

CSRBF を用いた非可逆画像符号化

北郷正輝[†] ルイス・ディアゴ[†] 萩原一郎[†](正会員)[†] 東京工業大学大学院

あらまし 高詳細なデジタル画像を通信、記憶保持する機会が急速に増すにつれ、高度な画像圧縮手法の開発が求められている。本研究では、ウェーブレット変換の多重解像度解析と CSRBF を用いて画素を散乱的に間引き CSRBF 近似曲面を生成する MCA (Multiresolution CSRBF Approximation) を提案し、MCA を用いて生成した CSRBF 近似曲面の関数情報を圧縮する非可逆画像符号化手法を提案する。ここでは、MCA の散乱点抽出精度および散乱点補間精度を評価して MCA の有用性を示し、本研究で提案した非可逆画像符号化手法の圧縮性能を JPEG と比較した。本手法は低ビットレート(高圧縮率)において JPEG より優れた圧縮性能を示した。

キーワード: CSRBF, 非可逆符号化, 散乱点補間, ウェーブレット変換, 多重解像度解析

Summary The development of advanced image compression techniques is demanded as the chance to communicate high detailed digital images, and to do the storage maintenance increases rapidly. This paper presents a novel scattered point interpolation technique called MCA (Multiresolution CSRBF Approximation) that is composed of multiresolution analysis of wavelet transform and CSRBF. The lossy image coding system for compressing function information of CSRBF approximation surface based on MCA is suggested. We showed the superiority of MCA by evaluating the accuracy of scattered point detection, and the accuracy of scattered point interpolation. Then, the compression performance of the proposed coding system was compared with JPEG. Our results demonstrated that the proposed approach has better quality than JPEG in low bit rate.

Key words: CSRBF, Lossy Coding, Scattered Point Interpolation, Wavelet Transform, Multiresolution Analysis

1. はじめに

高詳細なデジタル画像を通信、記憶保持する機会が急速に増すにつれ、高度な画像圧縮手法の開発が求められている。画像圧縮手法には、符号化時に画質劣化を伴わずに原画像を完全に復元できる可逆符号化と、画質劣化を伴う非可逆符号化がある。可逆符号化は、医療用画像、人工衛星画像、美術品のデジタル・アーカイブ化など高品位な画像を必要とする場合に利用される。また非可逆符号化は、圧縮効率が良いことから自然画像など幅広い分野で利用される。非可逆符号化の主な目的は、視

覚的な画質劣化を最小限に抑えながら、高い圧縮率を実現することにある。

現在広く用いられている非可逆符号化方式として JPEG (Joint Photographic Experts Group) と呼ばれる国際標準符号化方式がある^{1),2)}。JPEG は周波数領域への変換に離散コサイン変換 (DCT: Discrete Cosine Transform) を用い、エントロピー符号化にランレングス符号化とハフマン符号化を組み合わせている。JPEG は DCT を用いるため、低ビットレート(高圧縮率)では符号化誤差によりブロックひずみや不連続な輪郭を生成してしまうなどの画質劣化が起きてしまう。

そこで、次世代の符号化方式として JPEG2000 の国際標準化が進められている^{3),4)}。JPEG2000 では DCT ではなく離散ウェーブレット変換 (DWT: Discrete Wavelet Transform) が採用され、エントロピー符号化

“Lossy Image Coding by Using CSRBF” by Masaki KITAGO, Luis DIAGO, and Ichiro HAGIWARA (Member) (Tokyo Institute of Technology Graduate School of Science and Engineering).

には EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation) と呼ばれる方式を用いている⁵⁾。これにより JPEG2000 は JPEG の欠点である低ビットレートでの画質劣化を少なくし、更に、特徴領域の画質だけを向上させる ROI (Region Of Interest), 可逆符号化に対応するなど多くの実用的な機能を取り入れている。しかしながら JPEG2000 は、これから広い分野での活用が期待できるが、まだ一般に普及しているとはいえないのが現状である。

その他にも数多くの非可逆符号化手法が提案されている。その中でも DCT を用いた手法⁶⁾、ウェーブレット変換を用いた手法^{7),8)}、フラクタルを用いた手法⁹⁾などが代表的である。近年では、画素を散乱的に間引いて画像情報を圧縮する手法が提案されている。画像の複雑さに応じて四分木法により画像を細分割し、細分割された領域をそれぞれ RBFN (Radial Basis Function Network) を用いて曲面近似し、RBFN のパラメータを保持することで画像圧縮する手法¹⁰⁾、適応的に画素を間引くことで画像情報を圧縮し、Delaunay 三角形分割から一次スプライン関数を用いて画像を再構成する手法¹¹⁾などが挙げられる。

本研究では、ウェーブレット変換の多重解像度解析と CSRBF (Compactly Supported Radial Basis Function) を用いて画素を散乱的に間引き、CSRBF を用いて生成した近似曲面の関数情報を圧縮する非可逆画像符号化手法を提案する。

本稿の構成として、2 章では、本研究で提案する非可逆画像符号化手法について説明する。2.1 節では、散乱点補間法の関連研究および CSRBF 理論について概説し、2.2 節では、本研究で用いるウェーブレットの構築法を述べる。また 2.3 節では、ウェーブレット変換の多重解像度解析と CSRBF を用いて画素を散乱的に間引き、CSRBF 近似曲面を生成する MCA (Multiresolution CSRBF Approximation) を提案する。そして 2.4 節では、生成した CSRBF 近似曲面の関数情報を符号化するアルゴリズムを示す。3 章では、本手法の有用性を、散乱点抽出の精度、散乱点補間の精度、JPEG との圧縮率の比較の三点から評価する。

