

ベクトル化した二値画像の画質評価に関する検討

山本 勇樹[†] 河村 圭^{††} 渡辺 裕^{††} 富永 英義^{†,††}

[†] 早稲田大学 理工学部 電子・情報通信学科 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

^{††} 早稲田大学大学院 国際情報通信研究科 〒367-0035 埼玉県本庄市西富田大久保山 1011

E-mail: [†]{yuuki,kei,tominaga}@tom.comm.waseda.ac.jp, ^{††}hiroshi.watanabe@waseda.jp

あらまし 漫画をはじめとした二値画像のベクトル表現は、拡大・縮小時に画質の維持が可能であり、オブジェクト単位の構造化などの機能が付加される利点がある。しかし、ベクトル表現はラスター表現の符号化方式と比較して、符号化効率が十分ではない。我々は、その効率低下の要因が直線・曲線上のノイズであることを明らかにし、符号量を削減する手法を提案してきた。本稿では、二値画像のベクトル化における符号量削減手法による画像の画質評価を目的とする。ベクタ変換における符号量削減手法と、ベクタ変換後の画像の画質評価手法について検討を行う。符号量削減手法としては、ガウスフィルタリングによる従来手法と、その問題点を解消する提案手法を示す。また、画質評価としては、歪みによる評価を示し、輪郭線の本数による評価手法を提案する。シミュレーション実験により、それぞれの提案手法の有効性を確認する。

キーワード 画像符号化, ベクトル化, 二値画像, ノイズ除去, 画質

A Study on Evaluation of Quality Metrics for Vectorized Binary Images

Yuki YAMAMOTO[†], Kei KAWAMURA^{††}, Hiroshi WATANABE^{††}, and Hideyoshi

TOMINAGA^{†,††}

[†] Dept. of Elec., Info. and Comm. Eng., WASEDA Univ., 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555 JAPAN

^{††} GITS, WASEDA University, 1011 Okuboyama, Nishitomida, Honjo, Saitama, 367-0035 JAPAN

E-mail: [†]{yuuki,kei,tominaga}@tom.comm.waseda.ac.jp, ^{††}hiroshi.watanabe@waseda.jp

Abstract Vector representation of binary images, such as comics, has an advantage of keeping high image quality for arbitrary scaling. Moreover, it has an editing capability at an object basis. However, the vector representation suffers from achieving high compression efficiency compared with JBIG. We have showed a main cause of coding inefficiency is redundant passing points by the noise on straight lines and curves. Then, we have described a proposed method to relieve it. In this paper, we aim to evaluate the quality of vectorized binary images which are processed by the method of rate reduction. We consider two techniques to reduce a bit rate for vectorization and to evaluate the quality of vectorized binary images. The former, we indicate the conventional method using Gaussian filter and propose the method for improvement of the coding efficiency. The latter, for evaluation of the images, we show the method using distortion and propose the method using number of contour lines. Validity of the proposed methods is confirmed by experimental results.

Key words image coding, vectorization, binary image, noise reduction, image quality

1. はじめに

近年、コンピュータや携帯端末に漫画などの人工的に作成された電子コンテンツをダウンロードして閲覧する機会が増えている。コンテンツをオンラインで販売・配信するサービスも提供されている。漫画のほとんどは二値で表現されており、通常は紙にハードコピーされている。しかし、スキャナを用いてこのような紙媒体の出版物を取り込む際には、紙質などによるノイズが含まれる。

二値画像を表現する手法として、ラスタ表現とベクトル表現が存在する。ラスタ表現は拡大・縮小処理に不適とされている。ディスプレイで表示するために画像の解像度を小さくすると線分が欠落し、線幅の相対関係が失われる。また、網点を含む領域にはモアレが発生し、視覚的な品質が著しく低下する。

一方、ベクトル表現は、拡大・縮小時に画質を維持でき、オブジェクト単位の構造化による機能性の付加などの利点があるため、漫画のような二値画像の符号化方式として効果的である[1]。我々は、ベクトル表現の符号化効率がラスタ表現と比べて十分でないことを示した[2]。そして、その効率低下の要因が、直線・曲線上の凸凹の原因となるノイズであることを明らかにした。さらに符号化効率の向上を目的として、Freeman の chain code を用いて輪郭線を直線に置き換える手法を提案してきた。

