論 文

分布間距離を用いた Bilateral Filter のパラメータ推定法の一考察

 非会員
 真喜志泰希*
 正
 員
 山田
 親稔*

 非会員
 荻野
 正*
 非会員
 市川
 周一**

A study on Parameter Estimation of Bilateral Filter Using Distribution Distance

Taiki Makishi*, Non-member, Chikatoshi Yamada*, Member, Tadashi Ogino*, Non-member, Shuichi Ichikawa**, Non-member

(2014年4月17日受付, 2014年9月17日再受付)

A bilateral filter has high noise removal properties. However, estimation of suitable parameters using an input image is required to obtain a fine denoised image. A method of parameter estimation that uses the distribution distance has been proposed. This method enables optimal parameter estimation of a bilateral filter using the distribution distance and an assumed noise distribution. The parameters are estimated based on the differences between input and output images. However, input images with several small edges present difficulties. In this paper, we propose a method for estimation of parameters the standard deviation of the prior probability noise distribution. We also present the experimental results of the proposed method.

キーワード:バイラテラルフィルタ,ラプラス-ガウスフィルタ,分布間距離,パラメータ推定 **Keywords:** bilateral filter, laplacian-gaussian filter, distributin distance, parameter estimation

1. はじめに

エッジ保存性の高いノイズ除去フィルタとして Bilateral Filter⁽¹⁾⁽²⁾が,画像処理や CG など広範に利用されてい る^{(3)~(6)}。Bilateral Filter により良好な復元結果を得るには, 入力画像に応じて平滑化パラメータを調整する必要がある が,多くの場合には経験的に設定されている。現在までに, 入力画像毎に Bilateral Filter の平滑化パラメータを推定す る手法として,分布間距離を用いたパラメータ推定⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾が 提案されている。この手法は,まず初めに,入力画像から MAD 推定⁽¹⁰⁾を用いて事前仮定雑音分布を作成する。続い て,入力画像に Bilateral Filter を適用することにより入力 画像から復元画像を生成し,入力画像との差分をとり,残 差画像からヒストグラムを作成する。ここで,復元画像は, Bilateral Filter の平滑化パラメータを総当りで作成するた め,パラメータの変動の度合いによって,生成される画像 が異なる。最後に,残差画像より得られた雑音の分布と事

* 沖縄工業高等専門学校 〒 905-2192 沖縄県名護市辺野古 905 Okinawa National College of Technology 905, Henoko, Nago, Okinawa 905-2192, Japan
*** 豊橋技術科学大学 〒 441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1 Toyohashi University of Technology 1-1, Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan 前仮定雑音分布の分布間距離を求め、分布間距離が最小と なった際の Biltaral Filter の平滑化パラメータを Bilateral Filter の最適パラメータとする手法である。この手法は種々 の画像を用いた実験によりその有効性が示されているが. 入力画像によっては Bilateral Filter の最適パラメータと分 布間距離による推定結果がずれてしまうことがある。その 原因は、入力画像から MAD 推定法を用いて推定された事 前仮定雑音分布の標準偏差の推定精度にあると言われてい る®。そこで本稿では、事前仮定雑音分布の標準偏差の推 定精度を向上させるために,入力画像の原信号の影響を受 けにくい事前仮定雑音分布の標準偏差の推定方法を提案す る。具体的には、入力画像の原信号の影響を低減するため に,入力画像から画像の平坦部とエッジ部での原信号を仮 定し, 仮定したそれぞれの原信号と入力画像の差分から事 前仮定ノイズ分布の標準偏差の推定を行う。以下では、ま ず Bilateral Filter について説明をする。その後,先行研究 である分布間距離に基づいた Bilateral Filter のパラメータ 推定方法の概要について説明し、本稿における提案手法の 説明を行う。最後に、種々の画像を用いて従来手法の事前 仮定雑音分布の標準偏差の推定方法と提案手法における事 前仮定雑音分布の標準偏差の推定方法の推定精度の比較を 行う。

