

I-078

雑音画像のエッジ抽出におけるファジー集合のパラメータの決定

Parameter setting of fuzzy set for the edge detection method of noisy image

石井 聡*1 辻 裕之*1 田口 亮*2 木村 誠聡*1

Satoru ISHII Hiroyuki TUJI Akira TAGUCHI Tomoaki KIMURA

1 はじめに

画像処理の重要な処理の一つとして、エッジ抽出処理があり、特徴検出や画像認識等に用いられる。検出や認識に用いられるにはエッジ以外の雑音情報は不必要であるものの、カメラやビデオ等から取得した画像には一般的に撮像素子の熱雑音や伝送経路の影響などでガウス雑音やインパルス雑音が重畳してしまう[1]。そのため雑音が重畳した画像からエッジ情報を抽出した場合、エッジ情報だけでなく雑音成分も抽出されてしまい、出力画像は良好であるとは言い難い[2]。一般的にこの問題を解決する方法として雑音を除去するフィルタを最初に適用し、その後にエッジ抽出を行う。しかしながら、この方法では最初に雑音除去を行うため、高周波数成分を失う可能性があり、エッジ出力画像は良好であるとは言い難い。そこで筆者らは雑音除去とエッジ抽出を同時に行う方法を提案している[3]。文献[3]の方法は局所領域内にエッジがあるか否かの情報と雑音があるか否かの情報をファジー推論によって合わせて検討し、処理点がエッジであり、かつインパルス雑音でない場合に、エッジを抽出するという方法である。具体的にはエッジ抽出に用いる各画素にインパルス雑音が重畳しているかを調べるインパルス情報と局所領域内の形状を調べる形状情報を取得する。この時、処理対象画素がインパルス雑音であると判断された場合、メジアン処理を施す事でインパルス雑音が除去可能となる。また形状情報において局所領域が平坦部であると判断された場合にはエッジ出力を0とすることで、平坦部に重畳したガウス雑音の除去が可能とな

る。しかしながら、文献[3]の方法は形状情報やインパルス雑音情報で用いるファジー推論のメンバーシップ関数のパラメータに対して実験的手法によって求めた固定値を与えており、雑音が多い画像や細部信号が多い画像に対してはパラメータの再設定が必要になってしまうという問題が存在する。つまり、文献[3]の方法は、画像に重畳した雑音や形状に合わせた最適なパラメータが設定されているとは言い難い。そこで本稿では画像に重畳したガウス雑音を推測し、形状情報のパラメータを変化させる事で画像内のガウス雑音と形状に合わせたパラメータ設定方法を提案する。提案する方法は取得画像に重畳したガウス雑音をガウス雑音推定式を用いて、局所領域内のガウス雑音および形状に適した処理を判断する。本稿では提案法が、画像毎、局所領域内毎の形状、雑音の変化に対応したエッジ抽出を可能とし、文献[3]の方法より優れたエッジを抽出する事を示す。

2 ファジー推論を用いたエッジ抽出法

著者らはファジー推論を用いたエッジ抽出法として文献[3]を提案している。文献[3]は微分フィルタを基本とする方法であり、図1に示す 3×3 の局所領域 $I()$ における処理点 P と隣接画素 X, Y を用いてエッジ抽出を行う。しかしながら、図1の処理点 P, X, Y のいずれかにインパルス雑音が重畳した場合、エッジと一緒にインパルス雑音も抽出されることになり、またエッジが存在しない場合では雑音のみが抽出されることになる。そこで文献[3]では以下に示す方法によって雑音の検知・除去および局所領域内の形状情報を取得し、それらをファジー推論で合わせる事でエッジ抽出と雑音除去を同時に成し得る。なお、文献[3]のインパルス雑音は8bit階調画像とした場合、0または255の固定値を想定している。

2.1 インパルス雑音の検知

文献[3]では図1の P, X, Y (以下処理対象画素)を用いてエッジ抽出を行う。しかしながら、微分

*1 神奈川工科大学大学院情報工学専攻

Department of Information and Computer Sciences, Kanagawa Institute of Technology
1030 Simoogino, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0292
Japan

