

実画像復元のための有色性駆動源を含む2次元カルマンフィルタ Image Restoration Method Using Two-Dimensional Block Kalman Filter with Colored Driving Source

長保 龍*

田邊 造*

松江 英明*

古川 利博†

Ryu NAGAYASU*

Nari TANABE*

Hideaki MATSUE*

Toshihiro FURUKAWA†

1 まえがき

原画像がぼけと雑音の影響を受けた劣化画像のみを用いて鮮明な画像に復元する手法は、生活、生命・医療、産業などの様々な分野で必要とされている。その一例として、日常生活分野においてはデジタルスチルカメラや携帯端末によって得られる画像 [1]、生命・医療分野では防犯カメラで得られる画像や内視鏡カメラなどから得られる画像 [2]、産業分野では器具の故障検出などに用いられる画像などが挙げられる [3]。これらで用いられるデジタル画像に対して、高性能な劣化画像復元を可能とする手法が望まれている。

高速処理が可能な劣化画像復元手法として、従来から線形フィルタであるウィナーフィルタを用いた手法が挙げられる [5]–[7]。この手法は、確率過程の定常性を前提として原画像と復元画像の二乗距離を最小にすることで最適な復元画像を得る手法である [6]。しかしながら、ウィナーフィルタの安定性を決めるパラメータの決定が困難であるとともに、非定常性の強い領域の復元性能が低下してしまう問題もある [7]。

また、非定常性の強い領域を良好に復元する手法として、射影フィルタを用いた劣化画像復元手法が存在する [8]–[10]。この手法は原画像と復元画像との似通いの程度を原画像の空間で直接評価し、画像の出現頻度に関わりなく最良近似画像を復元する手法である [8]。しかしながら、雑音の影響によって復元性能が大きく左右される問題がある [9]。

これらの問題を解決する手法として、2次元カルマンフィルタを用いた劣化画像復元手法が存在する [11]–[15]。この手法は、(Step 1) 復元したい複数の画素である注目画素領域とその領域に隣接する周辺画素領域との相関を考慮して自己回帰 (Auto-regressive:AR) システムから AR 係数の導出を行う。次いで、(Step 2) 原画像に対応した注目画素領域および周辺画素領域と Step 1 で導出した AR 係数および AR 係数の予測誤差 (白色性駆動源) により構成される状態方程式と、その原画像に対応した画素とぼけ関数および雑音より構成される観測方程式からなる状態空間モデルをカルマンフィルタ理論に適用することで劣化画像復元を行う。

本論文では2次元カルマンフィルタ [14] に着目し、この手法について議論するものとする。この手法は、予測誤差の分散を評価量とする逐次的な処理であるために高性能な劣化画像復元が可能であることが知られている。しかしながら、Step 1 において AR 係数を推定する際に必要な (i) AR 次数の決定問題が存在する。AR 次数の推定手法としては赤池情報量基準 [16] などが挙げられるが、この手法を用いた場合においても依然として正確な推定は困難となる場合もある。それゆえ、(ii) AR 係数の推定精度が低下してしまうことから、

Step 2 の劣化画像の復元精度に影響が生じてしまう。また、Step 1 における (iii) AR 次数と AR 係数の推定において多くの演算量が必要となることも短時間での劣化画像復元処理を困難にしている。

そこで本論文は、この問題を解決するために AR システムのコンセプトを用いない有色性駆動源を含む2次元カルマンフィルタによる劣化画像復元手法を提案する。提案手法は、(a) 復元したい複数の画素である注目画素領域とその領域に隣接する周辺画素領域からなる原画像に対応した画素のみによって構成される有色性駆動源を含む状態方程式と、(b) 原画像に対応した画素とぼけ関数および雑音より構成される観測方程式からなる状態空間モデルから劣化画像復元を実現している。