本稿では、二値画像のベクトル化における符号量削減手法による画像の画質評価を目的とする。ベクタ変換における符号量削減手法と、ベクトル化した二値画像の画質評価手法について検討を行う。ガウスフィルタリングによる符号量削減手法は細部の再現性が低いという問題点がある。また、平均誤差や歪みによる画質評価手法は近似誤差とつぶれを区別できず、主観評価と一致しない。そこで、差分画像と周囲長を用いて細部を復元する手法を述べ、さらに輪郭線の本数による画質評価手法を提案する。シミュレーション実験により、主観品質とレートディストーションの観点から提案手法の有効性を確認する。提案手法により、細部の再現性と符号化効率の高いベクタ変換が可能となる。また、つぶれを考慮した客観的な評価手法が得られる。

2. ベクタ変換における符号量削減手法

2.1 符号化効率低下の原因

ベクトル表現はラスタ表現と比べて符号化効率が十分でない。その効率低下の原因は大きく分けて、網点とノイズに分けられる。特にベクトル表現においては、直線・曲線上のノイズによる凸凹によって通過点が多数必

表 1 スキャン条件

Scanner	Canon Canoscan LIDE30
Source images	Weekly magazine
Paper size	B5(4299 × 6090[pixel])
Scanning resolution	600dpi
Component/Bit depth	Gray scale/8bit
Vectorization	Potrace [3] &bzip2
Binalize threshold	0.5 (0:white, 1:black)



図 1 入力画像

要となり、符号化効率が低下することが明らかにした。符号化効率を改善するために、直線・曲線上の凸凹の原因となるノイズの除去が必須である。従来手法としてガウスフィルタを利用した手法を示し、さらにガウスフィルタの問題点を改善する手法を提案する。

2.2 ガウスフィルタリング

ガウス関数の二次元の合成式を式 1 に示す。

$$p_1(x,y) = \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j \exp\left(-\frac{(x_i-x)^2}{2r^2}\right) \exp\left(-\frac{(y_i-y)^2}{2r^2}\right) p(x_i, y_j) \quad (1)$$

$$\frac{1}{N} = 0.398942280401, r = \text{radius} \quad (2)$$

ここで、N は規格化定数であり、積分が 1 となるように値を設定する。このガウス関数でフィルタリングすることで、画像をぼかすことができ、線の平滑化が行える。

本稿の実験では、週刊漫画雑誌をスキャンし、孤立点と網点、べた塗り領域のノイズを除去した画像をベクトル化した。実験条件を表 1 に、入力画像の一部を拡大したものを図 1 に示す。ラスタ表現の JBIG がエントロピー符号化を行うのに対して、ベクトル表現の EPS はエントロピー符号化を行わないため、汎用の圧縮手法である bzip2[4] で圧縮した。ここで、フィルタリング後の二値化におけるしきい値は 0~1 の範囲で 0.5 とする。

半径を変化させてフィルタリングした際の画像のファイルサイズを表 2 に示す。

表 2 より、ガウスフィルタをかけることによって画像のファイルサイズは減少する。半径を大きくするほど、符号化効率が向上することがわかる。

また、半径 1~4 画素のガウスフィルタによる処理画像を図 2 に示す。図 2(c), (d) より、大きい半径でフィルタリングを行うと、ところどころで画像のつぶれが生じ

