

ラプラスーガウスフィルタを用いたインパルス性雑音検出器

山下 哲孝[†] 関屋 大雄[†] 呂 建明[†] 谷萩 隆嗣[†]

[†] 千葉大学

〒 263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

E-mail: [†]n_yamashita@graduate.chiba-u.jp, ^{††}{sekiya,jmlu,yahagi}@faculty.chiba-u.jp

あらまし インパルス性雑音の除去手法として、インパルス性雑音検出器と復元器からなる二段処理によって画像の復元を行う、Progressive Switching Median(PSM) フィルタが提案されている。PSM フィルタでは、雑音検出器により検出した雑音のみ復元器で処理するため、非劣化画素の歪みを発生させることなく画像を復元できる。しかしながら、検出器において、雑音を検出できない未検出、および雑音でないにもかかわらず雑音と判定してしまう誤検出が発生すると、復元器の復元精度が低下してしまう。PSM フィルタでは、輪郭部において誤検出が発生しやすく、誤検出を抑制しようと閾値を大きくすると、未検出が増大してしまうという問題があった。本研究では、ラプラスーガウス(L-G) フィルタを用いたインパルス性雑音検出器を提案する。L-G フィルタにより、画像の平たん部・輪郭部の抽出を行う。抽出した各部位ごとに異なる閾値を設定することで、精度良く雑音を検出することができる。さらに、計算機シミュレーションから提案する検出器の有効性を検証する。

キーワード インパルス性雑音, 雑音検出, ラプラスーガウスフィルタ

IMPULSE NOISE DETECTOR BY USING LAPLACIAN-GAUSSIAN FILTER

Noritaka YAMASHITA[†], Hiroo SEKIYA[†], Jianming LU[†], and Takashi YAHAGI[†]

[†] Chiba University

1-33 Yayoi-Cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 Japan

E-mail: [†]n_yamashita@graduate.chiba-u.jp, ^{††}{sekiya,jmlu,yahagi}@faculty.chiba-u.jp

Abstract In this work, we propose a new impulse noise detector from images using Laplacian-Gaussian(L-G) filter. In our system, the L-G filter separates the edge from the flat. The threshold for noise detection is set to large in the edge. On the other hand, that is set to small in the flat. Consequently, the performance of the noise detector is improved. Extensive simulations indicate that proposed method performs significantly better than traditional methods.

Key words Impulse Noise, Noise Detection, Laplacian-Gaussian Filter

1. はじめに

デジタル画像において、符号化または伝送時に生じるインパルス性雑音の影響を受けることは少なくない。よって、インパルス性雑音の除去方法に関する研究が数多く報告されている [1]- [3]。代表的なインパルス性雑音の除去手法として、メジアンフィルタ [1] があげられる。しかしながら、メジアンフィルタは画像全体に一律に処理を施すフィルタであるため、非劣化画素に対しても処理を施し、原画像を劣化させてしまう問題が生じる。

そこで、処理点ごとにインパルス性雑音で劣化しているか

否かの判定を行い、雑音と判断した画素のみ処理を施すスイッチングタイプの手法が提案されている [2]- [3]。劣化の有無を判定することにより、雑音除去性能と信号保存性を両立できる。スイッチングタイプのフィルタとして、PSM(Progressive Switching Median) フィルタ [3] が提案されている。PSM フィルタは画像全体の雑音位置情報を作成するインパルス性雑音検出器と、作成した雑音位置情報を用いて復元を行う復元器の 2 段階処理により復元を行う。雑音検出器では、処理点と処理点近傍の画素値情報を利用して、処理点が雑音で劣化しているか否かを判定し、雑音位置情報を作成する。復元器では、雑音位置情報を利用して劣化画素のみメジアンフィルタで処理を施す。

