論文

医用画像におけるバイラテラルフィルタのパラメータ決定

非会員 与座 章宙* 正 員 山田 親稔* 正 員 宮城 桂* 正 員 市川 周一** 非会員 藤枝 直輝**

Determination of Optimal Parameters for Bilateral Filter for Medical Images

Akihiro Yoza*, Non-member, Chikatoshi Yamada*, Member, Kei Miyagi*, Member, Shuichi Ichikawa**, Member, Naoki Fujieda**, Non-member

(2019年2月11日受付, 2019年6月7日再受付)

Recent camera can take a bright picture even in dark field. The Processor of camera gain signal. However noise is amplified when signal amplified. In this article, we propose an easily technique bilateral filter for noise reduction. The proposed technique can efficient noise reduction in 4 times of filtering and the optimized parameter searching time is drastically shortened.

キーワード: 医用画像, バイラテラルフィルタ, PSNR, SSIM, ノイズ除去 **Keywords:** medical image, bilateral filter, PSNR, SSIM, noise reduction

1. はじめに

1895 年にレントゲンは人体を透過する放射線である X 線を発見した。透過した X 線を感光板に照射することは、 人体を切り開くことなく内部の様子を診察する非破壊検査 として主に医療方面に用いられてきた。近年, X線による 放射線に続き、超音波、渦電流、磁場などの技術による非 破壊検査が行われている。しかし、現在でもX線撮影は重 要な判断基準となっており、最終的な方針の決定に使われ るなど、最も信頼性の高い検査方法として使われている(1)。 さらに近年の医療機器の発展はめざましく, 心臓や血管な どを立体的に観察することのできる3次元撮像(2)に加え、 時間の次元も追加した立体映像による4次元撮像も開発さ れ、今後の利用は増加していくと考えられている(3)。4次 元撮像は撮影時間が長く、放射線の被曝量が多くなり健康 被害が懸念される。しかし、被曝量を下げて撮影すると信 号強度が下がるため、相対的にノイズが増えてしまう。そ こでノイズを低減することで、同じ情報量をより低線量の 撮像が実現できることから、ノイズを低減する様々な手法

* 沖縄工業高等専門学校

〒 905-2192 沖縄県名護市辺野古 905 National Institute of Technology, Okinawa College 905, Henoko, Nago, Okinawa 905-2192, Japan

** 豊橋技術科学大学

〒 441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1 Toyohashi University of Technology

1-1, Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

が研究されている。レントゲン写真などのモノクロ画像では、白と黒の色飛び (スパイクノイズ) としてノイズが画像中に現れる (๑)(๑)。画像中からこれらのノイズを除去する手段として、バイラテラルフィルタを用いる手法がある (๑)(๑)。 がイラテラルフィルタは、ノイズを除去しながらも画像中の輪郭部分やエッジなどの保存を同時に行うことができる非線形フィルタである。このフィルタの性能を最大限発揮するためには、入力画像毎に異なるパラメータの最適な値を選択する必要がある。先行研究では、入力するパラメータの最適値の探索を行っている。このパラメータの探索を行う場合、探索範囲内の全てのパラメータの組み合わせにおいて、フィルタ処理と画質評価値の計算を行う必要がある。この手法では探索範囲が広く、パラメータの組み合わせ数も多いため、探索には膨大な時間を必要とする問題であった。

そこで本研究では、バイラテラルフィルタを繰り返し適用することで、より強力にノイズ除去できる特徴を活かし、医用画像向けの効率的なパラメータ探索アルゴリズムを実装する。さらに、二つの画質評価手法 PSNR (Peak Signalto-Noise Ratio) 及び SSIM (Structual SIMilarity) によって最適な繰り返し回数を検討することで、先行研究に比べ、パラメータ探索に要する実行時間を大幅に短縮できることを示す。

