

局所特徴に基づく適応ループ内フィルタ方式

吉野 知伸[†] 内藤 整[†]

Wiener フィルタに基づく符号化ループ内フィルタ方式(Adaptive Loop Filter; ALF)は、符号化誤差を最小化するフィルタが設計される。符号化誤差の特性は局所的な映像特徴に依存するため、局所的にフィルタ設計することで高い符号化性能を実現することが可能である。しかしながら、従来の ALF 方式ではフレームごとに限定的な数のフィルタしか設計されないため、従来方式は高い符号化性能に達するには十分な局所的な最適性を有していない。以上の観点から、本研究では、映像特徴に基づいて局所的に最適なフィルタ設計するループ内フィルタ方式を提案する。本方式では、局所領域ごとに水平方向および垂直方向の特徴量を抽出し、特徴量の大きさに応じて局所的に最適なフィルタを設計する。符号化実験により、従来方式に対して符号量削減率が 2.0%改善することを確認した。

Adaptive loop filter technology based on local image characteristics

Tomonobu Yoshino[†] and Sei Naito[†]

Based on Wiener algorithm, the adaptive loop filter (ALF) technology is designed to minimize coding distortion. Since the coding distortion characteristics depend on local image feature, coding performance can be improved by locally designing filter characteristics. However, the conventional ALF approaches designed only limited several sets of frame basis filter coefficients. Therefore, these ALF coefficients were not necessarily optimal to achieve the significant coding gain. From this perspective, we propose an enhanced ALF approach based on adaptive control of filter design dependent on the texture property of the local image region. This scheme evaluates horizontal/vertical gradient of pixel values in every local region. Then, an optimal filter for the local region is designed based on magnitude of the pixel value gradient. Experimental results show that the bit reduction performance is improved by 2.0 points against the conventional scheme.

1. はじめに *

近年、放送サービスやパッケージメディアなどで HDTV コンテンツが幅広く利用されている。高臨場感な映像表現へのニーズが向上しつつあることを考慮すると、将来的には、映像サービスに、超高精細映像(UHDTV)[1,2]が適用されることが期待される。一方で、コンシューマ向け映像配信サービスでは、映像に許容される伝送容量が限られるため、多くの HDTV コンテンツや更に高解像度な映像をネットワーク上で配信するためには、映像圧縮技術が不可欠である。映像圧縮に関する標準規格の中では、H.264 が最も優れた圧縮性能を有する。しかしながら、H.264 の単純適用では、FTTH などに代表されるコンシューマ向け映像配信ネットワークで許容される伝送容量である 100Mbps 以下に UHDTV を圧縮することは困難である。従って、将来的な映像データ量の増大を考慮すると、新しい符号化技術による、高い圧縮性能を有する新たな圧縮方式が求められる。

次世代映像符号化技術における有望な符号化要素技術の一つとして、適応ループフィルタ技術が挙げられる。文献[3-5]では、Wiener フィルタ[6]ベースの適応ループフィルタ方式が提案されている。これらの手法では、各符号化済みフレームに対して、Wiener フィルタに基づき、画面内の符号化誤差エネルギーを最小化するフィルタ係数を算出する。しかし、画面内で単一種類のフィルタ係数しか設定できないため、画面内における画素値の空間的な局所性に追従したフィルタ設計は困難であった。これに対して、文献[7]では、符号化済みフレームを予め決められた形状の領域に 2 分割し、各領域ごとに Wiener フィルタに基づいてフィルタを設計する。また、2 分割する形状について、14 種類の候補が定義されている。しかしながら、任意の絵柄および構図に追従できるだけの候補の種類が定義されていない。一方、文献[8]では、画像の局所的な特徴に応じて複数のフィルタを定義する手法が提案されている。同手法ではアクティビティに応じて最大 16 種類のフィルタ係数が算出される。同手法ではフィルタ係数算出のために 16-pass 処理を行うことを前提としており、実際のハードウェア実装が困難であることが懸念されている[9]。

以上の背景から、本研究では、局所的な最適性を考慮した 2-pass の ALF 手法を提案する。本研究では、まず、適応フィルタに要求される局所性を把握

*[†] (株)KDDI 研究所
KDDI R&D Laboratories Inc.