*2 東京都市大学工学部 Faculty of Engineering,
Tokyo city University 128-1 Tamatsutsumi,

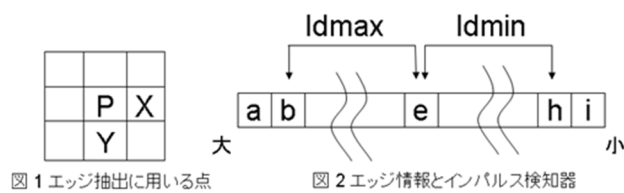


図1 エッジ抽出に用いる点

図2 エッジ情報とインパルス検知器

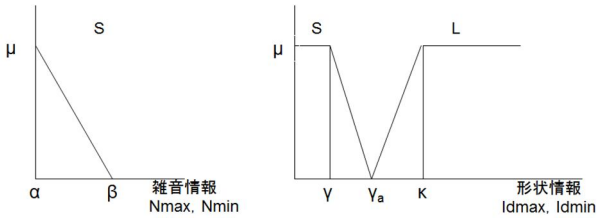


図3 ファジー集合

に用いる処理対象画素のいずれかにインパルス雑音が重畳している場合、インパルス雑音が抽出されてしまうという問題がある。そこで、以下の式によって処理対象画素にインパルス雑音が重畳しているかを判断する。

$$\begin{aligned} N_{\max} &= |2 \cdot N - (a + b)| \\ N_{\min} &= |2 \cdot N - (h + i)| \end{aligned} \quad (1)$$

$(N = \{P, X, Y\})$

ここで N は処理対象画素の P , X , Y の何れかを表す。 a は図2の様に局所領域を画素値の大きい順に並び替えた時の一番大きな値を表し、 i は一番小さな値を表す。

提案法は局所領域 $l()$ を並び替えることでインパルス雑音の検知を行う[3]。インパルス雑音は図2の並び替えた時の最大値または最小値に固まることが文献[3], [4]より示されている。また文献[4]にあるインパルス雑音の発生確率と局所領域内に重畳するインパルス雑音の個数を推定する式を用いて、インパルス雑音の発生確率が3%の時の雑音の個数を求めた所、局所領域内にはインパルス雑音が3個程度重畳することが文献[4]より明らかとなっている。この事から局所領域 $l()$ を並び替えた時、インパルス雑音は最大値または最小値のどちらかにインパルス雑音が2個以上連続して存在する場合が生じる。インパルス雑音が連続して存在する場合、 a と b , または h と i の画素はインパルス雑音である可能性が高い。そのため、処理対象画素と並び替えた時の両端をそれぞれ比べ、その差分値を用いてインパルス雑音の検知を行う。この時、インパルス雑音と判断された

画素はメジアン値に置換することでインパルス雑音を除去するものとする。もし処理対象画素にインパルス雑音が存在している場合、式(1)の結果は小さくなり、処理対象画素にインパルス雑音が存在していない場合は大きくなる。つまり式(1)によって、インパルス雑音が複数個重畳しているか否かが分かる。なお、局所領域内にインパルス雑音が存在しない場合、式(1)の結果は小さくなるため、インパルス雑音の誤検知が発生する。しかしながら、インパルス雑音の誤検知が発生した場合でも、置換された画素はエッジ部または平坦部の画素である可能性が高く、結果としてメジアン値は置換前の画素値に近いと考えられるため、エッジ精度に問題は発生しないと考えられる。

2.2 形状情報の取得

文献[3]では形状情報を以下の式を用いて取得している。

$$\begin{aligned} Id_{\max} &= D(a-m) - \text{Med}(l()) \\ Id_{\min} &= \text{Med}(l()) - D(i+n) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、式(2)の $D()$ は 3×3 の局所領域内を降順に並び替えた時の画素の順番を示し、 $\text{Med}(l())$ は局所領域 $l()$ のメジアン値を表す。また $a \sim i$ は2.1と同様、並び替えた順序を示す。式(2)の m , n は任意の数値を示し、 $(a-m)$ および $(i+n)$ は a から m 個および i から n 個離れている画素を表す。この m , n を与えることでインパルス雑音の影響を避けた画素の情報取得が可能となる[3]。局所領域内にエッジが存在していた場合、エッジ部と平坦部の画素群は最大値または最小値に固まる。この時、どちらかの群の個数は奇数となるため、個数が多い値の群には必ず中央値が含まれる事になる。よって図2の様に大小の値とメジアン値を比較する事でその局所領域内にエッジがあるか否かが分かることになる。具体的にはエッジ画素と平坦部の画素を比べた場合、式(2)の Id_{\max} , Id_{\min} は大きくなり、平坦部と平坦部を比べた場合、式(2)の Id_{\max} , Id_{\min} は小さくなる。つまり Id_{\max} , Id_{\min} が大きい場合は、局所領域内はエッジ部であり、値が小さい場合は平坦部であることが分かる。局所領域内にエッジがあると判断された場合は、図1の処理対象画素を用いたエッジ抽出を行う。また平坦部であると判断された場合はエッジ出力を0にすることで、平

