

劣化画像のみを用いた荷重メジアンフィルタの 多目的遺伝的アルゴリズムによる設計

鍋谷 洋介[†] 花田 良子^{††}
折登 由希子^{†††} 棟 安実 治^{††}

インパルス性雑音によって劣化した画像を復元する手法の1つである荷重メジアンフィルタは、画像に適したフィルタの窓形状と荷重の設計は重要な課題である。その設計の際には多くの場合トレードオフの関係をもつ非劣化画素の信号保存性能と劣化画素の雑音除去性能を考慮する必要がある。本論文ではフィルタ設計をこれらの評価基準を同時に考慮しながら最適化を行う多目的最適化問題として定式化し、一度の解探索で信号保存性能を重視したフィルタと雑音除去性能を重視したフィルタが同時に得られる手法を提案する。

An Unsupervised Design Method of Weighted Median Filters Using Multiobjective Genetic Algorithm

YOSUKE NABETANI[†], YOSHIKO HANADA^{††}, YUKIKO ORITO^{†††}
and MITSUJI MUNESAYU^{††}

Estimation of a suitable window shape and appropriate weights in weighted median filters (WMFs) is one of important problems. In this paper, we propose a new unsupervised design method of WMFs. To recover images from the noise, any filters must preserve original values of non-corrupted pixels and simultaneously well estimate the original values of corrupted pixels; however, the preservation quality and the restoration quality often have a trade-off relation. We formulate the design of WMF as a multi-objective optimization problem that treats the preservation performance and the restoration performance as conflict functions. Through the experiments, we show our method obtains a wide variety of filters that have the high preservation performance or the high restoration performance at one search process.

1. はじめに

デジタル画像は符号化、伝送時に生じる誤りによって劣化することがある。インパルス性雑音は、それらの誤りにより生じる画像上の情報欠損の一種であり、画像の質を著しく低下させるため、これまでメジアンフィルタをはじめとする多くのインパルス性雑音除去手法が考案されてきた¹⁾。そのひとつである荷重メジアンフィルタ²⁾は、フィルタ窓内の各画素に荷重を割り当て、大きな荷重を持つ画素を選択されやすくすることにより、細部を保存しつつ、劣化部分の復元を

現している。これまでにテクスチャ画像を対象として、劣化画像のみから最適な荷重メジアンフィルタを推定する手法が提案されている³⁾。この手法では、非劣化画素の信号保存性能と劣化画素の雑音除去・復元性能をそれぞれ考慮する2つの部分的な評価指標からなる目的関数が用いられ、そのバランスを決定する設計パラメータのもとで最適な窓形状と荷重が推定される。しかし、信号保存性能と雑音除去・復元性能は多くの場合トレードオフの関係をもつ、パラメータの設定が設計されるフィルタの性能に大きな影響を与える。

本論文では適切な荷重メジアンフィルタの窓形状および荷重を推定するにあたり、信号保存性能と雑音除去・復元性能のトレードオフに着目し、これらの評価基準を同時に考慮しながら最適化を行う多目的最適化問題として定式化する。NSGA-II (elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)⁴⁾を用いて最適化を行うことで、一度の解探索で信号保存性能を重視したフィルタと雑音除去性能を重視したフィル

[†] 関西大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Kansai University

^{††} 関西大学システム理工学部
Faculty of Engineering Science, Kansai University

^{†††} 広島大学大学院社会科学部
Graduate School of Social Sciences, Hiroshima University

タが同時に得られる手法を提案する。また、単一の目的関数の最適化問題としてフィルタを設計する従来のアプローチ³⁾で得られるフィルタと同等の性能を有するフィルタ群が多目的最適化のアプローチでも得られることを示す。なお、本稿では処理対象をテキスト画像に限定するが、自然画像内のテキスト分解について多くの研究がなされており、それらと組み合わせることによって、自然画像への応用が可能であると考えられる。