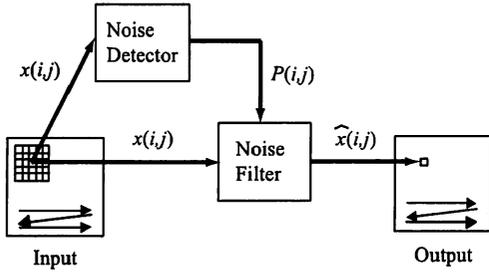


図1 PSM フィルタ

さらに復元には近傍の非劣化画素のみを使用する。よって、精度良く復元を行うことが可能となる。しかし、雑音の未検出が発生すると雑音はそのまま残留し、逆に非劣化画素を雑音と誤検出すれば原信号の保存ができない。よって、検出器における雑音の誤検出および未検出の減少が求められる。しかしながら、PSM フィルタでは、輪郭部において、処理点近傍の画素値のばらつきが大きいため誤検出が発生しやすく、誤検出を抑制しようと閾値を大きくすると、未検出が増大してしまうという問題があった。また、ランダム値インパルス性雑音を対象とする場合、雑音の検出は非常に困難となる。ランダム値インパルス性雑音においては、雑音と近傍画素との差が小さくなる可能性が高いため、未検出が生じる確率は高くなる。

本研究では、ラプラスーガウス (Laplacian-Gaussian; L-G) フィルタ [4] を用いたインパルス性雑音検出器を提案する。L-G フィルタは、画像に対しガウス関数による平滑化を行った後、ラプラスを掛けて、出力結果のゼロクロッシングの近傍を輪郭部として検出するフィルタである。L-G フィルタを用いることで、雑音を強調することなく、画像の平坦部・輪郭部を検出することができる。検出した平坦部・輪郭部に対して、それぞれに異なる閾値を設定することで、精度良く雑音を検出することができる。また、ランダム値インパルス性雑音に対しても、平坦部における雑音の未検出を抑制することができる。さらに、計算機シミュレーションから提案する検出器の有効性を検証する。

2. PSM フィルタ

2.1 インパルス性雑音

本研究では、インパルス性雑音として、固定値インパルス性雑音とランダム値インパルス性雑音を扱う。まず、固定値インパルス性雑音による劣化画像 $x(i, j)$ は以下のように定義される。

$$x(i, j) = \begin{cases} x_0(i, j) & : \text{probability } 1 - q \\ 0 & : \text{probability } q/2 \\ 255 & : \text{probability } q/2 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 (i, j) は処理点画素の座標を表し、 $x_0(i, j)$ は原画像、 q は雑音発生確率である。

次に、ランダム値インパルス性雑音による劣化画像 $x(i, j)$ は以下のように定義される。

$$x(i, j) = \begin{cases} x_0(i, j) & : \text{probability } 1 - q \\ h & : \text{probability } q \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 h は $[0, 255]$ の一様分布に従った整数値を与えるものとする。

2.2 PSM フィルタ [3]

雑音検出器を用いた雑音除去手法として、PSM フィルタ [3] が提案されている。図1に PSM フィルタの構成図を示す。PSM フィルタは雑音検出器と復元器から構成されている。

雑音検出器では、劣化画像 $x(i, j)$ の各画素がインパルス性雑音で劣化しているか否かを判定する。判定に基づき、雑音位置画像 $P(i, j)$ を作成する。ここで、雑音で劣化していると判定された処理点 (i, j) に対しては、 $P(i, j) = 1$ 、劣化していないと判定された処理点 (i, j) に対しては、 $P(i, j) = 0$ とする。

復元器では、インパルス性雑音で劣化したと判定された画素、つまり $P(i, j) = 1$ となった処理点 (i, j) のみに対して、復元処理を行う。このとき、復元処理には処理点 (i, j) 近傍で、インパルス性雑音で劣化していないと判定された画素のみを用いる。