提案手法の特徴は、注目画素領域と周辺画素領域の対象とする領域の時刻変化に着目して有色性駆動源 (原画像) を含む状態方程式を構成していることである。それゆえ、提案手法は従来の2次元カルマンフィルタ [11]–[15] に必要であった AR システムのコンセプトを必要とせず劣化画像復元を行っていることから、(1) 演算量の軽減による復元処理速度の向上と、(2) 高性能な劣化画像復元が可能である。従って、提案手法はシンプルで実用的な劣化画像復元が期待できる。提案手法の有効性は、1枚の劣化した実画像に対して従来手法 [14] と提案手法を適用した復元画像に対する (i) 視覚評価、(ii) 主観評価、および (iii) 処理速度評価を用いて確認している。

2 問題設定 [5],[14]

本章は、本論文で用いる劣化画像について定義する。劣化画像は、ぼけの点拡がり関数 (Point Spread Function:PSF) と加法性白色ガウス雑音 (Additive White Gaussian Noise:AWGN) によって次式のように表される [5]。

$$y_{i,j} = \sum_p \sum_q h_{i-p,j-q} x_{p,q} + v_{i,j} \quad (1)$$

ただし、 i, j は画像の縦軸と横軸における位置を表し、 $y_{i,j}$ は劣化画像、 $x_{i,j}$ は原画像、 $h_{i,j}$ はぼけの PSF、 $v_{i,j}$ は AWGN とする。ここで、式 (1) において原画像 $x_{i,j}$ は雑音 $v_{i,j}$ と無相関 ($E[x_{i,j} \cdot v_{i,j}] = 0$) と仮定する。ただし、 $E[\cdot]$ は期待値を表す。

以後の議論を容易にするため、図1に示すように $l \times m$ の注目画素領域を $l = m = 2$ 、およびその注目画素領域に隣接する $L_i \times L_j$ の周辺画素領域を $L_i = L_j = 6$ とすれば、注目画素領域と周辺画素領域をまとめた $(L_i \times L_j) = 6 \times 6$ の局所領域においては $(L_i \times L_j) = L = 36$ として議論を進めることにする。

本論文の目的は、1枚の原画像にぼけと雑音が加わった劣化画像に対して、文献 [17] を劣化画像復元に適用できるよ

* 諏訪東京理科大学

† 東京理科大学

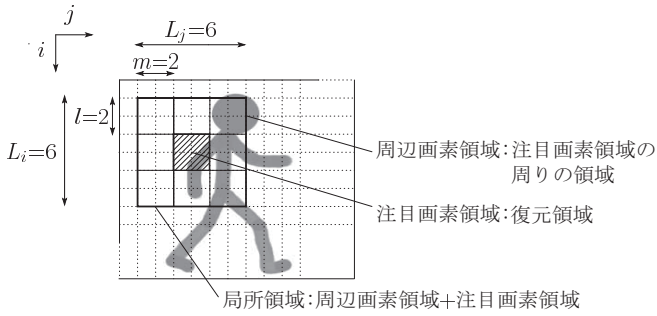


図1: 注目画素領域と周辺画素領域

に拡張することにより、高速かつ高性能な劣化画像復元を実現することである。

3 文献 [14] をばけに対応させた手法

本章は、Citrinらによって提案された2次元カルマンフィルタによる劣化画像復元手法 [14] をばけ画像にも対応させた手法 (以降、従来手法と称する) について簡単に説明する。

画素をスカラーで取り扱った局所領域が、時刻 n から時刻 $(n+1)$ に変化した際の様子を図2(a)に示す。次いで、図2(a)の各画素領域をベクトルに置き換えた従来手法の局所領域変化を図2(b)に示す。ここで、“ n ”は状態量 $x_{i,j}$ で構成される時刻 n における状態ベクトル $x(n)$ の局所領域変化を示す。

従来手法のアルゴリズムは、次に示す2段階の処理によって定義される。

3.1 Step 1: AR システムのパラメータ推定

原画像の時刻 n における注目画素 $x_{i,j}(n)$ は、図1に示すように隣接する周辺画素と相関があることを考慮して、ARシステムでモデル化すると次式のように表される [14]。

$$x_{i,j}(n+1) = \sum_{L_i, L_j \in L} \alpha_{L_i, L_j}(n+1) x_{i-L_i, j-L_j}(n) + e_{i,j}(n+1) \quad (2)$$

