

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500227

研究課題名(和文)ボケと雑音が複合的に重畳した画像の復元アルゴリズムとその実用化に関する研究

研究課題名(英文)Image restoration algorithm for multiple degradation caused by blur and mixed noise

研究代表者

辻 裕之(Tsuji, Hiroyuki)

神奈川工科大学・情報学部・教授

研究者番号：70350676

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：画像入力装置で撮像される画像は光学系に起因するボケや装置特有の雑音によって複合的に劣化しており、これらを効果的に除去する画像復元法の確立が求められている。本研究では、ボケ、ガウス雑音、インパルス雑音に対応可能なTotal Variation Filter (TVフィルタ)を要として、これらを統一的に扱う画像復元のフレームワークを提案し、混合雑音除去の性能において従来法より優れた結果が得られることを確認した。また、TVフィルタをFPGA実装するためのハードウェア構成を検討し、実際にTVフィルタをFPGA実装したうえで映像を入力し、TVフィルタのリアルタイム処理が実現できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Total Variation (TV) filter is a nonlinear filter that is suitable for Gaussian noise removal, and has an advantage of preserving edges of the objects. We extended the framework of TV filter, so that it can be applied not only for Gaussian noise but also impulse noise. In this research, we applied this framework for the restoration of images degraded by the mixed noise that is composed of both Gaussian noise and impulse noise. In the proposed framework, it is required to detect spatial positions of impulse for removing the mixed noise successfully. Therefore, we introduced one of the most efficient impulse noise detectors we proposed, which is based on Gaussian curvature of the image surface. Through computer simulations, we demonstrated that the image quality of the restored images is effectively improved, compared with the conventional filters such as original TV, DW-MTM and the hybrid of switching median and bilateral filter.

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：人間情報学・知覚情報処理

キーワード：画像処理 画像復元 非線形フィルタ 混合雑音 TVフィルタ FPGA実装

### 1. 研究開始当初の背景

デジタル画像入力装置によって撮像される画像は光学系に起因するボケやデジタルデバイス特有の雑音によって複合的に劣化しており、これらを効果的に除去する画像復元法の確立が求められている。例えば、撮像素子の暗電流に起因する雑音はガウス雑音でモデル化される一方で、データ転送時のビット誤りに起因する雑音はインパルス雑音としてモデル化される。性質の異なるこれらの雑音が同時に重畳した「混合雑音」を対象とする雑音除去手法は、それぞれを単独で扱う各種の雑音除去法よりも難しく、現在もなお研究が行われている。

また、画像入力デバイスにおいては、レンズ固有の特性や手ブレ等によって生じるボケの発生が避けられない。このため、一般環境下では、ボケが生じた画像に対してさらに上述の混合雑音が重畳した複合的な劣化画像を考慮する必要がある。実用上はボケや雑音に対する個々の既存手法を組み合わせることで対応可能であるが、十分な画質が得られないことも多いことから、複合的な劣化画像を統一的に扱うより高度な画像復元の枠組みが求められている。

また、一般に複合的に劣化した画像を対象とした復元処理においては、画像の局所的な状況に応じた適応的な処理を行う必要がある。これらは非線形な信号処理を伴うが、多くの場合、線形フィルタよりも複雑な処理が求められる。加えて、最適化が必要となるアルゴリズムには反復処理を伴うことが多く、さらに演算量が増えたと考えられる。このため、アルゴリズムの実用化にあたり、リアルタイム処理を実現するためには、ハードウェア化を視野に入れた処理の高速化の検討が重要であると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、暗電流や熱雑音に起因するガウス雑音と伝送路中のビット誤りに起因するインパルス雑音が同時に重畳した混合雑音に対する画像復元法の提案を行うことである。その際、上述の混合雑音に加え、さらにボケを含んだ複合的な劣化画像への拡張が容易に可能となるような画像復元のフレームワークを提示することを目指した。

具体的には、ボケの復元と混合雑音の除去の双方に対応可能な要素技術として、PDEを用いた正則化手法である Total Variation Filter (以下、TV フィルタと記す) に着目し、以下の ~ の実現を目的とした：

