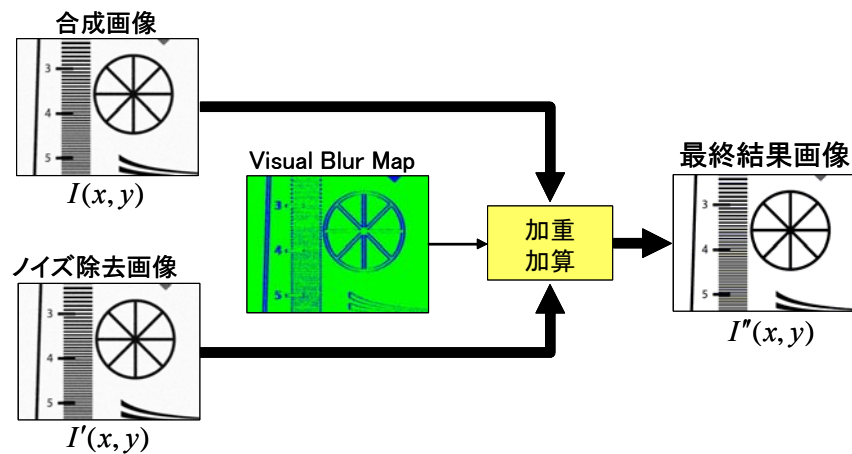


図 19 エッジ形状を考慮したノイズ除去

$$I'(x,y) = \sum_{x,y}^{ROI} (I(x,y) \times w(x,y))$$

$$\sum_{x,y}^{ROI} w(x,y) = 1$$

(17)

3.3.4 ぶれを考慮した高精度位置合わせ

長露光画像のぶれ、および短露光画像のノイズの影響により、長短露光画像の位置合わせ精度が低下し、合成画像にゴーストやノイズが発生するという問題があった(図 20)。

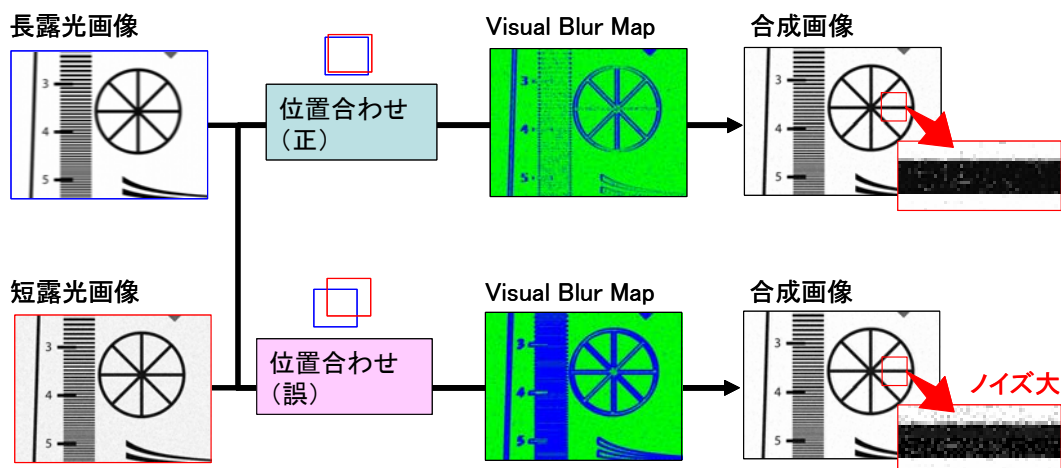


図 20 位置合わせ精度と合成結果画像

そこで、長露光画像のぶれを考慮した新しい位置合わせ手法を提案する。提案手法のアルゴリズムを説明する。まず、手ぶれによる画像の劣化は式(18)で表される。ここで、 g はぶれ画像、 f はぶれなし画像、 h は劣化カーネル (PSF)、 n はノイズ、 \otimes は畳み込み積分を表す。次に、式(18)をフーリエ変換すると式(19)となる。ここで、 G, F, H, N は g, f, h, n をそれぞれフーリエ変換したものを示す。式(19)から平均 2 乗誤差が最小となる劣化 PSF \hat{h} を式(20)で算出する。

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) + n \quad (18)$$

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v) + N \quad (19)$$

$$\hat{h}(u, v) = \text{InvFT} \left(\frac{G(u, v) \bullet F^*(u, v)}{|F(u, v)|^2 + \alpha} \right) \quad (20)$$

$$g'(x, y) = i(x, y) \otimes \hat{h}(u, v) \quad (21)$$

次に、式(21)により得られた PSF で短露光画像 i を劣化し、長露光画像と類似のぶれ画像 g' を生成する。そして最終的に、ブロックマッチングで短露光画像の劣化画像と長露光画像間の位置ずれ量を検出し、その結果を用いて長短露光画像間の位置合わせを行う。

本手法により、長露光画像のぶれおよび短露光画像のノイズの影響が低減されるため、正確な位置合わせが可能となり、合成画像のノイズが低減される。

3. 4 性能評価

LS-Blender の基本アルゴリズムと 3 つの応用技術について、それぞれ PC シミュレーションによる性能評価実験を行った。

3. 4. 1 基本アルゴリズム

手ぶれおよびノイズのない理想テストチャートから擬似的に作成した長短露光画像を用いて、LS-Blender の基本アルゴリズムで画像合成を行い、理想画像と合成画像との PSNR を算出した。擬似長露光画像は、理想画像に 9 画素の水平等速ぶれと標準偏差 $\sigma=1, 2, 4, 8$ のガウスノイズを与え、擬似短露光画像は、理想画像に標準偏差 $\sigma=4, 8, 16, 32$ のガウスノイズを与えることにより生成した(図 21)。また、理想画像と長短露光画像それぞれとの PSNR も計測した。結果を図 22に示す。グラフは、横軸は短露光画像のノイ

ズ量, 縦軸は PSNR であり, PSNR が大きいほど理想画像に近いことを意味する. グラフより, ノイズ量に関わらず, 合成画像の結果は, 長短露光画像それぞれの結果よりも優れていること(画像合成により, 短露光画像より 2.0dB 以上, 長露光画像より 0.5dB 以上の画質改善効果があること)がわかる.

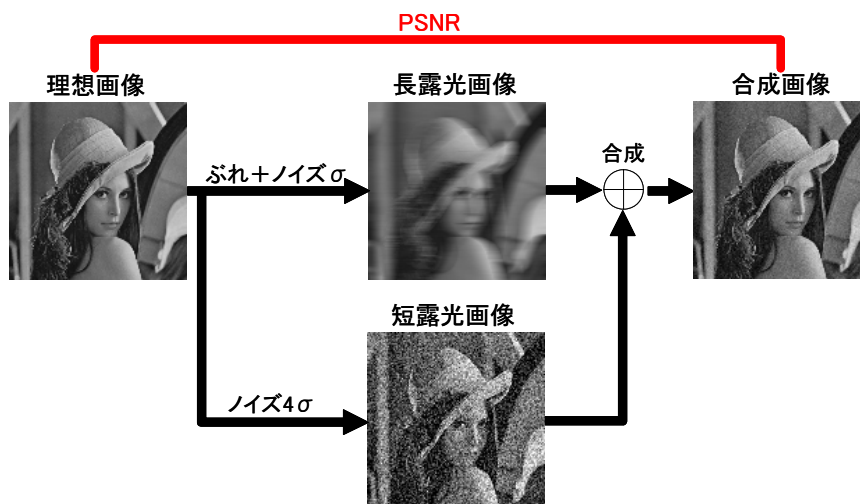


図 21 基本アルゴリズムの性能評価概要

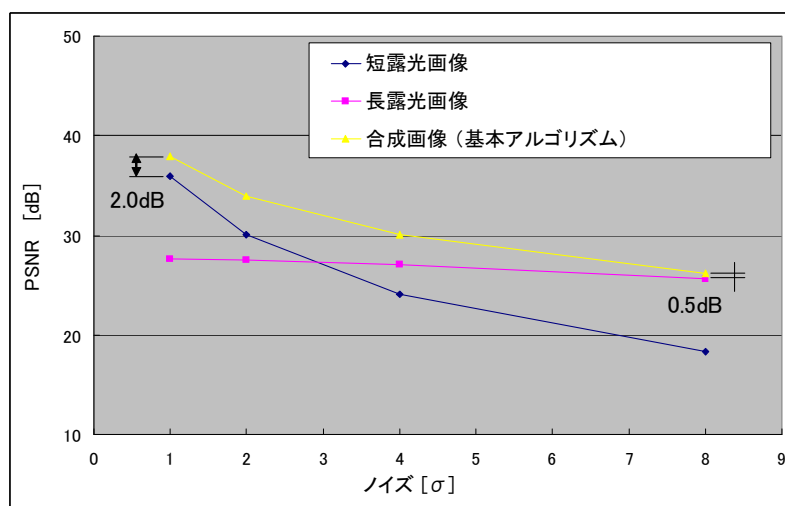


図 22 基本アルゴリズムの性能評価結果

3. 4. 2 ノイズにロバストな Visual Blur Map

前実験と同条件で、提案手法(ノイズにロバストな Visual Blur Map)による合成画像と理想画像との PSNR を算出した(図 23). 結果を図 24の赤線で示す. 提案手法により, $\sigma = 8$ (短露光画像は $\sigma = 32$)の高感度撮影条件で基本アルゴリズムより最大 0.5dB の画質改善が得られた.