2. バイラテラルフィルタ

光センサの信号を増幅した直後の写真には,スパイクノイズと呼ばれる白黒の色飛びがノイズとして重畳する。こ

のノイズを除去するため、画像処理フィルタの技術が用いられる。本節では本稿で用いたバイラテラルフィルタについて説明する。バイラテラルフィルタは Tomasi らにより提案された非線形平滑化フィルタのであり、エッジをほかさずに、ノイズを除去できるフィルタの一つである。バイラテラルフィルタは信号・画像処理の分野で幅広く利用されている $^{(8)}$ 。画像中の画素を(x,y),入力画像をIN(x,y),rをフィルタ半径を表す正の整数とするとバイラテラルフィルタの出力は O_{BF} として式(1)で表される。

$$O_{BF}(x, y) = \frac{\sum_{i=-r}^{r} \sum_{j=-r}^{r} IN(x+i, y+j)W(x+i, y+j)}{\sum_{i=-r}^{r} \sum_{j=-r}^{r} W(x+i, y+j)} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

また,フィルタの重み W は式(3)で定義される。

式(3)は画像を平坦化する項(対空間)と輪郭の平坦化を 抑制する項(対輝度)によって構成されている。それによっ て, 輝度差の大きい画素のみを抑制し, 輪郭を保存したノ イズ除去が可能となる。 σ_r と σ_d はそれぞれ空間方向及び 輝度方向の平滑化パラメータであり、フィルタ処理を行う 前に、画素情報として重要であるかを推定するためのパラ メータを設定し、復元画像を生成する。パラメータの推定 には平滑化を行う中心が外の周囲の輝度差に基づいて、エッ ジとして残すのか、ノイズとして平滑するのかを判断する。 このパラメータ推定の調整によって、画像内のエッジをどれ だけ細かく検出するかを決めることができる。入力画像に 基づき、最適なパラメータ推定ができれば、より良好な復元 結果を得ることが可能となる。ここで、面積の10%へガウ シアンノイズを重畳した lenna 画像を Fig. 1 に示す。Fig. 1 をバイラテラルフィルタによって処理した結果を Fig. 2 に 示す。背景と中央人物との輪郭や帽子のファーなどの輪郭 がはっきりとしていることがわかる。

3. 画質評価手法

本研究で用いた画質評価手法である PSNR と SSIM を説明する。PSNR とは、画質の再現性に影響を与える輝度の最大値と、劣化をもたらすノイズ値との比率である。PSNR は式 (4) と式 (5) で定義される。式 (4) の MAX は画像中の輝度の最大値である。MSE(Mean Square Error) は比較される 2 つの画像の対応する画素値の平均二乗誤差である。ここで、PSNR は MSE によって求められるので、MSE が大きいほど PSNR は小さく、MSE が小さいほど PSNR は大きくなる。SSIM は、入力された 2 つの画像のそれぞ



Fig. 1. Image noise for lenna



Fig. 2. Bilateral filtering Fig. 1

れの画素の平均 $(\mu_{x,y})$,標準偏差 (σ_x,σ_y) ,共分散 (σ_{xy}) で求まり,構造に着目した比較を行う画質評価手法である。 SSIM は式 (6) より求まる。式 (6) 中の C1 と C2 の値には, $C_1 = (0.01 \times 255)^2$ と $C_2 = (0.03 \times 255)^2$ がよく用いられる。

$$PSNR = 10log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) \dots (4)$$

$$MSE = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{M} (I_1(i, j) - I_2(i, j))^2 \cdot \cdots (5)$$

$$SSIM(X,Y) = \frac{(2\mu_X\mu_Y + C_1)(2\sigma_{XY} + C_2)}{(\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1)(\sigma_Y^2 + \sigma_Y^2 + C_2)} \cdots (6)$$

4. 先行研究

先行研究 (5) において SIDBA (Standard Image Data-BAse) 画像に対しバイラテラルフィルタのパラメータの総当り探索を行った。その結果,どのような画像でも標準偏差 σ_r , σ_d に対する画質評価 PSNR がピークを迎え,その後減少する範囲が示された。 σ_r の探索範囲は (0.5 \sim 2.5), σ_d の探索範囲は (10.0 \sim 35.0) である。この全ての範囲を探索する