平坦部に重畳しているインパルス雑音およびガウス雑音を除去することを可能とする。

2.3 ファジー推論による各情報の関連付け

2.1 および 2.2 で得られた情報を用い、局所領域内の形状およびインパルス雑音の有無を図3のファジー集合を用いて判断する。図3のインパルス雑音情報はS集合をインパルス雑音が重畳していない集合とし、 α から β までの範囲でインパルス雑音の検知を行う。この時、S集合ではない場合は、処理対象点の何れかにインパルス雑音が重畳しているものとし、対象画素にメジアン処理を施し、インパルス雑音の除去を行うものとする。図3の形状情報のファジー集合はS集合を平坦部の集合とし、 γ を中心として0から γ_a までの範囲としている。L集合はエッジ部の集合とし、 κ を中心に γ_a から255までとする。この時、S集合でガウス雑音の除去範囲が決定し、L集合でエッジ抽出を行う範囲が決定される。なおS集合でもなくL集合でもない場合、エッジでも平坦でもない部分であると考えられるため、特に重要視する必要はない。

以上のファジー集合を用いて、2.1 および 2.2 で得られた各情報はファジー推論を用いて式(3)のように関連付けられる。

If Idmax, Idmin is {S, L} and
 Nmax, Nmin is {S}
 then y = is {E₀~E₃, E₅~E₈}
 else y = is {E₄, E₉} (3)

ここで E₀~E₉は表1のルールテーブルに示される後件部である。S, Lは図3に示されるそれぞれの情報のファジー集合であり、この時のファジー集合のパラメータは実験的手法によって求めた固定値となる。よって雑音の状態や画像の種類が著しく変わると、ファジー集合のパラメータを再設定しなければならないという問題が出てくる。そこで、画像の雑音の状態に着目しパラメータを雑音の状態によって変化させる事で、より理想的なエッジ信号を得ることが可能であると考えられる。

3. 提案するファジー集合のパラメータ設定法

本稿で対象としている混合雑音はインパルス雑音およびガウス雑音があるが、本稿ではガウス雑音に着目する。インパルス雑音は文献[3]および

表1 ファジーテーブル

		Idmax	
		S	L
Nmax	P	E ₀ =0	E ₁ =2e - (X+Y)
	X		E ₂ =2P - (e+Y)
	Y		E ₃ =2P - (X+e)
	else	E ₄ =2P-(X+Y)	
		Idmin	
		S	L
Nmin	P	E ₅ =0	E ₆ =2e - (X+Y)
	X		E ₇ =2P - (e+Y)
	Y		E ₈ =2P - (X+Y)
	else	E ₉ =2P-(X+Y)	

[5]において述べられているように、現実的に3%までのインパルス雑音しか重畳しないと考えられる。そのため、文献[4]から式(2)の m, n を変化させることでインパルス雑音の影響を避けた画素の情報を得ることが出来る事が明らかになっている。よって本稿ではガウス雑音に着目し、雑音の重畳状態が異なる場合に対し、ファジー集合の形状情報のパラメータを変化させる方法を提案する。文献[3]の従来法では実験的手法で求めていたパラメータを、提案法ではガウス雑音推定式を用い、ガウス雑音の重畳に合わせたパラメータを設定する方法を提案する。