画像の局所情報に基づき、TV フィルタの強弱を画素ごとに制御することで、ガウス雑音平滑化後の画質を改善すること

インパルス雑音を TV インペインティングによって周辺画素から補完するために、ランダム値のインパルス雑音を精度よく検知する手法を確立すること

反復処理を伴う TV フィルタ処理を高速に実現するため、FPGA による TV フィルタのハードウェア実装を実現すること

### 3. 研究の方法

(1) 本研究で提案する画像復元手法のフレームワークを図1に示す。

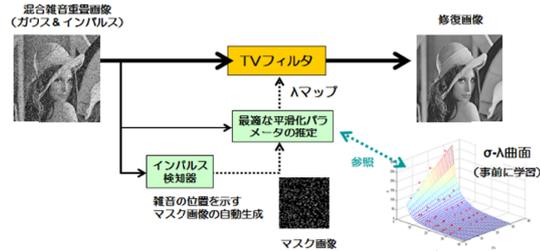


図1 画像復元法のフレームワーク

本手法においてガウス雑音とインパルス雑音の除去に適用する要素技術は TV フィルタである。TV フィルタは、以下のエネルギー汎関数を最小にする画像  $u$  を数値的に求めることで実現される：

$$J[u] = \int |\nabla u| dx dy + \frac{\alpha}{2} \int_{\Omega \setminus D} (u - u_{in})^2 dx dy \quad (1)$$

ここで、 $u_{in}$  は劣化した入力画像、 $D$  はインパルス雑音が重畳した領域、 $\Omega \setminus D$  はそれ以外の領域を表す。 $\lambda_\alpha$  は画素  $\alpha = (x, y)$  における平滑化パラメータである。

右辺の第2項ではインパルス雑音が重畳していない領域  $\Omega \setminus D$  に対してのみ積分が行われる。これによりインパルスが重畳していない領域にはガウス雑音除去のための通常の TV フィルタが実現され、一方でインパルス雑音が重畳した領域には右辺第1項に基づく画素の補完が行われる。この補完処理は TV インペインティングと呼ばれる。

本研究では TV フィルタの実装方法として T. Chan らのデジタル TV フィルタを利用した。この方法では、画素  $\alpha$  における TV フィルタの出力は以下の式(2)を適切な回数だけ反復することによって得られる：

$$\begin{cases} u^{(0)} = u_{in} \\ u^{(n+1)} = F(u^{(n)}) \end{cases} \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

ただし、関数  $F(\cdot)$  は以下の式(3)~(6)で決まる。

$$F(u)|_\alpha = \sum_{\beta \sim \alpha} h_{\alpha\beta} + h_{\alpha\alpha}(u_{in})_\alpha \quad (3)$$

$$h_{\alpha\beta} = \begin{cases} \frac{w_{\alpha\gamma}}{\lambda_\alpha + \sum_{\gamma \sim \alpha} w_{\alpha\gamma}} & (\beta \neq \alpha) \\ \frac{\lambda_\alpha}{\lambda_\alpha + \sum_{\gamma \sim \alpha} w_{\alpha\gamma}} & (\beta = \alpha) \end{cases} \quad (4)$$

$$w_{\alpha\beta} = \frac{1}{|\nabla_\alpha u|_\epsilon} + \frac{1}{|\nabla_\beta u|_\epsilon} \quad (5)$$

$$|\nabla_\alpha u|_\epsilon = \sqrt{\sum_{\beta \sim \alpha} (u_\beta - u_\alpha)^2 + \epsilon} \quad (6)$$

ここで  $\beta \sim \alpha$  は画素  $\alpha$  と  $\beta$  が互いに隣接していることを表し、 $\sum_{\beta \sim \alpha}$  は画素  $\alpha$  に隣接するすべ

ての画素 $\beta$  に対する総和を表す．また、 $\varepsilon$  は微小な正定数を表す．

(2) 図1の TV フィルタを実現するには、これに先立ち、インパルス雑音の重畳位置を精度よく検知するインパルス検知手法、及び各画素 $\alpha$ の近傍領域の状況から平滑化パラメータ $\lambda_\alpha$ を適切に決定する $\lambda$ マップ生成手法の確立が必要である．