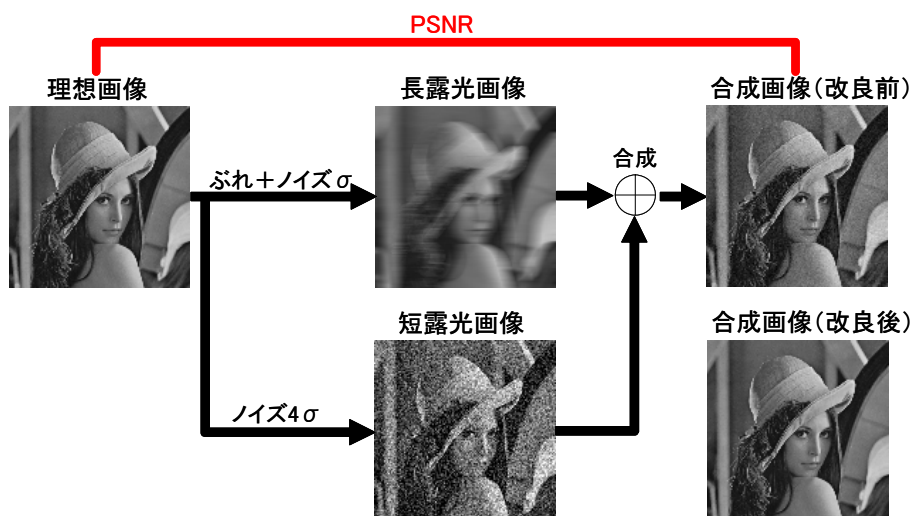


図 23 提案 Visual Blur Map の性能評価概要

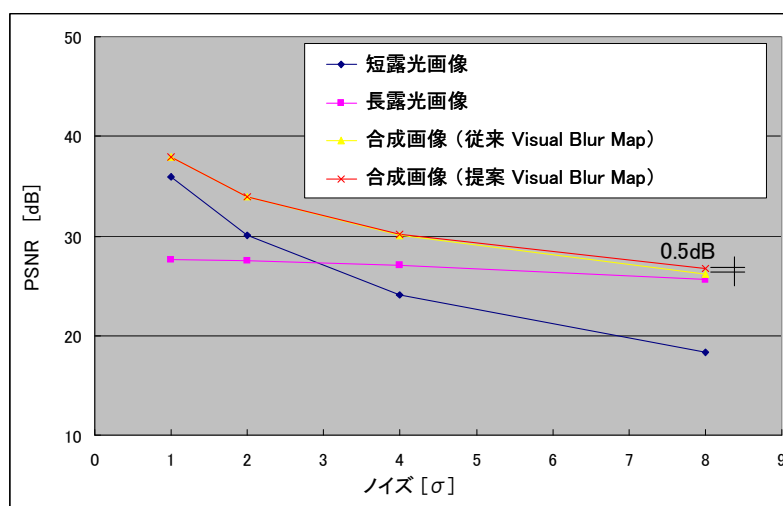


図 24 提案 Visual Blur Map の性能評価結果

3.4.3 エッジ形状を考慮したノイズ除去

前実験と同条件で、ノイズにロバストな Visual Blur Map を用いて生成した合成画像に提案手法のノイズ除去を適用した画像と理想画像との PSNR を算出した。結果を図 25の緑線で示す。提案手法により、従来手法より最大 3.7dB の画質改善が得られた。

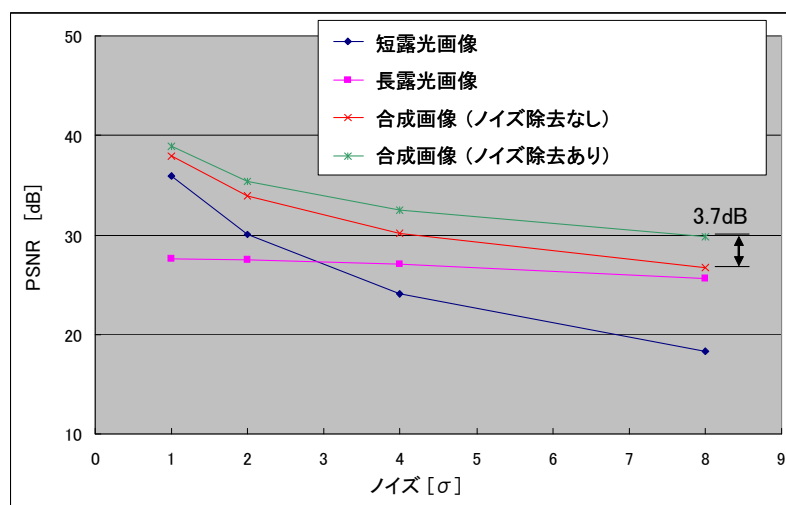


図 25 エッジ形状を考慮したノイズ除去の性能評価結果

3.4.4 ぶれを考慮した高精度位置合わせ

手ぶれおよびノイズのない理想テストチャートから擬似的に作成した長短露光画像を用いて、従来手法(ぶれの考慮なし)と提案手法(ぶれの考慮あり)による位置合わせを行った。擬似長露光画像は、理想画像に 20 種類の手ぶれを与え、擬似短露光画像は、理想画像に標準偏差 4 のガウスノイズを与えることにより生成した。結果を表 5 に示す。提案手法により従来手法より平均 0.3 画素の位置合わせ精度の向上が得られた。

表 5 ぶれを考慮した高精度位置合わせの性能評価結果

	従来手法	提案手法
位置合わせ誤差	0.304 pixel	0.004 pixel

3.5 まとめ

従来の画像重ね合わせ式(短露光画像合成式)手ぶれ補正では,手ぶれ低減効果の代償としてノイズが増大するという課題があった.これに対して,今回,長短露光画像を用いた新しい画像合成式手ぶれ補正技術を提案した.提案手法は,画像特徴とぶれ・ノイズに対する人間の知覚特性に基づく重み付けで長短露光画像を加加重算する基本アルゴリズムと下記 3 つの応用技術から成る.

- ①ノイズにロバストな Visual Blur Map
- ②エッジ形状を考慮したノイズ除去
- ③ぶれを考慮した高精度位置合わせ

これらの提案手法により,手ぶれとノイズを同時に低減できることをシミュレーション実験で確認した.

第4章 各方式の性能比較

前記 2 種類の提案手法と従来の重ね合わせ式について、実際の撮影条件(手ぶれ量, ノイズ)の変化を想定した補正性能比較シミュレーションを行った。本章では、その性能評価の内容と結果について述べる。

4.1 実験内容

下記 3 種類の手ぶれ補正手法について、補正結果画像の画質性能を評価した。入力画像は手ぶれ・ノイズのない理想画像から擬似的に生成した。具体的な入力画像の作成方法を下記に示す。

(a) 入力画像

①長短露光画像復元式 (Hand-blur Refiner)

長短露光画像を 1 枚ずつ用意する。長露光画像は理想画像にぶれ量 B の水平手ぶれと標準偏差 σ のガウスノイズを付加して生成し、短露光画像は理想画像にぶれ量 $B/4$ の水平手ぶれと標準偏差 4σ のガウスノイズを付加して生成する。

②長短露光画像合成式 (LS-Blender)

上記と同じ。

③短露光画像合成式 (重ね合わせ式)

短露光画像を 4 枚用意する。短露光画像は、理想画像にぶれ量 $B/4$ の水平手ぶれと、標準偏差 4σ のガウスノイズを付加して生成する。

理想画像は標準画像データベース SIDBA(Standard Image Data-Base)の中から, 図 26の 4 種類の画像(画像サイズは 512x512 画素)を用いた.

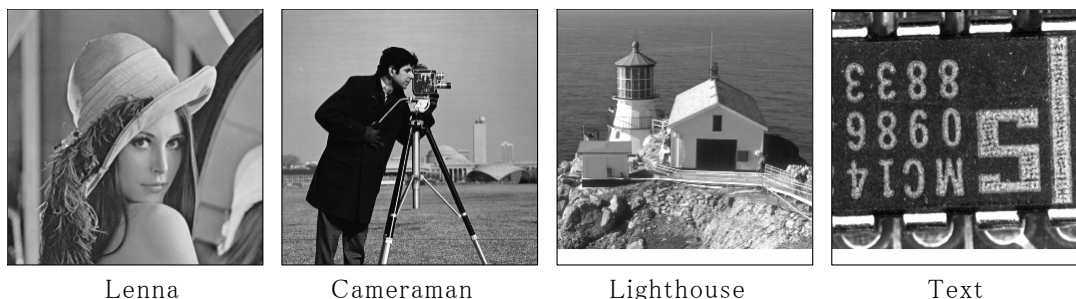


図 26 実験画像

上記入力画像を用いて, 下記 2 つの性能検証を行った.

(b) 検証項目

①手ぶれ量と補正性能

ノイズ量を一定($\sigma=4$)にし, 手ぶれ量 B を 4, 8, 16, 32 画素と変化させた場合の理想画像と補正画像の PSNR を測定する.

②ノイズ量と補正性能

手ぶれ量を一定($B=8$)にし, ノイズの標準偏差 σ を 1, 2, 4, 8 と変化させた場合の理想画像と補正画像の PSNR を測定する.

4.2 実験結果

4.2.1 手ぶれ量と補正性能

検証項目①の実験結果を図 27に示す. 横軸は手ぶれ量, 縦軸は PSNR を表す. PSNR が大きいほど, 画質が良好である(手ぶれとノイズが総合的に少ない)ことを示す. 図より, LS-Blender は全ての手ぶれ量で他の手法よりも良好な補正結果が得られているのがわかる. また, LS-Blender は手ぶれ量が増加するほど, 短露光画像との画質差がなくなる傾向が伺える. これは, 手ぶれにより長短露光画像間の画素差分値が拡大し, 短露光画像の合成比率が増加するためであると思われる. 一方, Hand-blur Refiner は手ぶれ量 B=8~16 画素付近で画質改善効果が高く, 逆に, 手ぶれ量 B=4 画素および B=32 画素のときは, 長露光画像よりも画質が低下していることがわかる.