本研究では、2つの構成要素のうち雑音検出器について提案を行う。そこで、ここでは PSM フィルタの雑音検出器について説明を行う。

PSM フィルタの雑音検出器は次の3つのステップで構成される。

A) 入力信号は $x(i, j)$ であり、 n 回目の繰り返しにおける雑音位置画像を $f_n(i, j)$ 、インパルス性雑音検出に用いる n 回目のフィルタ処理後の画像を $y_n(i, j)$ とするとき、それぞれの初期値を

$$y_0(i, j) = x(i, j) \quad (3)$$

$$f_0(i, j) = 0 \quad (4)$$

とする。

B) $y_n(i, j), f_n(i, j)$ を以下のように更新する。

$$f_n(i, j) = \begin{cases} f_{n-1}(i, j) & \text{if } |y_{n-1}(i, j) - m_{n-1}(i, j)| < T_D \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$y_n(i, j) = \begin{cases} m_n(i, j) & \text{if } f_n(i, j) \neq f_{n-1}(i, j) \\ y_{n-1}(i, j) & \text{if } f_n(i, j) = f_{n-1}(i, j) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $m_{n-1}(i, j)$ は画像 $y_{n-1}(i, j)$ の (i, j) 近傍のメジアン値、 T_D はインパルス性雑音を検出するための閾値である。

C) $n = N$ となったとき、

$$P(i, j) = f_n(i, j) \quad (7)$$

として、雑音位置画像 $P(i, j)$ を得る。もし、 $n < N$ ならば、 $n = n + 1$ として B) に戻る。ここで、 N はあらかじめ設定しておく反復回数である。

復元器では、雑音検出器によって得られた $P(i, j)$ に基づいてインパルス性雑音除去を行う。 $P(i, j)$ を用いることで、インパルス性雑音の除去と原信号の保存が両立できる。また、復元処



図2 提案法の構成図

理において雑音で劣化していない画素のみを用いて処理を行うことで、通常のメジアンフィルタよりも良好な処理画像を得られる。

しかしながら、PSMフィルタの雑音検出器では輪郭部において雑音の誤検出が発生する。輪郭部では、処理点近傍の画素値のばらつきが大きく、 $y_{n-1}(i,j)$ と $m_{n-1}(i,j)$ との差分値が閾値 T_D を越えるため、非劣化画素をインパルス性雑音と誤判定する。一方で、輪郭部での雑音の誤検出をなくそうと T_D を大きくすると、雑音の未検出が増加する。また、ランダム値インパルス性雑音を対象とする場合、雑音の検出は非常に困難となる。白と黒の固定値インパルス性雑音の場合、雑音の画素値が大きいため、近傍画素との差が大きくなりやすく雑音の検出は容易であるが、ランダム値インパルス性雑音では雑音の画素値が近傍画素と近くなることもある。従って、雑音と近傍画素との差分値が小さくなり、輪郭部、平坦部に関わらず未検出が生じる確率は高くなる。

3. 提案手法

図2に本研究で提案する雑音検出器の構成図を示す。検出器は主に、メジアンフィルタ、L-Gフィルタ[4]を用いた平坦検出部、および雑音検出部で構成される。

3.1 メジアンフィルタ

インパルス性雑音で劣化した画像に対して、直接平坦・輪郭検出処理を行った場合、雑音が輪郭として誤って検出されることがある。誤って輪郭と判定してしまうと、判定された箇所における雑音検出の閾値が変化するため、雑音検出精度が低下する。本研究では、雑音による輪郭の誤検出を抑制するために、前処理としてメジアンフィルタを用いてインパルス性雑音の除去を行う。メジアンフィルタを用いることで、L-Gフィルタにおける輪郭の誤検出が抑制され、平坦検出の精度が向上する。その結果、雑音の検出精度が向上する。

3.2 L-Gフィルタを用いた平坦検出

本研究では、3.1で処理した画像に対して、L-Gフィルタを利用することによって平坦・輪郭の検出を行う。本研究では、文献[4]の5値方式L-Gフィルタを利用して、平坦部・輪郭部の検出を行う。図3に、L-Gフィルタを用いた平坦検出の流れを示す。平坦検出は、L-Gフィルタ処理、多値化処理、連結処理、補完処理、および平坦検出処理によって行われる。