ただし、 L はAR次数とし、 $\alpha_{L_i, L_j}(n+1)$ はAR係数、 $e_{i,j}(n+1)$ は駆動源である。ここで、 $\alpha_{L_i, L_j}(n+1)$ と $e_{i,j}(n+1)$ は劣化画像を用いてYule-Walker法より算出を行う [18]。

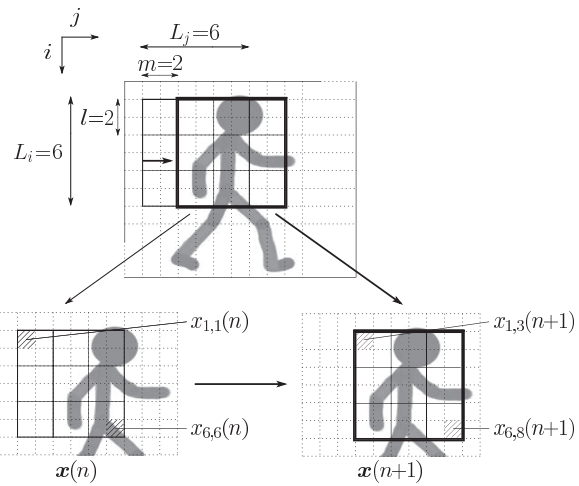
3.2 Step 2: カルマンフィルタ理論を用いた劣化画像復元

はじめに状態方程式について議論する。図2(a)に示した時刻 n における 2×2 の画素領域に対して、図2(b)のように置き換えた4次元ベクトル $x_{i,j}(n)$ を次式に示す。

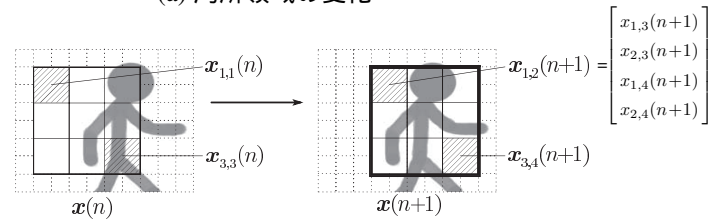
$$\left. \begin{aligned} x_{1,1}(n) &= [x_{1,1}(n), x_{2,1}(n), x_{1,2}(n), x_{2,2}(n)]^T \\ x_{2,1}(n) &= [x_{3,1}(n), x_{4,1}(n), x_{3,2}(n), x_{4,2}(n)]^T \\ x_{3,1}(n) &= [x_{5,1}(n), x_{6,1}(n), x_{5,2}(n), x_{6,2}(n)]^T \\ x_{1,2}(n) &= [x_{1,3}(n), x_{2,3}(n), x_{1,4}(n), x_{2,4}(n)]^T \\ x_{2,2}(n) &= [x_{3,3}(n), x_{4,3}(n), x_{3,4}(n), x_{4,4}(n)]^T \\ &\vdots \\ x_{3,3}(n) &= [x_{5,5}(n), x_{6,5}(n), x_{5,6}(n), x_{6,6}(n)]^T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

従来手法で対象となる L 次元の状態ベクトルは、式(3)の状態ベクトル $x_{i,j}(n)$ を並べたベクトルとして $x_c(n) = [x_{1,1}^T(n), x_{2,1}^T(n), x_{3,1}^T(n), x_{1,2}^T(n), \dots, x_{3,3}^T(n)]^T$ とすれば、状態ベクトルと Step 1 で得られた AR 係数より状態方程式は次式 [state equation]

$$x_c(n+1) = \Phi_c(n+1)x_c(n) + \delta_c(n+1) \quad (4)$$



(a) 局所領域の変化



(b) 従来手法 [14] および提案手法における局所領域の変化

図2: 状態遷移図

となる。ただし、 $L \times L$ 行列の状態遷移行列 $\Phi_c(n+1)$ と、 L 次元の白色性駆動源ベクトル $\delta_c(n+1)$ は次式とする。