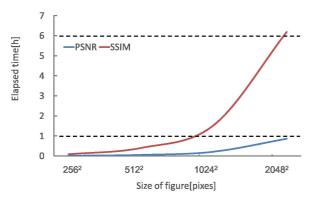


Fig. 3. Result of figure size and execution time for PSNR and SSIM

と、パラメータ探索の主な計算であるバイラテラルフィルタの計算と画質スコアの算出を500回行う必要がある。パラメータ探索の計算時間は入力画像のサイズに比例しており、画像サイズが3000×3000を超える医用画像において非常に大きな問題となる。画質計算であるPSNRとSSIMの計算時間をFig.3に示す。画像サイズが1014×1024以下ではSSIMとPSNRの処理時間は1時間未満である。しかし、画像サイズが2048×2048以上になると、PSNRの計算時間は1時間に達し、SSIMの計算時間は6時間を超えてしまう。医用画像は非常に大きくDICOM(Digital Imaging and Communication in Medicine) 画像は3000×3000を超える。医用画像はその画像サイズの大きさから、画質評価の計算時間は膨大なものとなる。このことから500回ものパラメータ探索は実用でなく、より少ない処理回数でパラメータ探索を行う必要がある。

5. 提案手法

バイラテラルフィルタはフィルタ半径を大きくしたほう が、より周囲との比較ができるため、より良い復元ができ ると考えられる。しかし、バイラテラルフィルタは、フィ ルタ半径の大きさの2乗に比例して計算量が増えてしまう。 バイラテラルフィルタは、フィルタ半径を大きくせずとも、 複数回繰り返してフィルタを適用したほうがより短い時間 で処理を行うことができる®。このことから、先行研究で は標準偏差 σ_d , σ_r の探索範囲を縮小することで処理回数を 削減していた。本研究ではさらにバイラテラルフィルタの 繰り返し回数nの探索を新たに加えることで、 σ_d , σ_r の探 索範囲のさらなる縮小を目指す。本稿において提案するア ルゴリズムのフローチャートを Fig. 4 に示す。本研究で使 用した医用画像は,がん診療画像リファレンスデータベー ス⁽⁹⁾ の CR (Computed Radiography) 画像を用いた。この画 像は人間の肺の X 線レントゲン写真である。今回実験に用 いた画像を Fig. 5 に示す。Fig. 5 を平滑化した画像を Fig. 6 に示す。Fig.5とFig.6から、鎖骨先端の真下にあった腫瘍 が、平滑化後も保存されていることがわかる。

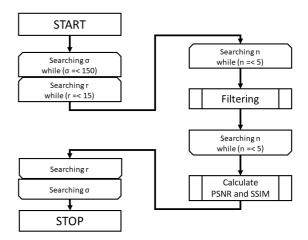


Fig. 4. The proposed algorithm

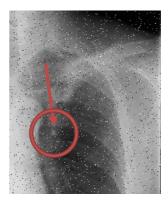


Fig. 5. The lung cancer image without filtering

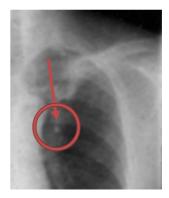


Fig. 6. The lung cancer image with filtering

6. 実験及び結果

〈6・1〉 最適繰り返し回数の検討 Fig. 5 のようにノイズを、 $10\%\sim30\%$ まで重畳させた画像を用意した。その画像へバイラテラルフィルタ処理を 1 回 ~10 回まで繰り返し実行し、フィルタ処理回数毎の PSNR の値を確認した。実験結果を Fig. 7 に示す。また、実験環境を Table 1 に示す。Fig. 7 のグラフ横軸がフィルタをかけた回数、縦軸が PSNRのスコアである。紫・緑・青色のグラフは、それぞれノイズが $10\%\cdot20\%\cdot30\%$ の画像でフィルタ処理を行ったときのグラフである。黄色のグラフは、先行研究 $^{(5)}$ の結果である。先行研究はフィルタ処理を 1 回だけ行っているので横