する目的で、局所領域ごとに最適なフィルタを算出したときのフィルタ特性を検証する。

2. 従来研究

符号化性能を改善する手法の一つとして、符号化ループ内で符号化済み画像に対して、ALF 処理を施す方式が提案されている。

文献[3,4,5]では、Wiener フィルタ[6]に基づく適応ループ内フィルタ方式が提案されている。Wiener フィルタでは、原画像に対する劣化画像の二乗誤差が最小となるフィルタが設計される。原画像の画素値 $F_{x,y}$ 、劣化画像の画素値 $G_{x,y}$ 、フィルタ係数 $w_{i,j}$ としたとき、フィルタ処理後の二乗誤差 E は式(1)で表現される。

$$E = \sum_x \sum_y \left(F_{x,y} - \sum_i \sum_j w_{i,j} G_{x+i,y+j} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、ALF 係数は、符号化劣化に関する二乗誤差を最小化するものである。従って、式(2)を解くことでフィルタ係数が得られる。

$$\frac{\partial E}{\partial w_{i,j}} = 0 \quad (2)$$

式(1)より 式(2)は、式(3)のように表わされる。

$$\sum_x \sum_y \left(F_{x,y} - \sum_i \sum_j w_{i,j} G_{x+i,y+j} \right) G_{x+i,y+j} = 0 \quad (3)$$

文献[7]では、最適なフィルタ特性が画素値の空間的な複雑さに依存することに注目し、画面を 2 つの領域に分割して、それぞれに最適なフィルタ係数を算出する手法が提案されている。同手法では、領域分割方法として、14 通りの分割形状候補が定義されている。Fig.1 に、文献[7]で提案されている分割形状候補を示す。各分割形状候補では、“A”および“B”と記された領域ごとに ALF 係数が算出され、適用される。フレームごとに各分割形状候補の R-D コストを算出し、最も R-D コストが低いものを当該フレームの分割形状とする。

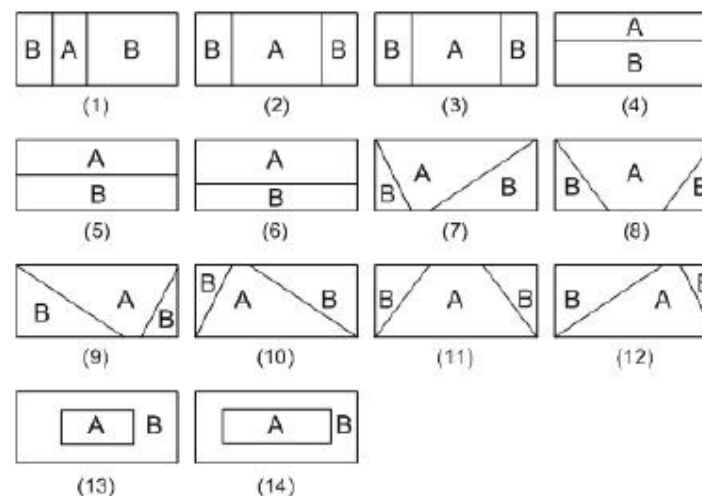


Fig.1 Segmentation candidates proposed in [7]

3. 局所的な最適性を考慮したループフィルタ

3.1 ループフィルタの空間的な局所性

Wiener フィルタの特性は画像信号の correlation property に依存し、画面内で correlation property が一定の時に Wiener 復元フィルタで最大の性能を得ることができる[6]。しかし、実際の映像は、様々な correlation property の信号(すなわち絵柄)の組み合わせで構成される[7]。したがって、絵柄ごとにフィルタ設計することで、Wiener フィルタにより高い復元性能が得られる。

ここで、文献[3-5]のように画面全体を対象とした Wiener フィルタ復元処理の場合、そのフィルタ特性は、画面全体の二乗誤差に最も大きな影響を与える絵柄に適したフィルタ特性が得られる。一般に、その絵柄は、低周波成分で構成される信号である。一方で、前記の絵柄以外では、複雑なテクスチャやエッジテクスチャで、量子化により大きな符号化劣化を生じる。これらの符号化劣化は、画面全体の二乗誤差が増大する要因の一つである。特に、エッジテクスチャは、画像を構成する主要な成分の一つであり、一般にほぼ全ての画像に含まれるテクスチャである。したがって、同テクスチャを良好に保持することは、様々な画像における符号化性能改善に寄与することが期待

される。以下では、エッジテクスチャに注目し、同テクスチャにおける Wiener フィルタ特性について検証する。

本検証では、16 画素×16 ラインの小領域ごとに ALF 係数を算出し、各小領域におけるフィルタ特性の傾向を観察する。フィルタ係数算出方法は、ブロックベース ALF 手法[4]に従った。Fig.2 に、4 節で後述する素材 D の、エッジ領域および非エッジ領域における代表的なエッジ特性を、それぞれ示す。Fig.2 (a), (b) は、非エッジ領域およびエッジ領域それぞれの画像である。Fig.2(c), (d) は、(a)および(b)に対する ALF 係数の水平方向の振幅特性である。結果より、エッジ付近で特有の ALF 特性が求められることがわかる。