本研究では、インパルス雑音を精度よく検出するため、画像曲面上のガウス曲率を計算し、その値を閾値処理することによりインパルス雑音を検知する独自の手法を提案した．本手法の特長として、0~255のランダム値をとるインパルス雑音に対しても適用可能であること、ランダム値インパルス雑音への適用を想定した有力な既存手法（例えばSD-ROM、PWMAD等）よりも優れたインパルス検知の性能を持っていること等が挙げられる．本インパルス検知手法の詳細は文献 [1] に記載されている．

一方、インパルスが重畳していない正常な画素 $\alpha$ に対しては、適切な平滑化パラメータ $\lambda_\alpha$ を画素毎に決定する必要があるが、具体的な方法が明らかではなかった．そこで本研究では独自の決定手法を提案し、これに基づいてマップの生成を行った．本手法は、画素 $\alpha$ における平滑化パラメータ $\lambda_\alpha$ がその近傍領域の信号分散 $\sigma_s$ と雑音分散 $\sigma_n$ の関数として与えられるという仮定の下で、以下の $\sigma$ - $\lambda$ 曲面モデルを導入する：

$$\lambda = f(\sigma_n, \sigma_s) = (p\sigma_s + q)/\sigma_n^2 \quad (7)$$

ここで係数 $p, q$ は何枚かの標準画像を用いて、事前に学習しておく．いったん $p, q$ が決まってしまうと、あとは式(7)を用いて各画素における $\lambda_\alpha$ の値を計算することにより、マップを生成することが可能である．本研究におけるマップ生成については文献 [1] に詳細が記載されている．

(3) TV フィルタのように反復処理を必要とする画像処理フィルタをハードウェア化するには、

反復処理の間、1フレーム分の画像情報を保持する必要があるため、大量のメモリを必要とする

同じハードウェアを複数用意する場合、メモリおよびロジック規模が大きくなる

等の問題が生じる．これらの問題を解決するため、メモリの使用量を抑えたハードウェア構成の提案を行った．

図2に全体のブロック図を示す．本構成では必要なラインのメモリだけを実装することで全体のメモリ使用量を削減した．具体的には、図3に示すブロック図の様に BRAM (1024bit  $\times$  8bit) 6ブロックとシフトレジスタ (5  $\times$  8bit) 5ブロックで構成する．これは式(3)~(6)の計算に必要な画素が5  $\times$  5の25画素分だけ必要なことから、縦方向について1ライン分のバッファを含め、6ラインを1セット

と考えるためである．図2の BRAM0~5には画面の水平方向の幅分毎に信号が書き込みこまれる．これらはリングバッファを形成しており、7ライン目以降は BRAM0 に戻って書き込まれることになる．また、読み出しは一度に1ライン5画素の5ライン分、つまり25画素分の情報のうち13画素が TV フィルタへ出力されるため、実質的にパイプライン的に処理させることが可能となる．このような構成をとることにより、各段の TV フィルタでは1画面分のメモリを必要とせず、数ライン分のメモリで十分であり、メモリの使用量を抑えることが可能となる．