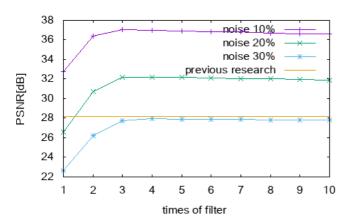


Fig. 7. Result of filtering repitation for PSNR

Table 1. Experiment environment

	Specification			
PC	MacBookAir 2015 Early			
CPU	1.6GHz Intel Core i5			
Memory	8GB 16000 MHz DDR3			
Language	Python3			
Library	OpenCV3.0, scikit-image			



Fig. 8. The X-ray image for CR(lung)

ばいに表示した。Fig.7のグラフから分かるように,ノイズ率10%~30%においてフィルタ回数が3回または4回でPSNRがピークに達し,その後は緩やかな右肩下がりであることが確認できる。また,ノイズ率が20%の画像では2回でPSNRが先行研究を上回り,ノイズ率が30%の画像では。4回目で先行研究とほぼ同じPSNRになった。以上の結果から,500回のパラメータ探索を行わずとも,フィルタを3回か4回繰り返し処理することで先行研究のPSNRを上回ることを確認した。

〈6・2〉 最優パラメータ検索の検討 バイラテラルフィルタを繰り返して実行する場合,与えるパラメータの σ とrが効果的な範囲を調査した。 σ が 50~200 まで、rが 3~17 まで、パラメータのすべての組み合わせでバイラテラルフィルタを 3 回及び 5 回繰り返して実行し、画質評価値の計算を行った。実験に用いた 3 枚の画像を Fig. 8、 Fig. 9 および Fig. 10 に示す。 Fig. 8 の CR (lung) 画像での実験結果を処理回数 3 回 (Fig. 11 及び Fig. 12) と処理回数 5 回 (Fig. 13 及び Fig. 14) にに示す。 Fig. 9 の SXA (head) 画像での実験

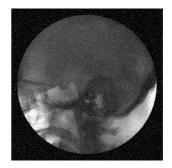


Fig. 9. The X-ray image for SXA(head)

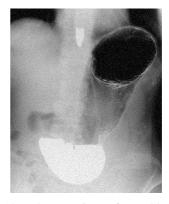


Fig. 10. The X-ray image for RF(bladder)

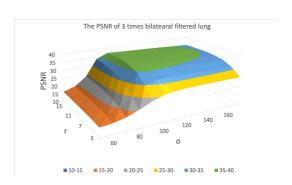


Fig. 11. The PSNR of 3 times filtering for CR(lung)

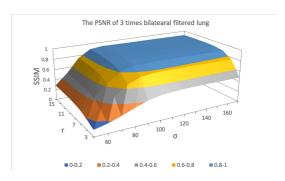


Fig. 12. The SSIM of 3 times filtering for CR(lung)

結果を処理回数 3 回 (Fig. 15 及び Fig. 16) と処理回数 5 回 (Fig. 17 及び Fig. 18) に示す。Fig. 10 の RF (bladder) 画像 での実験結果を処理回数 3 回 (Fig. 19 及び Fig. 20) と処理回数 5 回 (Fig. 21 及び Fig. 22) に示す。ここで,Fig. 11 から Fig. 22 において,縦軸はrが変化する大きさ,横軸は σ

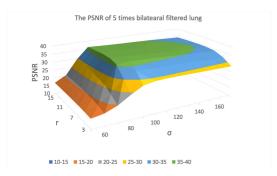


Fig. 13. The PSNR of 5 times filtering for CR(lung)

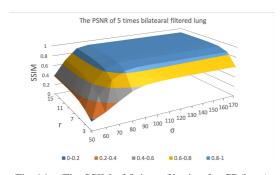


Fig. 14. The SSIM of 5 times filtering for CR(lung)

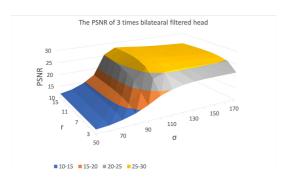


Fig. 15. The PSNR of 3 times filtering for SXA(head)

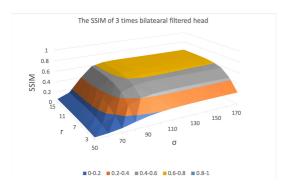


Fig. 16. The SSIM of 3 times filtering for SXA(head)