2. CSRBF を用いた非可逆画像符号化

2.1 CSRBF 理論

本節では、散乱点補間法の関連研究および CSRBF 理論について概説する。

散乱点補間の手法としては RBF (Radial Basis Function)^{2),13)} が代表的であり、主に CG 分野で構造再構成などに用いられている。RBF は密な線形方程式を解く必

要があり入力点数に限界があるため、大規模データを扱える手法として、CSRBF を用いて線形方程式を疎にする手法¹⁴⁾⁻¹⁶⁾ や、FMM (Fast Multipole Method) を用いて RBF を高速に解く手法¹⁷⁾ が提案されている。RBF を基にした手法の他には、階層状に B-spline 関数を生成する MBA (Multilevel B-spline Approximation)⁸⁾ などが提案されている。また、CSRBF は画像の散乱点補間にも利用されており、画像の修復¹⁹⁾、解像度変換²⁰⁾などに有効であることが示されている。

画像の散乱点補間において、点群 $\mathcal{P} = \{\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N\}$ とそれぞれの点での画素値 $\mathcal{H} = \{h_1, \dots, h_N\}$ が与えられたとき、CSRBF により生成される補間関数は以下の式で表される。

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{p}_i \in \mathcal{P}} \lambda_i \varphi_\sigma(\|\mathbf{x} - \mathbf{p}_i\|) + l(\mathbf{x}), \quad (1)$$

ここで $l(\mathbf{x})$ は線形多項式、 $\varphi_\sigma(r) = \varphi(r/\sigma)$ である。本研究では Wendland の CSRBF $\varphi(r) = (1-r)^2$ を用いる¹⁴⁾。また、 σ は CSRBF のサポートサイズである。

CSRBF の係数 λ_i は以下の補間条件により求められる。

$$h_j = \sum_{\mathbf{p}_i \in \mathcal{P}} \lambda_i \varphi_\sigma(\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|) + l(\mathbf{p}_j). \quad (2)$$

式 (1) で表される CSRBF の関数表現形式は、関数情報の保持に CSRBF の係数 λ_i 、CSRBF の中心座標 \mathbf{p}_i 、線形多項式の係数を保持するだけでよく、画像圧縮に有効であると思われる。

2.2 ウェーブレットの構築

本節では、本研究で用いるウェーブレットの構築法を述べる。ウェーブレットの構築にはリフティング構成を用いる^{21),22)}。リフティング構成は高速ウェーブレット変換^{23),24)}と比較して計算効率が良く、JPEG2000 にも採用されている手法である。以下にリフティング構成による一次元多重解像度解析を概説する。

レベル l の離散信号 $\{s_i^l\}_{i \in \mathbb{Z}}$ をレベル $l+1$ の近似信号 $\{s_i^{l+1}\}_{i \in \mathbb{Z}}$ と詳細信号 $\{d_i^{l+1}\}_{i \in \mathbb{Z}}$ に変換するとき、リフティング構成は Split, Predict, Update それぞれの演算子で構成される。リフティング構成の順変換を図 1 に、逆変換を図 2 に示す。ここで図中の P は Predict 演算子、 U は Update 演算子を示す。

Split は離散信号 $\{s_i^l\}_{i \in \mathbb{Z}}$ を偶数番目 $\{\text{even}_i^{l+1}\}_{i \in \mathbb{Z}}$ と奇数番目 $\{\text{odd}_i^{l+1}\}_{i \in \mathbb{Z}}$ の信号に分割する演算子であり、Predict は偶数番目の信号から奇数番目の信号を予測する演算子である。この予測値と奇数番目の信号 $\{\text{odd}_i^{l+1}\}_{i \in \mathbb{Z}}$ との差が詳細信号 $\{d_i^{l+1}\}_{i \in \mathbb{Z}}$ となる。Update はこの詳細信号を利用し、偶数番目の信号からレベル $l+1$ の近似信号 $\{s_i^{l+1}\}_{i \in \mathbb{Z}}$ を構成する演算子である。ここで、Merge は奇数番目の信号と偶数番目の信号を結合する演算子である。

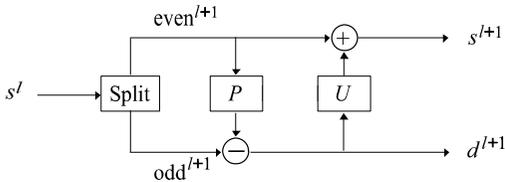


図 1 リフティング構成：順変換
Fig. 1 The lifting scheme: forward transform

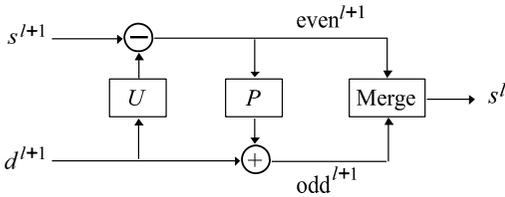


図 2 リフティング構成：逆変換
Fig. 2 The lifting scheme: inverse transform

以下に本研究での Predict 演算子と Update 演算子の決定法について述べる．ここでは、リフティング構成の Predict 演算子は細分割手法^{25) - 27)}の一つである 4-ポイントスキーム²⁵⁾を用いて決定する．

奇数信号 $\{\text{odd}_i^{l+1}\}_{i \in \mathbb{Z}}$ は 4 点の偶数信号により予測される．予測式は 4 点の偶数信号と 4-ポイントスキームの重みから以下のように表される．

$$e_i^{l+1} := [\text{even}_{i-1}^{l+1}, \text{even}_i^{l+1}, \text{even}_{i+1}^{l+1}, \text{even}_{i+2}^{l+1}], \quad (3)$$

$$h := \left[-\frac{1}{16}, \frac{9}{16}, \frac{9}{16}, -\frac{1}{16} \right], \quad (4)$$

$$\text{odd}_i^{l+1} \approx \langle h, e_i^{l+1} \rangle, \quad (5)$$

ここで、 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ は内積を、“ \approx ” は左辺を右辺で予測することを表す．すなわち、リフティング構成の Predict 演算子は、

$$\text{Predict}(\{\text{even}_i^{l+1}\}_{i \in \mathbb{Z}}) = \langle h, e_i^{l+1} \rangle, \quad (6)$$