2. 荷重メジアンフィルタ

簡単のために、1次元の荷重メジアンフィルタについて説明する²⁾。入力ベクトルを $\mathbf{X}=\{X_1, \dots, X_{2N+1}\}$ と考え、荷重ベクトルを正の整数を要素とする $\mathbf{W}=\{W_1, \dots, W_{2N+1}\}$ とする。荷重メジアンフィルタの出力を Y とすると、 Y は以下のように与えられる。式中の MED は要素の中から中央値を取る操作を示している。

$$Y = MED\left\{\underbrace{X_1, \dots, X_1}_{W_1}, \underbrace{X_2, \dots, X_2}_{W_2}, \dots, \underbrace{X_{2N+1}, \dots, X_{2N+1}}_{W_{2N+1}}\right\} \quad (1)$$

3. 荷重メジアンフィルタ設計

これまでに、荷重メジアンフィルタ設計を最適化問題に定式化し、テキストにあった窓形状および荷重を劣化画像から推定する手法を提案している³⁾。この手法では、劣化・非劣化画素の集合に対して、それぞれ雑音除去性能、信号保存性能を向上させる部分的な指標からなる一目的関数を用い、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA)⁵⁾によりフィルタを最適化している。

3.1 問題設定

256階調のグレースケールのテキスト画像を対象とし、インパルス性雑音のみの影響を受けた劣化画像 $x(i, j)$ の復元について考える。取り扱う雑音モデルとして、以下のランダム値のインパルス性雑音の発生モデル⁶⁾を用いる。 p は雑音付加率、 $x_o(i, j)$ は原画像の画素値(輝度値)、 $\xi(i, j)$ は一様分布を持つ正数のランダム雑音であり、確率 p で画素の輝度値を $[0, 255]$ の範囲のランダムな輝度値と置き換える。

$$x(i, j) = \begin{cases} \xi(i, j) & \text{prob. } p \\ x_o(i, j) & \text{prob. } 1-p \end{cases} \quad (2)$$

3.2 フィルタ設計のための目的関数

劣化/非劣化の画素によらず処理を画像全体に適用するフィルタの設計において、考慮しなければならない

点は非劣化画素の信号保存性能と劣化画素の雑音除去・復元である。非劣化画素は、処理対象画素とフィルタ処理後の画素間の平均二乗誤差 (Mean Square Error: MSE) を用いて評価できる。また、劣化画素については、何らかの推定画素値との誤差を用いて評価すればよい。ただし、原画像をもとに推定するのではないため、各々の画素で雑音かどうか判断する必要がある。ここでは何らかの指標により非劣化画素と判断された画素の集合を \mathcal{O} 、劣化画素と判断された画素の集合を \mathcal{N} とする。

サイズ $M_1 \times M_2$ の画像において、非劣化画素 \mathcal{O} に分類された画素 (i, j) については次の f_1 で誤差を評価する。

$$f_1(i, j) = \begin{cases} |z(i, j) - o(i, j)|^2, & (i, j) \in \mathcal{O} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $z(i, j)$ は処理画像もとの画素値、 $o(i, j)$ は処理後の画素値を示す。一方、劣化画素 \mathcal{N} に分類された画素 (i, j) については次の f_2 で誤差を評価する。式中、 $m(i, j)$ は窓内の中央値を示す。

$$f_2(i, j) = \begin{cases} |m(i, j) - o(i, j)|^2, & (i, j) \in \mathcal{N} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

荷重メジアンフィルタの設計においては、 f_1 と f_2 からなる式 (5) を解 \mathbf{Y} に対する目的関数として最小化することで、劣化画素の復元と非劣化画素のフィルタ処理による劣化を考慮したフィルタが推定される。

$$F(\mathbf{Y}) = \sum_{i=0}^{M_1-1} \sum_{j=0}^{M_2-1} f_1(i, j) + \sum_{i=0}^{M_1-1} \sum_{j=0}^{M_2-1} f_2(i, j)$$

非劣化画素群 \mathcal{O} と劣化画素群 \mathcal{N} を区別するため、種々の統計量が提案されている^{7),8)}。原論文では³⁾、劣化画素と非劣化画素の値に近いランダム値インパルス性雑音で有効であると報告されている ROLD (Rank-Ordered Logarithmic Differences) 統計量⁷⁾が用いられている。ROLD 統計量は、周囲の輝度差が極めて高い雑音についてはその値が大きくなり、一方、非劣化画素では低い値を示す。これにより閾値 Th を導入し、画素を非劣化画素群 \mathcal{O} と劣化画素群 \mathcal{N} に分類している。

