

THE IEICE TRANSACTIONS ON INFORMATION AND SYSTEMS (JAPANESE EDITION)

IEICE | **電子情報通信学会**
D | **論文誌** 情報・システム

VOL. J97-D NO. 9
SEPTEMBER 2014

本PDFの扱いは、電子情報通信学会著作権規定に従うこと。
なお、本PDFは研究教育目的（非営利）に限り、著者が第三者に直接配布することができる。著者以外からの配布は禁じられている。

情報・システムソサイエティ

一般社団法人 **電子情報通信学会**

THE INFORMATION AND SYSTEMS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

研究速報

圧縮センシングに基づく画像の自己相関性を利用した
カラー画像の再構成

苫米地 大†^{a)} 杉村 大輔† (正員)
保坂 忠明†† (正員) 浜本 隆之† (正員)

Reconstructing Color Image Based on Compressed Sensing
Using Self Correlation

Masaru TOMABECHI†^{a)}, Nonmember, Daisuke SUGIMURA†,
Tadaaki HOSAKA††, and Takayuki HAMAMOTO†, Members

† 東京理科大学大学院工学研究科電気工学専攻, 東京都
Graduate School of Engineering, Tokyo University of Science,
6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo, 125-8585 Japan

†† 東京理科大学経営学部経営学科, 久喜市
School of Management, Tokyo University of Science, 500
Shimokiyoku, Kuki-shi, 346-8512 Japan

a) E-mail: tomabechi@isl.ee.kagu.tus.ac.jp

あらまし 本論文では、圧縮センシングに基づき少数データからカラー画像を再構成する手法を提案する。従来手法では、圧縮センシングにおける再構成の精度に影響する信号のスパース性を向上できていない。この問題に対し提案手法では、カラー画像において高い自己相関性をもつ局所類似性と色相関を利用することで、再構成する信号のスパース性を向上させ、高品質のカラー画像を取得する。

キーワード カラー画像再構成, 圧縮センシング, 局所類似性, 色相関

1. ま え が き

近年、少数の観測データから原信号の完全な再構成を試みる圧縮センシングに基づき、カラー画像を再構成する研究が盛んに行われている [1]。本論文ではジョイント圧縮センシング [2] に基づきカラー画像の局所類似性と色相関を利用することで高品質のカラー画像を再構成する。

2. 圧縮センシング

圧縮センシングは、スパースなベクトルに対する圧縮と再構成に関する理論である。これにより少数の観測データから原信号を再構成することができる。

原信号ベクトルを $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$, 基底行列を $\boldsymbol{\psi} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ として、表現ベクトル $\mathbf{s} = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$ がスパースであると仮定する。そして、結合係数を並べた観測行列を $\boldsymbol{\phi} \in \mathbb{R}^{M \times N}$ としたとき、観測ベクトル $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^M$ を、 $\mathbf{y} = \boldsymbol{\phi} \mathbf{x} = \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{\psi} \mathbf{s}$ と表現する。 $M < N$ のときにデータは圧縮されたことになる。ここで、観測行列 $\boldsymbol{\phi}$, 基底行列 $\boldsymbol{\psi}$, 観測ベクトル \mathbf{y} が与えられたときに原信号ベクトル \mathbf{x} を再構成することを考える。真の表現ベク

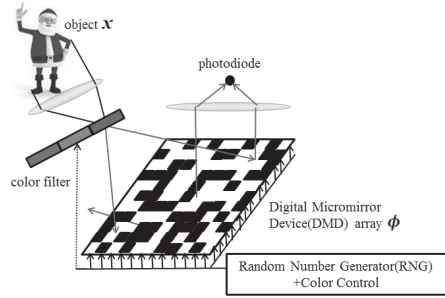


図 1 単画素カメラの構造
Fig. 1 Single-pixel camera architecture.

トル \mathbf{s} がスパースであるとき、 l_1 ノルム最小化基準によって得られる表現ベクトル \mathbf{s}^* が真の表現ベクトル \mathbf{s} に一致する可能性がある。再構成される表現ベクトル \mathbf{s}^* のスパース性が高いほど一致する可能性が高くなる。最後に $\mathbf{x}^* = \boldsymbol{\psi} \mathbf{s}^*$ を計算することで原信号の再構成ベクトル \mathbf{x}^* を取得する。

圧縮センシングの画像入力への応用として単画素カメラがある (図 1) [3]。単画素カメラにより赤・緑・青のカラー画像 $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_R^T \mathbf{x}_G^T \mathbf{x}_B^T]^T \in \mathbb{R}^N$ に対して M 回の線形観測を行い、観測ベクトル $\mathbf{y} = [\mathbf{y}_R^T \mathbf{y}_G^T \mathbf{y}_B^T]^T \in \mathbb{R}^M$ を取得できる。 $\mathbf{y}_R, \mathbf{y}_G, \mathbf{y}_B$ はそれぞれ赤・緑・青の観測ベクトルである。観測行列 $\boldsymbol{\phi}$ の要素 (各線形観測のパターン) は $\{1, 0\}$ で、DMD 上の微小な鏡の状態 (反射, 非反射) と対応している。 $M < N$ とすることで、データ量の削減が実現できる。