である．従って詳細信号は、

$$d_i^{l+1} = \text{odd}_i^{l+1} - \langle h, e_i^{l+1} \rangle, \quad i \in \mathbb{Z}, \quad (7)$$

となる．一方 Update 演算子は、以下のように定義される．

$$d_i^{l+1} := [d_{i-2}^{l+1}, d_{i-1}^{l+1}, d_i^{l+1}, d_{i+1}^{l+1}], \quad (8)$$

$$g := \left[-\frac{1}{32}, \frac{9}{32}, \frac{9}{32}, -\frac{1}{32} \right], \quad (9)$$

$$\text{Update}(\{d_i^{l+1}\}_{i \in \mathbb{Z}}) = \langle g, d_i^{l+1} \rangle. \quad (10)$$

これにより、レベル $l+1$ の近似信号 $\{s_i^{l+1}\}_{i \in \mathbb{Z}}$ は以下のように表される．

$$s_i^{l+1} = \text{even}_i^{l+1} + \langle g, d_i^{l+1} \rangle, \quad i \in \mathbb{Z}. \quad (11)$$

以上により本研究で用いるウェーブレットが構築される．ここで、共役ウェーブレット $\tilde{\psi}(t)$ とウェーブレット

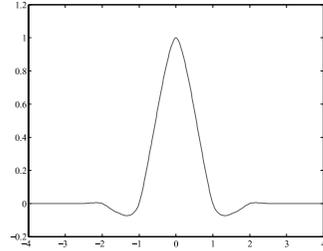


図 3 スケーリング関数
Fig. 3 Scaling function

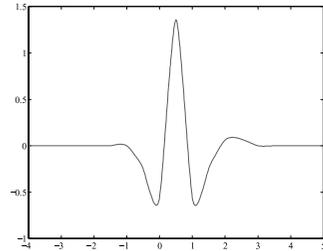


図 4 ウェーブレット
Fig. 4 Wavelet

ト $\psi(t)$ のバニングモーメント N は共に $N = 4$ となる²¹⁾．本研究で用いるウェーブレットは JPEG2000 のデフォルトで用いられているウェーブレットのバニングモーメント $N = 2$ より大きく、画像の近似信号の利用に有効だと思われる．スケーリング関数 $\varphi(t)$ を図 3 に、ウェーブレット $\psi(t)$ を図 4 に示す．

2.3 MCA 理論

本節では、ウェーブレット変換の多重解像度解析と CSRBF を用いて画素を散乱的に間引き、CSRBF 近似曲面を生成する MCA (Multiresolution CSRBF Approximation) を提案する．

まず、原画像をレベル L まで二次元多重解像度解析する．レベル l ($l = 0, 1, \dots, L$) での近似信号 $\{s_{i,j}^l\}_{i,j \in \mathbb{Z}}$ の値を画素値、正規化された座標を点情報として、ウェーブレット変換の画素値列 $\mathcal{E}^l = \{e_i^l\}_{i \in \mathbb{Z}}$ および点群 $\mathcal{Q}^l = \{q_i^l\}_{i \in \mathbb{Z}}$ を生成する．すべてのレベルにおいて同様の処理を行い、階層状に画素値列 $\{\mathcal{E}^0, \mathcal{E}^1, \dots, \mathcal{E}^L\}$ および点群 $\{\mathcal{Q}^0, \mathcal{Q}^1, \dots, \mathcal{Q}^L\}$ を構成する．

CSRBF の画素値列 $\mathcal{H} = \{h_i\}_{i \in \mathbb{Z}}$ および点群 $\mathcal{P} = \{p_i\}_{i \in \mathbb{Z}}$ に画素値列 \mathcal{E}^L 、点群 \mathcal{Q}^L をそれぞれ入力し、これをレベル L の画素値列 $\mathcal{H}^L = \{h_i^L\}_{i \in \mathbb{Z}}$ および点群 $\mathcal{P}^L = \{p_i^L\}_{i \in \mathbb{Z}}$ と定義する．画素値列 \mathcal{H}^L と点群 \mathcal{P}^L より CSRBF の初期曲面を以下のように生成する．

$$f^L(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{p}_i^L \in \mathcal{P}^L} \lambda_i^L \varphi_\sigma(\|\mathbf{x} - \mathbf{p}_i^L\|) + L^L(\mathbf{x}). \quad (12)$$

レベル l での CSRBF 近似曲面 $f^l(\mathbf{x})$ と画素値列 \mathcal{E}^{l-1}

との誤差を求め、レベル $l-1$ の画素値列 \mathcal{H}^{l-1} および点群 \mathcal{P}^{l-1} を生成する．誤差は以下の式で評価される．

$$E = \|f^l(\mathbf{q}_i^{l-1}) - e_i^{l-1}\|, \quad i \in \mathbb{Z}, l=1, 2, \dots, L. \quad (13)$$

誤差 E が設定した閾値より大きいとき、点ベクトル \mathbf{q}_i^{l-1} 、画素値 e_i^{l-1} をそれぞれ画素値列 \mathcal{H} 、点群 \mathcal{P} に加える．ここで、既に同じ座標の点が入力されているとき、画素値のみ更新する．更新された画素値列 \mathcal{H} 、点群 \mathcal{P} をレベル $l-1$ の画素値列 \mathcal{H}^{l-1} 、点群 \mathcal{P}^{l-1} としてレベル $l-1$ の CSRBF 近似曲面を生成する．レベル l での CSRBF 近似曲面は以下の式で表現される．

$$f^l(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{p}_i^l \in \mathcal{P}^l} \lambda_i^l \varphi_\sigma(\|\mathbf{x} - \mathbf{p}_i^l\|) + l^l(\mathbf{x}), \quad l=0, 1, \dots, L. \quad (14)$$

