

Chambolle の射影法の CELL プロセッサへの実装 Implementation of Chambolle's projection method on CELL processor

筒井 麻未[†] 作田 泰隆[†] 桜井 優[†] 後藤 富朗[†] 平野 智[†]
Asami Tsutsui Yasutaka Sakuta Masaru Sakurai Tomio Goto Satoshi Hirano

1. はじめに

Total Variation (TV) 正則化手法は画像圧縮ひずみの除去 [1], 超解像拡大 [2] などに大きな効果があることが報告されている。この TV 正則化は処理するための演算時間が膨大であるため、現段階では静止画像にしか適用されていない。しかし、この TV 正則化フィルタは動画像に対しても魅力的である。動画像へ TV 正則化フィルタを適用するためには、処理時間を削減する必要がある。TV 正則化の高速解法として Chambolle が提案した射影法 [3] が良く知られているが、動画像へ適用するためには更なるアルゴリズムの高速化とプログラミングの工夫が必要である。

リアルタイムで TV 正則化フィルタを利用するには高性能なプロセッサが必要であり、本研究では CELL プロセッサを利用して TV 正則化フィルタの実現を検討する。CELL プロセッサはハイビジョンテレビにも実装されており [4], 動画像のリアルタイム処理に適している。本稿では CELL プロセッサを利用し、TV 正則化フィルタによる動画像のリアルタイム処理について検討し、実験結果を報告する。

2. Chambolle の射影法

TV 正則化フィルタで用いる ROF モデルでは、最小化問題を式 (1) のように定式化している。

$$\inf_{u \in L^2} F(u) = \int |\nabla u| + \lambda |f - u|^2 \quad (1)$$

式 (1) において、 f は原画像、 u は骨格成分を示している。式 (1) より $F(u)$ を最小化する u を求め、原画像 f から骨格成分 u を引くことでテクスチャ成分を得ることができる。Chambolle の射影法では $u = f - \lambda \operatorname{div} p$ を計算することによって骨格成分 u を求めている。 $F(u)$ を最小化するような u は、式 (2) に示した式の $p_{i,j}^{n+1}$ を更新していくことで求めることができる。

$$p_{i,j}^{n+1} = \frac{p_{i,j}^n + \tau (\nabla (\operatorname{div} p^n - f/\lambda))_{i,j}}{1 + \tau |(\nabla (\operatorname{div} p^n - f/\lambda))_{i,j}|} \quad (2)$$

式 (2) における τ は最急降下法のステップ幅であり、Chambolle の射影法では半陰最急降下法という手法をとっている。この式 (2) を繰り返し計算することによって p を得ることができる。

3. CELL プログラミング

CELL プロセッサは PowerPC と命令互換の汎用な 64bit プロセッサコアである PPE 1 個と、独自の命令セットを持ち、データ処理などに特化したプロセッサ

コアである SPE 8 個を内蔵した非対称型マルチコアプロセッサである。CELL プロセッサでは、メインプログラムを PPE 上で実行し、高速演算が可能な SPE では PPE から依頼された内容を処理し、結果を PPE へ返すという操作を行う。このように PPE と SPE を利用することで、プログラムを高速化することが可能である。また、CELL プロセッサでは、一度の命令で複数の値を処理できる SIMD 演算を行うことで処理時間を削減している。

しかし、SPE のメモリは 256KB と小さいため、画像を分割し、プログラムと画像の容量の合計を 256KB 以下になるようにしなければならない。また、画像やプログラムを転送する際に PPE と SPE 間で行われる DMA 転送で時間がかかってしまう。このため、DMA 転送量および転送回数の削減をする必要がある。DMA 転送を効率良く行う方法として、転送している間に演算処理を行うダブルバッファ方式がある。ダブルバッファを用いることで高速化が可能であると考えられる。このダブルバッファ方式とシングルバッファ方式の違いを図 1, 2 に示す。

図 1, 2 において、PUT は SPE のメモリから PPE のメインメモリへの書き込みを示し、GET は PPE のメインメモリから SPE のメモリへの書き込みを示している。図 1 では、PUT と GET をしている間、SPE は演算をせず、待機している状態になっている。この時間が無駄であるため、図 2 のように入出力バッファを 2 系統準備し、一方のバッファが演算している間に DMA 転送を行っている。これにより、SPE の待機時間がなくなり、DMA 転送の時間を削減することが可能である。

今回、CELL プロセッサに実装する Chambolle の射影法では、原画像 f と更新画像 p_0, p_1 が必要となるが、更新時には更新前の周辺画素も使用する。それぞれの画像の 1 画素を更新する際に必要な画素を図 3 に示す。SPE のメモリは 256KB と限られているため、PPE と SPE で情報をやりとりし、画像を更新していく。しかし、周辺画素を読み込む前に画素が更新されてしまった場合、正しい結果が得られなくなる。このため、SPE を複数使用する場合、更新時の同期が必要となる。

4. 実験結果

測定条件を表 1 に示す条件で PC と CELL を用いて実行時間の比較を行った。測定結果を表 2 に示す。

測定結果より、最も高速なダブルバッファ SPE 6 個のプログラムでは、PC の C プログラムより約 20 倍高速化可能であることが分かった。また、CELL プロセッサにおいて、C プログラムが遅くなるのは、CELL プロセッサが SIMD 演算に特化したプロセッサであるためである。

[†]名古屋工業大学大学院 工学研究科 情報工学専攻

SPE 1 個から 6 個に増やすことにより, シングルバッファ, ダブルバッファのどちらも約 5 倍高速化することができた. SPE の数を 6 倍にしたにも関わらず, 実行時間が 6 倍にならないのは, 画像更新時に SPE 間で同期をとる時間が必要なためだと考えられる.