表2 フィルタリングによるファイルサイズ

Radius of pixel	File size[KByte]
No operation	114.2
1	86.7
2	74.0
3	68.8
4	65.1

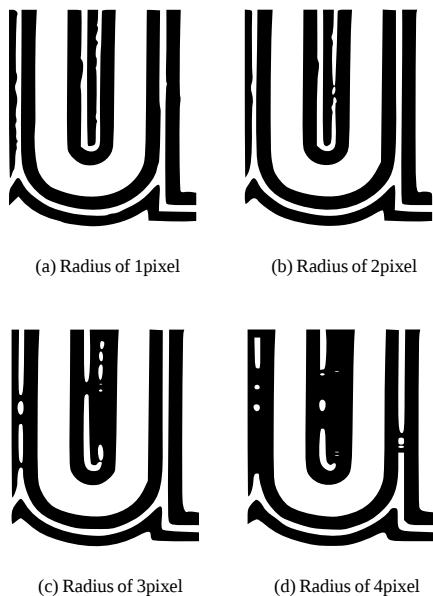


図2 ガウスフィルタによる処理画像

ることがわかる．一方，小さい半径のフィルタリングでは，通過点を十分に削減することができない．

2.3 細部を復元するガウスフィルタリング手法の提案

ガウスフィルタの問題点を解消するために，細部を復元するガウスフィルタリング手法を提案する．大きい半径でのフィルタリングによってつぶれる細部を再現すれば，画質を維持しつつ，符号化効率を向上できる．差分を利用した細部の復元を考える [5]．ガウスフィルタによる処理画像と入力画像の差分において，つぶれた領域の差分の周囲長の画素値に着目する．ガウスフィルタによる処理画像と入力画像の差分のうち，連結画素の周囲長が，閾値以上のものを処理として加えないようにする．アルゴリズムを図3に示す．この手法により，つぶれた細部を再現でき，形状の劣化を防ぐことができる．大きい半径でのフィルタリングが可能となるので，符号量を削減できる．

3. ベクトル化した二値画像の画質評価手法

3.1 ラスタ・ベクタ変換時に生じる誤差

3.1.1 平均誤差

ラスタ・ベクタ変換時には，曲線を関数で近似するた

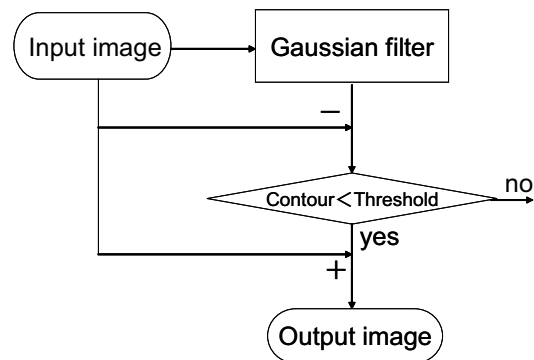


図3 細部を復元するガウスフィルタリングのアルゴリズム

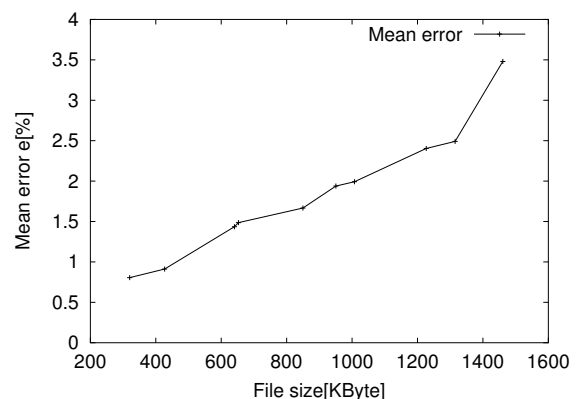


図4 EPS と入力画像間の平均誤差

めに，入力画像と出力画像の間に誤差が生じる．この誤差を定量的に測定するため，入力画像 $A(x,y)$ とベクトル表現をラスタライズした画像 $A'(x,y)$ の差分を考える．差分の絶対値の和をとり，全画素数で割ったものを平均誤差 e として式3に定義した．

$$e = \frac{\sum |A(x,y) - A'(x,y)|}{\text{All pixels}} \quad (3)$$

図4に平均誤差 e を示す．10枚の異なる画像に対して実験を行い，横軸にファイルサイズ，縦軸に平均誤差 e をとる．これより，平均誤差は符号量に比例することがわかる．ベクトル表現における符号量は，制御点の数に比例する．制御点が多いほど画像が複雑であるため，誤差が多く発生することが確認できた．平均誤差は画像の内容に依存しない評価手法である．

3.1.2 歪み

平均誤差は，分母が全画素であるのに対して，分母に黒画素数をとったものを歪みとして式4に定義する．

$$\text{Distortion} = \frac{\sum |A(x,y) - A'(x,y)|}{\text{Black pixels}} \quad (4)$$