以上の式 (13)、式 (14) および点群を更新するアルゴリズムを用いて再帰的にレベル 0 まで CSRBF 近似曲面を生成する．

最後にレベル 0 の CSRBF 近似曲面 $f^0(\mathbf{x})$ から以下の式で誤差評価を行う．

$$E = \|f^0(\mathbf{q}_i^0) - e_i^0\|, \quad i \in \mathbb{Z}. \quad (15)$$

同様に画素値列、点群を更新して最終的な画素値列 \mathcal{H} および点群 \mathcal{P} を求め、CSRBF 近似曲面を生成する．

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{p}_i \in \mathcal{P}} \lambda_i \varphi_\sigma(\|\mathbf{x} - \mathbf{p}_i\|) + l(\mathbf{x}). \quad (16)$$

式 (16) で表される関数を最終的な CSRBF 近似曲面とし、本手法を MCA (Multiresolution CSRBF Approximation) と呼ぶ．

2.4 エントロピー符号化

本節では、前節で生成した CSRBF 近似曲面の関数情報を符号化するアルゴリズムを示す．

まず、原画像から MCA を用いて CSRBF 近似曲面を生成する．そのときの CSRBF の係数 λ_i 、CSRBF の中心座標 \mathbf{p}_i 、線形多項式の係数を符号化する．符号化手順を図 5 に示す．

CSRBF の中心座標 \mathbf{p}_i の符号化には可逆符号化を用いる．MCA により画素を間引かれた画像を左上から右下にかけて横に 1 列ずつ順にスキャンしていき、初期曲面の生成に利用される規則格子状に並ぶ画素以外で、画素がある点は 1、画素のない点は 0 として単純なデータ列を作成する．このデータ列を PPM 法²⁸⁾⁻³⁰⁾ により可逆符号化する．

CSRBF の係数 λ_i と線形多項式の係数の符号化には非可逆符号化を用いる．ここで、符号化はスカラー量子化、算術符号化の順に行う．このとき、係数は任意のビット

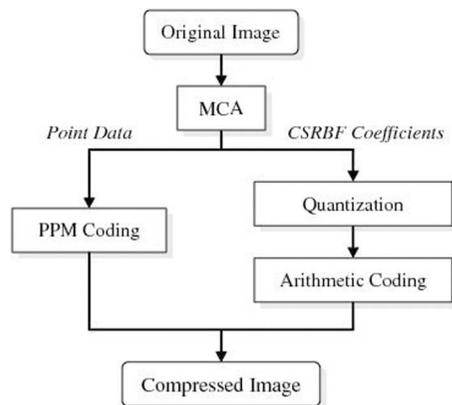


図 5 符号化手順
Fig. 5 Coding process

ト数で量子化できるが、8 ビットまたは 9 ビットで量子化すると圧縮効率が良いことが経験的に確認されている．

以上の符号化情報を合わせて、圧縮画像が生成される．

3. 計算機実験

本章では、本手法の有用性を、散乱点抽出の精度、散乱点補間の精度、JPEG との圧縮率の比較の三点から評価する．

ここでは、画像の評価指標として圧縮率、点削減率、PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) を用いる．圧縮率は、

$$\text{圧縮率} [\%] = \frac{\text{圧縮画像のファイルサイズ}}{\text{原画像のファイルサイズ}} \times 100, \quad (17)$$

と表し、点削減率は、

$$\text{点削減率} [\%] = \frac{\text{抽出された画素数}}{\text{原画像の画素数}} \times 100, \quad (18)$$

とする．また、圧縮画像の品質評価に用いる PSNR は MSE (Mean Squared Error) から導出される．MSE は以下の式で表される．

$$\text{MSE} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{y=1}^{N_2} \sum_{x=1}^{N_1} (f(x, y) - g(x, y))^2, \quad (19)$$

ここで、 f と g は $N_1 \times N_2$ サイズの画像であり、このとき PSNR は以下のように定義される．

$$\text{PSNR}[\text{dB}] = 10 \times \log_{10} \frac{255^2}{\text{MSE}}. \quad (20)$$

3.1 散乱点抽出の精度評価

本節では、MCA の散乱点抽出の精度を他手法と比較、評価する．原画像には Peppers (256 [pixel] × 256 [pixel]) を用いる．比較する散乱点抽出手法は、MCA、Sobel 演算子²⁾、Prewitt 演算子²⁾、Roberts cross-gradient 演算子²⁾、LoG (Laplacian of Gaussian ³⁾)、Canny エッジ抽出法³¹⁾ である．

MCA 以外の手法では、それぞれの手法で画像の特徴点を抽出し、MCA の初期曲面を生成するための点数と同数を格子状に配置する．ここでは、MCA はレベル 2 の二次元多重解像度解析を用いたため、4096 点を格子状に配置した．採用された点の比較を図 7 に示す．採用し

た点数は、(a) MCA が 10,344 点、(b) Sobel 演算子が 10,609 点、(c) Prewitt 演算子が 10,470 点、(d) Roberts cross-gradient 演算子が 10,081 点、(e) LoG が 10,017 点、(f) Canny エッジ抽出法が 10,072 点と、ほぼ同数の点を採用した．それぞれの手法毎に特徴はあるが、画像の特徴を良く捉えていることが分かる．

図 7 の採用点から CSRBF で再構成した画像を図 8 に示す．再構成画像の PSNR は、(a) MCA が 30.61 dB、(b) Sobel 演算子が 23.64 dB、(c) Prewitt 演算子が 23.63 dB、(d) Roberts cross-gradient 演算子が 23.27 dB、(e) LoG が 22.46 dB、(f) Canny エッジ抽出法が 23.44 dB と、MCA が他手法より約 7 dB もの再構成精度の良さを示した．