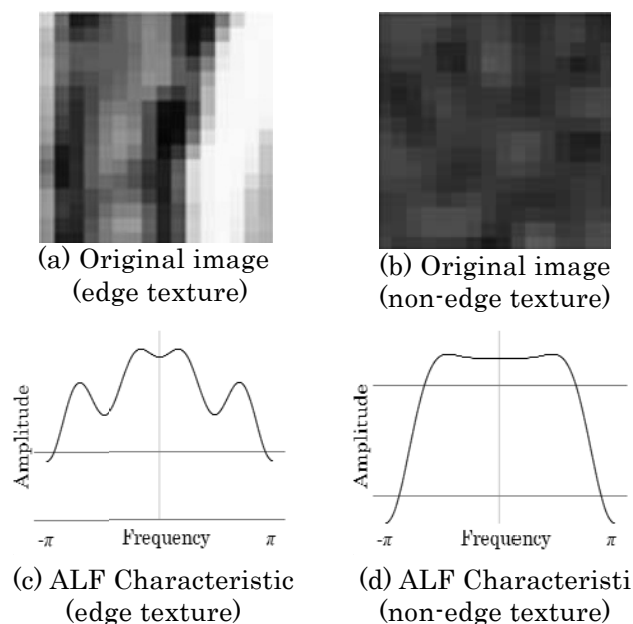


Fig.2 Filter characteristic (Horizontal)

文献[7]の手法で得られるフィルタの空間的な局所最適性について考える。同手法では予め決められた有限な数のパターンに基づいて、画面が Fig.1 に示した通り、2 種類の領域に分類される。画面内で異なる絵柄のオブジェクトが混在する場合、同手法が効果的であると期待される。しかし、Fig.2 より、ALF の最適性を追求するためには、エッジなどの局所的な絵柄の考慮が求められ

る。文献[7]の手法では、このような局所的な絵柄への追従は困難である。

なお、本節での検証は、ALF の局所性を検証するためのものであり、本検証における処理を実際の符号化処理に単純適用することは困難である。なぜなら全ての小領域でフィルタ係数を符号化すると非常に膨大な符号量が必要となるためである。実際の符号化処理では、いくつかの代表的なフィルタ係数に限定することが求められる。

3.2 提案手法

前節の ALF における局所性に関する解析を踏まえて、空間的な局所性を考慮した ALF 手法を提案する。なお、提案方式では、quadtree ALF[5] (QALF) 方式をベースとする。

提案手法では、最初に、処理フレームを N 画素×N ラインの小領域に分割する。本稿では N=16 とする。各小領域で垂直方向および水平方向のエッジ強度を評価する。エッジ強度に対する閾値判定により各方向におけるエッジ有無を判断することで、水平方向および垂直方向のエッジ有無の組み合わせにより、各小領域を 4 種類に分類可能である。画面内の全ての小領域を 4 種類に分類し、各分類ごとに Wiener フィルタを適用することで、空間的な局所性を考慮した ALF を設計する。

以下に、提案手法の流れを示す。

- Step 1. 各画素における水平方向および垂直方向のエッジ強度を算出する。このエッジ強度について、各方向で小領域(16×16)内で二乗平均を求める。この値を各小領域における各方向のエッジ強度とする。
- Step 2. 小領域における各方向のエッジ強度について、方向ごとに閾値 Th により 2 つの領域に分類する。すなわち、画面内の小領域を、各方向のエッジ有無により 4 種類に分類する。
- Step 3. Step 2 の各分類結果について、分類結果に該当する領域を対象として Wiener フィルタを適用し、ALF 係数を算出する。それぞれのフィルタ係数はスライスヘッダ情報として bit stream に記述される。
- Step 4. QALF 方式に従い、四分木構造で表現されるブロックごとに、Step 3 で算出したフィルタ係数の適否を評価する。本稿では、符号化歪み最小化規範に基づき当該ブロックに最適なフィルタを決定する。
- Step 5. QALF 方式と同様に各ブロックでの ALF 適否フラグ情報を符号化するとともに、各ブロックで用いられるフィルタ情報を 2bit の識別子とし