3.2.1 L-Gフィルタ処理

L-Gフィルタは、画像に対しガウス関数による平滑化を行った後、ラプラスを掛けて、出力結果のゼロクロッシングの近傍を輪郭部として検出するフィルタである。L-Gフィルタを用いることで、雑音を強調することなく、画像の平坦部・輪郭部

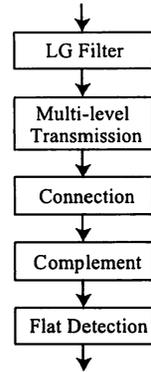


図3 L-Gフィルタを用いた平坦抽出

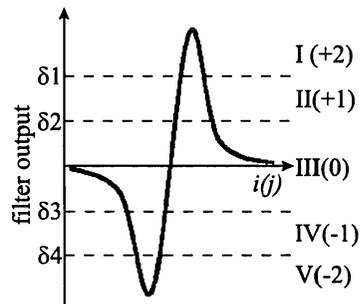


図4 L-Gフィルタ出力値の5値化

を検出することができる。

($2n+1$) 型の L-G フィルタ F の成分を $F(i,j)$ とすると、 $F(i,j)$ は次式で定義される。

$$F(i,j) = \frac{k}{4\pi\sigma^2} \left(1 - \frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

ここで、 n は自然数、 σ^2 は分散、 k は定数である。

L-G フィルタはパラメータ σ によって輪郭検出性能を調整できる。 σ が小さい場合には細かい輪郭を検出でき、 σ が大きい場合にはおおまかな輪郭だけ検出できる。画像に応じて σ を調整することは有効であるが、本研究では σ を適当な値で固定し、後の処理で輪郭検出の精度を向上させる。

3.2.2 多値化処理

L-G フィルタをかけた後、フィルタの出力値に対して閾値を用いることで多値化処理を行う。本研究では、正と負の閾値を2つずつ用意することで、フィルタ出力値を5値化(+2,+1,0,-1,-2)する。単一の閾値で2値化した場合には、輪郭と平坦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。しかしながら、閾値を増やして多値化し、多値化した結果を処理することによって、輪郭と平坦の分離が容易になると考えられる。図4にL-Gフィルタの出力値の5値化を示す。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、フィルタ出力値が高い領域から順に I, II, III, IV, V とする。

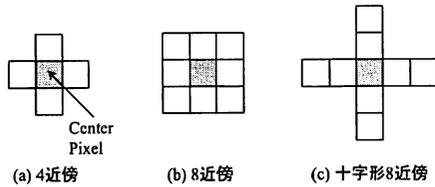


図5 近傍フィルタ

3.2.3 連結処理

ここでは、3.2.2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。

連結のとり方は、文献[4]に基づき、図5(c)の十字形8近傍を用いる。

3.2.4 補完処理

ここでは、3.2.3の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、輪郭線を構成すると思われる画素を検出し、輪郭の欠落部分を補完できる。ここで、輪郭線の欠落を補完する画素をVI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VI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画素以内に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VIとI画素、またはVIとVの組み合わせがある場合、注目画素をVIに置換する。

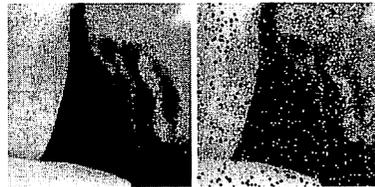
ここで、図5(a), (b)に4近傍と8近傍を示す。

3.2.5 平坦ん検出処理

ここでは、3.2.4の補完処理の結果に基づき、平坦ん・輪郭の検出を行う。補完処理を行った画像には、I・V・VI、およびIIIの画素が存在している。このうちI・Vは輪郭周辺の画素、またVIは輪郭を補完した画素として、I・V・VIの画素を輪郭部として検出する。一方、IIIの画素は輪郭に関わっていない画素として、平坦ん部として検出する。