が変化する領域、高さは画質評価値 PSNR 及び SSIM の値である。

〈6·3〉 パラメータ探索アルゴリズムの検討 実験 $\langle 6\cdot 2 \rangle$ の結果をもとに、パラメータ探索アルゴリズムを構築した。Fig. 8、Fig. 9 および Fig. 10 の画像で、パラメー

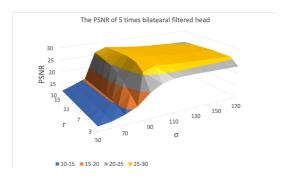


Fig. 17. The PSNR of 5 times filtering for SXA(head)

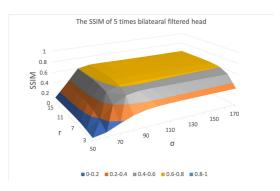


Fig. 18. The SSIM of 5 times filtering for SXA(head)

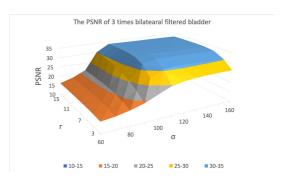


Fig. 19. The PSNR of 3 times filtering for RF(bladder)

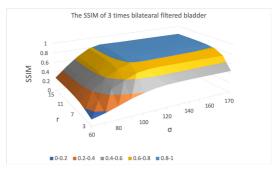


Fig. 20. The SSIM of 3 times filtering for RF(bladder)

タ探索アルゴリズムで探索を行った。また、パラメータ探索の処理時間を計測した。実行した結果から得られた最優パラメータと、その探索時間を Table 2 に示す。いずれの画像においても先行研究。での探索時間よりも大幅に短縮

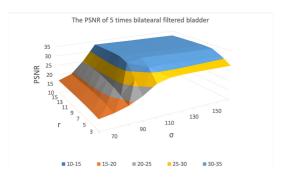


Fig. 21. The PSNR of 5 times filtering for RF(bladder)

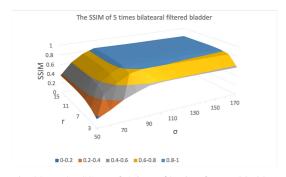


Fig. 22. The SSIM of 5 times filtering for RF(bladder)

Table 2. Results of PSNR and SSIM for images

Images	PSNR (r, σ)	Time[s]	SSIM (r, σ)	Time [s]
CR (lung)	40.6 (7, 30)	13.9	0.93 (7, 30)	48.4
SXA (head)	35.9 (7, 30)	2.05	0.71 (7, 30)	4.88
RF (bladder)	41.8 (11, 30)	4.26	0.85 (7, 30)	12.5
Avg. of previous work	27.9 (2.3, 75)	58.1	0.87 (1.3, 57)	300

することが出来ていることが確認できる。Fig.8のCR画 像の画像サイズは 3000×3000, Fig. 9 の SXA 画像の画像 サイズは 1024×1024, Fig. 10 の RF 画像の画像サイズは 1656×2019である。

7. まとめ

バイラテラルフィルタを繰り返して実行することにより. 強力にノイズ除去ができる特性を利用し、ノイズを重畳し た医用画像に対して, バイラテラルフィルタを用いて複数 回処理する方法を検討した。これを用いた, パラメータ探 索アルゴリズムを考案し、探索時間を大幅に短縮すること ができた。RFの画像では実験で得られた最適パラメータ を探索できていないが、より近傍付近の探索を行う処理を 追加することでパラメータ探索の精度を向上できると考え る。今後の展開として、一定の確率でスパイクノイズのみ 与えて、実験の画像として用いることを検討している。