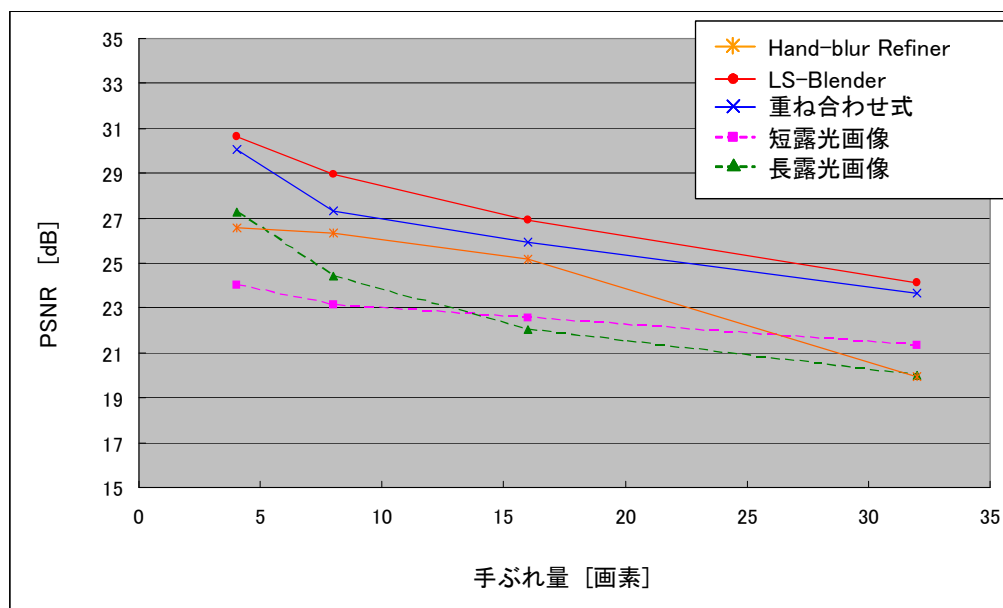


図 27 手ぶれ量とPSNR

Cameramanの補正結果画像一覧を図 28に示す. また, 手ぶれ量 $B=16$ 画素の場合の補正画像を図 29に拡大表示する. これらの画像より, 主観的にも, LS-Blender の画質が最も良好であることがわかる. 特に, LS-Blender と重ね合わせ式を比較すると, 手ぶれ低減効果はほぼ同等であるが, ノイズ低減効果は LS-Blender の方が優れていることが確認できる. Hand-blur Refiner については, 手ぶれ量 $B=16$ 画素では, 手ぶれ低減効果は他手法と同等であるが, リンギングが目立つため総合画質は他手法よりやや劣る(図 29). また, 手ぶれ量 $B=4$ 画素および $B=32$ 画素のときは, Hand-blur Refiner の PSNRは, 長露光画像よりも低いという結果であったが, 主観的には両者に大きな差は認められない.

手ぶれ量B [画素]	短露光画像	長露光画像	Hand-blur Refiner	LS-Blender	重ね合わせ式
4					
8					
16					
32					

図 28 手ぶれ量と補正画像例(ノイズ $\sigma = 4$)



理想画像



短露光画像



長露光画像



Hand-blur Refiner



LS-Blender



重ね合わせ式

図 29 補正結果画像例(手ぶれ $B=16$ 画素, ノイズ $\sigma=4$)

4. 2. 2 ノイズ量と補正性能

検証項目②の実験結果を図 30に示す. 横軸はノイズ量, 縦軸は PSNR を表す. 図より, 3 手法とも, ノイズが増加するほど長露光画像に対する画質改善効果が低下しているのがわかる. 特に Hand-blur Refiner と重ね合わせ式は, ノイズ量 $\sigma = 8$ では長露光画像よりも悪い結果となっている. これは, Hand-blur Refiner については, 基準となる短露光画像のノイズ量の増加により PSF の推定誤差が大きくなることが原因と思われる, 重ね合わせ式については, 原理的にノイズ量が短露光画像の $1/\sqrt{\text{合成枚数}} (=1/2)$ 倍になることが知られており, その原理通りの結果であるといえる.

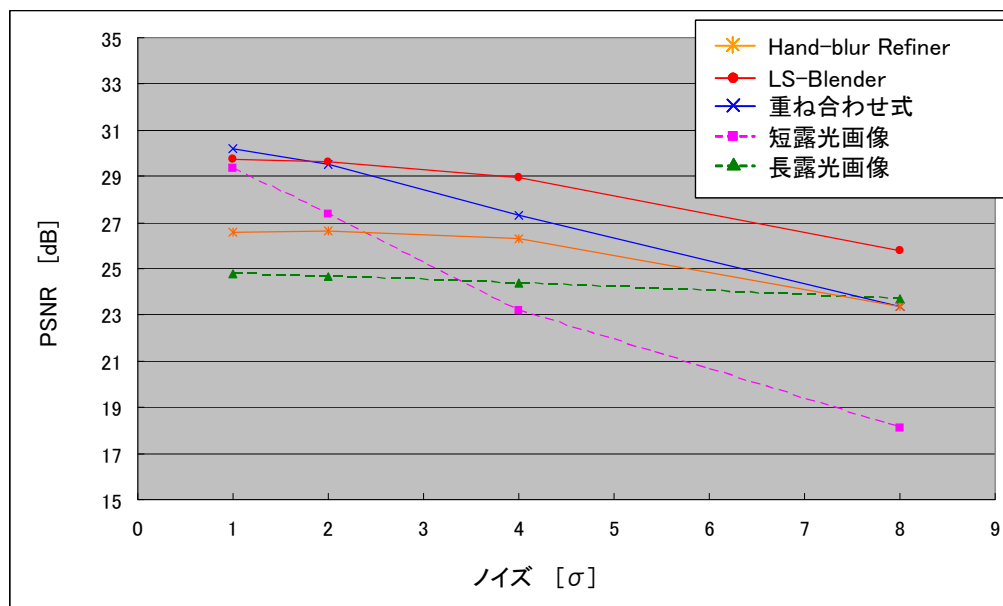


図 30 ノイズ量とPSNR

Cameramanの補正結果画像一覧を図 31に示す. また, ノイズ量 $\sigma=1$ の場合の補正画像を図 32に拡大表示する. LS-Blender と重ね合わせ式を比較すると, LS-Blender よりも重ね合わせ式の方がノイズの影響を大きく受けていることがわかる. また, LS-Blender では, 芝生の部分など振幅の小さいエッジ部の解像度が低下していることもわかる(図 32). $\sigma=1$ のとき, LS-Blender の PSNR が重ね合わせ式よりも小さいのはこれが原因であると推察する.

ノイズ σ	短露光画像	長露光画像	Hand-blur Refiner	LS-Blender	重ね合わせ式
1					
2					
4					
8					

図 31 ノイズ量と補正画像例(手ぶれ $B=8$ 画素)



理想画像

短露光画像



長露光画像

Hand-blur Refiner



LS-Blender

重ね合わせ式

図 32 補正結果画像例(手ぶれ $B=8$ 画素, ノイズ $\sigma=1$)

4.3 まとめ

Hand-blur Refiner, LS-Blender, 重ね合わせ式の 3 手法について, 手ぶれ量およびノイズ量に対する補正性能シミュレーションを行い, 下記の結果を得た.

(a) 提案手法の特性

- Hand-blur Refiner は, 8~16 画素程度の手ぶれに対して他手法と同等の手ぶれ低減効果が得られるが, リンギングが発生するため総合画質は他手法よりも劣る. また, ノイズ量が多い(長露光画像 $\sigma=8$, 短露光画像 $\sigma=32$) 場合や, 手ぶれ量が多い($B=32$ 画素) 場合は, 長露光画像よりも画質が低下することがある.
- LS-Blender は, 手ぶれとノイズがともに小さい場合(手ぶれ $B=4$ 画素, 長露光画像 $\sigma=1$, 短露光画像 $\sigma=4$) 以外は, 手ぶれ量, ノイズ量に依らず安定した画質改善効果が得られる.

(b) 提案手法の課題

- Hand-blur Refiner の第 1 の課題は, ノイズまたは手ぶれが大きい場合の補正性能向上である. 前者については, PSF 推定の際に, 短露光画像にノイズ除去を適用することが有効であると考えられる. 後者については, 手ぶれにより完全に失われた画像信号は原理的に復元できないため, 画像信号の特定の周波数成分が失われやすい等速運動による手ぶれの発生を低減することが重要である. そのためには, 例えば, 露光期間中にカメラの絞りやシャッターの開閉を制御し, 撮影時間と露光量のリニアリティを変化させることで, 等速運動の場合でも特定の周波数成分の消滅を低減するなどの対策が有効であると考えられる. 第 2 の課題は, リンギングのさらなる低減である. 今回, ぶれ画像のエッジ情報を用いてリンギング除去を行ったが, ぶれによりエッジ幅が拡大した分, リンギングが広く現れていると考えられる. 従って, 例えば, 撮影前のプレビュー画像のエッジ情報も合わせて利用するなどの対策が有効であると思われる.

- LS-Blender の課題は, 小振幅エッジの解像度補償である. ノイズ量 (撮影感度) に応じて, Visual Blur Map にさらに重み係数を適用することである程度の性能改善が期待できる. 根本的には, 被写体 (コンテンツ) 認識などを用いて, 小振幅エッジとノイズを正確に判別する技術が必要と思われる.

今回の実験では, 手ぶれ量とノイズ量に対する提案手法の補正性能を評価したが, 画像間の位置合わせ精度, 手ぶれ運動の種類 (等速, 加速など), 動被写体の有無という条件も補正性能に大きな影響を与えると思われる. これらの影響評価も今後の課題である.

第5章 デジタルカメラへの実装

第2章, 第3章で提案した2種類の新しい電子式手ぶれ補正手法をデジタルカメラの試作機に実装した. 本章では, 各手法の試作機への実装形態, 試作機での補正性能について述べる.

5.1 試作カメラ

5.1.1 長短露光画像復元式手ぶれ補正

第2章で提案した長短露光画像復元式手ぶれ補正 (Hand-blur Refiner) を図 33に示すデジタルカメラの試作機に実装した. カメラシステムのスペックとブロック図を表1と図 34にそれぞれ示す. 図 34の太線は画像データの流れを, 細線はそれ以外のデータの流れを表す. シャッターボタンが押されると, CCD を通して通常露光画像と短露光画像がフレームメモリに転送される. 次に, 動き検出回路で2画像間の位置ずれ量が計算され, その結果に応じて対応する小領域画像のペアが長短露光画像から4組抽出される. そしてそれらの小領域画像からDSPで通常露光画像のPSF, および逆フィルタ係数が計算され, 得られた係数がフィルタ回路に設定される. そしてCPUの指示により, 通常露光画像はフィルタ回路で画像復元およびリングング除去処理を施され, モニタ及びメモリカードに出力される.

本実装形態により, 通常のカメラシステムに対して, 3MBのフレームメモリ, DSP, 約100万ゲートの専用ハードウェア回路の追加で提案手法をコンパクトカメラに搭載できることを実証した.