て符号化する。本稿では、ALF 適否フラグおよびフィルタ識別子を、CABAC により符号化する。

以下に、エッジ強度評価方法を示す。領域内のすべての画素において、水平方向および垂直方向について Sobel フィルタを用いてエッジ強度を求める。原画像の画素値を $F_{x,y}$ としたとき、Sobel フィルタによる水平方向の傾き $H_{x,y}$ および垂直方向の傾き $V_{x,y}$ は、式(4)で求められる。

$$\begin{aligned} H_{x,y} &= (F_{x+1,y+1} + 2F_{x+1,y} + F_{x+1,y-1}) \\ &\quad - (F_{x-1,y+1} + 2F_{x-1,y} + F_{x-1,y-1}) \\ V_{x,y} &= (F_{x+1,y+1} + 2F_{x,y+1} + F_{x-1,y+1}) \\ &\quad - (F_{x+1,y-1} + 2F_{x,y-1} + F_{x-1,y-1}) \end{aligned} \quad (4)$$

4. 符号化実験

符号化実験を行い、提案手法の性能を評価した。比較のため、文献[7]で示す方式についても従来手法として評価した。実験では4つのUHDTV素材を用いた。ただし、UHDTV(7680画素×4320ライン)の中心1280画素×1280ラインを切り出した映像を入力画像として用いた。Fig.3に、各素材の先頭フレームを示す。素材AとDは、緩やかな動きのカメラワークを伴っている。素材BとCは、静止カメラであり、素材Cでは草花が細かく動く。

Table 1 Coding conditions

GOP structure	IBBP... (I-picture only first)
QP 27,32,	37,42
Coding method	CABAC
# of frames	60

Table 2 Coding efficiency improvement compared with JM (BD-bitrate[%] / BD-PSNR [dB])

Seq.	従来手法[7]		Proposed scheme		
	BD-bitrate	BD-PSNR	BD-bitrate	BD-PSNR	
A	-23.05	0.46	-24.2	4	0.48
B	-11.35	0.30	-12.7	9	0.34
C	-5.72	0.15	-6.64	0.19	
D	-20.84	0.62	-22.8	2	0.67

表1は、符号化条件を示している。提案手法のパラメータに関して、閾値 Th はフレームごとに異なる値を設定した。具体的には、各フレームで、上位10%の小領域がエッジと判断されるよう閾値を設定した。表2に符号化実験結果を示している。符号化性能は、H.264に対するBD-bitrateおよびBD-PSNR[9]により評価した。H.264による符号化性能評価にはJMを用いた。

結果より、提案手法によるH.264に対する符号量削減は、最大で約22.8%であることが分かる。また、従来のALF手法に対して、BD-bitrateが最大で約2ポイント改善していることが分かる。素材Dでは、強いエッジの領域が多く含まれており、提案方式が効果的であったと考えられる。

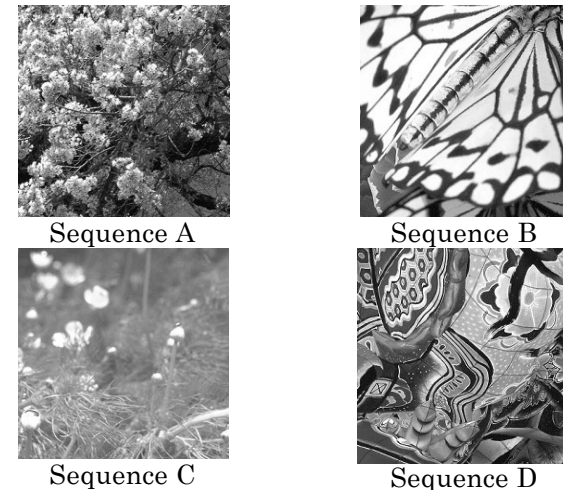


Fig.3 Test sequences

5. 考察

従来方式[7]に対して最も高い効果が得られた素材Dについて、提案手法による符号化性能改善効果の詳細を確認する。Fig.4(a), (b), (c)は、エッジ領域における、QALF、従来方式および提案手法それぞれの、水平方向のフィルタ特性を示している。また、(d)では、比較のため、3.1節で示した小領域ごとのALF特性について、素材Dのエッジ領域における代表的な例を示している。結果より、エッジ領域において、提案手法により、従来手法よりも良好なフィルタ設計が実現されていることが分かる。