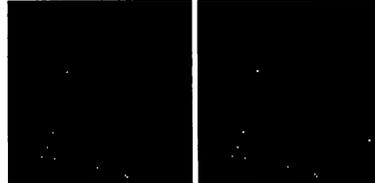
3.3 雑音検出

雑音検出部では、3.2の平坦ん検出結果に基づき雑音判定を行う。平坦ん部と判定された箇所では、処理点近傍の画素値のばらつきが小さく、非劣化の処理画素と近傍画素との差が小さいと考えられる。したがって、式(5)の閾値 T_D を小さくしても誤検出が発生しにくいいため、 T_D を小さくして雑音判定を行



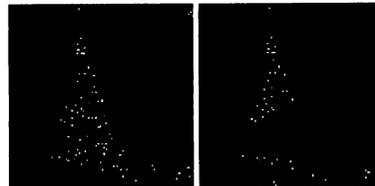
(a)Original (b)Noisy

図6 原画像と劣化画像(固定値インパルス性雑音, 10%)



(a)PSM [3] (b)Proposed

図7 誤検出画像



(a)PSM [3] (b)Proposed

図8 未検出画像

う。一方、輪郭部と判定された箇所では、処理点近傍の画素値のばらつきが大きく、非劣化であっても処理画素と近傍画素との差が大きくなりやすい。よって、誤検出の発生を抑制するため、 T_D を大きくして雑音判定を行う。ここで、平坦ん部に対する雑音検出の閾値を T_f 、輪郭部に対する閾値を T_e とする。

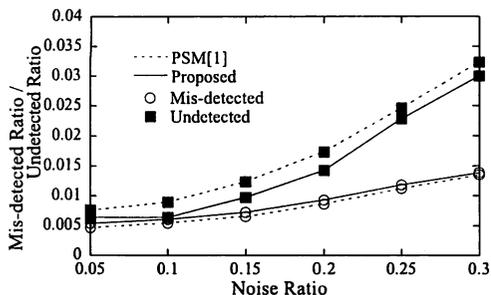
L-Gフィルタにより平坦ん検出を行い、平坦ん部、輪郭部でそれぞれ異なる閾値を設定することで、誤検出の増大を抑制しつつ、未検出を減少できる。

4. シミュレーション

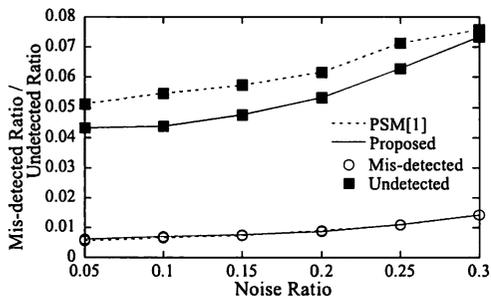
提案法の有効性を確認するため、実際の画像を用いて雑音検出を行う。処理画像として、SIDBAのBoatとPepper(256×256, 8bit/Pixel, モノクロ)を用いる。本研究では検出精度の指標として、インパルス性雑音を正しく検出できない未検出率と、非劣化画素を誤って雑音と判断してしまう誤検出率を用いる。

次に、検出器のパラメータを示す。メジアンフィルタの窓サイズは3×3とする。L-Gフィルタのパラメータは $k=16, \sigma=0.9$ 、多値化処理の閾値は $\delta_1=300, \delta_2=100, \delta_3=-100, \delta_4=-300$ とする。また、雑音検出の閾値は $T_f=20, T_e=45$ とする。

ここで、提案する検出器と従来の検出器との検出結果を比較することによって、提案手法の有効性を確認する。従来の検出器としてPSMフィルタの検出器[3]を用いる。



(a)Boat



(b)Pepper

図9 検出結果 (固定値インパルス性雑音)