3.3 閾値設定とトレードオフ

式 (5) に示した単一の目的関数による設計手法における数値実験の結果、ROLD による雑音判別の閾値 Th を小さくすると f_2 が重点的に最適化され雑音除去性能が向上し、閾値 Th を大きくすると目的関数 f_1 が評価する原信号の保存性能が向上することが確認されている³⁾。ただし、全体の処理精度を見た場合、その適切な設定は画像により異なる。そのため1つの閾

値設定で得られたフィルタで処理した結果だけでは、その解の信号保存性能と雑音除去性能が満足の得られるものであるかは判断できず、複数の閾値設定で解探索を行う必要がある。

4. 多目的最適化による荷重メジアンフィルタの設計

本論文では、荷重メジアンフィルタの窓形状と荷重の推定を多目的最適化問題として扱う。雑音除去性能を考慮した目的関数と原信号の保存性能を考慮した評価指標を用いることで、一度の解探索で雑音除去性能の優れたフィルタ、原信号の保存性能の優れたフィルタを同時に設計することを目指す。

4.1 目的関数の設計

3.2 節で述べた、原信号の保存性能を目的とした関数 f_1 と画像の平滑化を目的とした関数 f_2 は多くの場合、トレードオフの関係にある。また、そのバランスは従来の単一目的関数によるアプローチでは閾値 Th を用いて考慮していた。本研究では、両関数を分離してそれぞれ個別の目的関数とし、多目的最適化問題としてフィルタ設計問題を扱う。画像に含まれるすべての画素を非劣化画素群、劣化画素群に区別しない、すなわち閾値 Th を設計パラメータからなくし、すべての画素において f_1 , f_2 を計算する。ただし、多目的化にあたり、式 (4) に示した f_2 のかわりに、窓内のトリム平均値 $tavg(i, j)$ との誤差を評価する次の f'_2 を用いる。

$$f'_2(i, j) = |tavg(i, j) - o(i, j)|^2 \quad (5)$$

これは、従来手法の単一目的最適化による設計手法では劣化画素のフィルタ処理結果を窓内の中央値に近づけることで劣化部分の復元を図っていたが、中央値を用いると荷重がすべて等しいときに f_2 が 0 となり正確な推定が行えないためである。トリム平均値 $tavg(i, j)$ は平均値フィルタとメジアンフィルタの特徴を有する順序統計フィルタ α -Trimmed Mean¹⁾ にも用いられる統計量であり、窓内の画素の輝度値をソートした後、上側と下側をそれぞれ α 個除いた残りで平均値を取ることで求められる。

以上から多目的最適化における目的関数として、解 \mathbf{Y} に対する信号保存性能 F_1 と雑音除去性能 F_2 を以下のように定義する。

$$F_1(\mathbf{Y}) = \sum_{i=0}^{M_1-1} \sum_{j=0}^{M_2-1} |z(i, j) - o(i, j)|^2 \quad (6)$$

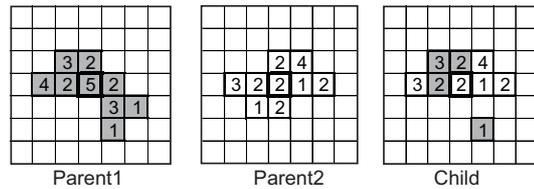


図 1 交叉の例

Fig. 1 Aspect of crossover method

$$F_2(\mathbf{Y}) = \sum_{i=0}^{M_1-1} \sum_{j=0}^{M_2-1} f'_2(i, j) \quad (7)$$

4.2 遺伝的アルゴリズムの適用

前節で述べた 2 つの目的関数を同時に最適化することで、一度の解探索で信号保存性能を重視したフィルタ群と雑音除去性能を重視したフィルタ群を得る。ここでは一度に非劣解集合を得られる多目的遺伝的 GA の手法を採用する。選択を除く遺伝的オペレータは従来の単一目的のアプローチと同様のものを用いる。ここではその詳細を述べる。