図 33 試作カメラA (Hand-blur Refiner搭載)

表 6 試作カメラAの仕様

撮像素子	1/2.5" CCD, 800 万画素
レンズ	3 倍ズーム
CPU	100 MHz
DSP	90 MHz / 16bit 浮動小数演算
画像メモリ	32 MB (3MB for Hand-blur Refiner)

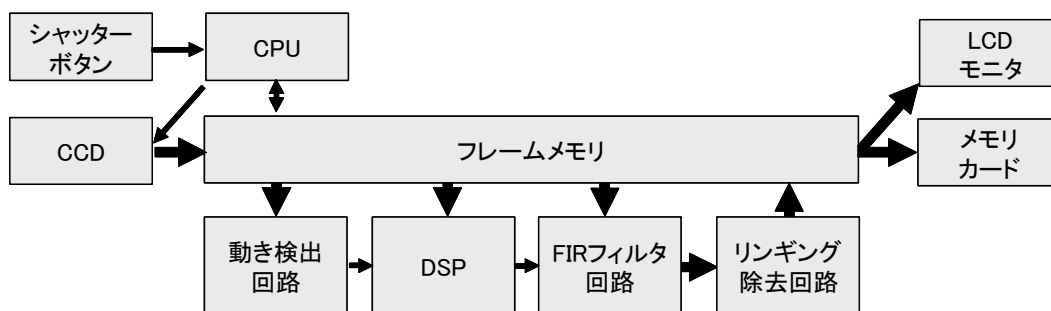


図 34 試作カメラAの処理ブロック図

5. 1. 2 長短露光画像合成式手ぶれ補正

同様に，第 3 章で提案した長短露光画像合成式手ぶれ補正 (LS-Blender) を前述とほぼ同じスペックのデジタルカメラの試作機に実装した (図 35)．表 7 と図 36 はそれぞれ試作カメラの基本スペックとシステムブロック図を示す．シャッターボタンが押されると，CCD を通して通常露光画像と短露光画像がフレームメモリに転送される．次に，動き検出回路で 2 画像間の位置ずれ量が計算され，その結果が画像合成回路にセットされる．そして CPU の指示により，画像合成回路で長短露光画像が画素合成された後，ノイズ除去回路で合成結果画像に対してノイズ除去処理が施され，結果画像がフレームメモリに出力される．そして，結果画像はデモザイキングおよび階調補正された後，モニタ及びメモリカードに出力される．

本実装形態により，通常のカメラシステムに対して，54MB のフレームメモリ，約 20 万ゲートの専用ハードウェア回路の追加で提案手法をコンパクトカメラに搭載できることを実証した．



図 35 試作カメラB (LS-Blender搭載)

表 7 試作カメラBの仕様

撮像素子	1/2.5" CCD, 1200 万画素
レンズ	3 倍ズーム
CPU	100 MHz
画像メモリ	64 MB (54MB for LS-Blender)

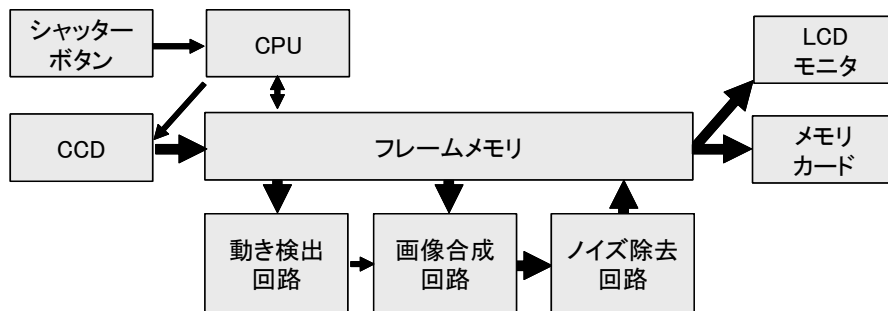


図 36 試作カメラBの処理ブロック図

5.2 性能評価

試作カメラを用いて性能評価を行った。評価項目は、手ぶれ、ノイズ、処理時間の3つである。各項目の評価内容と結果について述べる。

5.2.1 手ぶれ

(a) 実験方法

PSNR の値は、異なる時刻に撮影された画像間に適用する場合、外光の変化やカメラ姿勢(画像間の位置合わせ精度)に大きく影響される。そのため、実シーンでの手ぶれ補正の性能評価の指標としてPSNRは適当でない。そこで、手ぶれ補正の実性能を計測する独自の手法「MTF 面積法」を開発した(付録参照)。一般に、撮影時の手ぶれが大きいほど撮影画像の解像度は低下する(手ぶれと解像度には負の相関がある)。従って、MTF 面積法では、手ぶれ度合いの指標として、画像の解像度を表す MTF 曲線で囲まれた領域の面積値を用いた(図 37)。また、被写体としては、あらゆる方向の MTF を計測するため CZP(Circular Zone Plate)チャートを用いた。

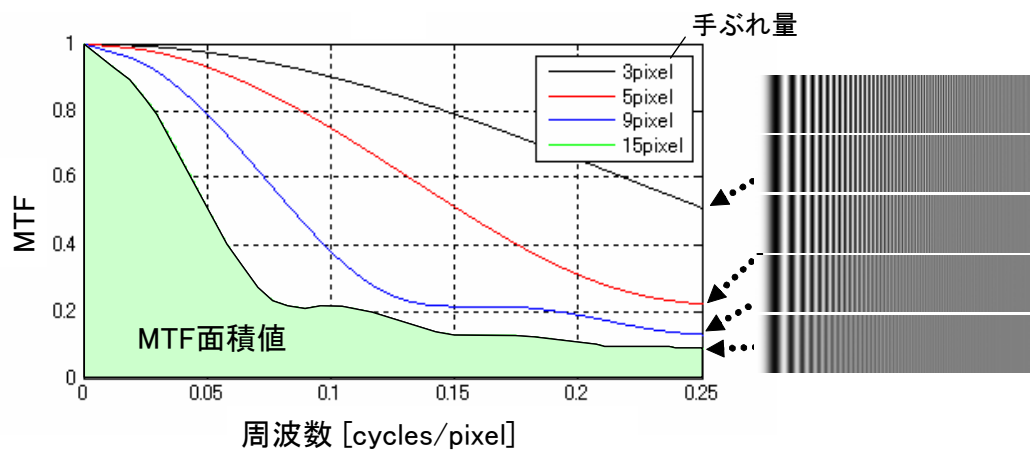


図 37 手ぶれ量とMTF

試作カメラで設定可能な露光時間ごとに、CZP チャートを 100 枚撮影 (被験者 10 名が 10 枚ずつ撮影) し、露光時間ごとに 100 枚の撮影画像から MTF 面積の平均値を算出する。得られたデータを図 38 のような露光時間—MTF 面積グラフにプロットし、2 次の近似曲線を導出する。この近似曲線を手ぶれ補正なしで撮影した場合と、手ぶれ補正ありで撮影した場合とでそれぞれ求め、これらの曲線から同じ MTF 面積に対応する手ぶれ画像の露光時間を T_{off} 、補正画像の露光時間を T_{on} として抽出する。そして、露光時間段数 N (EV) を式(22)より求める。

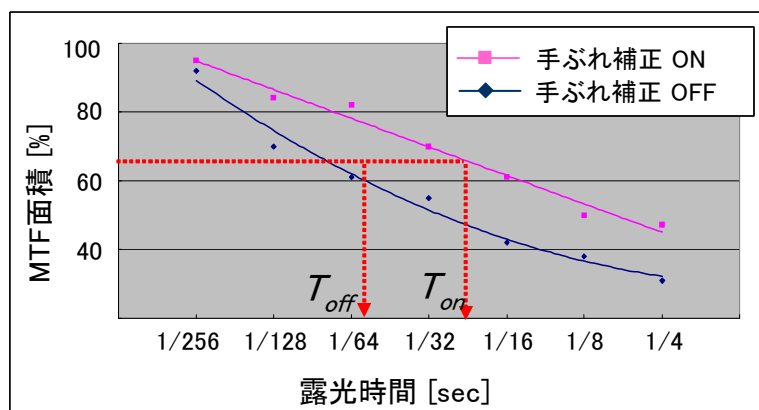


図 38 露光時間—MTF 面積グラフ

$$N = \log_2(T_{on}/T_{off}) \quad (22)$$

本指標は、手ぶれ補正により、通常より 2^N 倍長い露光時間でも、手ぶれなく撮影できることを意味する。

(b) 実験結果

試作カメラA (Hand-blur Refiner)でのMTF面積測定結果を図39に示す。曲線上の全点に対して式(22)を用いて補正段数を計算した結果、補正段数は0.7~1.4段であった。

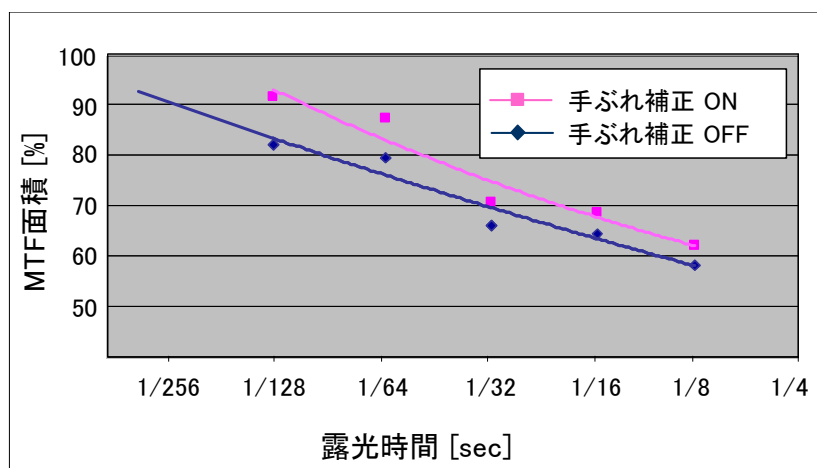


図 39 試作カメラAのMTF測定結果 (Hand-blur Refiner)

試作カメラB (LS-Blender)でのMTF面積測定結果を図40に示す。同様に、曲線上の全点に対して式(22)を用いて補正段数を計算した結果、補正段数は0.8~2.1段であった。

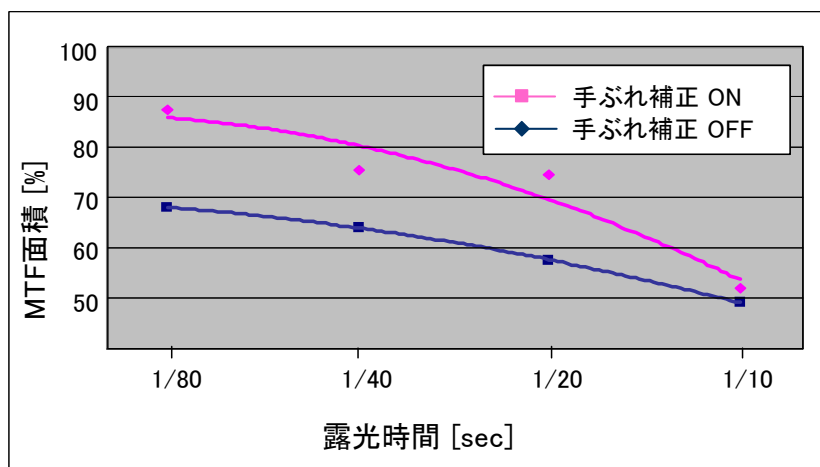


図 40 試作カメラBのMTF測定結果 (LS-Blender)

5.2.2 ノイズ

(a) 実験方法

画像のノイズを評価する値として SN 比 (SNR: Signal to Noise Ratio) を採用した. SNR は測定領域の輝度の平均値を S (信号), 輝度の標準偏差を N (ノイズ) とし, S と N の比で表した値であり, 式(23)で計算できる.

$$SNR = \frac{\bar{Y}}{\sigma_Y} \quad (23)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{x=0, y=0}^{H, V} Y(x, y)}{H \cdot V}, \quad \sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_{x=0, y=0}^{H, V} (Y(x, y) - \bar{Y})^2}{H \cdot V}}$$

H, V はそれぞれ測定領域の水平画素数, 垂直画素数, Y は輝度値を表す. 被写体は図 41のマクベスチャートを用い, 測定領域は各色パッチ領域とし, 全色パッチ領域の SNR の平均値を評価値とした.