$$\left. \begin{aligned} &\Phi_c(n+1) \\ &= \begin{bmatrix} O & O & O & I & O & O & O & O & O \\ A_{1,1}^{(2,2)} & A_{2,1}^{(2,2)} & A_{3,1}^{(2,2)} & A_{1,2}^{(2,2)} & A_{2,2}^{(2,2)} & A_{3,2}^{(2,2)} & A_{1,3}^{(2,2)} & A_{2,3}^{(2,2)} & A_{3,3}^{(2,2)} \\ O & O & O & O & O & I & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & I & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & I & O \\ O & O & O & O & O & O & O & O & I \\ O & O & O & O & O & O & A_{1,3}^{(1,4)} & A_{2,3}^{(1,4)} & O \\ O & O & O & O & O & O & A_{1,3}^{(2,4)} & A_{2,3}^{(2,4)} & A_{3,3}^{(2,4)} \\ O & O & O & O & O & O & A_{2,3}^{(3,4)} & A_{3,3}^{(3,4)} & O \end{bmatrix} \\ &\delta_c(n+1) = [0^T, e_{2,1}^T(n+1), 0^T, \dots, 0^T, \\ &\quad e_{1,3}^T(n+1), e_{2,3}^T(n+1), e_{3,3}^T(n+1)]^T \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $A_{i,j}^{(\alpha,\beta)}$ は AR 係数で構成される 4×4 行列であり、 (α, β) は AR 係数を用いて表す時刻 $(n+1)$ での状態ベクトル $x_{\alpha,\beta}(n+1)$ を示す。また、 $e_{i,j}(n+1)$ は原画像と無相関となる平均零の白色信号で構成される 4 次元ベクトル、 O は 4×4 行列の零行列、 I は 4×4 行列の単位行列とし、 0 は 4 次元の零ベクトルとする。

次いで、観測方程式について議論する。劣化画像の時刻 n における 2×2 の画素領域を 4 次元ベクトル $y_{i,j}(n)$ として次式のように示す。

$$\left. \begin{aligned} y_{1,1}(n) &= [y_{1,1}(n), y_{2,1}(n), y_{1,2}(n), y_{2,2}(n)]^T \\ y_{2,1}(n) &= [y_{3,1}(n), y_{4,1}(n), y_{3,2}(n), y_{4,2}(n)]^T \\ y_{3,1}(n) &= [y_{5,1}(n), y_{6,1}(n), y_{5,2}(n), y_{6,2}(n)]^T \\ y_{1,2}(n) &= [y_{1,3}(n), y_{2,3}(n), y_{1,4}(n), y_{2,4}(n)]^T \\ y_{2,2}(n) &= [y_{3,3}(n), y_{4,3}(n), y_{3,4}(n), y_{4,4}(n)]^T \\ &\vdots \\ y_{3,3}(n) &= [y_{5,5}(n), y_{6,5}(n), y_{5,6}(n), y_{6,6}(n)]^T \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

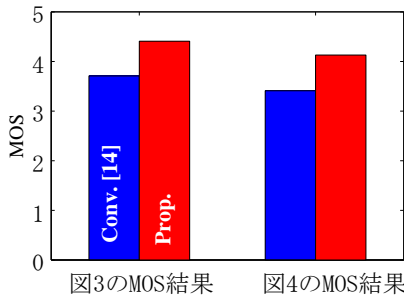


図5: 図3と図4に対する主観評価 (MOS)

よる復元画像はアルミ片や目盛りの15と0の数字が鮮明になっており、土台と床の境界線もはっきりしていることが分かる。

次いで図4について画像比較を行うと、図3と同様に、図4(b)に示す従来手法による復元画像はぼけが残ってしまっているのに対し、図4(c)に示す提案手法による復元画像は良好な復元を実現している。

このことから、提案手法は従来手法よりも鮮明な実画像復元が可能であることが確認できる。

5.2 主観評価 [20]