4.2.1 初期個体生成

GA における解（個体）は荷重の情報を持つ窓形状であり、処理点を中心とした形状を有すると考えられる。したがって、初期個体はランダム性を保持しつつも処理点を中心として生成されることが望ましい。また、探索空間の複雑化を回避するため、固定の窓サイズ（窓の要素数） N のもとで窓形状の最適化を行う。初期個体の生成については、まず中心となる処理点を与え、その処理点を中心に $N-1$ 点追加していく。荷重については、その最大値を W_{max} とすると、各窓要素に対して $[1, W_{max}]$ の範囲で荷重をランダムに与え、それ以外は 0 とする。点を追加する過程において、窓要素の 8 近傍から追加点を選択することで、初期形状において不連続な要素が生じないようにする。

4.2.2 交 叉

選択、交叉、突然変異に代表される遺伝的操作の中で、各個体が持つ情報を交換する交叉は GA の主探索オペレータであり、その設計が GA の解探索性能の鍵となる。GA が効率よく解空間を探索するにあたり、交叉では親の良好な形質をうまく子に継承させる必要がある。まず、選んだ親 p_1 , p_2 について、 p_1 からランダムに処理点以外の $N/2$ 点 (N は窓サイズ) を選ぶ。そして、 p_2 からも同様に p_1 で選んだ点とは異なる $N/2$ 点を選び、生成された窓形状を子個体とする。中心の処理点は $1/2$ の確率で p_1 あるいは p_2 の荷重を採用する。図 1 に $N=9$ のときの交叉の例を示す。

一般に GA では 1 回の交叉の適用で生成される子個

体は複数であるが、本手法は1回の交叉で親2個体から1個体だけ生成されるため、交叉を親個体の各ペアに複数回適用することで、複数の子個体を生成する。

4.2.3 突然変異

突然変異については、生成された子個体に対してランダムに選んだ1点を窓の近傍点にランダムに移動させ、荷重については $[1, W_{max}]$ の範囲のランダムな値に置き換える。

4.3 多目的遺伝的アルゴリズムの適用

4.1 に示した2関数の最適化には多目的GAの手法の中でも、評価値の高い個体の保存や多様性に優れた個体の選択といった重要な要素が含まれているNSGA-II⁴⁾の枠組みを採用する。

以下にNSGA-IIのアルゴリズムの流れを示す。

【NSGA-IIのアルゴリズム】

0. 世代 $t = 0$ とする。サイズ N_{pop} の初期母集団 P_0 を生成する。また $Q_0 = \emptyset$ とする。
1. 親母集団と子母集団を組み合わせて $R_t = P_t \cup Q_t$ を生成する。
2. R_t に対して非優越ソートを行い、全個体をフロント毎（ランク毎）に分類する。
3. R_t における個体の混雑距離を計算する。
4. 個体数 $2 \times N_{pop}$ の R_t から非優越ランクと混雑距離によるアーカイブの選択を行い、 N_{pop} の個体からなる P_{t+1} を生成する。
5. 終了判定を行う。条件（総評価計算回数など）が満たされれば終了。
6. $t = t + 1$ とする。 P_t から混雑度トーナメント選択により N_{pop} 個体の Q_t を選択する。
7. Q_t に対して交叉、突然変異を実行し、1へ戻る。

初期個体の生成、交叉、突然変異には、従来手法と同様の方法を用いる。また、上記の世代交代モデルに従い、親1ペアに適用する交叉回数は2回とする。

5. 数値実験

提案手法を図2に示す階調数256、サイズ 64×64 の8画像の劣化画像に実際に適用することで、荷重メジアンフィルタの多目的設計の有効性を示す。これらの画像はBrodatzのテクスチャ⁹⁾から特徴的な箇所を切り取ったものであり、球状や線状といった典型的な形状や、方向、明瞭性などのテクスチャの形状や配置の観点から選択した。雑音には $[0, 255]$ のランダム値のインパルス性雑音を用い、雑音発生率は0.2とした。予備実験により、窓サイズ $N=9$ 、最大荷重 $W_{max}=5$ 、