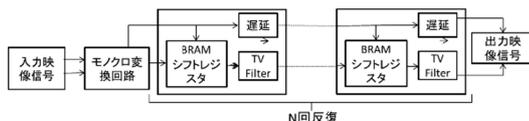


図2 TV フィルタの全体ブロック図

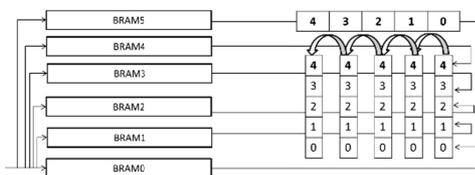


図3 BRAM とシフトレジスタのブロック図

#### 4. 研究成果

(1) 本研究の成果として得た TV フィルタに基づく複合的劣化画像の復元手法の性能を検証するため、各種従来手法との比較実験を行った．本実験ではボケは考慮せず、ガウス雑音とインパルス雑音が混在した混合雑音除去を対象とする．比較対象とする従来法は、ガウス雑音除去に効果的な Chan らのデジタル TV フィルタ(TV)、混合雑音除去に効果的な Double Window Modified Trimmed Mean フィルタ(DW-MTM)、および代表的なインパルス雑音除去手法である Switching Median とガウス雑音除去に有効な Bilateral filter を順次適用したハイブリッド法(Hybrid)である．なお、Switching Median に適用するマスク画像は提案法と同じものを使用した．

実験に使用した 20 種類の標準画像は、すべて 256  $\times$  256、256 階調(8bit)のグレースケール画像である．これらの画像に対して、平均 0、標準偏差  $\sigma=10, 20, 30$  のガウス雑音、輝度値 0 から 255 までランダム値をとる発生確率 10, 20, 30% のインパルス雑音の両者をそれぞれ重畳させた 9 パターンの混合雑音重畳画像を作成し、各々の手法を適用する．

提案法において $\lambda$ マップの作成に用いる曲面モデルには、事前に 3 枚の標準画像 (Lena, Boat, Bridge) から作成した  $p = 170, q = 2531$  のモデルを使用した (文献 [1]) ．

(2) 各手法による修復画像の評価値 (SSIM) を 20 種類の全テスト画像に対して平均をとった結果を図4に示す．この図より、9パタ

ーンの雑音の組み合わせすべてに対して提案法がデジタル TV フィルタ、DW-MTM フィルタおよび Hybrid 法のいずれにも優っていることがわかる。この傾向は、客観評価値に PSNR を用いた時にも同様であった。

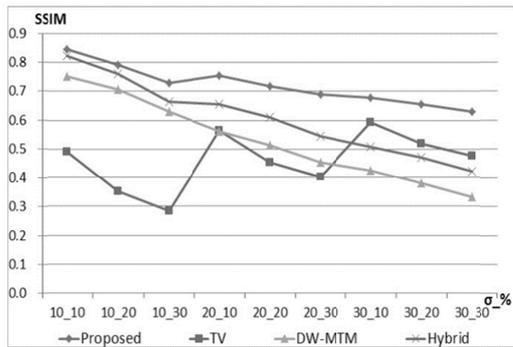


図4 全画像の平均による SSIM の推移

表1に数値評価の一例としてガウス雑音  $\sigma_n = 20$ 、インパルス雑音発生確率 10%時における各手法の処理結果を示す。提案法、TV フィルタ、DW-MTM フィルタ、Hybrid 法の4つの中で一番数値が良かったものを太文字で表している。なお、参考ため、表の一番右の列には、インパルス雑音を 100%正確に検出して得られる理想マスク画像を提案法に適用した結果を Optimal として提示している。

表1 混合雑音除去結果 ( $\sigma_n = 10, 10\%$ )

	Proposed	TV	DW-MTM	Hybrid	Optimal
Aerial	0.5779	0.5323	0.6511	<b>0.6518</b>	0.5954
Airplane	<b>0.8313</b>	0.5212	0.5304	0.6590	0.8556
Balloon	<b>0.8421</b>	0.6036	0.4078	0.5896	0.8523
Barbara	<b>0.6932</b>	0.5671	0.6087	0.6701	0.7393
Boat	<b>0.8017</b>	0.6172	0.5288	0.6491	0.8180
Bridge	0.6268	0.5735	0.6918	<b>0.6921</b>	0.6496
Building	<b>0.7582</b>	0.5603	0.6720	0.6981	0.7851
Cameraman	<b>0.7941</b>	0.4953	0.4913	0.6466	0.8250
Earth	<b>0.7878</b>	0.6204	0.5940	0.6636	0.8005
Girl	<b>0.8253</b>	0.4516	0.4874	0.6371	0.8359
Lax	0.5107	0.4820	0.5338	<b>0.5650</b>	0.6224
Lena	<b>0.8235</b>	0.6245	0.5478	0.6627	0.8438
Lighthouse	<b>0.7269</b>	0.5276	0.5652	0.6619	0.7840
Mandrill	0.5513	0.5350	<b>0.6330</b>	0.6328	0.6048
Milkdrop	<b>0.8649</b>	0.5856	0.4493	0.6271	0.8726
Parrots	<b>0.8450</b>	0.5894	0.4633	0.6275	0.8656
Pepper	<b>0.8559</b>	0.6288	0.5527	0.6830	0.8695
Sailboat	<b>0.8426</b>	0.5889	0.5974	0.6926	0.8571
Text	<b>0.7704</b>	0.5746	0.7014	0.7452	0.8051
Woman	<b>0.8003</b>	0.6233	0.5468	0.6542	0.8192