下記条件でそれぞれ, マクベスチャートを 50 枚撮影 (被験者 5 名が各 10 枚撮影) し, SNR の平均値を測定した.

- ① 通常露光画像 (露光時間 1/15, ISO 感度 400, 試作機 B)
- ② 短露光画像 (露光時間 1/60, ISO 感度 1600, 試作機 B)
- ③ Hand-blur Refiner による補正画像 (①, ②の撮影条件, 試作機 A)
- ④ LS-Blender による補正画像 (①, ②の撮影条件試作機 B)

但し, 試作機 A と試作機 B はノイズレベルが異なるため, 通常撮影の SNR が同等になるように試作機 A の感度を微調整した後に本測定を実施した.



図 41 マクベスチャート

(b) 実験結果

結果を表 8に示す. Hand-blur Refiner による補正画像の SNR は, 長露光補正画像と同等であり, ほぼシミュレーション通りの性能が得られている. 一方, LS-Blender による補正画像の SNR は, 長露光画像の SNR よりも 8dB も低く, シミュレーション通りの性能が得られていない. これは, 詳細結果から色パッチ毎の SNR の分散が大きいことがわかっており, CCD の感度リニアリティが色毎に異なることが原因であると推察する.

表 8 SN比測定結果

	①長露光画像 (通常露光画像)	②短露光画像	③Hand-blur Refiner	④LS-Blender
SNR	28dB	6dB	27dB	20dB

5. 2. 3 処理時間

前述の手ぶれ性能評価実験の際に処理時間も同時に計測した。その結果、Hand-blur Refiner は 800 万画素の画像に対して平均 3.1 秒、最大 4.9 秒、LS-Blender は 1200 万画素の画像に対して平均 1.5 秒、最大 1.8 秒であった。なお、Hand-blur Refiner では、フィルタ処理に要する時間が全体の 50%以上を占めているため、処理時間は撮影画素数と手ぶれ量に比例する。一方、LS-Blender の処理時間は、撮影画素数にほぼ比例するが、手ぶれ量にはほとんど影響しない。

5. 2. 4 まとめ

以上の評価結果を表 9 にまとめる。

表 9 性能評価結果(まとめ)

	Hand-blur Refiner	LS-Blender
補正段数	0.7-1.4 段	0.8-2.1 段
SNR (対長露画像光)	27dB (-1dB)	20dB (-8dB)
処理時間	平均 3.1 秒 (最大 4.9 秒) (*1)	平均 1.5 秒 (最大 1.8 秒) (*2)

(*1)800 万画素 (*2)1200 万画素

5.3 補正画像サンプル

最後に、試作カメラによる補正画像例を紹介する。まず、Hand-blur Refiner と従来手法による補正画像例を図 42, 図 43に示す。補正画像の左上の画像は推定 PSF を示す。従来手法は MATLAB で deconvblind 関数として知られる繰り返し演算に基づく手法である。図より、両シーンとも水平方向の手ぶれが発生しているが、従来手法の推定 PSF は円形と誤推定しており、補正効果もほとんど得られていないことがわかる。一方、Hand-blur Refiner は、リングングも少なく良好な補正画像が得られている。

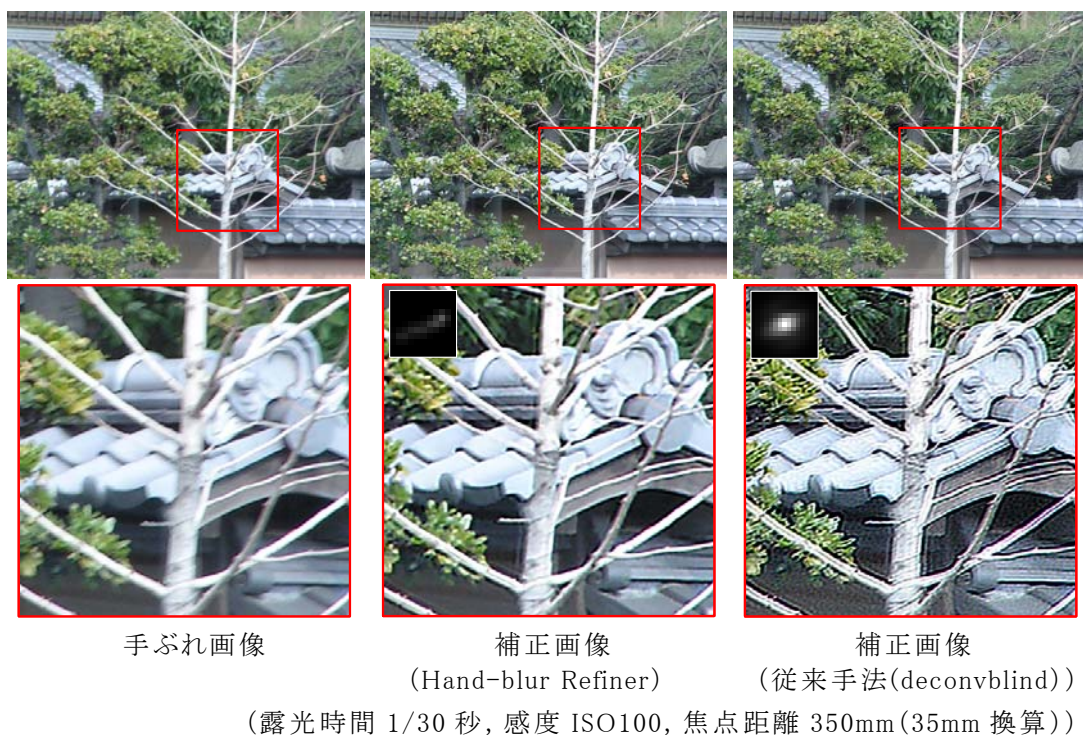


図 42 補正結果画像例1 (Hand-blur Refiner)



図 43 補正結果画像例2 (Hand-blur Refiner)

次に、LS-Blender と長短露光画像、および光学式 (イメージセンサシフト式) による補正画像例を図 44 に示す。ここでは、光学式手ぶれ補正搭載カメラに LS-Blender を実装し、そのカメラを 2 台並べて、1 台は光学式補正で撮影、もう 1 台は LS-Blender で撮影 (長短露光画像も同時に保存) するという方法で 2 台のシャッターを同時に押下することで、ほぼ同条件での撮影画像を取得できるように配慮した。

図より、LS-Blender は長露光画像に対して、ノイズの増加を抑制しながら、良好に手ぶれを低減できていることがわかる。光学式と比較しても遜色のない手ぶれ補正効果が得られている。



(a)長露光画像
(手ぶれ画像)

(b)短露光画像

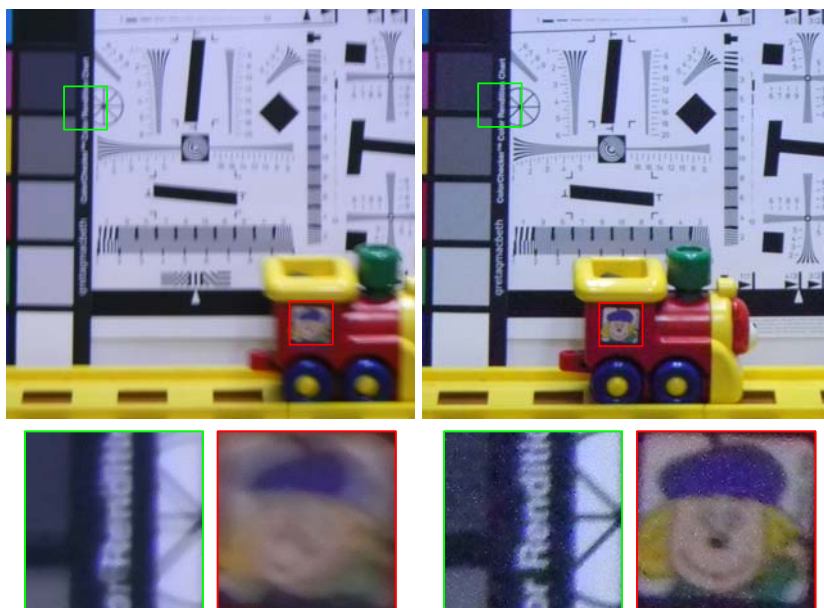


(c)補正画像
(LS-Blender)

(d)補正画像
(光学式)