再構成画像の視覚的な特徴としては、MCA が滑らかで自然な画像を再構成できているのに対し、他手法はジャギーが少し目立って見える．

また、図 6 に図 8 の評価を採用点数を変えて評価した図を示す．ここで、横軸は点削減率、縦軸は PSNR である．MCA は他手法と比較して、すべての採用点数において PSNR で 3 dB から 8 dB の再構成精度の良さを示している．

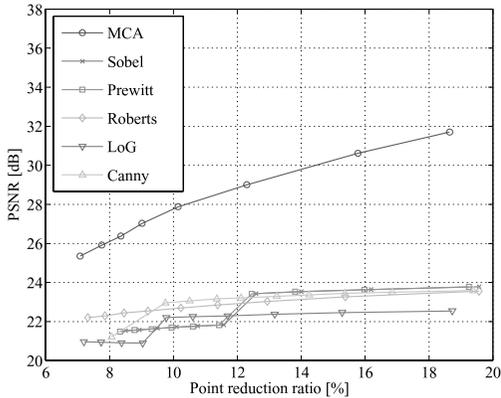


図 6 散乱点抽出法からの再構成画像の精度比較
 Fig. 6 Accuracy comparison of reconstructed images from scattered point detection techniques

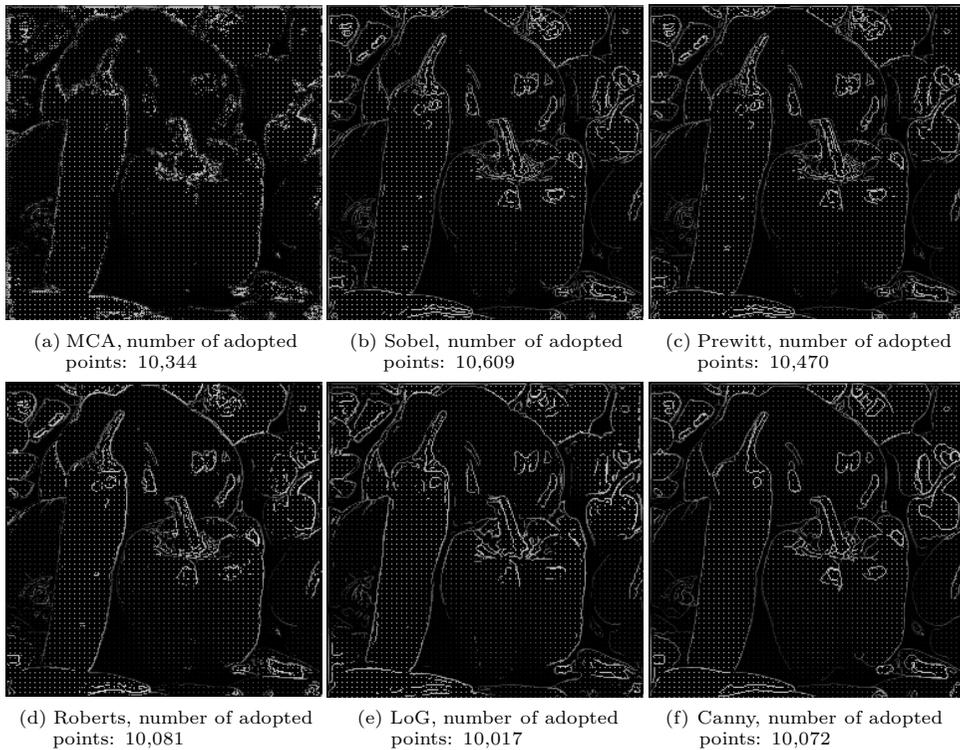


図 7 散乱点抽出法による採用点の比較

Fig. 7 Comparison of adopted points of scattered point detection techniques

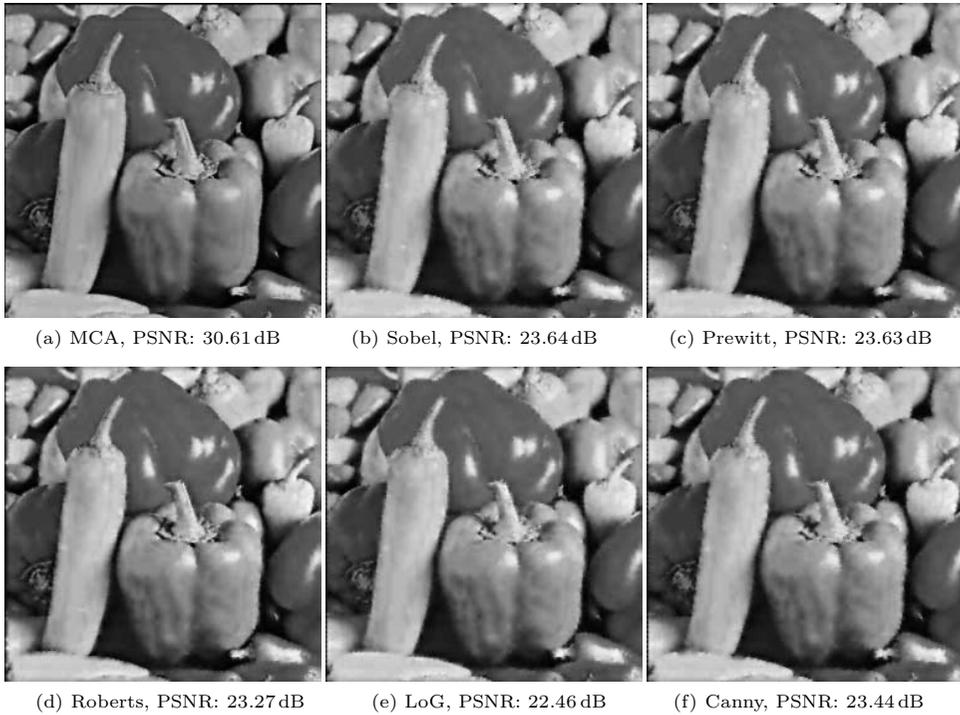


図 8 散乱点抽出法からの再構成画像の比較

Fig. 8 Comparison of reconstructed images from scattered point detection techniques