2. Bilateral Filter

Bilateral Filterは、Tomasi らにより提案された非線形平

滑化フィルタ⁽¹⁾であり,エッジ保存性の高い平滑化フィルタ として信号・画像処理の分野で広く利用されている⁽²⁾。入 力画素 (x,y) における画素値を I(x,y) とすると,バイラテ ラルフィルタの出力 $I_{BF}(x,y)$ は (1) 式で表される。

ここで, r はフィルタ半径を表す正の整数である。またフィルタ係数 W は, (2) 式で定義される。

(1)式は画像を平坦化する項(対空間)と輪郭の平坦化を抑 制する項(対輝度)により構成される。これにより、輝度 差の大きい画素は重みが抑制され、輪郭を保存したノイズ 除去が可能となる。 σ_r , σ_d は、それぞれ空間方向及び輝度 方向の平滑化パラメータであり、このパラメータを調整す ることにより平滑化の度合を調整することが可能である。

3. 分布間距離によるパラメータ推定

分布間距離による Bilateral Filter の平滑化パラメータ推 定は,入力画像と復元画像の差分から雑音分布を求め,さら に事前に仮定した雑音分布との分布間距離を求め、その分 布間距離の大きさにより行われる。分布間距離が最小の場 合に良好な雑音除去が行われたと考え,その際の平滑化パ ラメータの値を最適なパラメータ値とする。Fig.1に従来 手法の概略を示す。入力画像 I と復元画像 IBF の差分から 残差画像 Ires を生成する。生成した残差画像からヒストグ ラムを作成し正規化を行う。この正規化されたヒストグラ ムを雑音分布 H_{res} とする。続いて、入力画像を $k \times k$ の局 所領域へ分割を行い, MAD (Median Absolute Deviation) 推定法を用いて各局所領域毎に標準偏差の推定を行う。入 力画像の原信号の影響を少なくするために,各局所領域毎 に得られた標準偏差の中で最小の値を画像に付加されてい るノイズの標準偏差と仮定し、その標準偏差を用いて雑音 分布を生成し、この雑音分布を事前仮定雑音分 Hass とす る。ここでは入力画像に重畳しているノイズをガウス性雑 音と仮定しているため, H_{ass} は $N(0, \sigma^2)$ の正規分布となる。 生成した仮定雑音分布 Hass と雑音分布 Hres の2つの分布 の類似度を分布間距離を用いて算出することにより Bilateral Filter の平滑化パラメータの推定を行う流れとなってい る。先行研究のつのにおいては、分布間距離を求める手法と LT, Hellinger distance (HD) ⁽¹¹⁾, Jensen-Shannon divergence (JSD) (12), L1-norm (L_1) (12)(13), infinity norm (L_{∞}) (13), symmetric Kullback-Leibler divergence (SKLD) ⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を用



Fig. 1. An optimal parameter estimation of bilateral filter based on Distribution distance.

いて, Bilateral Filter のパラメータの推定を行っており,本 研究においても同分布間距離を使用する。

〈3・1〉 MAD 推定法 MAD 推定法は、データ群の中の中央値を求め、その値をデータ群の中のすべての値から 差をとる。差分をとった結果から更に中央値を求めること により、外れ値に対してロバストな推定方法となっている。 MAD 推定は (3) 式により定義される。

$$\hat{\sigma}_i = \text{med}\{|I_{i,j} - \text{med}\{I_{i,j}: 1 \le j \le k^2\}|: 1 \le j \le k^2\}$$

.....(3)