また, シングルバッファとダブルバッファを比較すると, SPE 1 個の時と 6 個の時ではどちらもシングルバッファよりダブルバッファの方がより高速に演算できていることが分かる. このため, より効率良く DMA 転送を行うことでさらに高速化することが可能であると考えられる.

5. むすび

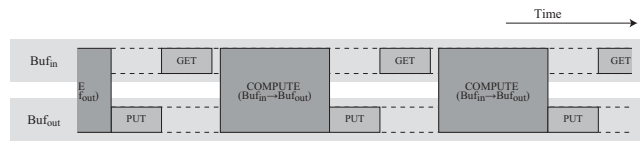
CELL プロセッサにより ハイビジョン動画像への Chambolle の射影法の適用の可能性を検討した. 表 1 に示されるように, 繰り返し回数を 20 回とすると, 動画像を 1 フレーム時間内 (0.017sec) に処理するには, もう少しの工夫が必要である. 今後は, DMA 転送の工夫 [5] をし, 1 回の転送での演算回数を増やして転送回数を減らしたり, 4 方向 Chambolle 法 [6] により 1 回の演算の情報量を増やし, 計算回数を減らしたりする方法などの採用を検討していきたい.

表 1: 測定条件

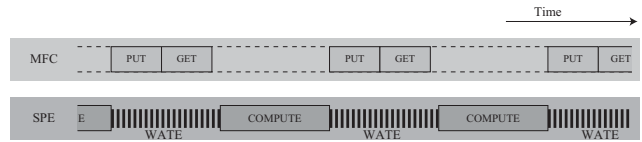
iteration number	20
λ	20
τ	0.25
画素数	1920×1080
CPU	Pentium4 2.60Hz
メモリ	480MB

表 2: 測定結果

プログラム		実行時間 [s]
C プログラミング (PC)		3.95
C プログラミング (PPE)		11.52
SIMD 演算 (PPE)		2.32
シングルバッファ	PPE+SPE×1	1.30
	PPE+SPE×6	0.28
ダブルバッファ	PPE+SPE×1	1.05
	PPE+SPE×6	0.21

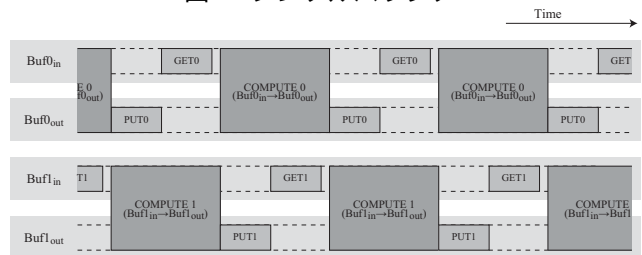


(a) 入出力バッファ

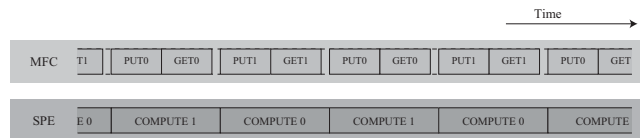


(b) MFC と SPU のデータの処理

図 1: シングルバッファ

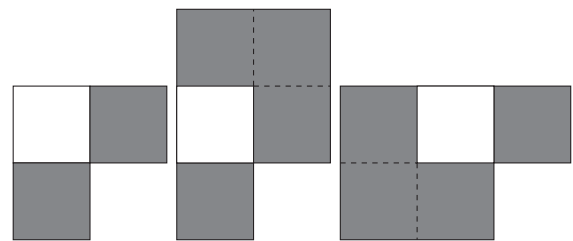


(a) 入出力バッファ



(b) MFC と SPU のデータの処理

図 2: ダブルバッファ



(a) 原画像 (b) 更新画像 p₀ (c) 更新画像 p₁

図 3: 更新時に使用する周辺画素

参考文献

- [1] 後藤富朗, 大野永貴, 平野智, 桜井優, “Total Variation 正則化を用いた JPEG 圧縮画像に対するノイズ除去法”, 映像メディア学会誌, Vol.64, No.11, pp.1647–1654, Sep. 2010.
- [2] 桜井優, 吉川昭博, 鈴木彰太郎, 後藤富朗, 平野智, “Total Variation 正則化と事例学習法を組合せた超解像度画像の復元法”, 映像メディア学会誌, Vol.64, No.11, pp.1613–1620, Sep. 2010.
- [3] A.Chambolle, “An Algorithm for Total Variation Minimization and Applications”, Journal of Mathematical Imaging and Vision, Vol.20, pp.89–97, Jan. 2004.
- [4] Yamashita, M.Sakai, R.Tanaka, A.Imada, K.Takahashi, Y.Ida, T.Matsumoto, N.Kato, “Image Super-Resolution and Multiple Video Playback on TV sets using Cell Processor”, IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE2009), pp.305–306, May 2009.
- [5] 高橋幸恵, 今田敬, 境隆二, 加藤宣弘, “多段階画像処理におけるメモリアクセス削減の検討”, 情報処理学会全国大会講演論文集, Mar. 2011.
- [6] 桐山誠史, 後藤富朗, 平野智, 桜井優, “4 方向 TV 正則化基準による Chambolle 法の高速度”, 電子情報通信学会総合大会, Mar. 2011.