# I-079

# 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 *	田邉 造*	松江 英明*	古川 利博 †
Ryu NAGAYASU *	Nari TANABE *	Hideaki MATSUE *	Toshihiro FURUKAWA $^{\dagger}$

## 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ィ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ィ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に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].

$$y_{i,j} = \sum_{p} \sum_{q} h_{i-p,j-q} x_{p,q} + v_{i,j}$$
(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*<sub>*i*,*j*</sub> は 劣化画像,*x*<sub>*i*,*j*</sub> は原画像,*h*<sub>*i*,*j*</sub> はぼけの PSF,*v*<sub>*i*,*j*</sub> は AWGN とする.ここで,式(1) において原画像 *x*<sub>*i*,*j*</sub> は雑音 *v*<sub>*i*,*j*</sub> 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う

<sup>\*</sup> 諏訪東京理科大学

<sup>†</sup> 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,高速で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] をぼ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]をぼ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<sub>i,j</sub>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<sub>i,j</sub>(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].

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

$$\begin{array}{c} \boldsymbol{x}_{1,1}(n) = \left[ x_{1,1}(n), x_{2,1}(n), x_{1,2}(n), x_{2,2}(n) \right]^{T} \\ \boldsymbol{x}_{2,1}(n) = \left[ x_{3,1}(n), x_{4,1}(n), x_{3,2}(n), x_{4,2}(n) \right]^{T} \\ \boldsymbol{x}_{3,1}(n) = \left[ x_{5,1}(n), x_{6,1}(n), x_{5,2}(n), x_{6,2}(n) \right]^{T} \\ \boldsymbol{x}_{1,2}(n) = \left[ x_{1,3}(n), x_{2,3}(n), x_{1,4}(n), x_{2,4}(n) \right]^{T} \\ \boldsymbol{x}_{2,2}(n) = \left[ x_{3,3}(n), x_{4,3}(n), x_{3,4}(n), x_{4,4}(n) \right]^{T} \\ \vdots \\ \boldsymbol{x}_{3,3}(n) = \left[ x_{5,5}(n), x_{6,5}(n), x_{5,6}(n), x_{6,6}(n) \right]^{T} \end{array} \right\}$$
(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  $x_c(n) = [x_{1,1}^T(n), x_{2,1}^T(n), x_{3,1}^T(n), x_{1,2}^T(n), \cdots, x_{3,3}^T(n)]^T$ 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]

$$\boldsymbol{x}_c(n+1) = \Phi_c(n+1)\boldsymbol{x}_c(n) + \boldsymbol{\delta}_c(n+1)$$
(4)



(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.

$\Phi_c$	(n+1)	)									
	O	O	O	Ι	O	O	O	O	0		
	$A_{1,1}^{(2,2)}$	$A_{2,1}^{(2,2)}$	$A_{3,1}^{(2,2)}$	$A_{1,2}^{(2,2)}$	$A_{2,2}^{(2,2)}$	$A_{3,2}^{(2,2)}$	$A_{1,3}^{(2,2)}$	$A_{2,3}^{(2,2)}$	$A_{3,3}^{(2,2)}$		
	0	O	O	O	O	Ι	O	O	0		
	0	O	O	O	O	O	Ι	0	0		
=	0	0	O	0	O	O	0	Ι	0		
	0	O	O	O	O	O	O	0	Ι	Ì	, (S)
	0	O	0	O	0	0	$A_{1,3}^{(1,4)}$	$A_{2,3}^{(1,4)}$	0		
	0	O	0	O	0	0	$A_{1,3}^{(2,4)}$	$A_{2,3}^{(2,4)}$	$A_{3,3}^{(2,4)}$		
	0	0	0	O	0	0	Ō	$A_{2,3}^{(3,4)}$	$A_{3,3}^{(3,4)}$		
$\boldsymbol{\delta}_{c}$	(n+1)	$0 = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$	$^{T}, e_{2,}^{T}$	$_{1}(n + $	$1), 0^{T}$	·,···,	$0^{T},$				
$\boldsymbol{e}_{1,3}^{T}(n+1), \boldsymbol{e}_{2,3}^{T}(n+1), \boldsymbol{e}_{3,3}^{T}(n+1) \right]^{T}$											

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, ( $\alpha,\beta$ )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 $2 \times 2$ 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.