本稿では、正規分布の場合の標準偏差を求めるために(3)式 を 1.4826 倍とした。ここで、 1.4826 倍とした理由は、 入力 画像に重畳しているノイズをガウス性雑音と仮定している ため, 推定結果は $N(0, \sigma^2)$ の正規分布としなければならな いために,正規分布のMAD 推定結果である 1.4826 倍する 必要があるためである。画像内の詳細部では、標準偏差の 推定に原信号の影響が大きくなり, MAD により推定され た標準偏差は大きくなる。標準偏差 ĉの最小値を推定値と 行なっているのは、原信号の影響の少ない平坦部より雑音 の標準偏差推定を積極的に行っているためである。しかし, 詳細部の多い画像の推定を行う際には,原信号の影響を大き く受けてしまい推定精度が低下してしまう欠点がある。先 行研究においては、この推定精度の低下のが Bilateral Filter の最適パラメータのずれに影響を及ぼしていると考察され ている。実際に、標準画像データベース SIDBA (Standard Image Data-base) に登録されている種々の画像を入力画像 として、事前に標準偏差 $\sigma = 5$ および $\sigma = 10$ のガウス性ノ イズを付加し、その付加されたノイズの標準偏差を MAD 推定法により推定を行った結果を Table 1 に示す。入力画 像に用いた画像を Fig.2 に示す。ここで, MAD 推定法に よる推定結果は、付加したガウス性雑音の標準偏差である $\sigma = 5, \sigma = 10$ に近ければ近いほど良い結果となる。Table 1 より, Bridge, Barbara において, 付加した雑音に対して推 定結果が大きくずれてしまっていることがわかる。このず れの影響を受けることにより, Bilateral Filter のパラメータ 調整に影響が出る。



Table 1. Results of MAD estimation.

	Standard deviation		
	$\sigma = 5$	$\sigma = 10$	
Airplane	4.4	8.9	
Barbara	7.4	12.6	
Boat	4.4	8.9	
Bridge	12.6	14.8	
Cameraman	4.4	8.9	
Girl	5.2	9.6	
Lax	5.9	10.4	
Lenna	4.4	9.6	

4. 提案手法

本提案手法において,原信号による影響を低減するため に,MAD 推定を行う前に入力画像のエッジを抽出し,平 坦部とエッジ部における原信号を仮定し入力画像からその 差分を取ることにより,原信号による影響の低減を図った。







Fig. 4. Flowchart of proposed method.

エッジ抽出には, Laplacian-Gaussian Filter を用いた多値画 像輪郭抽出法⁽¹⁶⁾を用いた。本手法の流れを Fig.3 に示す。 多値化した Laplacian-Gaussian Filter を用いた多値画像輪 郭抽出法を用いた本提案手法の流れを Fig.4 に示す。この 手法は,まず入力画像に5 値へ多値化を行った Laplacian-Gaussian Filter を適用し,その後,近傍フィルタを用いて 補完処理,連結処理を行うことによりエッジを検出する手 法となっている。実際に標準偏差5 のガウス性雑音の重畳 した画像へ適用した結果を Fig.5 に示す。

〈4・1〉 Laplacian-Gaussian Filter Laplacian-Gaussian Filter は、画像に対しガウス関数による平滑化を行うことにより重畳している雑音を除去し、その後、Laplace Filter を適用し、出力結果のゼロクロッシング近傍を輪郭部として検出するフィルタである⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。Laplacian-Gaussian Filter を用いることで、雑音を強調することなく、画像の輪郭を抽出することができる。注目画素を中心とした、フィルタ半径 (2n + 1)型における Laplacian-Gaussian Filter は (4) 式で定義される。

$$F(i, j) = \frac{n}{4\pi\sigma^2} \left(1 - \frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2} \right) \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2} \right) \dots \dots (4)$$



Fig. 5. Results of edge extraction.