図5に歪みを示す．横軸にファイルサイズ，縦軸に歪みをとる．

図5より，符号量と歪みの間には相関が無いことがわ

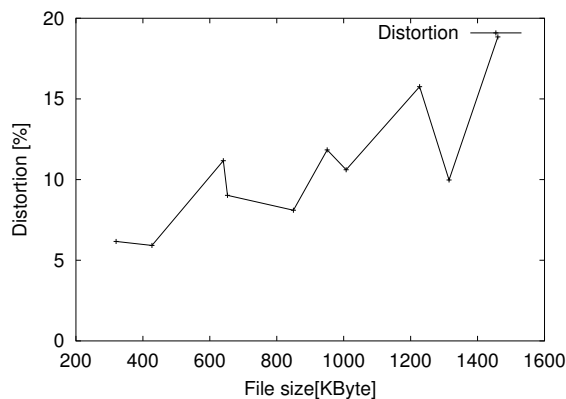


図5 EPSと入力画像間の歪み

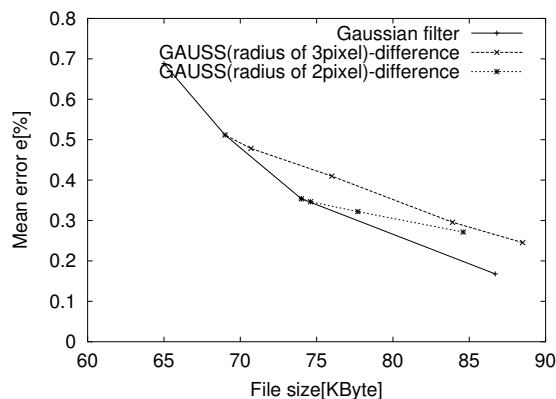


図6 平均誤差による評価

かる．塗りつぶされた領域が多い画像は有効画素を多く含むが，符号量に関係しない．その結果，相対的に歪みが小さくなると考えられる．

3.2 平均誤差による評価とその問題点

3.2.1 平均誤差による評価

以上より平均誤差を用いて画質評価を行う．ガウスフィルタによる手法と細部を復元するガウスフィルタリング手法における，平均誤差を用いた評価を図6に示す．横軸にファイルサイズ，縦軸に平均誤差をとる．ガウスフィルタは半径 r を 1～3[pixel] まで変化させた．また，細部を復元するガウスフィルタは 2, 3[pixel] の半径 r における画像を処理した．図6より，ガウスフィルタによる処理では，半径を大きくすると，ファイルサイズは減少し平均誤差は増加する．符号量と平均誤差の間には反比例の関係があることがわかる．また，下に凸のカーブを描くことから，一般的なレートディストーション理論が当てはまる．このように，平均誤差は客観的な評価手法として利用できる．

また，細部を復元するガウスフィルタリング手法を施すと，平均誤差は低減するが，ファイルサイズは増加す

表3 入力画像との差分値

Length of difference	Difference[pixel]	
	EPS	Gaussian-EPS
ALL	174143	244210
1	44284	30641
50 <	4950	15285

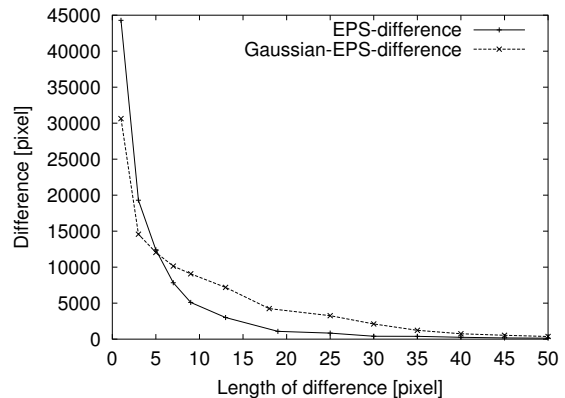


図7 入力画像との差分の検討

る．同じファイルサイズで画質を比較すると，主観品質は細部を復元する手法の方が高いが，歪みによる客観評価では逆になっている．この理由として，つぶれた細部は差分値は小さいが，特に多くの通過点を持っているということが挙げられる．以下で差分値を詳しく検討する．

3.2.2 差分値の検討

差分をその周囲長の画素数ごとに詳しく検討した．表3に差分値を，図7に周囲長と差分の関係を示す．横軸は差分の周囲長，縦軸はその周囲長をもつ差分の画素数を示す．

図7では，入力画像をベクトル化したのみの場合と，入力画像にガウスフィルタをかけたものをベクトル化した場合の二通りの入力画像との差分を示している．入力画像をベクトル化したのみの場合は，ガウスフィルタリングした場合と比べて，小さい周囲長の差分が多く表れる．つまり，入力画像をベクトル化した場合，近似による小さなずれが多数発生することがわかる．このような誤差は主観品質に影響しない．

図7において，2本の曲線は周囲長の長さが5で逆転する．これは，ガウスフィルタをかけると，入力画像とのずれが大きくなることを示している．特に長い直線の近似の際には，直線一本が一画素ずつずれることもあるため，周囲長の長い差分が発生する．実際，周囲長50画素以上の差分値は，ガウスフィルタリングした画像の方が大きいことが表10からわかる．これらの誤差も主観品質に影響しない．