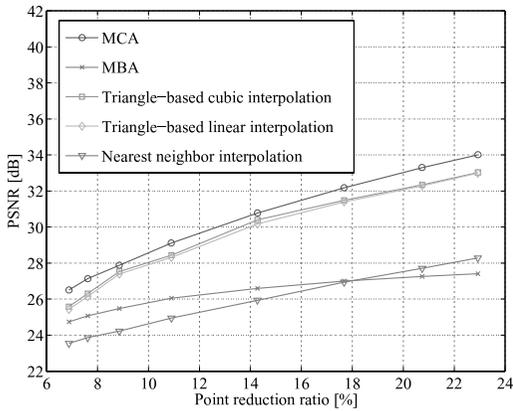


図 9 散乱点補間法による再構成画像の精度比較

Fig. 9 Accuracy comparison of reconstructed images by using scattered point interpolation techniques

以上の評価により, MCA が散乱点抽出手法として有用であることが示された.

3.2 散乱点補間の精度比較

本節では, MCA の散乱点補間の精度を他手法と比較, 評価する. 原画像には Lena (256 [pixel]×256 [pixel]) を用いる. 比較する散乱点補間手法は, MCA, MBA¹⁸⁾,

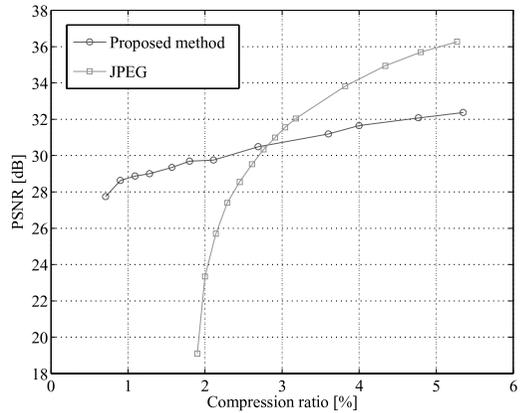


図 10 提案手法と JPEG の圧縮率の比較

Fig. 10 Comparison of proposed method and JPEG in compression ratio

Delaunay 三角形分割を基にした三次補間法³²⁾, Delaunay 三角形分割を基にした一次補間法³²⁾, ニアレストネイバ法である.

図 11 (a) に示される MCA により抽出された散乱点からそれぞれの手法で散乱点補間を行った. ここで, 抽出された散乱点数は 11,588 点である. 再構成画像の PSNR は, (b) MCA が 32.18 dB, (c) MBA が 27.01 dB, (d) De-

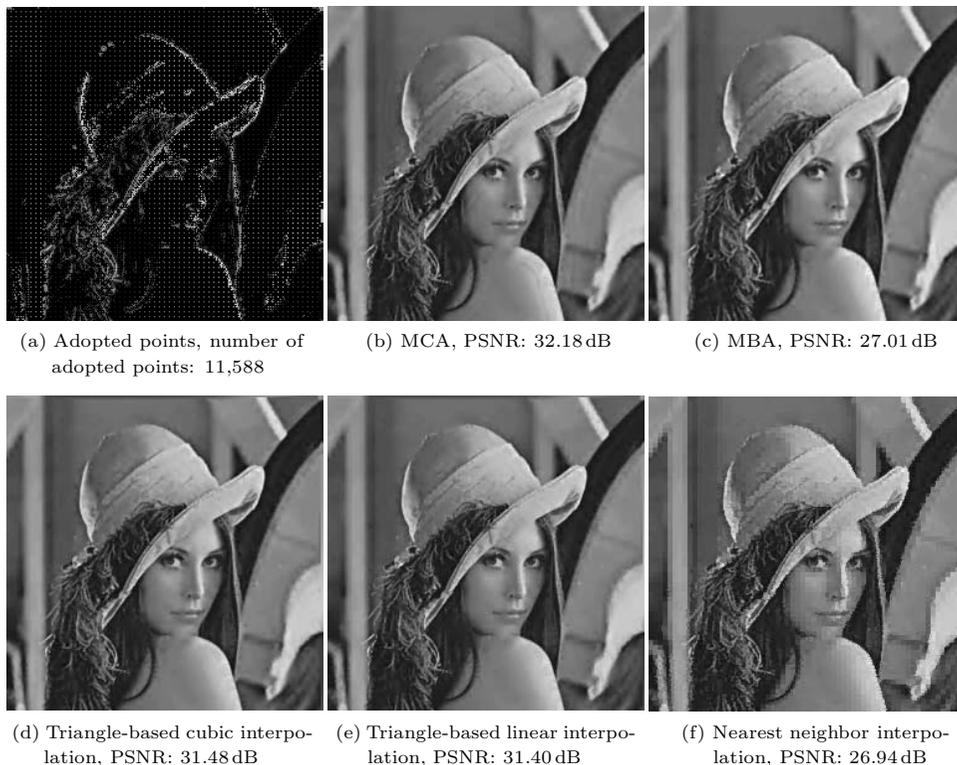


図 11 散乱点補間法による再構成画像の比較

Fig. 11 Comparison of reconstructed images by using scattered point interpolation techniques

launay 三角形分割を基にした三次補間法が 31.48 dB, (e) Delaunay 三角形分割を基にした一次補間法が 31.40 dB, (f) ニアレストネイバ法が 26.94dB と, MCA が最も良い画像再構成精度を示した。再構成画像の視覚的な特徴としては, (c) MBA は全体的に色が薄くなっているように見え, (f) ニアレストネイバ法はジャギーが目立っている。これらの手法は PSNR においても劣化が目立つ。また (c) および (f) 以外の手法では, 視覚的な差異はほとんど確認できない。