3.1 提案法で用いるガウス雑音推定式

文献[3]から形状情報の平坦部の集合である S 集合が大きすぎるとガウス雑音と一緒に細部信号やエッジも一緒に消えてしまう問題が発生する事が報告されている。その為、形状情報の平坦部の S 集合に注目し、ガウス雑音に合わせてメンバーシップ関数を変化させ、ガウス雑音状況に合わせたパラメータを設定する事で雑音除去とエッジ抽出の精度が向上すると考える。つまり、ガウス雑音と局所領域の形状に合わせた形状情報の S 集合のパラメータの決定をシステムチックに行う。システムチックに行うことでガウス雑音や画像の種類が著しく変化しても、都度パラメータのチューニングをする必要が不要となる。そこで本稿では以下に示すガウス雑音の推定式を用いて[6]、ガウス雑音の標準偏差を求め、形状情報の S 集合のパラメータ設定、具体的には図3の形状情報の γ の設定を自動的に行う方法を提案する。

$$\sigma = 1.483 \cdot \text{Med}\{|l() - \text{Med}(l())|\} \quad (4)$$

式(4)より、画像に重畳しているガウス雑音の標準偏差を推定することが可能となる[6]. なお本稿で扱う雑音はインパルス雑音 3%およびガウス雑音分散 $\sigma^2=25 \sim \sigma^2=400$ までの混合雑音である. よってメジアン処理をした場合でも、インパルス雑音が中央値になることはなく、混合雑音が重畳していても式(4)に問題は生じない.

4. 適用例

本稿では文献[5]から実際にカメラに発生すると考えられる雑音に対応可能である発生確率 3%のインパルス雑音とガウス雑音分散 $\sigma^2=25 \sim 400$ 程度の混合雑音が重畳した画像を対象とする. この時、式(2)の m, n の値は、文献[4]からインパルス雑音の発生確率が 3%の時に局所領域内に存在するインパルス雑音は 3個であることを考慮し、 $m, n=2$ とする. そして本稿で用いるインパルス雑音のメンバーシップ関数のパラメータは文献[3]のパラメータを用いる.

4.1 形状情報のパラメータチューニング

ここでは実験画像として Lenna(256×256)を用いて、3章で提案する形状情報のパラメータに対してガウス雑音の大きさとの関係について検討し、形状情報のパラメータの設定値について求める. 重畳させる混合雑音はインパルス雑音を 3%に固定し、ガウス雑音分散 $\sigma^2=25 \sim \sigma^2=400$ を重畳させ、実験を行う. この時、発生するガウス雑音はガウス分布に沿って発生することから[7], 形状情報の S 集合のパラメータである γ を $\gamma=\sigma$ に設定することで重畳するガウス雑音を概ね除去することが可能と考えられる. しかしながら、 σ が小さいとガウス雑音が残留してしまい、 σ が大きすぎるとガウス雑音の除去範囲は広がるものの、細部信号が消えてしまう問題が生ずる. そこで γ と σ の関係に対する最適値を実験的手法から求める. 図 4, 5 は、 $\gamma=X\sigma$ とし、 X の値を 1 ~ 3 まで 0.2 毎に変化させ、 E_s および N_e の変化を表したものである. なお、形状情報のパラメータである γ_a および κ は 2.2 で述べたように独立して存在させるため、 $\gamma_a=\gamma+3, \kappa=\gamma_a+3$ と一時的に設定する. γ_a および κ のパラメータチューニングについては γ と σ の関係が決定後に、 γ の値を固定し、 γ_a および κ の最適値の実験を行