表1の結果から、約8割の画像に対して提案法(Proposed)の修復画像の評価値が最も高くなっている。このことから概ね提案法が混合雑音を最も効果的に除去しているといえるが、一部 Aerial, Bridge, Lax, Mandrill といった細部信号が多い画像に対して、評価値が悪くなってしまう傾向が見られることがわかる。これは、細部信号の影響でガウス雑音の標準偏差の推定を誤った結果として過度に平滑化が施された結果と考えられる。

(3) 提案法および各従来法による画像復元の結果を主観的に確認するため、図3から図5に処理画像を示す。

図5のBarbaraは、画像内に細部信号が多く含まれた画像である。提案法はインパルス雑音およびガウス雑音の影響は除去できているものの、過度な平滑化により、主観的な画質を損ねてしまっている。例えば、背景の椅子の模様や人物の着衣に見られる周期的な縞模様が過度な平滑化によりつぶれていることが確認できる。

図6のPepperは平坦部が多い画像の典型的な事例である。提案法はこのような画像に対して特に良好な結果を示す。ガウス雑音が強く重畳した場合 ( $\sigma = 30$ ) においても、提案法は混合雑音の除去を効果的に行えていることが確認できる。



図5 Barbara ( $\sigma_n = 30$ , 発生確率 20%)

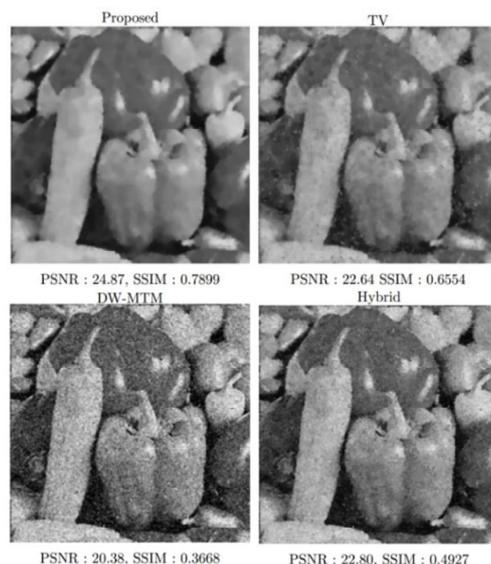


図6 Pepper ( $\sigma_n = 30$ , 発生確率 20%)

(4) 先に述べたハードウェア構成にしたがって、TVフィルタのFPGAへの実装を行った。この際、TVフィルタの構成は10段とした。FPGAには高速な処理が可能なALTERA社の

開発用ボード Stratix V を用いた。また、開発ツールには Quartus Subscription Edition v13.0 を、開発言語には VHDL を使用した。

図 7 に 10 回の反復処理を実装した場合のコンパイル結果を示す。この結果から、10 段の TV フィルタを実装してもメモリ、ロジック共に余裕があることがわかる。さらに、FPGA に実装した TV フィルタに映像を入力して動作確認を行ったところ、TV フィルタの性能をソフトウェア処理と比べ損なうことなく実装でき、かつ映像信号をリアルタイムで処理できることを確認した。



