

Total Variation フィルタの平滑化パラメータの FPGA 実装 FPGA implementation of Smoothing parameter of Total Variation filter

小林恵太† 仲西篤† 辻裕之† 木村誠聡†

Keita Kobayashi Atsushi Nakanishi Hiroyuki Tsuji Tomoaki Kimura

1. まえがき

画像に重畳したガウス雑音を除去するフィルタ[1]の一つとして変分原理を用いた Total Variation(TV)フィルタがある。TV フィルタはエッジ保存性が高くガウス雑音を効果的に除去可能なフィルタとして報告されている[2][3]。このフィルタは、反復処理を必要とするフィルタであるものの一つの画像を処理するのに反復処理をしないフィルタに比べ多くの時間を必要とする。

筆者らは文献[4]において TV フィルタのハードウェア化について報告しており、複数回の TV フィルタ処理を含めた映像信号に対する処理を実装している。しかしながら、文献[4]の処理は画像信号に重畳するガウス雑音が特定されていることを前提としており、文献[2]のように不特定のガウス雑音には対応していない。

そこで本稿では不特定のガウス雑音に対応するために入力画像からリアルタイムで平滑化パラメータを画素ブロック毎に決定する方法と雑音の有無に応じて TV フィルタの処理を適用する方法を提案し、FPGA の実装により映像信号を入力したときにリアルタイムで反復型の TV フィルタが処理できることを報告する。

2. TV フィルタと平滑化パラメータ λ

2.1 TV フィルタ

TV フィルタは反復処理を必要とする非線形フィルタであり、その処理は次の式のように示される[2]。

$$J[u] = \int_{\Omega} |\nabla u| dx dy + \frac{\lambda}{2} \int_{\Omega} (u - u_m)^2 dx dy \quad \dots(1)$$

式(1)は過剰な不自然な画像を排除するための正則化項(第一項)と最適解が元の劣化画像から離れすぎないようにするための制約項(第二項)から構成される。ここで係数 λ ($\lambda > 0$) は平滑化の度合いを決める平滑化パラメータでありガウス雑音の重畳度合いにより変化させる必要がある。よってこのパラメータは入力画像毎に異なる設定をする必要がある。文献[2]では与えられた入力画素ごとにその値を設定する方法であり、本稿で扱う TV フィルタの設定についてはこれに添うものとする。

2.2 平滑化パラメータ λ と局面モデル

文献[2]では与えられた入力画像毎に λ の値を適切に推定する方法について述べられており、平滑化パラメータ λ の最適解は以下の式で与えられる。

$$\lambda = \frac{1}{\sigma^2} \frac{1}{|\Omega|} \sum_{\alpha \in \Omega} \sum_{\beta \in \Omega} w_{\alpha\beta} (u_{\beta} - u_{\alpha})(u_{\alpha} - (u_m)_{\alpha}) \quad \dots(2)$$

ここで u は平滑化処理後の画素値であり、また w は重

み係数である。この式(2)には右辺に平滑化処理後の画素値 (u_{α} および u_{β}) を含んでいるため、 λ を求めることは困難である。そこで文献[2]では式(2)を変形し、最適な平滑化パラメータ λ を与えるガウス雑音の標準偏差 σ_n と画像の標準偏差 σ_s に関する学習平面 F として式(3)のようにモデル化している。

$$\lambda = F(\sigma_n, \sigma_s) = \frac{p\sigma_s + q}{\sigma_n^2} \quad \dots(3)$$

ここで関数 $F(\cdot)$ は学習局面であり、 p および q のパラメータは文献[2]において $p=170$, $q=2531$ が実験的に求められている。また σ_s および σ_n は次の式で推定される。

$$\sigma_n = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sigma_x(B_i) \quad \dots(4)$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \sigma_x^2 - \sigma_n^2} \quad \dots(5)$$

ここで式(4)の M は画像全体をあるブロック (B_i) に分割した際のブロック内の画素の標準偏差のうち下位 5% の値である。なおブロック内の標準偏差は次式で求められる。

$$\sigma_x(B_i) = 1.483 * \text{median}\{|B_i - \text{median}(B_i)|\} \quad \dots(6)$$

文献[2]では 1 画面分のデータから各標準偏差を算出しているため、そのままハードウェアとして実装した場合多くのメモリが必要となり、FPGA に実装できなくなる可能性がある。そこで本稿では画面全体に対して一律な平滑化パラメータを与えるのではなく、ある小さな領域ごとに平滑化パラメータを時变的に決定する方法を提案しメモリの使用量を抑えることを考える。本稿では映像信号を扱うことに着目し、横方向におけるラインごとのブロック分割を試みる。具体的には 16 画素ごとにブロック分割を施し、そのブロック毎に各標準偏差を求める。よって式(4)および式(5)を次のように変形する。

$$\sigma_x' = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^M \sigma_x(B_i') \quad \dots(7)$$

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_x' + \sigma_{n-1}}{2} \quad \dots(8)$$