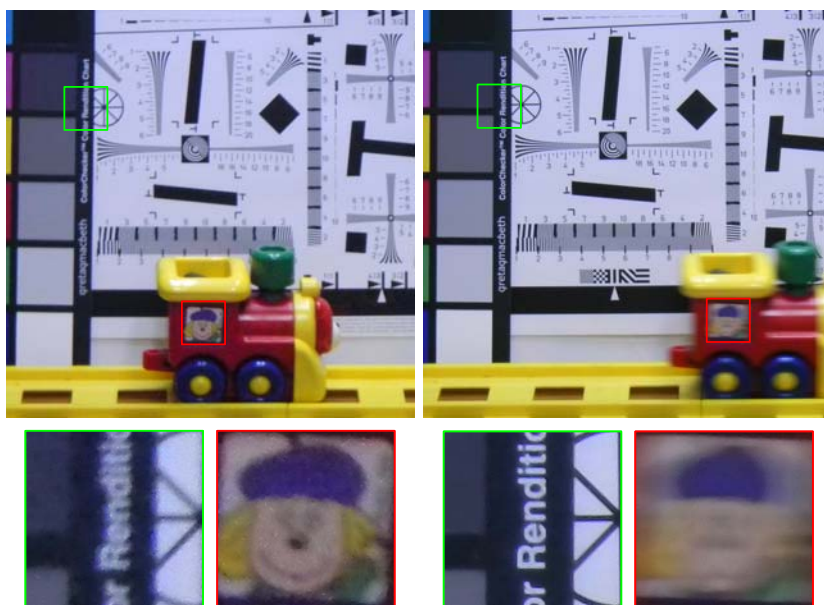
(露光時間 1/8 秒, 感度 ISO400, 焦点距離 35mm(35mm 換算))

図 44 補正結果画像例1 (LS-Blender)



(a)長露光画像

(b)短露光画像



(c)補正画像
(LS-Blender)

(d)補正画像
(光学式)

(露光時間 1/15 秒, 感度 ISO400, 焦点距離 105mm(35mm 換算))

図 45 補正結果画像例2(LS-Blender)

上記と同じ方法で動被写体を含むシーンを撮影したときの補正画像例を図 45に示す。これは、固定したテストチャートの前を電車が横切るシーンであり、テストチャート部と電車部を観察することで、それぞれ手ぶれ補正効果と動被写体ぶれ低減効果を確認できる。図より、LS-Blender は、光学式と比較して、固定被写体部の画質(手ぶれ低減効果)は不十分であるが、動被写体ぶれの低減効果は大きいことがわかる。動被写体部のノイズ低減は今後の課題である。

第6章 結論

従来の電子式静止画手ぶれ補正の主要課題を解決する新しい2つの方式「長短露光画像復元式」,「長短露光画像合成式」を提案し,シミュレーション実験によりその有効性を示した.さらに,両手法をそれぞれデジタルカメラに搭載し,実用化可能であることを実証した.

具体的には,以下の研究成果を得た.

- ① 下記3つの要素技術から成る「ジャイロセンサレスの長短露光画像復元式手ぶれ補正技術」を提案し,デジタルカメラへの搭載を実現した.本システムの性能は露光時間 $1/125 \sim 1/8$ において,補正段数は $0.7 \sim 1.4$ 段,処理時間は800万画素の画像で平均3秒であることを確認した.
 - (a)長短露光画像によるPSF推定技術
 - (b)画像復元フィルタの縮小化技術
 - (c)エッジ強度に基づくリングング除去技術
- ② 下記3つの要素技術から成る「長短露光画像合成式手ぶれ補正技術」を開発し,デジタルカメラへの搭載を実現した.本システムの性能は,補正段数は $0.8 \sim 2.1$ 段,処理時間は1200万画素の画像で平均1.5秒(最大1.8秒)であることを確認した.
 - (a)ノイズにロバストなVisual Blur Mapの生成技術
 - (b)エッジ形状を考慮したノイズ除去技術
 - (c)ぶれを考慮した高精度位置合わせ技術

上記提案方式により,デジタルカメラ向け電子式手ぶれ補正の性能向上

が実証された。しかし、それでもなお、本方式は光学式よりも補正性能が低い（補正段数は、光学式 1.5～3 段、電子式 2 段）。ただし、光学式に比べて電子式のカメラへの実用化は歴史が浅いため、まだまだ改善の余地がある。例えば、長短露光画像合成式については、長露光画像に基づき短露光画像の色レベルを補正することで、短露光画像の露光時間をさらに短縮化し、手ぶれ補正効果を向上できる。また、画像復元式については、画像重ね合わせ式と組み合わせることで性能改善できる。具体的には、複数の短露光画像を一括画像復元することで、各短露光画像の手ぶれで欠落した周波数成分を補い合いようなアルゴリズムが有効と思われる。

さらに、複数枚の画像を用いる手法の共通課題として、動被写体への対応がある。長短露光画像合成式については、被写体の形状が急激に変化する場合は、原理的に画像復元は困難であるが、被写体が剛体とみなせる場合は、背景と動被写体領域とをセグメンテーションし、各領域で異なる PSF を算出し、画像復元を行うことで手ぶれ、被写体ぶれとも低減可能であると考えられる。一方、長短露光画像合成式については、基本的には、画像間で対応領域が部分的にずれることと対応領域に欠損が発生することが問題であるため、画像間の局所的な位置合わせと自己相似性に基づく欠損補完を用いて擬似的に動被写体の存在しない長露光画像を作成した後に画像合成することで動被写体にも対応できると考える。

また、2 枚撮影の時間短縮も大きな課題である。長短露光画像合成式での対策は非常に難しいが、長短露光画像復元式については、短露光画像は PSF 推定のための参照画像であり、高解像度である必要はない。従って、例えば、シャッターボタンを押す直前の低解像度なプレビュー画像を短露光画像として利用することでシャッター押下後は通常通り 1 枚の撮影で済ませることができると考える。

手ぶれ補正機能が初めてデジタルカメラに搭載されてから 10 年以上が経つ。しかし、最新の機種でも、暗所シーンや高倍率ズーム時など撮影条件によっては依然、撮影画像に手ぶれが残る。今後、光学式も含め、手ぶれ補正のさらなる性能向上を目指して研究を推進し、ユーザが「簡単に」「失敗なく」「きれいな」写真を撮るための理想的なカメラの実現に貢献していきたい。

謝辞

本論文は、奈良先端科学技術大学院大学在学中に、研究発表、学会論文誌投稿した研究内容を論文としてまとめたものである。

同大学院大学の千原國宏教授には、執筆にあたり数々の有益なご教示と同時に、心暖まる激励をいただきましたことに深甚の謝意を表します。

横矢直和教授、加藤博一教授、眞鍋佳嗣教授(現千葉大学)には、ご多忙中にもかかわらず御助言、審査いただき感謝申し上げます。

さらに、ミーティングを通して、適切なお指導をいただきました池田聖助教、浦西友樹助教に感謝致します。

David Sell 教授には、懇切丁寧に英文指導をいただき感謝致します。

また、研究活動、事務手続きにおいて多大なご協力をいただきました像情報処理学講座秘書山田真絵氏に御礼申し上げます。

本研究は、筆者が三洋電機株式会社研究開発本部デジタル技術研究所にて行ったものをまとめたものであり、研究の遂行、ならびに論文をまとめる機会を与えてくださいました三洋電機株式会社研究開発本部の津田信哉本部長に厚く御礼申し上げます。

さらに、奈良先端科学技術大学院大学での研究活動を始める機会を与えていただき、その後も公私に渡りご指導、激励していただきましたデジタル技術研究所の村田治彦所長(現デジタルシステムカンパニー)に深謝致します。

また、社会人博士の先輩として適切なアドバイスをいただきましたプロジェクトシステム研究部の金山秀行部長(現デジタルシステムカンパニー)に感謝致します。

また、企業での業務と大学での研究活動の両立にご理解、ご配慮をいた

いただきました画像音響処理研究部の楢田海平部長(現大型蓄電事業部), 蚊野浩部長(現京都産業大学 教授), デジタルシステムカンパニーの春木俊宣副事業部長, 小林昭男部長, 森幸夫課長, 藤田日出人課長に感謝致します.

また, 研究活動はもとより論文の作成にあたり, 多大な協力いただきました福本晋平主任, 津田佳行社員, 横畠正大主任, 古山貫一主任, 藤川裕文主任, 上田正明主任, 隈俊毅主任をはじめ多数の方々に厚く御礼申し上げます.

最後に, 筆者の研究活動に対して暖かく見守ってくれた親愛なる家族に感謝します.

参考文献

- [1] 大嶋, 伊崎, 梶野, 五十嵐, 三谷; “撮像装置,” 特許登録番号 1589189 号.
- [2] 能登; “光学補正式手ぶれ補正技術の歴史と技術分類,” レンズ特別セミナー予稿集, オプトロニクス社, 2010.
- [3] M. Oshima, T. Hayashi, S. Fujioka, T. Inaji, H. Mitani, J. Kajino, K. Ikeda and K. Komoda; ”VHS Camcorder with Electronic Image Stabilizer,” IEEE Transaction on Consumer Electronics, Vol. 35, No. 4, pp. 749-758, 1989.
- [4] 甲斐; “コンパクトカメラの手ブレ補正機能の開発,” 日本写真学会誌 Vol. 58, pp. 428-431, 1995.
- [5] “手ブレ写真を防ぎます,” 日刊工業新聞, pp. 13, 1995.
- [6] “CAMEDIA C-2100 Ultra Zoom,” オリンパスニュースリリース, 2000.
- [7] 坂口, 山根, 林, 吉次, 山本; “手振れ補正ジャイロ搭載コンパクト DSC “DMC-FX1/5”,” 松下テクニカルジャーナル, Vol. 50(4), pp. 293-297, 2004.
- [8] 高野, 田中, 中村, 開発; “ α -7 DIGITAL の手ぶれ補正技術,” Konica Minolta Technology Report Vol. 2, pp. 15-18, 2005.
- [9] 新谷, 三谷, 真島, 柴谷, 糸原; “レンズユニットスイング方式手ぶれ補正ユニットの開発,” Konica Minolta Technology Report Vol. 3, 149-152, 2006.
- [10] 二宮, 嵩, 杉山; “MUSE 用動きベクトル検出装置,” テレビジョン学会誌 Vo. 39(10), pp. 25-30, 1985.
- [11] 石井, 森村; “画像の動きベクトル検出方式 検出精度の向上と演算量