$$\begin{array}{c} \boldsymbol{y}_{1,1}(n) = \left[ y_{1,1}(n), y_{2,1}(n), y_{1,2}(n), y_{2,2}(n) \right]^{T} \\ \boldsymbol{y}_{2,1}(n) = \left[ y_{3,1}(n), y_{4,1}(n), y_{3,2}(n), y_{4,2}(n) \right]^{T} \\ \boldsymbol{y}_{3,1}(n) = \left[ y_{5,1}(n), y_{6,1}(n), y_{5,2}(n), y_{6,2}(n) \right]^{T} \\ \boldsymbol{y}_{1,2}(n) = \left[ y_{1,3}(n), y_{2,3}(n), y_{1,4}(n), y_{2,4}(n) \right]^{T} \\ \boldsymbol{y}_{2,2}(n) = \left[ y_{3,3}(n), y_{4,3}(n), y_{3,4}(n), y_{4,4}(n) \right]^{T} \\ \vdots \\ \boldsymbol{y}_{3,3}(n) = \left[ y_{5,5}(n), y_{6,5}(n), y_{5,6}(n), y_{6,6}(n) \right]^{T} \end{array} \right\}$$
(6)

480 (第3分冊)

Copyright © 2011 by Information Processing Society of Japan and The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers All rights reserved. [Initialization]

 $\hat{\boldsymbol{x}}_c(0|0) = \boldsymbol{0},$  $P_c(0|0) = I$ [Iteration] · Step 1 Yule-Walker 法より原画像の AR 係数  $\{\alpha_{L_i,L_j}(n)\}$  推定 · Step 2 1.  $P_c(n+1|n) = \Phi_c(n+1)P_c(n|n)\Phi_c(n+1)^T + R_{\delta_c}(n+1)$ 2.  $K_c(n+1) = \{P_c(n+1|n)M_c^T\}$  $\cdot \{M_c P_c(n+1|n)M_c^T + R_{\epsilon_c}(n+1)\}^{-1}$ 3.  $\hat{x}_c(n+1|n) = \Phi_c(n+1)\hat{x}_c(n|n)$ 4.  $\hat{\boldsymbol{x}}_c(n+1|n+1) = \hat{\boldsymbol{x}}_c(n+1|n) + K_c(n+1)$  $\cdot \{ \boldsymbol{y}_{c}(n+1) - M_{c} \hat{\boldsymbol{x}}_{c}(n+1|n) \}$ 5.  $P_c(n+1|n+1) = \{I - K_c(n+1)M_c\} P_c(n+1|n)$ 6. n = n + 1 go back 1.

ここで,従来手法の時刻 n における観測ベクトルは図2より 注目画素領域と一部の周辺画素領域を用いた画素領域から構 成される. すなわち, 16次元で構成される観測ベクトルは式 (6) より  $\boldsymbol{y}_{p}(n) = \left[ \boldsymbol{y}_{2,2}^{T}(n), \boldsymbol{y}_{1,3}^{T}(n), \boldsymbol{y}_{2,3}^{T}(n), \boldsymbol{y}_{3,3}^{T}(n) \right]^{T}$  とした とき,観測方程式は式(1)を用いて次式

observation equation

$$\boldsymbol{y}_c(n) = M_c \boldsymbol{x}_c(n) + \boldsymbol{\epsilon}_c(n) \tag{7}$$

となる.ただし,16×36行列の観測遷移行列 M<sub>c</sub>と16次元 の雑音ベクトル  $\epsilon_c(n)$  はそれぞれ PSF [19] と AWGN から構 成され,次式のように表される.

従来手法は,原画像 $x_{i,j}$ が雑音 $v_{i,j}$ と無相関でかつ,駆動 源ベクトル $\delta_c(n)$ が白色信号であるという条件のもとで,式 (4)の状態方程式と式(7)の観測方程式を用いて状態空間モデ ルを構成し,表1に示すカルマンフィルタ理論から劣化画像 復元を行う.

しかしながら,従来手法は Step 1 で AR 係数の推定を行う 際に AR 次数の決定問題が生じる.この AR 次数の決定問題 により AR 係数の正確な推定が困難となるため, 結果として Step 2 での劣化画像復元精度に影響を与えてしまう場合があ る.また,AR 次数とAR 係数の推定にも演算量と処理時間 が必要であるため,劣化画像復元に必要な処理時間が増加し てしまう問題も存在する.これらのことから,AR システム のコンセプトを用いない手法が望まれており,次章はこの問 題を解決する手法を提案する.