また, 図 9 に図 11 の評価を採用点数を変えて評価した図を示す。ここで, 横軸は点削減率, 縦軸は PSNR である。MCA は他手法と比較して, すべての採用点数において PSNR で最も良い再構成精度を示している。

以上の評価により, MCA が散乱点補間手法として有用であることが示された。

3.3 JPEG との圧縮率の比較

本節では, 現在広く用いられている国際標準符号化方式である JPEG^{1),2)} と提案手法との圧縮率の比較, 評価を行う。原画像には Zelda (512 [pixel]×512 [pixel]) を用いる。

提案手法と JPEG の圧縮率の比較を図 10 に示す。ここで, 横軸は圧縮率, 縦軸は PSNR である。提案手法は約 2.8%より高圧縮率のとき, JPEG より高い圧縮性能を示している。つまり, JPEG の欠点である低ビットレート (高圧縮率) での画質劣化が少ないことがわかる。

高圧縮率での提案手法と JPEG の圧縮画像の比較を図 12 に示す。ここでは, ほぼ同程度のファイルサイズに圧縮して画像を比較する。(a) は提案手法で, 圧縮率 2.11%に画像圧縮したとき PSNR は 29.75dB を示した。(b) は JPEG で, 圧縮率 2.14%に画像圧縮したとき PSNR は 25.70dB を示した。圧縮画像を比較すると, JPEG はブロック歪みがひどく発生してしまっているのに対し, 提案手法は, 画像に多少のボケが発生しているが, 十分利用に耐えうる画像だと思われる。

以上により, 低ビットレートにおいて JPEG より提案手法が有用であることが示された。

4. ま と め

本研究では, ウェーブレット変換の多重解像度解析と CSRBF を用いて画素を散乱的に間引き CSRBF 近似曲



図 12 提案手法と JPEG の圧縮画像の比較
 Fig. 12 Comparison of compressed images of proposed method and JPEG

面を生成する MCA を提案し，MCA を用いて生成した CSRBF 近似曲面の関数情報を圧縮する非可逆画像符号化手法を提案した．

まず，MCA の散乱点抽出精度および散乱点補間精度を評価し，MCA の有用性を示した．次に，本研究で提案した非可逆画像符号化手法の圧縮性能を JPEG と比較し，低ビットレート（高圧縮率）において JPEG より提案手法が有用であることを示した．つまり本手法は，JPEG の欠点である低ビットレートでの画質劣化を少なくできる．

本手法は，任意の圧縮率で適用可能であるが，特に高圧縮率において JPEG に対して優位性が高いことから，低圧縮率では JPEG，高圧縮率では本手法と，二つの非可逆画像符号化手法の併用が有効であると考えられる．

5. 将来課題

本研究では，圧縮性能の評価をグレースケール画像で行った．本手法をカラー画像に適用するとき，JPEG で用いられている YUV 空間を用いた画像圧縮方式などを組み込むことで圧縮性能が向上すると考えられる．

また現段階では，RGB 空間それぞれで CSRBF 関数曲面を生成しているが，RGB の相関を利用して，RGB 値を近似する一つの CSRBF 関数曲面を生成して画像圧縮する手法なども考えられる．

これらの画像圧縮手法を今後の開発課題とする．

参考文献

1) G.K. Wallace: "The JPEG Still Picture Compression Standard", *Commun. ACM*, Vol.34, No.4, pp.30-44

(1991).
 2) R.C. Gonzalez and R.E. Woods: *Digital Image Processing Second Edition*. Prentice-Hall, New Jersey, USA (2002).
 3) M.W. Marcellin, M.J. Gormish, A. Bilgin, and M.P. Boliek: "An Overview of JPEG-2000", *Data Compression Conference 2000*, pp.523-544 (2000).
 4) A.N. Skodras, C.A. Christopoulos, and T. Ebrahimi: "JPEG2000: The Upcoming Still Image Compression Standard", In *Proc. of the 11th Portuguese Conference on Pattern Recognition*, pp.359-366, Porto, Portugal (2000).
 5) D. Taubman: "High Performance Scalable Image Compression with EBCOT", *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol.9, No.7, pp.1158-1170 (2000).
 6) J. Li, J. Li, and C.-C. J. Kuo: "An Embedded DCT Approach to Progressive Image Compression", In *Proc. of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'96)*, Vol.1, pp.201-204 (1996).
 7) G. Davis and A. Nosratinia: "Wavelet-Based Image Coding: An Overview", *Appl. and Computational Control, Signal, and Circuits*, vol.1, pp.205-269 (1998).
 8) A. Mertins: "Image Compression via Edge-Based Wavelet Transform", *Optical Engineering*, Vol.38, pp.991-1000 (1999).
 9) D. Saupe, R. Hamzaoui, and H. Hartenstein: "Fractal Image Compression: An Introductory Overview", In *Fractal Models for Image Synthesis, Encoding, and Analysis*, D. Saupe, J. Hart (eds.), ACM SIGGRAPH'96 Course Notes XX, New Orleans (1996).
 10) H.-S. Kim and J.-Y. Lee: "Image coding by fitting RBF-surfaces to subimages", *Pattern Recognition Letters*, Vol.23, No.11, pp.1239-1251 (2002).
 11) L. Demaret, N. Dyn, M.S. Floater, and A. Iske: "Adaptive Thinning for Terrain Modeling and Image Compression", In *Advances in Multiresolution for Geometric Modeling*, N.A. Dodgson, M.S. Floater, and M.A. Sabin (eds.), Springer-Verlag, Heidelberg, pp.321-340 (2004).
 12) V. Savchenko, A. Pasko, O. Okunev, and T. Kunii: "Function Representation of Solids Reconstructed from

Scattered Surface Points and Contours”, Computer Graphics Forum, Vol.14, No.4, pp.181–188 (1995).