ここで, nは自然数, σ^2 は分散, mは定数である。Laplacian-Gaussian Filter はパラメータ σ によって輪郭抽出性能を調整することが可能である。 σ が小さい場合には細かい輪郭を検出し, σ が大きい場合には大まかな輪郭だけを検出することができるため, 画像に応じてパラメータ σ を調整することは有効であるが,本手法においてはこのパラメータ σ を固定値とし,次節以降の処理により輪郭の検出精度の向上を図っている。

〈4・2〉多値化 Laplacian-Gaussian Filter 適用後, フィルタの出力値に対して閾値を設定することにより多値 化処理を行う,本研究においては,正と負に二つずつ閾値を 設定することにより,フィルタの出力値を5値化している。 単一の閾値で二値化した場合,輪郭部とエッジ部の分離が困 難であり,またそのための閾値を厳密に設定する必要がある。 この問題に対処するために,閾値を増やすことにより多値化



Fig. 6. Output for five-valued Laplacian-Gaussian Filter



Fig. 7. Cross neighborhood filter

を行い,多値化した結果を処理するこによって,輪郭部とエッジ部の分離が容易になる。多値化した Laplacian-Gaussian Filter を実際の信号へ適用させた場合の出力を Fig.6 に示す。フィルタ出力値は4つの閾値 ($\delta1 \sim \delta4$) で5 領域に分割される。ここで,($\delta1 \sim \delta4$)はフィルタ出力値が高い領域から順に,I,II,III,IV,V とする。

〈4・3〉連結処理 ここでの連結処理とは、多値化処 理の結果に対し、Ⅱ・Ⅳの領域の中から輪郭の領域を検出 し、連結を行う処理のことである。連結処理を行うことで、 輪郭である可能性が高い場所のみ保存され、それ以外の雑 音や平坦部とみなされる場所は除去される。連結処理は次 のように行われる。

- Ⅰに連結したⅡをすべてⅠに置換する。
- Vに連結した Ⅳ をすべて V に置換する。
- 上記以外のⅡ・Ⅳ をすべてⅢ に置換する。

ここでは,連結している Ⅱ・Ⅳ を輪郭部とみなし,一方連結していない画素は雑音として処理をしている。連結の判定には,Fig.7 十字形 8 近傍フィルタを用いている。

〈4・4〉補間処理 連結処理の結果に基づき輪郭の補 完処理を行う。補完処理によって、輪郭線を構成している と推定される画素を検出し、輪郭の欠陥部分を補間できる。 ここで、輪郭線の欠落を補間する画素をⅣとする。

- 注目画素が Ⅲ で、8 近傍に I と V が少なくとも1 個 ずつ存在すれば、注目画素を Ⅳ に置換する。
- (2) 注目画素が Ⅲ で、4 近傍に I または V が存在した場合、その画素方向に注目画素から6 画素まで調べ、次



の2条件のいずれかを満たした場合,(3)を実行する。 [条件1] 1個でも6画素内にⅢが存在する。

[条件2] 6 画素とも I または V のみである。

(3) 注目画素が III で、8 近傍に IV と I 画素、または IV と V の組み合わせがある場合、注目画素を IV に置換する。

ここで,補間処理の判定には,Fig.8の4近傍フィルタと8 近傍フィルタを用いた。

5. 実 験

Fig.2 で示した SIDBA に登録されている種々の画像に 対し標準偏差 $\sigma = 5, \sigma = 10$ のガウス性雑音を重畳し,先 行研究の事前仮定雑音分布の推定結果と提案手法の推定結 果の比較を行った。まず初めに、局所領域の窓枠 k の大き さを決定するために, kの大きさを 10~50 の間で変化さ せ,ガウス性雑音の重畳された各画像に対して推定を行い, 真値との差の二乗を求めた。k を変化させた際の推定精度 の変化を Fig.9 に示す。ここで、図中の σ_n は提案手法に よる標準偏差の推定値である。Fig.9より、本提案手法の 最適なkの大きさはk = 24となった。しかし、実際には、 入力画像毎に最適な k の大きさは異なるため,入力画像に 応じてkを変化させる手法の追加が必要であると考えられ る。実際に k = 24 として推定を行った結果を Table 2 に示 す。Table 2 から、先行研究では推定精度が低下していた Barbara, Bridge において推定精度が向上していることが わかる。また、その他の画像においては、先行研究の手法 と同程度の精度で推定が行われていることがわかる。結果 より、本提案手法により画像の原信号の影響を受けにくく なっているため、本提案手法は分布間距離による Bilateral Filter のパラメータ推定において有効であると言える。し かし、本手法は256×256の画像から推定を行うまでに、約 2時間程度の時間を要するため、プログラムの最適化、最 適パラメータの探索手法の検討等が必要である。

