

# ノイズ推定法と分布間距離による Bilateral Filter の最適パラメータ推定の検討 A Study on Estimation Parameter of Bilateral Filter Using Distribution Distance and Noise Estimation

真喜志 泰希†  
Taiki Makishi

荻野 正†  
Tadashi Ogino

山田 親稔†  
Chikatoshi Yamada

市川 周一‡  
Shuichi Ichikawa

## 1. はじめに

携帯電話やスマートフォンへの高解像度カメラの搭載や、ネットワークの高速化、大量データの高速処理技術の進歩などにより、高解像度の画像が大量に流通している。企業においても製品画像の提供などにとどまらず、製品設計から保守のフェーズにいたるまで高解像度画像を用いることで、顧客とのコミュニケーションをさらに密に行うことでビジネスの差別化を図ることが可能となる。高解像度画像を高精度に表示することが可能となったため、画像のノイズを効率的に除去する機能が従来以上に必要になってきている。

現在、エッジ保存性の高いノイズ除去フィルタとして Bilateral Filter[1] が、画像処理や CG など広範に利用されている [2]。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ため、より効率的なパラメータの調整が必要とされている。平滑化パラメータの推定手法として、分布間距離を用いたパラメータ推定 [3] が提案されている。分布間距離を用いたパラメータ推定法は、入力画像と復元画像の差分として得られた雑音の分布と事前に仮定した雑音分布との分布間距離により、Bilateral Filter の平滑化パラメータの調整を行う。分布間距離が最小となる場合の平滑化パラメータの値を 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、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 [3]。

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 2 章で Bilateral Filter について説明をする。その後、3 章で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、4 章で本稿における提案手法の説明を行う。最後に、5 章で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。入力画素  $(x, y)$  における画素値を  $I(x, y)$  とすると、Bilateral Filter の出力  $I_{BF}(x, y)$  は式 (1) で表される。

$$I_{BF}(x, y) = \frac{\sum_{x=-r}^r \sum_{y=-r}^r f(i+x, j+y) W(x+i, y+j)}{\sum_{x=-r}^r \sum_{y=-r}^r W(x+i, y+j)} \quad (1)$$

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、

$$W(x+i, y+j) = \exp\left(-\frac{i^2+j^2}{2\sigma_r^2}\right) \exp\left(-\frac{[I(x, y) - I(x+i, y+j)]^2}{2\sigma_d^2}\right)$$

で定義される。フィルタ係数  $W$  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。 $\sigma_r$ ,  $\sigma_d$  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い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。図 1 に従来手法の概略を示す。

入力画像  $I$  と復元画像  $I_{BF}$  の差分から残差画像  $I_{res}$  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

†沖縄工業高等専門学校, Okinawa National College of Tech.

‡豊橋技術科学大学, Toyohashi University of Technology

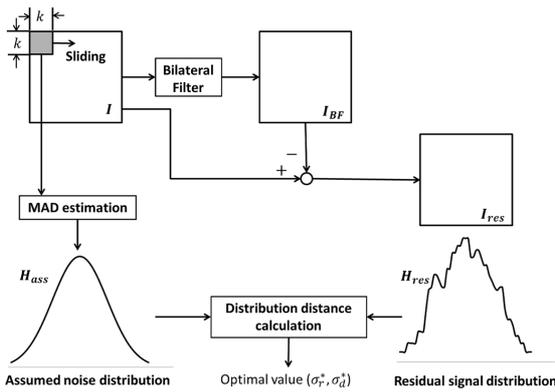


図1: 分布間距離による Bilateral Filter の最適パラメータ推定の概略図

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  $H_{ass}$  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  $H_{ass}$  と雑音分布  $H_{res}$  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。先行研究においては、Hellinger distance[4] を用いて、Bilateral Filter のパラメータの推定を行っている。

### 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 推定は式(2)により定義される。

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

本稿では、正規分布の場合の標準偏差を求めるために式(2)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  $\hat{\sigma}$  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えられている。

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 MAD 推定法による標準偏差の推定を行った結果を表1に示す。入力画像に用いた画像を図2に示す。



(a) Airplane

(b) Barbara

(c) Boat



(d) Bridge

(e) Camera-man

(f) Girl



(g) Lax

(h) Lenna

図2: 入力画像

表1: MAD 推定法による推定結果

	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

表1より、Bridge, Barbara において、付加した雑音に対して推定結果が最大で約2倍程ずれてしまっている。

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。

#### 4. 提案手法

本提案手法では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で、原信号による影響の低減を図った。提案手法の流れを図3に示す。