表 2: 提案手法のアルゴリズム

$$\begin{split} & [\text{Initialization}] \\ & \hat{x}_p(0|0) = \mathbf{0}, \qquad P_p(0|0) = I \\ & [\text{Iteration}] \\ & 1. \ P_p(n+1|n) = \Phi_p P_p(n|n) \Phi_p^T + R_{\delta_p}(n+1) \\ & 2. \ K_p(n+1) = \left\{ P_p(n+1|n) M_p^T \right\} \\ & \quad \cdot \left\{ M_p P_p(n+1|n) M_p^T + R_{\epsilon_p}(n+1) \right\}^{-1} \\ & 3. \ \hat{x}_p(n+1|n) = \Phi_p \hat{x}_p(n|n) \\ & 4. \ \hat{x}_p(n+1|n+1) = \hat{x}_p(n+1|n) + K_p(n+1) \\ & \quad \cdot \left\{ y_p(n+1) - M_p \hat{x}_p(n+1|n) \right\} \\ & 5. \ P_p(n+1|n+1) = \left\{ I - K_p(n+1) M_p \right\} P_p(n+1|n) \\ & 6. \ n = n+1 \ \text{ go back } 1. \end{split}$$

#### 4 提案手法

本論文では, AR システムのコンセプトを用いない劣化画 像復元手法を提案する.

はじめに提案手法の状態方程式について議論する.原画像 が図 2 (a),(b) に示すように定義された場合,提案手法の時刻 n における L 次元の状態ベクトルは式 (3) より

$$\boldsymbol{x}_{p}(n) = \left[\boldsymbol{x}_{1,1}^{T}(n), \boldsymbol{x}_{2,1}^{T}(n), \boldsymbol{x}_{3,1}^{T}(n), \boldsymbol{x}_{1,2}^{T}(n), \cdots, \boldsymbol{x}_{3,3}^{T}(n)\right]^{T}$$
(9)

と定義する.提案手法は,時刻 n から時刻 (n+1) の時刻変 化が局所領域の変化であることに着目し, AR システムのコ ンセプトを用いずに表した状態方程式を次式に示す. state equation

$$\boldsymbol{x}_{p}(n+1) = \Phi_{p}\boldsymbol{x}_{p}(n) + \boldsymbol{\delta}_{p}(n+1)$$
(10)

ただし, $L \times L$ 行列の状態遷移行列  $\Phi_p$  とL次元の有色性駆 動源ベクトル $\delta_p(n+1)$ を次式に表す.

$$\Phi_{p} = \begin{bmatrix}
O & O & O & I & O & \cdots & O \\
\vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
\vdots & \ddots & & \ddots & \ddots & O \\
\vdots & \ddots & & \ddots & \ddots & O \\
O & \cdots & & & \cdots & O \\
O & \cdots & & & \cdots & O \\
O & \cdots & & & \cdots & O
\end{bmatrix}$$
(11)
$$\delta_{p}(n+1) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{T}, \cdots, \mathbf{0}^{T}, \mathbf{x}_{1,4}^{T}(n+1), \\ \mathbf{x}_{2,4}^{T}(n+1), \mathbf{x}_{3,4}^{T}(n+1) \end{bmatrix}^{T}$$

ここで,状態遷移行列  $\Phi_p$  は図 2 (b) に示す時刻 n から時刻 (n+1) への時刻変化を表し,駆動源ベクトル $\delta_p(n+1)$ は 原画像の要素を含む有色性駆動源となる.

次いで,提案手法の観測ベクトルは図2より,注目画素領 域と一部の周辺画素領域を用いて構成する.時刻 n における 16次元の観測ベクトルは,式(6)から

$$\boldsymbol{y}_{p}(n) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{y}_{2,2}^{T}(n), \boldsymbol{y}_{1,3}^{T}(n), \boldsymbol{y}_{2,3}^{T}(n), \boldsymbol{y}_{3,3}^{T}(n) \end{bmatrix}^{T}$$
(12)

と定義する.提案手法の観測方程式は式(1)より次式となる. observation equation

$$\boldsymbol{y}_{p}(n) = M_{p}\boldsymbol{x}_{p}(n) + \boldsymbol{\epsilon}_{p}(n)$$
(13)

481 (第3分冊)

Copyright © 2011 by Information Processing Society of Japan and The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers All rights reserved.



(a) 撮影画像 (140 フレーム目)

(b) 従来手法 [14]

図 3: 撮影画像の復元比較 (140 フレーム目)

(c) 提案手法



(a) 撮影画像 (182 フレーム目)

(b) 従来手法 [14] 図 4: 撮影画像の復元比較 (182 フレーム目)

(c) 提案手法

ただし , 16 imes 36 行列の観測遷移行列  $M_p$  と 16 次元の雑音ベクトル  $\epsilon_p(n)$  はそれぞれ PSF [19] と AWGN から構成され ,

$$\begin{bmatrix} h_{-1,1} & h_{-1,0} & h_{0,1} & h_{0,0} \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{\epsilon}_p(n) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{2,2}^T(n), \boldsymbol{v}_{1,3}^T(n), \boldsymbol{v}_{2,3}^T(n), \boldsymbol{v}_{3,3}^T(n) \end{bmatrix}^T$$

以上に示した式 (10)の状態方程式と式 (13)の観測方程式よ り構成される状態空間モデルを用いて劣化画像復元を行う. 提案手法のアルゴリズムを表 2 に示す.