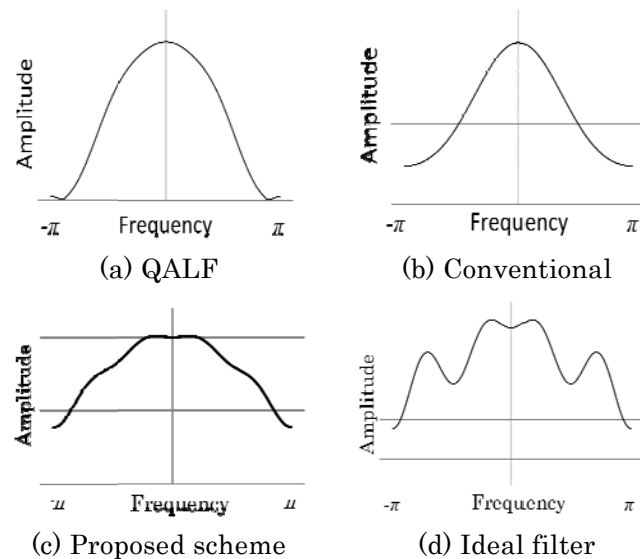


Fig.4 フィルタ特性 (素材 D、QP=27、3 フレーム目、水平方向)

次に、提案手法が対象とするエッジ付近領域における画質改善効果を確認する。表 3 は、素材 D に対して提案手法を適用したときの PSNR を示している。PSNR は、(a) 画面全体、(b) 提案手法がエッジと判断された領域(エッジ領域)、(c)非エッジと判断された領域について示している。また、フィルタ処理として、フィルタ無し、QALF、提案手法を適用した場合それぞれの結果を示している。

Table 3 エッジ領域における PSNR[dB] (素材 D、QP=27、6 フレーム目)

	(a) Frame	(b) Edge	(c) Non-edge
No filter	35.33	34.50	35.31
QALF	36.05	34.95	36.33
Proposed	36.11	35.05	36.39

結果より、QALF の適用により、画面全体で PSNR が大きく改善していることが分かる。ただし、エッジ領域では、改善傾向はみられるものの、画面全体の改善傾向に比べると改善効果は小さい。一方、提案手法を適用した場

合、エッジ領域でも、特に改善効果が得られていることが分かる。結果的に、提案手法が、画面全体での PSNR 改善効果に寄与していることが分かる。また、主観画質の重要な要素であるエッジ付近の画質が改善されるため、提案方式は主観画質向上にも寄与する。

6. まとめ

本研究では、映像の空間的な局所性を考慮した適応ループフィルタ手法として、エッジ領域に注目した適応性を有する ALF 手法を提案した。一方で、ALF の最適性は絵柄の複雑さに依存することを考慮すると、エッジ以外の絵柄についても、絵柄の複雑さに応じたフィルタ設計が求められる。今後は、エッジ以外の映像特徴に関する局所性にも対応した手法を検討し、適応ループフィルタの空間的な局所性の最適化を図る。

本研究は独立行政法人情報通信研究機構による委託研究「超高精細映像符号化技術に関する研究開発」として実施したものである。

参考文献

- 1) ITU-R BT-1769 "Parameter values for an expanded hierarchy of LSDI image formats for production and international programme exchange".
- 2) SMPTE 2036-1-2007, "Ultra High Definition Television - Image Parameter Values for Program Production".
- 3) D.-H. Kim, H.-Y. Oh, O. Urhan, S. Erturk and T.-G. Chang, "Optimal Post-Process/In-Loop Filtering for Improved Video Compression Performance," IEEE Trans. on Consumer Electronics, Vol. 53, No. 4, 2007.
- 4) T. Chujoh, G. Yasuda, N. Wada and T. Yamakage, "Block-based adaptive loop filter," ITU-T Q.6/SG16, VCEG-A118, 2008.
- 5) T. Chujoh, G. Yasuda, N. Wada and T. Yamakage, "Specification and experimental result of quadtree-based adaptive loop filter," ITU-T Q.6/SG16, VCEG-AK22, 2009.
- 6) A. D. Hillery and R. T. Chin, "Iterative Wiener Filters for Image Restoration," IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 39, pp. 1892
- 7) I. Lim, D. Park and C. Kim, "A Loop Filter with Segmentation Mode in Video Coding," ICIP, pp.2073-2076, 2010.
- 8) M. Karczewicz, P. Chen, R. Joshi, X. Wang, W. Chien, R. Panchal, "Video coding technology proposal by Qualcomm Inc.," JCTVC-A121, April 2010.
- 9) M. Karczewicz, "Adaptive loop filter with low encoder complexity," JCTVC-C113, October 2010.
- 10) G. Bjontegaard, "Improvements of the BD-PSNR model", ITU-T 16/Q6, 35th VCEG Meeting, July 2008, VCEG-A111.