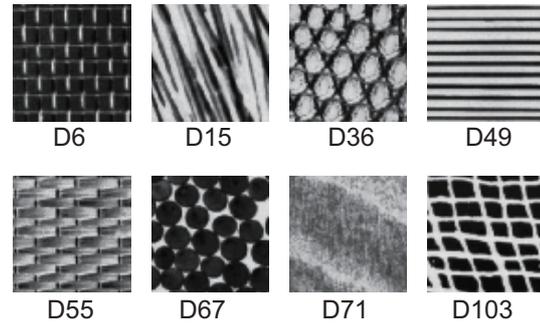


図2 原画像
 Fig. 2 original images

母集団サイズ $N_{pop}=50$ 、世代交代数1200、突然変異率 $1/N_{pop}$ とし、トリム平均は輝度値が小さい方から2点、大きい方から2点を除いた、残り5点の平均値とした。直線の形状が推定される場合を想定し、 9×9 の範囲で解を表現する。

5.1 目的関数の妥当性

まず、原信号保存性能と雑音除去性能に関する目的関数 F_1 、 F_2 の妥当性を検証する。設計された荷重メジアンフィルタを劣化画像に適用して得られる復元画像の評価として、MSE、および非劣化画素におけるMSEを表す MSE_O 、劣化画素におけるMSEを表す MSE_N を用いる。目的関数の妥当性については、 F_1 - F_2 平面での解集合と MSE_O - MSE_N 平面での解集合について、目的関数値の大小が、MSEでの大小に対応しているかで検証する。図3は、D103において、提案手法の典型的な1試行で得られた非劣解の F_1 - F_2 平面および MSE_O - MSE_N 平面での分布を示した結果である。代表的な5点を取り、それぞれの平面での対応を示している。局所的に優劣の順序の反転はあるが、全体として概ね代表点のように目的関数値の大小が、MSEでの大小に対応していることが確認できている。また、ここでは1画像の例を示しているが、他の画像においても同様の傾向が見られている。そのため、得られたフィルタの信号保存性能と雑音除去・復元性能は F_1 、 F_2 を用いて評価して良いと考えられる。

5.2 設計されたフィルタと処理結果

提案手法の典型的な1試行で得られた非劣解群による処理結果の例を図4に示す。"F1(ith)"は $F_1(F_2)$ の値が i 番目に小さい(大きい)解を表している。

図4において設計されたフィルタを見ると、 $F_1(F_2)$ の値によらず、例えば横に伸びるパターンが特徴的なテクスチャに対して横に伸びる窓形状が得られているように、パターンに沿ったフィルタが設計されていることがわかる。また、 F_1 が小さい値は処理点の周辺

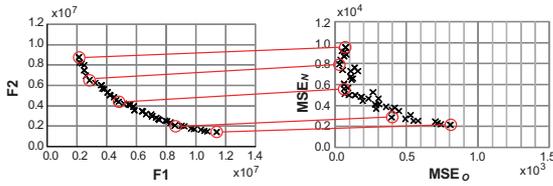


図3 非劣解の分布 (D103, F_1 - F_2 and MSE_O - MSE_N)
Fig. 3 Distribution of nondominated solutions (D103, F_1 - F_2 and MSE_O - MSE_N)

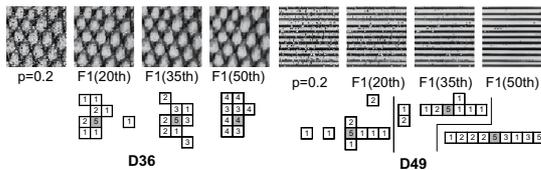


図4 設計されたフィルタと処理結果
Fig. 4 Designed filter and its processing result

要素の荷重が低く、大きい場合は平板に近いフィルタが得られていることがわかる。図4より、 F_1 の値が小さい解は、雑音が残留する代わりに鮮明な画像が得られている。一方で、 F_2 の値が小さい解は平滑化作用が強くなり、全体的にぼやけたような画像となっているが雑音がよく除かれていることが確認できる。

5.3 提案手法の有効性

多目的設計により得られるフィルタ群の処理性能を検証する。ここでは、8例題を用いて、単一目的のGAで式(5)を最適化して設計される荷重メジアンフィルタと比較する。GAのパラメータは提案手法と同様とし、単一目的のアプローチにおいて雑音・非雑音を分類するROLDの閾値 Th は200, 300, 400, 500および600とした。世代交代モデルはER (Elitist Recombination) モデル¹⁰⁾を採用した。いずれも1試行に必要とする評価計算回数は同じである。