- の低減,” 電子情報通信学会全国大会講演論文集 1989 号秋, pp. 6-57, 1889.
- [12] 森村, 魚森, 石井, 坂口, 北村; “純電子式画像揺れ補正システム,” テレビジョン学会技術報告, Vol. 15(7), pp. 43-48, 1991.
- [13] 畑中, 千葉; “手ぶれ補正装置,” 特許登録番号 4187704 号.
- [14] 平賀; “携帯電話における手ブレ補正, 画像処理技術,” 最新 携帯電話 技術全集, pp. 283-299, 技術情報協会, 2008.
- [15] 児玉; “撮像装置,” 特願平 8-63370.
- [16] 畑中, 飯田; “画像合成装置及び方法並びに撮像装置,” 特開 2008-060927.
- [17] 蚊野, 富永; “リングング除去装置およびリングング除去プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体,” 特願 2004-316648.
- [18] 畑中, 蚊野, 福本; “手ぶれ補正装置,” 特願 2005-98942.
- [19] H. Hatanaka, S. Fukumoto, H. Kano and H. Murata; “An Image Stabilization Technology for Digital Still Camera Based on Blind Deconvolution,” IEEE International Conference on Consumer Electronics, Jan. 13, 2009.
- [20] M. R. Banham and A. K. Katsaggelos; “Digital Image Restoration,” IEEE Signal Processing Magazine, pp. 24-41, 1997.
- [21] T. M. Cannon; “Blind Deconvolution of Spatially Invariant Image Blurs With Phase,” IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 24, pp. 58-63, 1976.
- [22] 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, No. 15, pp. 1512-1529, 1998.
- [23] M. Tanaka, K. Yoneji, and M. Okutomi; “Motion Blur Parameter Identification from a Linearly Blurred Image,” IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2007.
- [24] M. E. Moghaddam and M. Jamzad; “Linear Motion Blur Parameter Estimation in Noisy Images Using Fuzzy Sets and Power Spectrum,” EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 10-1,

- 2007.
- [25] G. R. Ayers and J. C. Dainty; “Iterative Blind Deconvolution Method and its Applications,” *Optics Letters*, vol. 13(7), pp. 547–549, July 1988.
 - [26] R. Fergus, B. Singh, A. Hertzmann, S. T. Roweis and W. T. Freeman; “Removing Camera Shake from a Single Photograph,” *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 25, No. 3, pp. 787–794, 2006.
 - [27] Q. Shan, J. Jia, A. Agarwala; “High-quality Motion Deblurring from a Single Image,” *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 27, No.3, Article 34, 2008.
 - [28] S. H. Lim, and D. A. Silverstein; “Method for Deblurring an Image,” *US Patent Application*, Pub. No. US2006/0187308 A1, Aug 24, 2006.
 - [29] L. Yuan, J. Sun, L. Quan, and H.-Y. Shum; “Image Deblurring with Blurred/Noisy Image Pairs,” *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 26, No. 3, Article 1, 2007.
 - [30] W. H. Richardson; “Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration,” *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 62, pp. 55–59, 1972.
 - [31] L. B. Lucy; “An Iterative Technique for the Rectification of Observed Distributions,” *Astronomical Journal*, Vol. 79(6), pp. 745–754, 1974.
 - [32] N. Wiener; “Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications,” *The MIT Press*, 1964.
 - [33] S. Chalkov, N. Meshalkina and C. Kim; “Post-Processing Algorithm for Reducing Ringing Artefacts. in Deblurred Images,” *The 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications*, 2008.
 - [34] H. Kano, H. Hatanaka, S. Fukumoto and H. Murata; “Motion Blur Estimation of Handheld Camera Using Regular- and Short-Exposure

- Image Pair,” IEEE International Conference on Image Processing, 2009.
- [35] C. Tomasi and R. Manduchi; “Bilateral Filtering for Gray and Color Images,” IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 839–846, Jan. 1998.
- [36] J. Portilla, V. Strela, M. J. Wainwright and E. P. Simoncelli; “Image Denoising using Scale Mixtures of Gaussians in the Wavelet Domain,” IEEE Transaction in Image Processing, Vol. 12, No. 11, pp. 1338–1351, Nov. 2003.
- [37] K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik and K. Egiazarian; “Image denoising by sparse 3D transform–domain collaborative filtering,” IEEE Transaction on Image Processing, Vol. 16, No. 8, pp. 2080–2095, Aug. 2007.
- [38] A. Buades, B. Coll and J. M. Morel; “A review of image denoising algorithms, with a new one,” Multiscale Modeling and Simulation (SIAM interdisciplinary journal), Vol. 4, No.2, pp. 490–530, 2005.
- [39] G. Spampinato, A. Castorina, A. Bruna and A. Capra; “Camera Shaking Effects Reduction by means of Still Sequence Stabilization and Spatio–Temporal Filtering,” IEEE International Conference on Consumer Electronics, Tech. Paper 4.3–2, 2009.

付録

A. MTF 面積法

撮影時の手ぶれが大きいほど、撮影画像の先鋭度は低下する。そこで、手ぶれの評価指標として画像の先鋭度を示す MTF (Modulation Transfer Function) を用いた手ぶれ補正性能評価手法「MTF 面積法」を開発した。MTF 面積は、MTF 曲線で囲まれた閉領域の面積である。これを用いることにより、手ぶれにより劣化したあらゆる周波数成分を総合的に計測できる。下記に MTF 面積と補正段数の算出手順をそれぞれ説明する。

A. 1 MTF 面積の算出手順

MTF 面積法では、任意方向の手ぶれによる画像劣化度を計測するため、CZP (Circular Zone Plate) チャート ((株)映像情報メディア学会で策定されているテストチャート) を被写体として用いる。

CZP チャートは図 46 (a) に示すような、同心円状に空間周波数が増加するチャートであり、中心から n 番目の環の半径を r_n 、中心環の半径を r_0 とすると、円環の方程式は式(24)で表される。

$$x^2 + y^2 = r_n^2 = nr_0^2 \quad (24)$$

このとき、 n 番目の環における空間周波数 f_n は、次式で表される。

$$f_n = r_n / r_0^2 \quad (25)$$

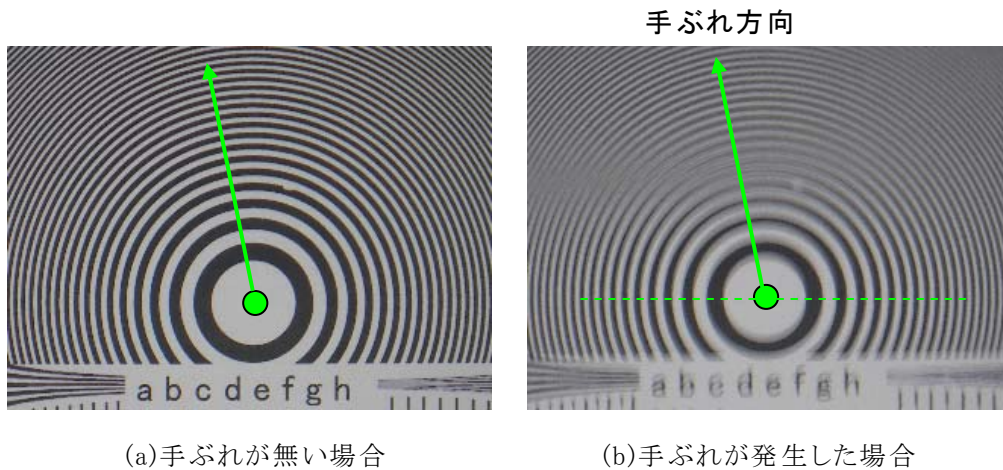


図 46 CZPチャート(実験用に一部を切り取り)

撮影時に手ぶれが発生し, 図 46(b)に示すような画像が撮影された場合, 手ぶれの無い画像と, 手ぶれ画像に対して, 円環の中心点から, 手ぶれ方向への線分の輝度値を測定すると, 図 47(a), (b)に示すような輝度曲線が得られる.

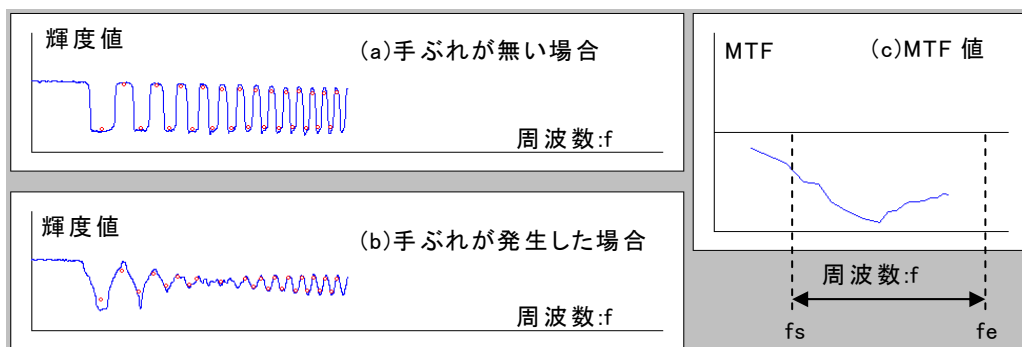


図 47 輝度曲線

このとき, 輝度曲線の極小, 極大値を求めることで, 画像の空間周波数毎

のコントラスト値を算出できる。手ぶれが無い場合には、中心点から距離が遠くなくても(空間周波数が高くなっても)輝度曲線のコントラストが低下しないが、手ぶれ画像では、手ぶれの大きさ、手ぶれの軌跡に合わせてコントラストが低下する。

算出された空間周波数 f に対する手ぶれの無い画像, 手ぶれ画像のコントラストをそれぞれ $C_s(f)$, $C_b(f)$ とすると, 手ぶれの無い画像と手ぶれ画像のコントラスト比 (MTF 値) $M(f)$ は式(26)で算出できる。また, 図 47(c)に空間周波数毎の MTF 値を示す。

$$M(f) = C_b(f) / C_s(f) \quad (26)$$

ここで, MTF 値は, 空間周波数毎に異なり, また, 手ぶれの大きさ, 手ぶれ軌跡によって異なる値となるため, 式(27)のように, 一定周波数区間の MTF 値を積算することで, 画像上のぶれ量の評価値 (MTF 面積値) B を定義した。

$$B = \sum_{f=f_s}^{f_e} M(f) \quad (27)$$

A. 2 補正段数の算出手順

上記で定義した MTF 面積値を用いて, 実際には以下の手順で補正段数を算出する。

- ① 三脚固定による静止画像の撮影
- ② 手持ちによる撮影 (ばらつきを低減するため 30 枚以上)
- ③ ①, ②をカメラの露光時間を変えて複数回行う。
- ④ 露光時間毎に, 各画像の MTF 面積値を算出し, 平均値を算出する。