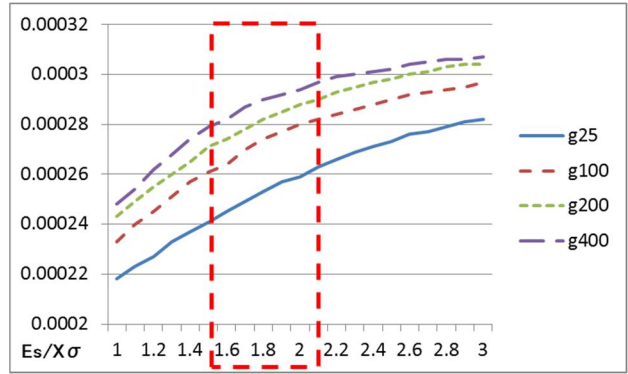


図 4 E_s の実験結果

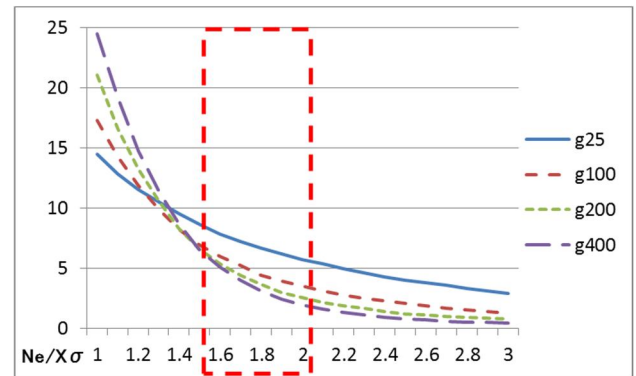


図 5 N_e' の実験結果

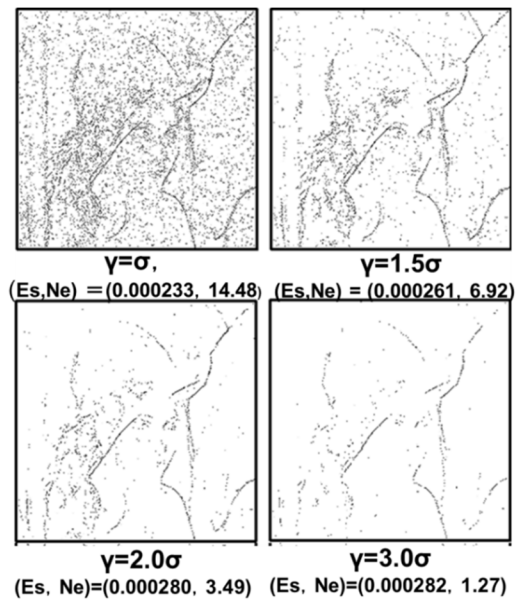


図 6 パラメータチューニング画像
(ガウス雑音 $\sigma^2=200$)

う. E_s および N_e のパラメータについて、 E_s は 0.00028 を過ぎるとエッジが薄くなり、 N_e' は 6 を下回れば平坦部に重畳するガウス雑音が除去出来ている事を図 6 のパラメータチューニング画像から判断出来る. その為、平坦部に重畳するガウス雑音を概ね除去し、エッジを損なわずに抽出

することの出来る $X\sigma$ は, Ne の値が 6 以下であり, なおかつ Es の値が 0.00028 以下である $\gamma=1.5\sigma \sim 2\sigma$ であることが図 4, 5 から判断出来る. しかしながら, $\gamma=1.5\sigma$ ではガウスの分散 $\sigma^2=200$ と大きくなった場合はガウス雑音の残留が目立ち, $\gamma=2\sigma$ の時は細部信号の一部が欠けてしまう事を考慮した結果, 提案法では $\gamma=1.8\sigma$ が適当と考える. 次に $\gamma=1.8\sigma$ に固定し, Es および Ne' を用い, 同様の実験を γ_a および κ に行った結果, Ne' が 6 以下となる $\gamma_a = \gamma + 6$, $\kappa = \gamma_a + 6$ が適当で考え, 以後は $\gamma=1.8\sigma$ とし, $\gamma_a = 1.8\sigma + 6$, $\kappa = \gamma_a + 6$ と設定し, 以後はこのパラメータを用いる.

4.2 種々の画像に対する提案法の適用

ここでは提案するパラメータの有効性を示すために, 6 種類の実験画像にインパルス雑音は 3% を重畳させ, ガウス雑音は $\sigma^2=25$, $\sigma^2=100$, $\sigma^2=200$, $\sigma^2=400$ の 4 種類を重畳させて実験を行う. なお, 比較対象手法として文献[3]の方法とインパルス雑音除去+ガウス雑音の除去+エッジ抽出の複合法として文献[8]+文献[9]+微分の方法との比較を行う. 評価ではエッジ強度誤差 Es と雑音誤差 Ne' を評価関数として用い[3], また処理結果による主観評価も行う. この時, Es および Ne は 0 に近いほど良好とされる評価関数である. 理想画像は微分処理後, 文献[10]の方法を用い, 画像の閾値を求め, 閾値以上のみを抽出した画像を理想画像とする. 表 2 に提案法および 2 つの比較対象の処理結果を示す. 表 2 の Es から, 提案法はガウス雑音が分散値 $\sigma^2=25$ と小さく重畳した場合, 2 つの比較対象と比べ, 優れていることが分かる. また, ガウス雑音の分散値 $\sigma^2=200$ の場合でも比較対象法と比べて Es の値が同等である事から, ある大きさのエッジが求められている事が分かる. しかしながら, $\sigma^2=400$ の場合は, Es の値は比較対象法と比べ, 良好とはいえない次に表 2 の Ne から, 提案法は $\sigma^2=25$ と小さく重畳した場合, Ne の値は大きく, 雑音除去能力が比較対象と比べ, やや弱いものの, ガウス雑音の分散値が大きくなるにつれ, Ne の値が比較対象と比べると小さくなっている. つまり, 提案法はガウス雑音の分散が大きくなるに従い, 高いガウス雑音除去性能を示す事が分かる. よって提案法は, ガウス雑音が小さい場合はエッジが強く抽出