図5は提案手法において、20試行それぞれで得られた非劣解を F_1 - F_2 平面、および MSE_O - MSE_N 平面に示した例である。 F_1 - F_2 平面においては、提案手法20試行で得られた最良の MSE を示す解、および上位5%の解を示し、 MSE_O - MSE_N 平面では単一目的のアプローチで設計された解(20試行で最良の MSE を示す解)を示している。また、表1に20試行の最良解の MSE_O , MSE_N の比較結果を示す。図表中、提案手法の多目的のアプローチをWMF(multi opt.)、従来の単一目的のアプローチをWMF(single opt.)と記している。非劣解の分布についてはD36およびD49のみ示している。D36において従来手法で閾値 $Th=200$ とした結果は表1からわかるように MSE_O , MSE_N

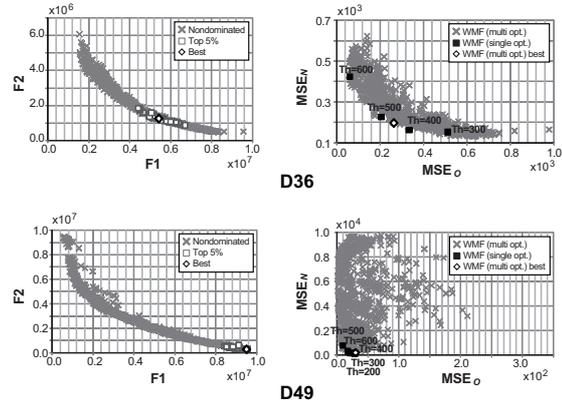


図5 20試行の非劣解集合
Fig. 5 Nondominated solutions out of 20 trials

がともに悪く、図5からは省いている。

表1において、従来の単一目的関数による設計手法の結果に着目すると、テクスチャによって適切な閾値設定は異なることが確認できる。提案手法の結果は、 MSE の観点から従来手法の結果と比較すると、複数の閾値設定と比べて良好な結果が得られていることがわかる。また、D6およびD55においては、最良の閾値設定を用いた従来の単一目的のアプローチよりも優れた MSE が得られている。図5の MSE_O - MSE_N 平面の分布から、D36において提案手法により信号保存性能を重視したフィルタ、雑音除去性能を重視したフィルタおよび両性能がバランスよく得られるフィルタが幅広く得られており、トレードオフの関係にあることが確認できる。また、 MSE が比較的良好な解は F_1 - F_2 平面で偏って存在している。なお、このような分布、傾向はD49を除く例題すべてで見られる。

D6は適当な閾値が発見しづらい例題である、これは、閾値によっては目的関数(5)を最小化することが必ずしも MSE の改善につながらない例題であり、平坦な部分を多く有する画像(どのような窓形状を適用しても結果が大きく異なる)に多く見られる傾向である。D15, D36, D67, D71, D103では、提案手法により、従来の単一目的のアプローチで設計される荷重メジアンフィルタの各閾値設定の解とほぼ同等の解が得られていることがわかる。また、提案手法で得られた優良な解群は、従来手法の解の方が MSE_O が優れるとき MSE_N が優れ、従来手法の解の方が MSE_N が優れるとき MSE_O が優れ、優越されない解となっている。D49においては、従来の単一目的関数で設計される荷重メジアンフィルタの各閾値での、 MSE が最良の解の窓形状はすべて横一直線であった。 Th が小さいほど荷重が平坦、 Th が大きいほど処理点の

表 1 多目的アプローチと単一目的アプローチの比較 (20 試行の最良 MSE)
Table 1 Comparison of multi-objective and single-objective approaches
(The best MSE out of 20 trials)