- ⑤ 露光時間毎の MTF 面積値を露光時間－MTF 面積グラフにプロットし、近似曲線を作成する。(図 48に今回の性能評価における MTF 面積値を示す.)
- ⑥ 補正画像の MTF 値に対し、同じ MTF 面積値を持つ通常露光画像の露光時間を算出する。(図 48中の矢印)
- ⑦ 同じ MTF 値を持つ補正画像、通常露光画像の露光時間をそれぞれ T_s 、 T_b とすると、露光時間の比を用いて、式(28)により、通常露光画像の露光時間 T_b における補正段数 N を算出する。

$$N = \log_2(T_s/T_b) \quad (28)$$

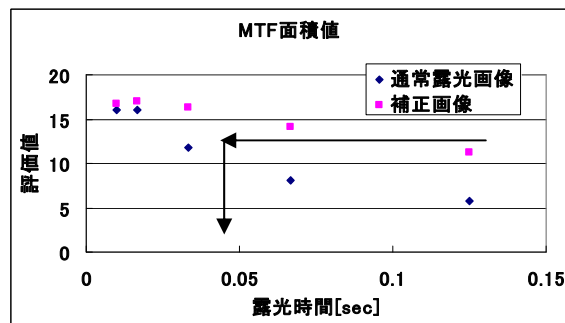


図 48 MTF面積値

研究業績

[研究論文]

Haruo Hatanaka, Shimpei Fukumoto, Haruhiko Murata, Hiroshi Kano and Kunihiro Chihara; “An Image Stabilization Technology for Digital Still Camera Based on Blind Deconvolution,” IEICE, Vol. E94-D, No. 5, 2011. (第 2, 5 章)

畑中晴雄, 手島昌之, 木原均, 東原稔, 安田昌司; “環状バーコードの高速読み取り手法,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 14, No. 4, pp. 194-199, 2001.

[解説論文]

畑中晴雄; “デジタルカメラの画像処理技術,” 月刊機能材料 Vol. 30 No. 11, pp. 52-60, Nov. 2010. (第 1, 2, 3 章)

畑中晴雄; “小型ビデオカメラにおけるデザイン形状と使いやすさについて,” KEC 情報, No. 210, pp. 29-34, Jul. 2009.

千葉直樹, 畑中晴雄, 飯田崇; “画像特徴に基づく高速・高精度なパノラマ画像合成ソフトウェアデジタルカメラの画像処理技術,” SANYO Technical Review Vol. 35 No. 1, Jun. 2003. (第 1 章)

[国際会議]

Yoshiyuki Tsuda, Haruo Hatanaka, Shimpei Fukumoto, Masaaki Ueda and Kunihiro Chihara; "Noise-Robust Image Deblurring by Blending Regular- And Short-Exposure Images," Electronic Imaging, Jan. 25, 2011. (第 2, 5 章)

Haruo Hatanaka, Shimpei Fukumoto, Yoshiyuki Tsuda and Yukio Mori; "An Image Stabilization Technology for Digital Still Cameras by Blending Long- And Short-Exposure Images," International Workshop on Advanced Image Technology, Jan.11, 2010. (第 3, 5 章)

Hiroshi Kano, Haruo Hatanaka, Shimpei Fukumoto and Haruhiko Murata; "Motion Blur Estimation of Handheld Camera Using Regular- and Short-Exposure Image Pair," IEEE International Conference on Image Processing, pp. 1317-1320, 2009. (第 2, 5 章)

Haruo Hatanaka, Shimpei Fukumoto, Hiroshi Kano and Haruhiko Murata; "An Image Stabilization Technology for Digital Still Camera Based on Blind Deconvolution," IEEE International Conference on Consumer Electronics, Jan. 13, 2009. (第 2, 5 章)

Yasuhiro Iijima, Haruo Hatanaka, Hideto Fujita, Yoshihiro Shimomura, and Tetsuo Katsuura; "A User-friendly Video Camera Based on Ergonomic Studies," IEEE International Conference on Consumer Electronics, Jan. 11, 2008.

Haruo Hatanaka, Masayuki Teshima, Hitoshi Kihara and Masashi Yasuda; "High-Speed Ring Bar Code Reading Method," Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Jul. 25, 2000.

[国内発表]

津田佳行, 畑中晴雄, 福本晋平, 千原國宏; “被写体の動きを考慮した長短露光画像の合成による画像ぶれ低減法,” Forum on Information Technology, Sep. 2010.

福本晋平, 畑中晴雄, 蚊野浩, 村田治彦; “デジタルカメラ向け画像復元式静止画手ぶれ補正技術,” 映像情報メディア学会 コンシューマエレクトロニクス研究会, Feb. 2009. (第 2, 5 章)

齋藤哲生, 飯嶋靖博, 畑中晴雄, 下村義弘, 勝浦哲夫; “デジタルカメラの最適ボタン配置に関する人間工学的研究,” 日本人間工学会関東支部大会, Feb. 2009.

徳永裕香, 飯嶋靖博, 畑中晴雄, 下村義弘, 勝浦哲夫; “ビデオカメラ操作ボタンの人間工学的評価,” デザイン学会秋季企画学会, Nov. 2008.

横畠正大, 奥智岐, 畑中晴雄, 坂地亮, 上田瞳, 岡本正義; “撮影場所を選ばない防水デジタルムービーカメラ Xacti「DMX-CA8 の開発」,” 映像情報メディア学会 コンシューマエレクトロニクス研究会, Oct. 2008. (第 1 章)

徳永裕香, 飯嶋靖博, 畑中晴雄, 藤田日出人, 下村義弘, 勝浦哲夫; “グリップ角度に焦点をあてたビデオカメラの最適な形状,” 日本人間工学会第 37 回関東支部大会, Nov. 2007.

畑中晴雄, 宮治伸, 中村吉伸, 松浦英文, 河田宏; “J リードタイプ IC 部品の位置認識アルゴリズム,” 電気関係学会 関西支部連合大会, Oct. 1994.

[工業所有権(特許)]

発明者	公開番号	発明の名称
畑中晴雄 他	特開 2010-279022	撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2010-263270	撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2010-252293	画像処理装置及び撮影装置
畑中晴雄 他	特開 2010-193476	撮像装置及び画像再生装置
畑中晴雄 他	特開 2010-193475	撮像装置及び画像再生装置
畑中晴雄 他	特開 2010-166558	撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2010-147926	撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2010-141657	撮像装置及び撮像方法
畑中晴雄 他	特開 2010-141653	画像処理装置及び撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2010-081002	撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2010-078635	ブレ補正装置及び撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2009-232227	撮像装置及び撮像方法
畑中晴雄 他	特開 2009-207118	撮像装置及びぶれ補正方法
畑中晴雄 他	特開 2009-177332	ぶれ検出装置,ぶれ補正装置及び撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2009-153046	ぶれ補正装置及び方法並びに撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2009-147727	撮像装置及び画像再生装置
畑中晴雄 他	特開 2009-135561	ぶれ検出装置,ぶれ補正装置及び方法
畑中晴雄 他	特開 2009-118434	ぶれ補正装置及び撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2009-088935	画像記録装置,画像補正装置及び撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2009-088933	画像記録装置,画像補正装置及び撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2008-271529	撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2008-271246	ぶれ補正装置及びぶれ補正方法ならびにぶれ補正装置を備えた電子機器
畑中晴雄 他	特開 2008-271245	ぶれ補正装置及びぶれ補正方法ならびにぶれ補正装置を備えた電子機器や,画像ファイル及び画像ファイル作成装置
畑中晴雄 他	特開 2008-270983	手ぶれ補正装置及び手ぶれ補正方法
畑中晴雄 他	特開 2008-236289	撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2008-219124	撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2008-147767	画像補正装置及び方法並びに電子機器
畑中晴雄 他	特開 2008-145523	ぶれ検出装置及び方法並びに撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2008-124787	手ぶれ補正装置及び方法並びに撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2008-124728	撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2008-123396	画像復元装置及び方法並びに撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2008-060927	画像合成装置及び方法並びに撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2008-060892	動き検出装置及び方法並びに撮像装置
畑中晴雄 他	特開 2007-274720	手ぶれ補正装置,手ぶれ補正方法および手ぶれ補正プ

			プログラムを記録した記録媒体
畑中晴雄	他	特開 2007-267184	撮像装置
畑中晴雄	他	特開 2007-266771	手ぶれ検出装置およびデジタルカメラ
畑中晴雄	他	特開 2007-088829	手ぶれ検出装置
畑中晴雄	他	特開 2007-088828	手ぶれ補正装置
畑中晴雄	他	特開 2007-049276	車載パノラマカメラシステム
畑中晴雄	他	特開 2006-333061	手ぶれ補正装置
畑中晴雄	他	特開 2006-279808	手ぶれ補正装置
畑中晴雄	他	特開 2006-279807	手ぶれ補正装置
畑中晴雄	他	特開 2006-237985	撮像装置
畑中晴雄	他	特開 2006-101485	手ぶれ補正装置および撮像機器
畑中晴雄	他	特開 2006-074261	手ぶれ補正装置
畑中晴雄	他	特開 2005-094614	手ぶれ補正装置, 手ぶれ補正方法および手ぶれ補正プログラムを記録した記録媒体
畑中晴雄	他	特開 2005-094493	意図的な移動撮像シーンの検出装置および検出方法ならびに意図的な移動撮像シーン検出プログラムを記録した記録媒体
畑中晴雄	他	特開 2003-087550	画像合成装置, 画像合成方法, 画像合成処理プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体
畑中晴雄	他	特開 2003-087549	画像合成装置, 画像合成方法, 画像合成処理プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体
畑中晴雄	他	特開 2002-133407	画像のあおり補正方法, 画像のあおり補正装置およびあおり補正用プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体
畑中晴雄	他	特開 2001-274973	顕微鏡画像合成装置, 顕微鏡画像合成方法, 顕微鏡画像合成処理プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体
畑中晴雄	他	特開 2001-272045	オープン調理器
畑中晴雄	他	特開 2001-256492	画像合成装置, 画像合成方法, 画像合成プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体
畑中晴雄	他	特開 2000-348161	刻印読取方法
畑中晴雄	他	特開 2000-348132	バーコード読取方法
畑中晴雄	他	特開平 10-222718	紙葉類識別装置及び紙葉類識別方法
畑中晴雄	他	特開平 07-311724	コンピュータ間通信システム