表 2 数値評価結果

Airplane	Es				Ne			
	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$
method/noise								
提案法	0.000238	0.000251	0.000260	0.000268	7.53	5.35	4.17	3.54
文献[3]	0.000263	0.000258	0.000254	0.000242	2.80	3.10	4.27	21.32
文献[8], [9]	0.000282	0.000281	0.000281	0.000281	18.19	20.16	23.51	27.94
BRIDGE	Es				Ne			
	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$
method/noise								
提案法	0.000113	0.000114	0.000114	0.000115	5.76	4.63	3.92	2.83
文献[3]	0.000114	0.000113	0.000111	0.000108	4.66	5.68	7.90	35.80
文献[8], [9]	0.000116	0.000116	0.000116	0.000116	27.26	28.20	30.53	33.23
Boat	Es				Ne			
	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$
method/noise								
提案法	0.000167	0.000179	0.000186	0.000188	4.41	3.21	2.48	1.99
文献[3]	0.000189	0.000187	0.000184	0.000173	1.37	1.76	2.62	16.28
文献[8], [9]	0.000192	0.000192	0.000192	0.000192	14.96	16.91	18.99	24.15
Camerman	Es				Ne			
	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$
method/noise								
提案法	0.000347	0.000369	0.000375	0.000382	7.64	4.81	5.21	3.98
文献[3]	0.000375	0.000371	0.000368	0.000352	2.90	3.04	4.24	18.82
文献[8], [9]	0.000413	0.000413	0.000413	0.000414	15.14	17.08	20.14	24.08
Lighthouse	Es				Ne			
	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$
method/noise								
提案法	0.000177	0.000188	0.000188	0.000188	10.73	7.18	6.69	5.13
文献[3]	0.000192	0.000191	0.000185	0.000185	4.57	4.99	6.46	29.16
文献[8], [9]	0.000202	0.000202	0.000202	0.000202	21.99	23.27	25.58	28.81
Mandrill	Es				Ne			
	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$	$\sigma^2=25$	$\sigma^2=100$	$\sigma^2=200$	$\sigma^2=400$
method/noise								
提案法	0.000099	0.000100	0.000101	0.000101	4.28	3.49	2.06	1.84
文献[3]	0.000101	0.000100	0.000099	0.000095	2.37	3.53	5.48	29.16
文献[8], [9]	0.000102	0.000102	0.000102	0.000102	20.63	21.93	24.27	28.13

され, ガウス雑音が大きくなるに従い, エッジの強さよりも雑音除去を重視している事が分かる. これは形状情報の γ の設定に大きく係わるため, 例えば, エッジの強さを重要視したい場合には γ の設定を, $\gamma = \sigma$ とすることが出来る.

文献[3]は, パラメータを固定しているため, 雑音量が変化しても, 設定した値のエッジのみ抽出するために, 状況変化に弱く, 分散 $\sigma^2=400$ と大きくなった場合は Ne' が大きくなってしまっている. よって, 分散値が大きくなった時に対応出来ない事が分かる. 文献[8], [9]の複合法は, 雑音重畳画像からの復元能力は優れているものの, エッジ抽出をした時, エッジ画素以外の微細な信号も抽出するため, ガウス雑音の除去が完全に出来ず, エッジと一緒にガウス雑音と一緒に抽出されてしまう事が分かる.