	D6			D15			D36			D49		
	MSE _O	MSE _N	MSE									
Degraded Image	0	13228	2654	0	10372	1932	0	9829	1902	0	12266	2410
Th=200	470	823	541	206	499	260	1250	1908	1377	29	107	44
WMF (single opt.)	575	987	658	132	633	225	512	1513	706	24	109	41
Th=400	662	1372	805	79	817	216	335	1617	583	22	137	44
Th=500	238	1276	446	55	1018	234	207	2259	664	18	279	69
Th=600	117	2147	524	21	2393	463	61	4230	868	10	755	156
WMF (multi opt.)	190	800	312	72	891	224	262	1954	590	30	203	64
	D55			D67			D71			D103		
	MSE _O	MSE _N	MSE									
Degraded Image	0	8201	1527	0	14330	2907	0	7369	1511	0	14291	2808
Th=200	560	1005	643	575	1037	669	153	454	215	1025	2184	1253
WMF (single opt.)	270	997	405	555	1130	671	102	577	199	601	1975	871
Th=400	177	1458	416	289	1572	549	103	622	209	341	2399	745
Th=500	94	1870	425	206	1863	542	65	861	228	298	2570	744
Th=600	42	2751	546	96	3284	743	38	1318	300	59	6172	1261
WMF (multi opt.)	175	1378	399	205	1877	544	95	658	210	222	2951	758

荷重が他の窓要素に比べて高くなる傾向にあるが、いずれの設定においても MSE_O, MSE_N はほぼ一定であり、両者にトレードオフが見られない特殊な例題である。提案手法で得られた解分布を見ると雑音除去性能が高い、すなわち MSE_N が小さい解はほぼ劣解となっており、多様な性能が高いフィルタが得られていない。しかし、従来手法とほぼ同等の原信号保存性能および雑音除去性能を示すフィルタが得られていることがわかる。上記より、両指標にトレードオフが見られる例題においては、従来手法で設計される荷重メジアンフィルタの各閾値設定の最良解に優越されない解が MSE_O-MSE_N 空間で幅広く得られることが分かった。また、トレードオフの有無によらず最良解とほぼ同等の性能を有する解が得られており、本手法が性能の高い多様なフィルタが設計できることがわかった。

6. ま と め

本論文では、荷重メジアンフィルタの最適な窓形状と荷重の推定を多目的最適化問題として扱い、NSGA-II を用いて最適化することで、一度の解探索で原信号の保存性能を重視したフィルタ、雑音除去性能を重視したフィルタ、その中間のフィルタの集合を同時に求める手法を提案した。数値実験より、従来の単一目的関数により設計される荷重メジアンフィルタと比較して、提案手法で得られたフィルタは、MSE_O-MSE_N 空間に幅広く分布する複数の閾値設定の最良解に優越されない複数の解が得られることを確認した。今後の課題として、自然画像のセグメンテーションとの併用があげられる。

謝辞 本研究の一部は独立行政法人日本学術振興会の科学研究費補助金（若手研究（B）：課題番号 24700234）の助成を得て行われた。

参 考 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 (1999).
- 2) Brownrigg, D. R. K.: The weighted median filter, *Commun. ACM*, Vol. 27, No. 8, pp. 807-818 (1984).
- 3) 花田良子, 棟安実治, 浅野晃: テクスチャ画像における劣化画像のみを用いた荷重メジアンフィルタの遺伝的アルゴリズムによる設計, *電子情報通信学会論文誌 A*, Vol. J94-A, No. 1, pp. 18-29 (2011).
- 4) Deb, K., Agarwal, S., Pratap, A. and Meyariyan, T.: A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II, *In KanGAL Report 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India*, pp. 849-858 (2000).
- 5) Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley (1989).
- 6) Abreu, E., Lightstone, M., Mitra, S. K. and Arakawa, K.: A New Efficient Approach for the Removal of Impulse Noise from Highly Corrupted Images, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 5, No. 6, pp. 1012-1025 (1996).
- 7) Dong, Y., Chan, R. H., and Xu, S.: A Detection Statistic for Random-Valued Impulse Noise, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 16, No. 4, pp. 1112-1120 (2007).
- 8) Garnett, R., Huegerich, T., Chui, C. and He, W.: A Universal Noise Removal Algorithm with an Impulse Detector, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 14, No. 11, pp. 1747-1754 (2007).
- 9) Brodatz, P.: *Textures: A Photographic Album for Artists and Designers*, Dover Pubns, (1993), <http://www.ux.uis.no/~tranden/brodatz.html>
- 10) Thierens, D. and Goldberg, D. E.: Elitist Recombination: An Integrated Selection Recombination GA, *Proc. of the 1st IEEE Conference on Evolutionary Computation*, Vol. 1, pp. 508-512 (1994).