Family	Stratix V
Device	5SGSMD5K2F40C2
Timing Models	Final
Logic utilization (in ALMs)	144,440 / 172,600 (84 %)
Total registers	293673
Total pins	77 / 864 (9 %)
Total virtual pins	0
Total block memory bits	1,228,664 / 41,246,720 (3 %)
Total DSP Blocks	648 / 1,590 (41 %)

図 7 反復処理 10 回を伴う TV フィルタを実装した結果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

三浦 翔、辻 裕之、木村 誠聡、“混合雑音画像に対する拡張 Total Variation フィルタの雑音除去性能に関する考察”、神奈川工科大学研究報告(理工学編) 査読有、第 38 号、pp.59 - 66

[学会発表](計 13 件)

田中 大、三浦 翔、辻 裕之、木村 誠聡、“ $\lambda$  曲面モデルを用いた空間適応型 TV フィルタの実現に関する検討”、第 26 回信号処理シンポジウム、2011.11、札幌、北海道

近木 邦彦、星 直樹、辻 裕之、“曲率を用いたインパルス性雑音検知の基礎検討”、電子情報通信学会総合大会 A-4-8、2012.3、岡山大学

花上 将太、木村 誠聡、“反復法のハードウェア実装”、電子情報通信学会総合大会(学生ポスターセッション)ISS-P-107、2012.3、岡山大学

Sho Miura, Masaru Tanaka, Hiroyuki Tsuji, Tomoaki Kimura, “Gaussian noise removal

using spatial adaptive TV filter”, International Workshop Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2012), 2012.09, Bangkok, Thailand

近木 邦彦、三浦 翔、辻 裕之、木村 誠聡、“画像曲面のガウス曲率を用いたインパルス雑音検知手法”、電子情報通信学会技術研究報告、Vol.112、No.207、SIS2012-27、2012.9、梅田、大阪

成沢 良太郎、三浦 翔、辻 裕之、木村 誠聡、“TV フィルタの FPGA 実装についての検討”、電子情報通信学会技術研究報告、Vol.112、No.348、SIS2012-42、2012.12、津田沼、千葉

Sho Miura, Hiroyuki Tsuji, Tomoaki Kimura, “Impulse noise detection based on Gaussian curvature of image surface”, International Workshop on Advanced Imaging Technology (IWAIT 2013), 2013.1, Nagoya, Japan.

田中 大、三浦 翔、辻 裕之、木村 誠聡、“空間適応型 TV フィルタにおける  $\lambda$  マップ生成法に関する検討”、電子情報通信学会技術研究報告、Vol.112、No.465、SIS2012-60、2013.3、浜松、静岡

成沢 良太郎、三浦 翔、辻 裕之、木村 誠聡、“Total Variation フィルタの FPGA 実装についての検討”、電子情報通信学会総合大会(学生ポスターセッション)、ISS-P-214、2013.3、岐阜大学

Sho Miura, Hiroyuki Tsuji, Tomoaki Kimura, “Randomly valued impulse noise removal using Gaussian curvature of image surface”, International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), 2013.11, Okinawa, Japan.

成沢 良太郎、仲西 篤、辻 裕之、木村 誠聡、“映像信号に対する Total Variation filter の実装”、電気学会 電子回路研究会、ECT-13-125、2013.11、日本大学

仲西 篤、成沢 良太郎、木村 誠聡、“映像信号に対する反復処理のメモリ実装に関する考察”、電子情報通信学会総合大会(学生ポスターセッション)ISS-P-117、2014.03、新潟大学

成沢 良太郎、仲西 篤、辻 裕之、木村 誠聡、“反復型 Total Variation フィルタの実装”、電子情報通信学会総合大会、A-20-2、2014.03、新潟大学

[その他]

組み込み機器展 Embedded Technology 2013 (ET2013)

Total Variation フィルタを FPGA 実装したハードウェア機器の展示を行った。

6 . 研究組織

(1)研究代表者

辻 裕之 (TSUJI HIROYUKI)  
神奈川工科大学・情報学部・教授  
研究者番号：70350676

(2)研究分担者

木村 誠聡 (KIMURA TOMOAKI)  
神奈川工科大学・情報学部・教授  
研究者番号：40454178