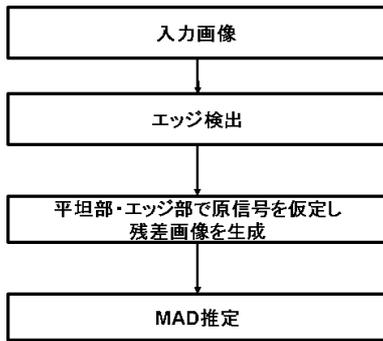


図3: 提案手法のフローチャート

ここで、エッジ検出には、Laplacian-Gaussian Filterを用いた多値画像輪郭抽出法 [5] を用いた。

##### 4.1 Laplacian-Gaussian Filter による輪郭抽出法

Laplacian-Gaussian Filterを用いた多値画像輪郭抽出法は、通常のLaplacian Filterなどのエッジ検出フィルタよりもノイズの影響を受けにくく、細かなエッジも抽出することが可能なフィルタとなっている。本手法の流れを図4に示す。

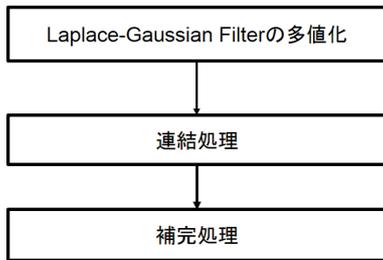


図4: Laplacian-Gaussian Filter による輪郭抽出法

まず、入力画像に多値化したLaplacian-Gaussian Filterを適用することにより、重畳しているノイズ除去と多値画像の生成を行う。その後、生成された多値画像に対して、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細かなエッジまで抽出することを可能としたエッジ検出法となっている。

##### 4.1.1 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 [5]。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は式(3)で定義される。

$$F(i, j) = \frac{k}{4\pi\sigma^2} \left(1 - \frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

ここで、 $n$ は自然数、 $\sigma^2$ は分散、 $k$ は定数である。Laplacian-Gaussian Filterはパラメータ $\sigma$ によって輪郭抽出性能を調整することが可能である。 $\sigma$ が小さい場合には細かい輪郭を検出し、 $\sigma$ 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 $\sigma$ 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 $\sigma$ 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を行い、多値化した結果を処理することによって、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図5に示す。

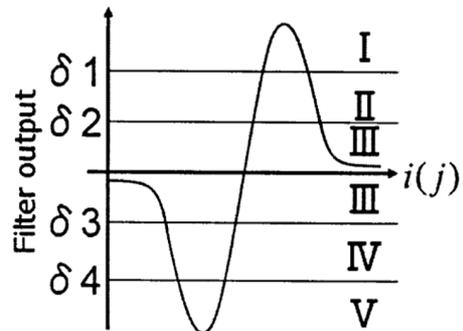


図5: 5値化したLaplacian-Gaussian Filterの出力

フィルタ出力値は4つの閾値( $\delta_1 \sim \delta_4$ )で5領域に分割される。ここでは、フィルタ出力値が高い領域から順に、I, II, III, IV, Vとする。

##### 4.2.1 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て、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、十字形8近傍フィルタを用いた。

#### 4.2.2 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。

- (1) 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VとIV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、4近傍フィルタと8近傍フィルタを用いた。

## 5. 実験

図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本研究の提案手法による推定結果の比較を行った。実験結果を表2に示す。この結果から、先行研究では推定精度が低下していたBarbara, Bridgeにおいては推定精度が向上がみられたが、しかし、CameramanやAirplane, Lennaにおいては、推定精度の低下が見られた。その他の画像においては先行研究と同程度の精度で推定が行われているため、一部画像における推定精度の低下の原因の検討を行う必要があると考えられる。

表2: 実験結果

	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	8.9	8.9
Bridge	8.2	12.6	11.9	14.8
Cameraman	4.4	4.4	8.2	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	7.6	9.6

## 6. まとめ

本稿では、分布間距離によるBilateral 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、原因である原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、事前仮定雑音分布の標準偏差の推定精度の向上を図ることができた。今後の課題としては、一部の画像において推定精度の低下が見られたため、精度の低下した原因の調査を行う必要があると考えられる。また、事前仮定ノイズ分布の推定精度の向上が分布間距離を用いたBilateral Filterの最適パラメータの推定法においてどの程度の向上が見られるのかについても検証を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 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, 62(8), pp.1268-1273 (2008)
- [3] 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)
- [4] D. Pollard, A. User's Guide to Measure Theoretic Probability, Cambridge University Press, Cambridge, U.K, 2003
- [5] 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)