本研究は JSPS 科研費 17K01063 の助成を受けたもので ある。

文 献

- (1) 池田 秦: 「X線による非破壊検査」, Radioisotopes, Vol.52, No.10, pp.567-576 (2003)
- (2)三浦嘉章:「X 線画像の進化 —三次元撮影技術解説—」,全国循環 器撮影研究会,Vol.23, pp.18-29 (2011)
- 保崎 誠・アルベルト・パラシオス:「ウェーブレットを用いた医用 画像ノイズ軽減方法」、桐蔭論叢、Vol.34, pp.159-163 (2016)
- (4) 市川勝弘:「線量低減技術と画質への影響」, 計測分科会誌, Vol.20, No.2, pp.42-43 (2012)
- 潤:「Bilateral Filter のパラメータ推定に対する画質評価の研 究」, 電学次世代産業システム研 (2017)
- (6) 真喜志泰希・市川周一・藤枝直輝・山田親稔:「分布間距離を用い た BilateralFilter の準最適パラメータ探索」,電学論 D, Vol.137, No.7, pp.576-582 (2017)
- (7) C. Tomasi and R. Manduchi: "Bilateral filtering for gray and color images", Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision, pp.839-846 (1998)
- (8) 浦濱喜一:「第8回画像の本質を引き出す:バイラテラルフィルタ によるノイズ除去とイラスト風画像の生成」、映像情報メディア学 会誌, Vol.62, No.8, pp.1268-1273 (2008)
- (9) DICOM の世界:http://www.jira-net.or.jp/dicom/dicom_data_01_02.html, 一般社団法人日本画像医療システム工業会

章 宙 (非会員) 2017 年沖縄工業高等専門学校 情報



通信システム工学科卒業。2019年同高等専門学 校専攻科創造システム工学専攻電子通信システム 工学コース修了。2019年より、アドバンスドプラ ンニング(株)勤務。現在に至る。

山 田 親 稔 (正員) 2000 年琉球大学大学院理工学研究科博



士前期課程修了。2004年同大学大学院博士後期 課程単位取得満期修了。同年拓殖大学北海道短期 大学専任講師。2007年沖縄工業高等専門学校情 報通信システム工学科助教。2009 年同高等専門 学校情報通信システム工学科准教授。2014 年ビ クトリア大学 (カナダ) 客員研究員。2015 年より, 沖縄工業高等専門学校情報通信システム工学科准

教授。現在に至る。博士(工学)。形式的設計検証, リコンフィギャラ ブルシステムの研究・教育に従事。IEEE、電子情報通信学会、各会員。

宮城



(正員) 2008 年高知工科大学情報システム工学 科卒業。2010年同大学大学院修士課程修了。2014 年同大学大学院博士課程修了。同年沖縄工業高等 専門学校情報通信システム工学科助教。現在に至 る。博士(工学)。自己同期型回路を用いた超低 消費電力 VLSI の研究に従事。電子情報通信学会 会員。



市 川 周 一 (正員) 1985年東京大学理学部卒業。1987年同 大学大学院理学系研究科修士課程修了。1987年 新技術事業団創造科学推進事業 (ERATO) 後藤磁 束量子情報プロジェクト研究員。1991 年三菱電機 (株) LSI 研究所,システム LSI 開発研究所勤務。 1994 年名古屋大学工学部助手。1997 年豊橋技術 科学大学工学部知識情報工学系講師。2001年豊橋 技術科学大学工学部知識情報工学系助教授。2007

年豊橋技術科学大学工学部知識情報工学系准教授。2010年豊橋技術 科学大学大学院工学系研究科准教授。2011年沼津工業高等専門学校 制御情報工学科教授。2012年より、豊橋技術科学大学大学院工学系研 究科教授。現在に至る。理学博士。並列計算機,並列処理,および専 用計算システムアーキテクチャの研究に従事。IEEE (senior member), 電子情報通信学会 (シニア会員), ACM, 情報処理学会, 各会員。



藤 枝 直 輝 (非会員) 2013 年東京工業大学大学院情報理工学 研究科計算工学専攻博士後期課程修了。博士(工 学)。2013年豊橋技術科学大学電気・電子情報工 学系助教。2019年より、愛知工業大学工学部電 気学科講師。現在に至る。プロセッサアーキテク チャ, FPGA 応用,組み込みシステム,セキュア プロセッサの研究に従事。情報処理学会, 電子情 報通信学会, IEEE 各会員。