13) G. Turk and J.F. O’Brien: “Shape Transformation using Variational Implicit Functions”, In Proc. ACM SIGGRAPH 99, pp.335–342 (1999).

14) H. Wendland: “Piecewise Polynomial, Positive Define and Compactly Supported Radial Basis Functions of Minimal Degree”, Advances in Computational Mathematics, Vol.4, pp.389–396 (1995).

15) B.S. Morse, T.S. Yoo, P. Rheingans, D.T. Chen, and K.R. Subramanian: “Interpolating Implicit Surfaces from Scattered Surface Data using Compactly Supported Radial Basis Functions”, In Proc. Shape Modeling International 2001, pp.89–98 (2001).

16) N. Kojekine, V. Savchenko, D. Berzin, and I. Hagiwara: “Software Tools for Compactly Supported Radial Basis Functions”, In Proc. The 4th Computer Graphics and Imaging International IASTED Conference CGIM2001, pp.234–239 (2001).

17) J.C. Carr, R.K. Beatson, J.B. Cherrie, T.J. Mitchell, W.R. Fright, B.C. McCallum, and T.R. Evans: “Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions”, In Proc. ACM SIGGRAPH 2001, pp.67–76 (2001).

18) S. Lee, G. Wolberg, and S.Y. Shin: “Scattered Data Interpolation with Multilevel B-Spline”, IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, Vol.3, No.3, pp.228–244 (1997).

19) V. Savchenko, N. Kojekine, and H. Unno: “A Practical Image Retouching Method”, In Proc. First International Symposium on Cyber Worlds’2002, pp.480–487 (2002).

20) M. Kitago, Y. Taniguchi, and I. Hagiwara: “Function Representation of an Image by means of CSRBF – An Application for Resolution Conversion”, In Proc. 2004 ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference (PVP’04), PVP-Vol.482, pp.221–226 (2004).

21) W. Sweldens: “The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets”, Appl. Comput. Anal, Vol.3, No.2, pp.186–200 (1996).

22) W. Sweldens: “The lifting scheme: A construction of second generation wavelets”, SIAM J. Math. Anal, Vol.29, No.2, pp.511–546 (1997).

23) S.G. Mallat: “A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, pp.674–693 (1989).

24) S.G. Mallat: “Multiresolution Approximations and Wavelet Orthonormal Bases of $L^2(\mathbb{R})$ ”, Trans. American Mathematical Society, Vol.315, pp.69–87 (1989).

25) N. Dyn, D. Levin, and J.A. Gregory: “A 4-point interpolatory subdivision scheme for curve design”, Computer Aided Geometric Design, Vol.4, No.4, pp.257–268 (1987).

26) N. Dyn, D. Levin, and J.A. Gregory: “A Butterfly Subdivision Scheme for Surface Interpolation with Tension Control”, ACM Trans. Graphics, Vol.9, No.2, pp.160–169 (1990).

27) L. Kobbelt: “Interpolatory Subdivision on Open Quadrilateral Nets with Arbitrary Topology”, Computer Graphics Forum 15, Eurographics’96 issue, pp.409–420 (1996).

28) J.G. Cleary and I.H. Witten: “Data Compression Using Adaptive Coding and Partial String Matching”, IEEE Trans. Commun., Vol.32, No.4, pp.396–402 (1984).

29) D. Shkarin: “PPM: one step to practicality”, In Proc. IEEE Data Compression Conference (DCC’02), pp.202–211, Snowbird, Utah, USA (2002).

30) M. Drinic, D. Kirovski, and M. Potkonjak: “PPM Model Cleaning”, In Proc. IEEE Data Compression Conference (DCC’03), pp.163–172, Snowbird, Utah, USA (2003).

31) J. Canny: “A Computational Approach for Edge Detection”, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol.8, No.6, pp.679–698 (1986).

32) C.B. Barber, D.P. Dobkin, and H. Huhdanpaa: “The Quickhull Algorithm for Convex Hulls”, ACM Trans. Mathematical Software, Vol.22, No.4, pp.469–483 (1996).

(2005年5月27日受付)

北郷正輝



2002年,東京工業大学工学部機械科学科卒。2004年,東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻修士課程修了。現在,同大学院博士課程在籍中。2005年8月より University of California, Irvine, Computer Graphics Labにて SurfaceReconstruction, Geometry Compression などの研究に従事。工修。ACM 学生会員

ルイス・ディアゴ



1995年,キューバ,ハバナ市にあるジョセ・アントニオ・エcheベリア高等研究所の電気通信学部卒,1997年,同研究所で情報科学の修士号を取得。1996年から2004年まで,キューバ物理学研究所と分子免疫学研究所,並びに日本の東京工業大学において共同研究員を務める。現在はキューバの CUJAE 大学電気工学部生物工学科の助手の傍ら,東工大機械物理工学専攻博士課程2年。生体医学的信号・イメージ処理,生物情報科学,並列コンピューター計算にかかわる研究に興味。

萩原一郎 (正会員)



1970年,京都大学工学部数理工学科卒。1972年,京都大学工学研究科数理工学専攻修士課程修了。1972年4月から1996年3月まで,日産自動車。1996年4月以降,東京工業大学教授。現在,東京工業大学教授大学院理工学研究科機械物理工学専攻教授。米国機械学会,日本機械学会,自動車技術会各フェロー。応用数理学会理事・学会誌編集長。応用数理にかかわる研究に興味。