6. まとめ

本稿では、分布間距離による Billateral Filter の最適パラ メータ推定を行う際に用いられる事前仮定分布の標準偏差 の推定精度の向上を目的としてパラメータ推定方を提案し た。推定精度の向上のために、推定精度低下の原因となる原



Fig. 9. Relationships between block size *k* and average estimation error $(\sigma_n - \sigma)^2$ for 8 images with $\sigma = 5, 10$.

Table 2. Experimental results.

	Standard deviation				
	$\sigma = 5$		$\sigma = 10$		
	prop.	trad.	prop.	trad.	
Airplane	4.4	4.4	7.4	8.9	
Barbara	4.4	7.4	8.9	12.6	
Boat	4.4	4.4	7.4	8.9	
Bridge	7.4	12.6	11.9	14.8	
Cameraman	4.4	4.4	7.4	8.9	
Girl	4.4	5.2	8.9	9.6	
Lax	5.9	5.9	8.9	10.4	
Lenna	4.4	4.4	8.9	9.6	

信号の影響を受けにくくする必要があったため,Laplacian-Gaussian Filter を用いた多値画像輪郭抽出法を導入し,入 力画像における原信号を仮定した後に入力画像と仮定した 原信号の差をとることで原信号による影響の低減を行った。 種々の画像を用いた実験により,本提案手法と先行研究に おける推定手法の推定結果を比較することにより,細かな エッジの多い画像において本提案手法の有効性を確認した。 しかし,1枚の画像の処理に要する時間が約2時間とかな りの時間を要するため,高速化を行う必要がある。また, 入力画像毎に局所領域の大きさの検定方法の検討が必要で ある。

謝 辞

本研究は,豊橋技術科学大学高専連携教育研究プロジェク ト及び日本学術振興会の科学研究費補助金(No.40412902) の支援を受けて行われた。

文 献

- C. Tomasi and R. Manduchi: "Bilateral filtering for gray and color images", Proc. 1998 IEEE Int. Conf. Computer Vision, pp.839–846 (1998)
- (2) 浦浜喜一:「第8回画像の本質を引き出す:バイラテラルフィルタ によるノイズ除去とイラスト風画像の生成」,映像情報メディア学会 誌, Vol.62, No.8, pp.1268–1273 (2008)
- (3) 常 セン・浦浜喜一:「ロバストクロスパイラテラルフィルタによるインパルス雑音除去」,信学論 (A), Vol.J92-A, No.11, pp.1216-1225 (2009)
- (4) 常 セン・浦浜喜一:「重み付きウィンドウバイラテラルフィルタによる混合雑音除去」,信学論 (A), Vol.J93-A, No.6, pp.430–432 (2010)
- (5) 浦浜喜一・井上光平:「バイラテラルフィルタのエッジ強調性」,信学
 論 (A), Vol.J86-A, No.3, pp.326–328 (2003)