3. 提案手法

本手法は観測と再構成の二つの過程により構成される。観測の過程では、単画素カメラを用いて小領域ごとに観測ベクトルを取得する。再構成の過程では、カラー画像の自己相関性を利用してカラー画像を得る。

3.1 小領域ごとの観測ベクトルの取得

小領域ごとに線形観測を行う。カラー画像 (解像度 $w \times h$) を、重複を許容しない $W \times W$ 画素からなる K 個の小領域から構成されると考える。各小領域に対しラスタスキャンの順にインデックス $(a, b) = (1, 1), (1, 2), \dots, (h/W, w/W)$ を割り当て、小領域 (a, b) が含む画素を $\hat{\mathbf{x}}^{(a,b)} = [\hat{\mathbf{x}}_R^{(a,b)T} \hat{\mathbf{x}}_G^{(a,b)T} \hat{\mathbf{x}}_B^{(a,b)T}]^T \in \mathbb{R}^{3W^2}$ とする。このとき、カラー画像 \mathbf{x} は $\mathbf{x} = [\hat{\mathbf{x}}^{(1,1)T} \hat{\mathbf{x}}^{(1,2)T} \dots \hat{\mathbf{x}}^{(h/W, w/W)T}]^T$ と表される。次に、各小領域ごとに単画素カメラを用いて線形観測を行う。各小領域から m 個の観測データ ($m = M/K$) を得るとすると観測行列 $\boldsymbol{\phi}$ は $\boldsymbol{\phi} = \text{diag}[\hat{\boldsymbol{\phi}} \hat{\boldsymbol{\phi}} \dots \hat{\boldsymbol{\phi}}] \in \mathbb{R}^{M \times N}$ と

定義される．観測行列 $\hat{\phi} \in \mathbb{R}^{m \times 3W^2}$ は各色の観測行列 $\hat{\phi}_R \in \mathbb{R}^{m_R \times W^2}$, $\hat{\phi}_G \in \mathbb{R}^{m_G \times W^2}$, $\hat{\phi}_B \in \mathbb{R}^{m_B \times W^2}$ を対角成分とする行列であり, $\{1, 0\}$ の二値が等確率で発生するベルヌーイ分布に従う乱数によってその要素を決める． m_R, m_G, m_B は小領域での各色の観測回数である．また, 小領域 (a, b) から得られる観測ベクトルを $\hat{y}^{(a,b)} \in \mathbb{R}^m$ とすると, 全体の観測ベクトルは $\mathbf{y} = [\hat{y}^{(1,1)^T} \hat{y}^{(1,2)^T} \dots \hat{y}^{(h/W, w/W)^T}]^T$ と表される．

3.2 局所類似性と色相関を利用した再構成

取得した観測ベクトル \mathbf{y} からカラー画像において高い自己相関性をもつ局所類似性と色相関を利用しカラー画像を再構成する．局所類似性とは, 画像を小領域ごとに見れば近傍の小領域間の輝度変化は類似しているという性質である．色相関はカラー画像の赤・緑・青の輝度変化は類似しているという性質である．原信号に加えて, 類似した輝度変化をもつ複数の小領域に共通する成分をもつ信号と, 赤・緑・青に共通する成分をもつ信号を再構成する．これにより再構成する信号のスパース性が向上し, 高品質のカラー画像を再構成することができる．

最初に小領域 (a, b) で再構成する原信号を $\hat{s}^{(a,b)} = [\hat{s}_R^{(a,b)^T} \hat{s}_G^{(a,b)^T} \hat{s}_B^{(a,b)^T} \hat{s}_I^{(a,b)^T}]^T \in \mathbb{R}^{4W^2}$ と定義する． $\hat{s}_j^{(a,b)}$ は小領域 (a, b) における各色の表現ベクトル $\hat{s}_R^{(a,b)}$, $\hat{s}_G^{(a,b)}$, $\hat{s}_B^{(a,b)}$ に共通する成分をもつベクトルである．次に, 小領域 (a, b) を左上とする $c \times c$ 個の小領域から成る中領域 (A, B) で得られる観測ベクトルを $\tilde{\mathbf{y}}^{(A,B)} = [\tilde{y}^{(a,b)^T} \dots \tilde{y}^{(a+c-1, b+c-1)^T}]^T \in \mathbb{R}^{mc^2}$ とし, 再構成する信号を $\tilde{\mathbf{s}}^{(A,B)} = [\tilde{s}^{(a,b)^T} \dots \tilde{s}^{(a+c-1, b+c-1)^T} \tilde{\mathbf{s}}_I^{(A,B)^T}]^T \in \mathbb{R}^{4(c^2+1)W^2}$ と表現する． $\tilde{\mathbf{s}}_I^{(A,B)}$ は中領域内の小領域間で共通する成分をもつベクトルである．次に l_1 ノルム最小化基準:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{s}}^{(A,B)*} = \underset{\tilde{\mathbf{s}}}{\operatorname{argmin}} & \left\| \tilde{\mathbf{y}}^{(A,B)} - \tilde{\phi} \tilde{\Psi} \tilde{\mathbf{s}}^{(A,B)} \right\|_2^2 \\ & + \alpha \left\| \tilde{\mathbf{s}}^{(A,B)} \right\|_1 \end{aligned} \quad (1)$$