次いで主観評価では、MOS(Mean Opinion Score)を用いて復元画像の評価を行う[20]。表3に示す5段階の評価基準に従って、図3と図4に示す復元画像と原画像を男性25人、女性25人に比較評価してもらい、この結果の平均値を評価結果として図5にそれぞれ示す。

まず図5に示す図3のMOS結果では、提案手法は従来手法よりも高い値となり、提案手法は高い復元評価を得ていることが分かる。これは、図3(c)のアルミ片の輪郭部分や目盛りの数字、または焦点がずれている奥の土台などがはっきり出ていることによる結果であると考えられる。

次いで、図5に示す図4のMOS結果は図3のMOS結果と同様に、提案手法は従来手法よりも高い値となった。これは、提案手法による復元画像のほうがアルミ片を鮮明に確認できることが影響していると考えられる。

これらのことから、主観評価においても提案手法の有効性が確認できる。

5.3 処理速度比較 [21]

本節は、従来手法[14]と提案手法の処理速度の比較を行う[21]。それぞれ232フレームを持つ異なる画像サイズ(256×256, 512×512, 1024×1024)の動画像に対して、232フレームの画像すべてに劣化画像復元処理を行い、1フレームの画像に対して必要とした平均処理時間[秒]を図6に示す。ただし、その際に用いたPCのスペックを表4に示す。

図6に示す処理速度の結果比較より、いずれの画像サイズにおいても提案手法は従来手法よりも高速な劣化画像復元処理を行っていることが確認できる。

ここで、従来手法と提案手法に処理速度の差が生じた理由について考察する。表1に示す従来手法のアルゴリズム手順と表2に示す提案手法のアルゴリズム手順の比較より、従来手法はStep2におけるカルマンフィルタの前処理としてAR係数の推定を行う必要があるのに対して、提案手法はこれが不要である。また、提案手法の状態遷移行列 Φ_p は式(11)よりAR係数を要素に持たずに零の要素を多く持つシンプルなシフト行列であることも、処理速度向上に影響した理由と考えられる。

表3: MOS評価基準 [20]

基準	評価値
非常に良い	5
良い	4
普通	3
悪い	2
非常に悪い	1

表4: PCスペック

OS	Windows XP Professional
CPU	Intel(R)Core(TM)i7-920(2.67GHz)
Memory	2GB

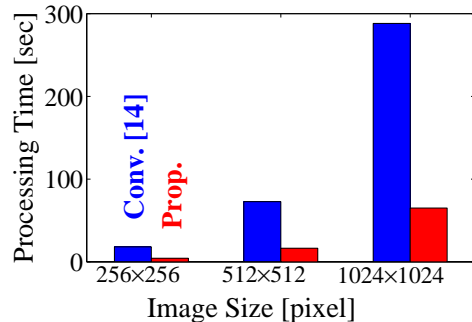


図6: 従来手法と提案手法の処理速度比較

以上の実画像を用いた復元結果より、提案手法は復元性能を犠牲にすることなく、処理速度の向上を可能としていることが確認できる。

6 まとめ

本論文は、実画像復元のための有色性駆動源を含む2次元カルマンフィルタによる劣化画像復元手法を提案した。

提案手法は文献[17]を劣化画像復元に適用し、従来の2次元カルマンフィルタ[14]の問題点であったARシステムのコセプトを用いない劣化画像復元手法である。提案手法の有効性は撮影した実画像に対する劣化画像復元によって明らかにされており、復元性能を犠牲にすることなく処理速度の向上を可能としている。これらのことから提案手法は、(i) 高速な復元処理が可能でかつ、(ii) 高性能な劣化画像復元手法が可能なシンプルで実用的な手法である。