- (6) 井上光平・杜 偉薇・浦浜喜一:「帯域バイラテラルフィルタによ る画像のエッジ強調平滑化 |, 信学論 (A), Vol.J88-A, No.5, pp.687-690 (2005)
- (7) 橋井勇人・田中 豪・末竹規哲:「Hellinger 距離に基づいた ε-フィ ルタのパラメータ調整」,信学技報, SIS2009-54, pp.49-54 (2008)
- (8) 末竹規哲・田中 豪・橋井勇人・内野英治: 「分布間距離に基づい たバイラテラルフィルタの最適パラメータの推定」,信学論 (A), Vol J94-A, No.4, pp.285-292 (2011)
- (9) 橋井勇人・田中 豪・末竹規哲・内野英治:「分布間距離を用いたバ イラテラルフィルタのパラメータ調整」,信学技報, SIS, スマートイ ンフォメディアシステム, Vol.110, No.189, pp.63-66 (2010)
- (10) J. Astola and P. Kuosmanen: "Fundamentals of nonlinear Digital Filtering", CRC Press, Boca Raton, FL (1997)
- (11) D. Pollard: "A. User's Guide to Measure Theoretic Probability", Cambridge Unversity Press, Cambridge, U.K (2003)
- Y. Qiao and N. Minematsu: "The general from divergence invariant to trans-(12)formations", IEICE Tehnical Report, SP2008-51 (2008)
- (13) G.H. Golub and C.F. Van Loan: "Matrix Computations", The Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD (1996)
- (14) S. Kullback and R.A. Leibler: "On information and sufficiency, Annals of mathematical Statistics", Vol.22, No.1, pp.79-86 (1951)
- (15) S. Kullback: "Information Theory and Statistics", Dover Publications, New York (1968)
- (16) 山野公太郎・範 公可:「可変閾値のラプラス-ガウスフィルタを用 いた多値画像輪郭抽出法」,信学論, pp.49-52 (2005)
- (17) 村中徳明・工藤新也・芦田高則・徳丸正孝:「ラプラス-ガウスフィ ルタを用いた多値画像輪郭抽出法 |, 信学論 (D-II), Vol.J85-D-II, No.10, pp.1503-1512 (2002)



真喜志 泰 希 (非会員) 2013 年沖縄工業高等専門学校情報通信 システム工学科卒業。同年同高等専門学校専攻科 創造システム工学専攻電子通信システム工学コー ス入学。現在,在学中。



山 田 親 稔 (正員) 2000 年琉球大学大学院理工学研究科博 士前期課程修了。2004年同大学大学院博士後期 課程単位取得満期修了。同年拓殖大学北海道短期 大学専任講師。2007年沖縄工業高等専門学校情 報通信システム工学科助教。2009年同高等専門 学校情報通信システム工学科准教授。2014年よ り, ビクトリア大学(カナダ)客員研究員。現在 に至る。博士(工学)。形式的設計検証,リコン

フィキャラフルシステムの研究・教育に従事。IEEE,電子情報通信学 会, 情報処理学会各会員。



正 (非会員) 1988 年東京大学大学院電気工学専門 課程博士課程修了。工学博士。同年三菱電機情報 電子研究所。2008年スタンフォード大学客員研 究員。2009 年三菱電機インフォメーションテク ノロジー。2013年より、沖縄工業高等専門学校 情報通信システム工学科 教授。現在に至る。クラ ウドコンピューティング, M2M 等先端情報技術 の研究・開発・事業化に従事。情報処理学会,電

子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員。



市川周一(非会員) 1985年東京大学理学部卒業。1987年 同大学大学院理学系研究科修士課程修了。1987年 新技術事業団 創造科学推進事業(ERATO)後藤 磁束量子情報プロジェクト研究員。1991 年三菱 電機(株)LSI研究所,システムLSI開発研究所 勤務。1994年名古屋大学工学部助手。1997年豊 橋技術科学大学工学部知識情報工学系講師。2001 年同大学工学部知識情報工学系助教授。2007年

同大学工学部知識情報工学系准教授。2010年同大学大学院工学系研究 科准教授。2011年沼津工業高等専門学校制御情報工学科教授。2012 年より、豊橋技術科学大学大学院工学系研究科教授。現在に至る。理 学博士。並列計算機,並列処理,および専用計算システムアーキテク チャの研究に従事。IEEE (senior member),電子情報通信学会(シニ ア会員), ACM, 情報処理学会各会員。