次に数値評価だけでなく, 図 7 に主観評価画像を示す. 図 7 はインパルス雑音 3% およびガウス雑音 $\sigma^2=25 \sim \sigma^2=400$ が重畳した画像からエッジを抽出した結果である. 図 7 から提案法は他の画像と比べ, 雑音があまり重畳していない場合にはエッジや細部信号が抽出できており, ガウス雑音が多く重畳した時は雑音除去を優先させながらエッジを抽出している事が分かる. この事から先に述べたように提案法は雑音の変化に対応したエッジ抽出をしている事が分かり, γ と σ の設定法に一定の指針を与えたと考えられる. 文献[3]




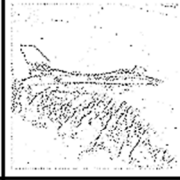
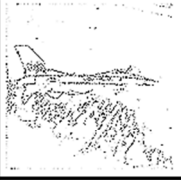

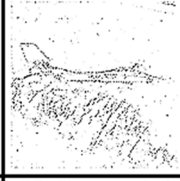
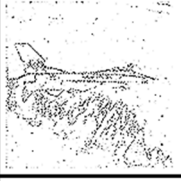

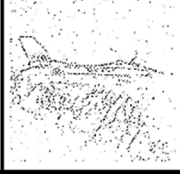
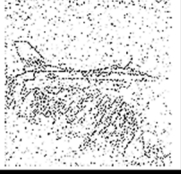

	提案法	文献[3]	文献[8], [9]
$\sigma^2=25$			
$\sigma^2=100$			
$\sigma^2=200$			
$\sigma^2=400$			

図7 主観評価結果

ではパラメータを固定しているため、主観評価に差は無く、文献[8], [9]の複合法ではガウス雑音の重畳が目立つため、主観評価においても有効なエッジ抽出法であるとは言いがたい。以上から提案法はエッジ抽出とガウス雑音に優れた性能を示し、その有効性が確立されたと言えよう。

5. まとめ

本稿では、ガウス雑音の重畳を推定し、メンバーシップ関数の形状情報のパラメータを決定する方法を提案した。提案法は対象画像に重畳したガウス雑音を推定し、パラメータとして用いる事で、画像の状況が変化する度にパラメータチューニングを行う必要が無くなるため、より画像内の形状やガウス雑音の状況に合わせたエッジ抽出処理を行う事が可能であることを確認した。また、4.1で求めた σ の係数を変化させる事で、より雑音除去性能やエッジ抽出精度に重みを置いた処理を行う事が可能である。しかしながら、ガウス雑音が強く重畳した場合、ガウス雑音と細部信号の判断が難しくなるため、細部信号をガウス雑音と誤検知してしまう問題がある。その為、強く雑

音が重畳した場合でも細部信号を抽出することが望まれる。これについては今後の課題である。参考文献

- [1]酒井幸市著, "デジタル画像処理の基礎と応用", p12, CQ 出版社, 2007
- [2]貴家仁志著, "よくわかる動画・静止画の処理技術", p13, CQ 出版社, 2004
- [3]石井聡, 辻裕之, 木村誠聡, "混合雑音重畳画像からのエッジの抽出", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.109, No.447, Page.81-84, 2010
- [4] Tomoaki Kimura, Akira Taguchi, Yutaka Murata, "Detection from noisy images by using the fuzzy technique", Electronics and Communications in Japan (Part III: Fundamental Electronic Science) Volume 83, , p p 61-69, Issue 1, D January 2000
- [5]中村幸弘, 片山卓也, 木村誠聡, 穂本和昌, "混合雑音重畳画像復元に関するハードウェア実装の研究", 電気学会電子回路研究会資料, Vol.ECT-09, No. 109-120, Page59-62, 2009.11.12
- [6]棟安実治, 田口亮, "非線形デジタル画像処理", pp 139, 朝倉書店, 1999
- [7] 柴田義貞著, "正規分布", p131, 東京大学出版会(1981)
- [8] 橋本有平, 梶川嘉延, 野村康雄, "高性能インパルス検知器によるノイズ位置情報を用いたインパルス性ノイズ除去手法", 信学論(A), Vol.J84-A, No.1, p p.1-12, 2001
- [9]木村誠聡, 田口亮, 濱田敬, 村田裕, "ファジー推論を用いた雑音重畳画像の復元", 電子情報通信学会技術報告, DSP98-28, pp25-31, May, 1998
- [10] 大津展之, "最小値フィルタを利用した2値化のしきい値選択法", 電子情報通信学会論文誌(D), Vol.J63-D, No.4, pp.349-356, Apr. 1980