ここで B_i' は横方向に分割したブロックであり 16 画素 \times 1 ラインである。また式(5)の画像の標準偏差 σ_s は小さな領域ごとに算出するため次の式のように変形する。

$$\sigma_s' = \sqrt{(\sigma_x')^2 - (\sigma_n')^2} \quad \dots(9)$$

以上によって 1 画面分のメモリを必要とせずライン分のメモリのみで TV フィルタの平滑化パラメータを時变的に決定することが可能であると考えられる。

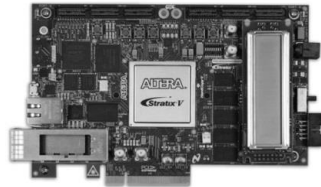
平滑化パラメータ λ は式によって求められるが計算時間が一定しているとはいえない。そこで σ_s' と σ_n' を入力とした Look Up Table としてメモリ上に局面モデルを展開することで常に一定の出力を試みる。以上によって TV フ

†神奈川工科大学 情報工学専攻

フィルタ処理と平滑化パラメータ λ の推定部についてハードウェア実装が可能となる。

3. TV フィルタの FPGA への実装と結果

ここでは TV フィルタの処理を FPGA に実装することを試みる。FPGA は ALTERA 社製 Stratix V が実装された図 7 に示すボードを用いる。また用いる開発ツールは Quartus II subscription Edition ver.13.0 であり、開発言語は VHDL とする。



LEs:172000, BRAM:41246720 bit

図 1 開発用ボード Altera, Stratix V

3.1 実装結果

図 2 は FPGA ボードに対して TV フィルタを実装した結果である。これは 800×600 の映像信号に対して 9 回の TV filter の反復処理および平滑化パラメータ推定の実装を実現している。結果としてメモリの使用量が十分に抑制されていることが分かる。

Family	Stratix V
Device	5SGSMD5K2F40C2
Timing Models	Final
Logic utilization (in ALMs)	169,687 / 172,600 (98 %)
Total registers	389871
Total pins	78 / 864 (9 %)
Total virtual pins	0
Total block memory bits	4,700,112 / 41,246,720 (11 %)
Total DSP Blocks	650 / 1,590 (41 %)

図 2 実装結果

3.2 実験結果と出力結果

図 3 本研究の実験の様子である。入力 は DVI 端子を用いて PC から映像信号を受け取り、出力も DVI 端子を用いてディスプレイに出力をしている。

図 4 ガウス雑音のみ重畳した Lena ($\sigma = 20$) の画像 (図 4(a)) と出力結果 (図 4(b)) である。なお文献 [2] で処理した画像の PNSR は 29.6dB であり、この出力結果は、遜色のない結果であると言える。図 4(b) の出力の結果は細部信号においてやや強い平滑化処理がなされていることがわかる。この理由として領域内に高周波数成分が存在する場合、それを雑音として検出する可能性があり、一部の λ の推定において平滑化が掛かるような出力となってしまっているためと考えられる。図 5 は平滑化パラメータ λ を視覚的に見やすくしたものである。黒い部分は λ の値が大きく、白に近づくほど λ の値は小さくなる。この結果からエッジのような画素値の大きく変化する部分の平滑化があまりされないことがわかり、平坦部に属している部分は平滑化が掛かっていることが分かる。これによって λ の値が時变的に変化していることがわかり、本研究の有効性が確認できる。なお映像信号の場合図 6 の様な文字や各種画像が混合し、かつ、雑音が領域内に有る場合と無い場合等が考えられる。

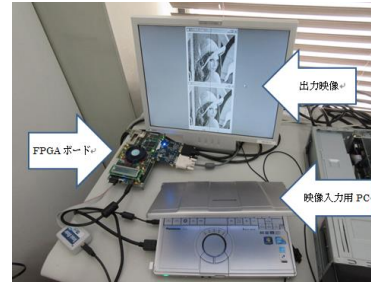


図 3 実験環境



(a) 入力画像 ($\sigma = 20$) (b) 出力結果 (29.1dB)

図 4 ガウス雑音の重畳した画像の出力

このような映像信号でも本研究における時变的な λ の推定が出来ていることが確認できる。

以上によって本稿では映像信号に対する 9 回の反復処理の TV フィルタと平滑化パラメータ λ の推定におけるハードウェア実装が実現できたことが確認できた。



図 5 平滑化パラメータ λ の視覚化画像



図 6 文字・画像・自然画像の混合信号の結果

4. まとめ

本稿では反復型の非線形フィルタである TV フィルタとその平滑化パラメータ λ の時变的な処理に対するハードウェア処理の構成を提案し、実装を行った。提案した方法は TV フィルタの性能を損なうことなく、かつ、映像信号内の雑音の強度に対しても有効的であることが確認され、問題無く実装できたと見えよう。

参考文献

- [1] A.Rosenfeld and A.C.Kalk(長尾真訳), デジタル信号処理, 近代科学社, 1978.
- [2] 三浦翔, 辻裕之, 木村誠聡, 徳増眞司, TV インペインティング法のパラメータ調整に基づく混合雑音除去, 電気学会論文誌 C, Vol.31, No.3, 2011.
- [3] T.F.Chan, S.Osher and J.Shen, "The digital TV filter and nonlinear denoising", IEEE Trans.Image Process, vol.10, no2, pp.231-241, Feb.2001.
- [4] 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 スマートインフォメディアシステム, (Mar. 2014)