

## 倍精度境界実装による単精度 IIR フィルタの安定化

## Boundary Processing in Double Precision for Stabilizing IIR Filter in Single Precision

渡邊 光一郎<sup>†</sup>  
Koichiro Watanabe前田 慶博<sup>†</sup>  
Yoshihiro Maeda福嶋 慶繁<sup>†</sup>  
Norishige Fukushima

## 1 はじめに

ガウシアンフィルタは、さまざまな場所で使われる基盤的なツールである。近年では、バイラテラルフィルタといったエッジ保存平滑化フィルタにも活用され応用範囲が広がっている。そのため、ガウシアンフィルタの高速化・高精度化は重要な役割を果たす。

リアルタイム O(1) バイラテラルフィルタ [1] は、バイラテラルフィルタの高速化手法の 1 つである。このフィルタは定数時間で実行可能だが、そのためには、IIR ガウシアンフィルタを用いる必要がある。また、一般的に、処理を高速に行うためには、倍精度よりも単精度で実装することが望ましい。しかし、このフィルタを単精度で実装すると、ノイズが発生する場合がある。

本稿では、単精度 IIR ガウシアンフィルタの境界処理に対して、倍精度を用いることで、安定性を向上させ、これを用いたリアルタイム O(1) バイラテラルフィルタでノイズが減少することを確認した。

## 2 関連研究

## 2.1 リアルタイム O(1) バイラテラルフィルタ

バイラテラルフィルタは、注目画素と周辺画素の空間的な距離とレンジの差を基にフィルタ係数を決定するフィルタである。入力画像を  $f: S \rightarrow \mathcal{R}$ 、出力画像を  $\tilde{f}: S \rightarrow \mathcal{R}$  とし、 $S$  と  $\mathcal{R}$  はそれぞれ画像の空間領域とレンジ領域とする。注目画素を  $p \in S$ 、周辺画素の集合を  $\mathcal{N}(p) \subset S$  とすると、バイラテラルフィルタは

$$\tilde{f}(p) = \frac{\sum_{q \in \mathcal{N}(p)} w_s(p, q) w_r(f(p), f(q)) f(q)}{\sum_{q \in \mathcal{N}(p)} w_s(p, q) w_r(f(p), f(q))} \quad (1)$$

と定義される。ここで、 $w_s$ 、 $w_r$  は、それぞれ入力画素間の空間領域・レンジ領域における距離からガウス分布に基づく重みを求める関数である。

リアルタイム O(1) バイラテラルフィルタでは、取りうるレンジから  $\{L_0, L_1, \dots, L_{K-1}\} \in \mathcal{R}$  となるように  $K$  個の値を間引き、注目画素のレンジが  $f(p) = L_k$  である時を考える。この時、 $w_r$  は  $q$  のみに依存する関数であるため、

$$g_k(q) = w_r(L_k, f(q)) f(q), h_k(q) = w_r(L_k, f(q)) \quad (2)$$

と置くことが出来る。この時の出力画像  $\tilde{f}_k(p)$  は

$$\tilde{f}_k(p) = \frac{\sum_{q \in \mathcal{N}(p)} w_s(p, q) g_k(q)}{\sum_{q \in \mathcal{N}(p)} w_s(p, q) h_k(q)} \quad (3)$$

となり、画像  $g_k, h_k$  それぞれにガウシアンフィルタをかけ、除算した画像に等しくなる。このフィルタを定数時間で実行するためには、IIR ガウシアンフィルタを用いる必要がある。

注目画素のレンジが  $f(p) \in [L_k, L_{k+1}]$  である時、

$$\tilde{f}(p) = (L_{k+1} - f(p)) \tilde{f}_k(p) + (f(p) - L_k) \tilde{f}_{k+1}(p) \quad (4)$$

で表される線形補間によって最終的な出力を求める。

## 2.2 IIR ガウシアンフィルタ

IIR フィルタは、無限遠点で 0 でない値を返すインパルス応答関数をもつフィルタである。しかし、無限遠点を考慮した畳み込み演算は現実的でないため、差分方程式を用いて、以下のように変形されたものが用いられる。

$$y_n = \sum_{i=0}^{N-1} a_i x_{n-i} - \sum_{j=1}^M b_j y_{n-j} \quad (5)$$

ここで、 $x_n$  は入力信号、 $y_n$  は出力信号、 $a_i$  と  $b_j$  は、フィルタの係数、 $N$  と  $M$  はフィルタの次数を表している。このフィルタ手法を用いたガウシアンフィルタに、Deriche 形式 [2] や、Vliet-Young-Verbeek (VYV) 形式 [3] などがある。これらのフィルタには初期値が必要であり、出力信号の初期値は、フィルタ次数に応じた境界処理を行うことで求められる。IIR フィルタは、初期値によっては不安定となるため、境界処理には十分な精度が求められる。

## 2.2.1 Deriche 形式

入力画像に対して順方向フィルタリングと逆方向フィルタリングを行い、それらの出力の和を求めることで最終的な出力を生成する手法である。VYV 形式と比較すると、安定性は高いが、計算コストが高い。各フィルタの境界画素は、画像端を鏡像で拡張し、インパルス応答を用いて畳み込みを行う事で求める。