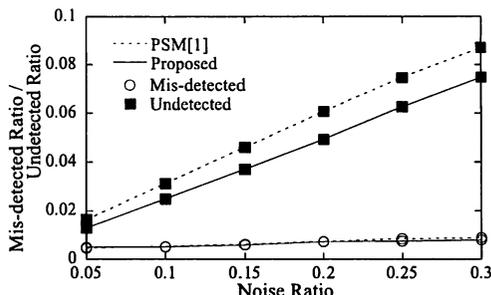
4.1 インパルス性雑音の検出

図6に原画像Pepperと $q = 10\%$ の固定値インパルス性雑音を付加した画像を示す。図6(b)に対して、各検出器で雑音検出したときの検出結果を図7、図8に示す。図7は誤検出、図8は未検出の結果であり、誤検出・未検出の画素を白い画素で示す。図7より、誤検出では従来法と提案法に差がないことがわかる。一方、図8より、従来法よりも提案法の未検出が少ないことがわかる。これは、従来法では画像全体を単一の閾値で雑音検出処理を行うのに対し、提案法では輪郭・平坦部を検出し、各部位ごとに異なる閾値を設定して雑音検出処理を行うためである。

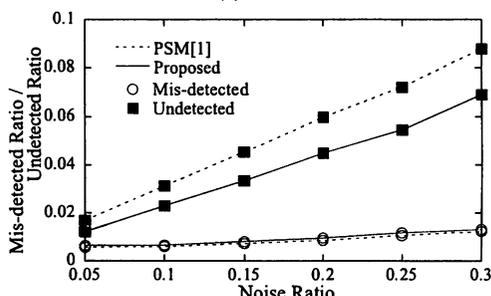
図9にBoatおよびPepperに対し固定値インパルス性雑音($q = 5\% \sim 30\%$)を付加した場合の未検出率と誤検出率を示す。図9より、従来法と提案法の誤検出率はほぼ等しいことがわかる。一方、未検出率を比較した場合、画像の種類、雑音の発生確率に関わらず、従来法よりも提案法の未検出率が減少している。よって、提案法では誤検出の増加を抑制しつつ、未検出を減少しているといえる。また、図10にBoatおよびPepperに対しランダム値インパルス性雑音($q = 5\% \sim 30\%$)を付加した場合の未検出率と誤検出率を示す。図10より、固定値インパルス性雑音と同様に、ランダム値インパルス性雑音に対しても、提案法は誤検出の増加を抑制しつつ、従来法よりも未検出を削減していることがわかる。

4.2 劣化画像の復元

提案する検出器と比較する検出器から得られる雑音位置情報を元に、PSMフィルタ[3]の復元器を用いて実際に劣化画像の



(a)Boat

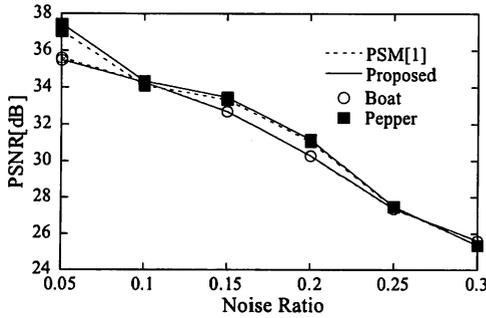


(b)Pepper

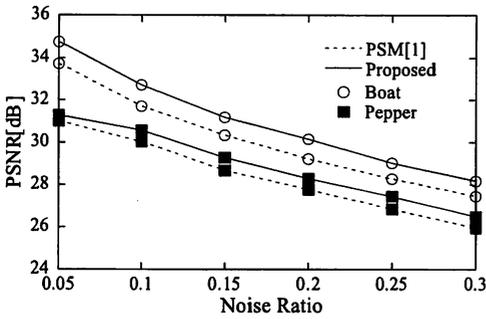
図10 検出結果 (ランダム値インパルス性雑音)