により $\tilde{\mathbf{s}}^{(A,B)*}$ を取得する．基底行列 $\tilde{\Psi}$ は

$$\tilde{\Psi} = \begin{bmatrix} \hat{\Psi} & & \hat{\Psi} \\ & \ddots & \vdots \\ & & \hat{\Psi} \hat{\Psi} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3c^2W^2 \times 4(c^2+1)W^2} \quad (2)$$

と定義される．また, 基底行列 $\tilde{\Psi}$ の要素 $\hat{\Psi}$ は

$$\hat{\Psi} = \begin{bmatrix} \hat{\psi} & \hat{\psi} \\ \hat{\psi} & \hat{\psi} \\ \hat{\psi} & \hat{\psi} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3W^2 \times 4W^2} \quad (3)$$

と定義される．基底行列 $\hat{\psi}$ は W^2 次元空間における離散コサイン変換の基底行列とする． $\alpha \in \mathbb{R}$ は重みを調整するパラメータである．基底行列 $\tilde{\Psi}$ により中領域内の小領域間で共通する成分をもつベクトルを $\hat{s}_I^{(A,B)}$, 基底行列 $\hat{\Psi}$ により赤・緑・青に共通する成分をもつベクトルを $\hat{s}_j^{(a,b)}$ として再構成できる．観測行列 $\tilde{\phi}$ は $\tilde{\phi} = \operatorname{diag}[\hat{\phi} \hat{\phi} \dots \hat{\phi}] \in \mathbb{R}^{mc^2 \times 3c^2W^2}$ と定義される．最後に表現ベクトル $\tilde{\mathbf{s}}^{(A,B)*}$ を用いて $\tilde{\mathbf{x}}^{(A,B)*} = \tilde{\Psi} \tilde{\mathbf{s}}^{(A,B)*}$ を計算する．これを全てのの中領域で行いカラー画像 \mathbf{x}^* を得る．

4. 評価実験

単画素カメラにより実画像に対する線形観測は可能である状況を想定して, シミュレーションによる評価実験を行った．その際 8 枚の画像を使って評価したが, 本論文では図 2 に示す Lena (解像度 256×256) に対する結果のみを示す．各パラメータは, 各色の観測数比 $m_R : m_G : m_B = 1 : 3 : 1$, 小領域サイズ $W = 4$, 中領域サイズ $c = 2$, 再構成における重み係数 $\alpha = 0.002$ と設定した．

サンプリングレート $M/N = 30\%$ において得られる Lena を図 2 に示す．(a) が従来手法, (b) が提案手法による再構成画像である．従来手法では各色の観測数比は $R : G : B = 1 : 2 : 1$ である．提案手法と従来手法では観測数比が異なるが, 少数データから画像を再構成する際に重要なのはサンプリングレートであるため, サンプリングレートの観点からの比較を行う．

同じサンプリングレートでも従来手法と比べて視覚的に良好な画像が得られていることが確認できる．また, サンプリングレートを変化させたときに再構成されるカラー画像の PSNR を表 1 に示す．サンプリングレートが小さくなるにつれて, PSNR が低下するも

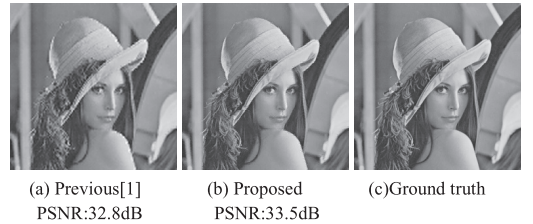


図 2 提案手法と従来手法の比較
Fig. 2 Reconstruction result.

表 1 再構成画像の PSNR 値

Table 1 PSNR values of reconstructed color images.

Sampling Rate	Previous[1]	Proposed
10%	29.9dB	30.9dB
20%	31.4dB	31.7dB
30%	32.8dB	33.5dB

の、いずれのサンプリングレートでも従来手法を超える画質を維持することが確認できる。他の画像でも同様な結果を確認できた。

5. む す び

本論文では、圧縮センシングに基づき、画像の局所

類似性と色相関を利用した少数データからのカラー画像の再構成手法を提案した。今後は、マルチバンド撮像システムへの応用を検討する予定である。

文 献

- [1] A. Majumdar et al., "Compressive color imaging with group sparsity on analysis prior," IEEE ICIP, pp.1337–1340, 2010.
- [2] D. Baron et al., "Distributed compressive sensing," 2009 [online] Available: <http://arxiv.org/pdf/0901.3403v1.pdf>
- [3] P. Nagesh et al., "Compressive imaging of color images," IEEE ICASSP, pp.1261–1264, 2009.
(平成 25 年 12 月 20 日受付, 26 年 4 月 7 日再受付)