今後は、状態空間モデルに有色性駆動源を含む提案手法をカルマンフィルタ理論に適用した場合でも、処理が可能なことについての証明を行う予定である。

参考文献

- 石田 皓之, 高橋 友和, 井手 一郎, 目加田 慶人, “携帯カメラ入力型文字認識におけるぼけやぶれに対処するための生成型学習法,” 信学論 (D), vol.J89-D, no.9, pp.2055-2064, Sep. 2006.
- 阪井 拓郎, スチット ボンスムクン, 佐川 立昌, 越後 富夫, 八木 康史, “注視点を考慮した脳展開開像の適応的表示法,” 信学論 (D), vol.J90-D, no.8, pp.2253-2261, Aug. 2007.
- 望月 淳, 浅野敏郎, “周期的明暗パターン撮像におけるモアレノイズ低減手法の検討,” 信学論 (D-II), vol.J83-D-II, no.2, pp.565-574, Feb. 2000.
- 亀田 昌志, 大竹 孝平, 宮原 誠, “画像のサブバンド符号化における帯域ブロックをベースにした2次元最速周波数分割,” 信学論 (D-II), vol.J81-D-II, no.6, pp.1095-1107, Jun. 1988.
- 小川 英光, “信号と画像の復元 [III]-復元問題の普遍性,” 信学誌, vol.71, no.5, pp.491-497, Jul. 1988.
- 西宮 亮平, 田口 亮, “複数のウィナーフィルタによる画像復元,” 信学論 (A), vol.J83-A, no.7 pp.892-902, Jul. 2000.
- 砂原 善文, 確率システム理論 III 応用編, 朝倉書店, 1982.
- 山下 幸彦, 小川 英光, “平均射影フィルタの諸性質,” 信学論 (D-II), vol.J74-D-II, no.2, pp.142-149, Feb. 1991.
- A.Syed, and H.Ogawa, “Characterization and Implementation of Partial Projection Filter in the Presence of Signal Space Noise,” IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E87-D, no.12, pp.2837-2843, Dec. 2004.
- 小出 祐司, 山下 幸彦, 小川 英光, “信号・画像推定のための射影フィルタ族の統一理論,” 信学論 (D-II), vol.J77-D-II, no.7, pp.1293-1301, Jul. 1994.
- M.R.Azimi-Sadjadi, and S.Bannour, “Two-Dimensional Recursive Parameter Identification for Adaptive Kalman Filtering,” IEEE Trans.Circuits Syst., vol.38, pp.1077-1081, Sep. 1991.
- M.R.Azimi-Sadjadi, and P.W.Wong, “Two-Dimensional Block Kalman Filtering for Image Restoration,” IEEE Trans. on Acoustics, Speech, Signal Proc., vol.assp-35, no.12, Dec. 1987.
- Jun Katayama, Yoshifumi Sekine, “Noise Reduction Approach of Range Image Using Nonlinear 2D Kalman Filter,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E85-A, no.4, Apr. 2002.
- S.Citrin, and M.R.Azimi-Sadjadi, “A full-plane block Kalman filter for image restoration,” IEEE Trans. on Image Processing, vol.1, no.4, Oct. 1992.
- 下江 敏夫, 齊藤 恒雄, 星子 幸男, “カルマンフィルタによる画像の2次元フィルタリング,” 信学論 (D), vol.J61-D, no.8, Aug. 1978.
- 赤池弘次, 赤池信賴量基準 AIC, 共立出版, 2007.
- N. Tanabe, T. Furukawa, and S. Tsujii, “Robust Noise Suppression Algorithm with the Kalman Filter Theory for White and Colored Disturbance,” IEICE Trans. on Fundamentals, vol.E91-A, no.3, Mar. 2008.
- 石黒 真木夫, 時系列解析の方法, 朝倉書店, 1998.
- M.Sakano, N.Suetake, and E.Uchino, “A Noise-Robust Estimation for Out-of-Focus PSF by Using a Distribution of Gradient Vectors on the Logarithmic Amplitude Spectrum,” IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.J90-D, no.10, pp.2848-2857, Oct. 2007.
- ITU-T COM 12, “Methods for subjective determination of transmission quality,” Recommendation P.800.
- 田中正行, 神田 崇史, 奥富 正敏, “残差画像に基づく漸進的ぼれ画像復元,” 信学論 (D), vol.J92-D, no.8, pp.1208-1220, Aug. 2009.