復元を行い提案検出器の有効性を検証する。本研究では、復元精度の指標としてPSNRを用いる。図11に復元結果のPSNRを示す。固定値インパルス性雑音に対しては、従来法と同等か0.2dBほど高いPSNRを示している。また、ランダム値インパルス性雑音に対しては、提案法では、従来法と比較して、PSNRを大きく改善している。これは、従来法では誤検出の増加を抑制するため、雑音検出の閾値を厳しく設定できず、近傍画素との差が小さい雑音を検出できない。一方、提案法では、平坦部を検出し、平坦部に対してのみ閾値を厳しく設定したため、誤検出を増加を抑制しつつ、近傍画素との差が小さい雑音を検出できる。したがって、平坦部における雑音を復元器で処理できるため、従来法に比べて提案法ではPSNRが向上したのである。また、ランダム値インパルス性雑音の場合、雑音と近傍画素との差が小さくなりやすいため、固定値ランダム値インパルス性雑音の場合よりも大きくPSNRが向上したと考えられる。以上より、雑音判定が提案手法により検出精度が向上し、復元の改善につながることを確認できる。

最後に、画像復元の視覚評価を行う。図12に $q = 10\%$ のランダム値インパルス性雑音を付加したBoatに対して、各検出器の検出結果を用いたPSMフィルタ[3]による復元画像を示す。図12(c)(d)より、従来法は平坦部(背景部分など)に雑音の残留が目立つ。それに対して、提案法は、平坦部での雑音の残留が大幅に減少している。一方で、輪郭部分に関しては、従来法、提案法でそれほど差がないことがわかる。これは、図10より、提案法では誤検出を従来法とほぼ同程度に抑制しつつ、未検出を従来法より大きく削減している。その結果、輪郭



(a) 固定値インパルス性雑音



(b) ランダム値インパルス性雑音

図 11 各雑音検出器による PSNR

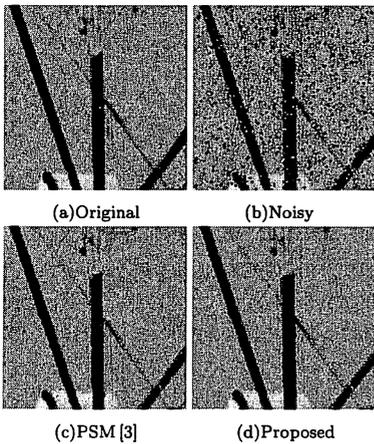


図 12 復元画像 (ランダム値インパルス性雑音, $q = 10\%$)

は従来法と同程度に保存され、一方で平坦部の雑音は従来法よりも除去されたのだと考えられる。以上より、提案手法の有効性が視覚的にも確認できた。

5. まとめ

本研究では、L-G フィルタを用いたインパルス性雑音検出器を提案した。L-G フィルタにより、画像の平坦部・輪郭部の抽出を行う。抽出した各部位ごとに異なる閾値を設定することで、精度良く雑音を検出することができる。さらに、計算機シ

ミュレーションから提案する検出器の有効性を確認した。

今後の課題として、平坦検出に用いる閾値や雑音検出の閾値の設定法についての検討などの必要がある。画像や雑音に応じて閾値を決めることにより、更なる雑音検出精度の向上が図れると考えられる。

文 献

- [1] 棟安実治, 田口 亮, 非線形デジタル信号処理, 朝倉書店, 東京, 1990.
- [2] T. Sun and Y. Neuvo, "Detail-preserving median based filters in image processing", Pattern Recognit. Lett., vol. 15, pp. 341-347, April 1994.
- [3] Z. Wang and D. Zhang, "Progressive switching median filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images", IEEE Trans. Circuits Syst. II, Analog and Digit. Signal Process., Vol. 46, No. 1, pp. 78-80, Jan. 1999.
- [4] 村中徳明, 工藤新也, 芦田高則, 徳丸正孝, 今西 茂, "ラプラスー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, Oct. 2002.