ここで,注意すべきことがある.それは,提案した状態空間 モデルにおいて状態方程式に含まれる駆動源ベクトル $\delta_p(n)$ は,式(11)に示すように原画像を要素に含んでいることから有色性駆動源となる.一般に,カルマンフィルタ理論[14] は状態量と雑音が無相関でかつ,白色性駆動源であるという 条件の下で適用されるのに対して,提案手法は先に述べた条 件を満足せず,有色性駆動源となる.この問題は,カルマン フィルタの更新アルゴリズムが逐次処理なことから証明が非 常に困難である.このため,本論文では実画像を用いた画像 復元比較を用いて提案手法の有効性を次章で確認する.

## 5 実動画像復元

本章は提案手法の有効性を確認するために,実際に撮影し た実画像(640×480,8ビットグレースケール)に対して劣 化画像復元を行い,従来手法[14]と比較を行う.撮影には HF25SA-1レンズを用いており,被写界深度は±2cmとした. 内容はアルミ片が時間と共に画像奥から画像手前に移動する 様子を撮影した動画像であり,撮影した232フレームの中で 140フレーム目と182フレーム目の画像を図3(a)と図4(a) にそれぞれ示す.本論文では,140フレーム目と182フレー ム目の画像に対してそれぞれ従来手法[14]と提案手法を実行 し,劣化画像復元を行うものとする.また,レンズの焦点は 画像内の数字0に対して合わせており,数字の15は焦点を 合わせた数字0からの手前15cmと奥15cmの位置を示して いる.

### 5.1 視覚評価

図 3 (a) と図 4 (a) に示した 1 枚の撮影画像に対して,従来 手法と提案手法を用いて復元を行った結果の画像を図 3 (b),(c) および図 4 (b),(c) にそれぞれ示す.

まず図3について視覚による画像比較を行う.図3(b)に 示す従来手法を用いた復元画像は,撮影画像と比較するとア ルミ片の輪郭部分などはやや鮮明になっているものの,焦点 がずれている奥の土台のラインなどは大きな復元は見られな い結果となっている.これに対して,図3(c)の提案手法に



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 Step 2 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  $\Phi_p$  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.



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.

#### まとめ 6

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 ン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 一部,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),volJ89-D,no.9,pp.2055-2064,Sep.2006.
   阪井 托部,スチットボンズムクン,佐川 立昌,越後 富夫,八木康史,"注税品を考慮した腸管展開画像の適応約表示法"信学論(D),volJ90-D,no.8,pp.2253-2261,Aug.2007.
   望月 淳,浅野敏郎,"周期的明暗バ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),
- [5]
- [6] Jul. 2000
- が原 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. [8] 1991.
- [9] [10]
- 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 幸虐, 小川 英光, "信号, 画像推定のための射影フィル夕族の統一理論," 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. [11]
- M.R.Azimi-Sadjadi, and P.W.Wong, "Two-Dimensional Block Kalman Filtering for Im Trans. on Acoustics, Speech, Signal Proc., vol.assp-35, no.12, Dec. 1987. [12]
- Jun Katayama, Yoshifumi Sekine, "Noise Reduction Approach of Range Image Using Nonlinear 2D Kalman [13]
- 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 [14]
- Image Processing, vol.1, no.4, Oct. 1992.

   下江 戦夫, 斉藤 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.

   赤池点次, 赤池情報量量準 AIC, 共立出版, 2007.
   [15]
- [16]
- 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. [17] [18]
- 石黑 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 Distri bution of Gradient Vectors on the Logarithmic Amplitude Spectrum," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.J90-D, 10.10, pp.2848-2857, Oct. 2007.
- ITU-T COM 12, "Metho ods for subjective deter tion of tra ission quality," Re 田中 正行,神田 崇史,奥富 正敏,"残差画像に基づく漸進的ぶれ画像復元,"信学論 (D), vol.J92-D, no.8, [21] pp.1208-1220, Aug. 2009

483 (第3分冊)

Copyright © 2011 by Information Processing Society of Japan and The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers All rights reserved.