<sup>†</sup>名古屋工業大学 大学院工学研究科 情報工学専攻

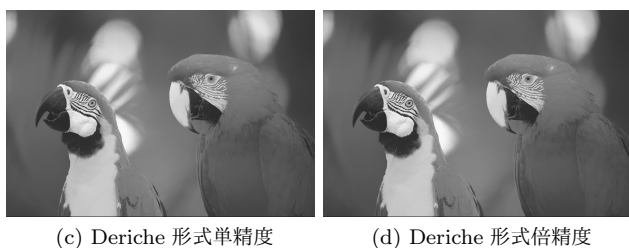
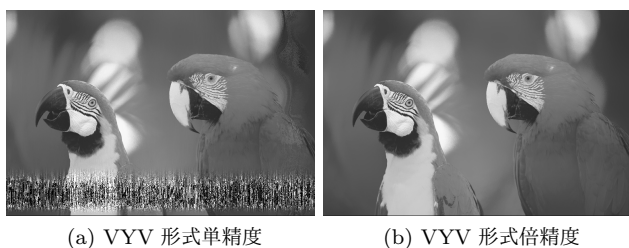


図 1: リアルタイム O(1) バイラテラルフィルタの出力

### 2.2.2 VYV 形式

入力画像に対して順方向のフィルタリングを行い、その出力に逆方向のフィルタリングを行うことで最終的な出力を生成する手法である。Deriche 形式と比較すると、計算コストは低いが、安定性が低くノイズが発生しやすい。順方向フィルタの境界画素は、Deriche 形式と同様に、畳み込みを用いて求めるが、逆方向フィルタの境界画素は、順方向フィルタの出力を用いて行列式を解くことで求める [4]。

## 3 解析

Deriche 形式と VYV 形式、それぞれの形式で単精度と倍精度の IIR ガウシアンフィルタを実装し、それらを用いたリアルタイム O(1) バイラテラルフィルタの出力を図 1 に示す。

図 1 から、VYV 形式の場合、Deriche 形式では発生しない帯状のノイズが発生していることが分かる。また、このノイズは、単精度フィルタの場合のみで発生し、倍精度では発生していない。このことから、VYV 形式の単精度フィルタでは計算精度が十分でなく、安定性が損なわれていることがわかる。

## 4 倍精度境界実装

帯状のノイズは、逆方向フィルタの境界処理の精度が十分でないことが原因である。計算精度の不足している処理を倍精度で計算することで、全体の安定性が向上すると考えられる。そこで本稿では、逆方向フィルタの境界処理に対してのみ倍精度を用いることで、フィルタの安定化を行った。

図 2 は、逆方向フィルタに倍精度境界を用いた出力であり、図 3 は、VYV 形式の単精度 IIR ガウシアン

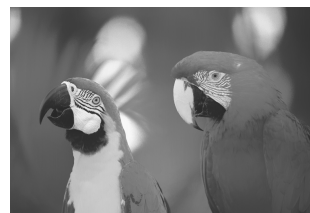


図 2: 倍精度境界を用いた VYV 形式単精度の出力

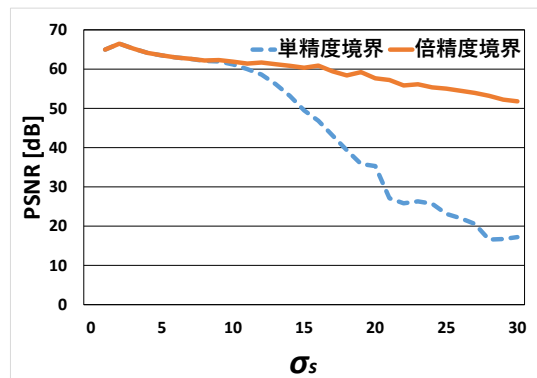


図 3: 単精度境界と倍精度境界の精度比較

フィルタに対して、単精度境界を用いたものと、倍精度境界を用いたものの出力の精度を比較したものである。図 2、図 3 より、境界処理に倍精度を用いることでノイズが消え、わずかなコストで安定性が向上したことが確認できた。

## 5 まとめ

単精度 IIR ガウシアンフィルタを用いたリアルタイム O(1) バイラテラルフィルタで発生する帯状のノイズについて調査を行った。

その結果、VYV 形式の単精度 IIR ガウシアンフィルタにおいて、逆方向フィルタの境界処理の精度が不足していることが原因であることが判明した。また、この処理を倍精度で計算することで、帯状のノイズが消え、単精度 IIR フィルタを用いたリアルタイム O(1) バイラテラルフィルタの安定性が向上したことを確認した。

## 参考文献

- [1] Q. Yang, *et al.*, “Real-time O(1) bilateral filtering,” in Proc. of IEEE CVPR, pp. 557-564 (2009).
- [2] R. Deriche, “Recursively implementing the gaussian and its derivatives,” INRIA Research Report (1993).
- [3] L. J. van Vliet, *et al.*, “Recursive gaussian derivative filters,” in Proc. of ICPR, vol.1, pp. 509-514 (1998).
- [4] B. Triggs and M. Sdika, “Boundary conditions for Young-van Vliet recursive filtering,” IEEE Trans. SP, vol.54, no.6, pp. 2365-2367 (2006).