ところで，ガウスフィルタによるつぶれ領域における

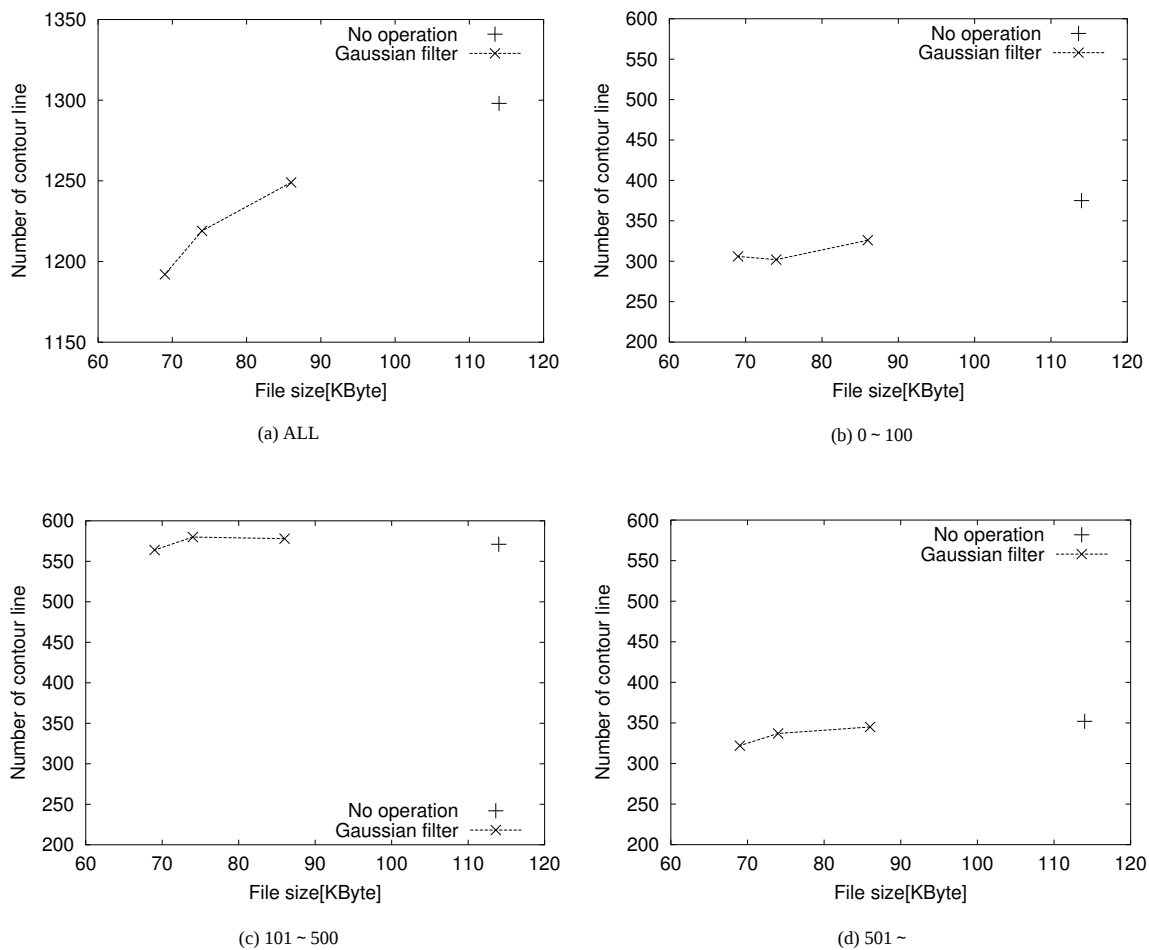


図 8 画素数別の輪郭線の本数

入力画像との差分は、10～30 画素程度の周囲長を持つ．この周囲長画素値には、直線・曲線近似による誤差によるものも多く含まれる．つまり、近似による誤差と画像のつぶれによる差分が同時に存在する．しかし、この 2 つを区別することは困難である．以上より、差分を用いた画質評価は、客観的な誤差を評価することはできるが、視覚的に大きな影響を及ぼすつぶれを評価するためには有効でないことが明らかとなった．

3.3 輪郭線の本数を用いた評価手法の提案

近似による誤差と細部のつぶれを区別できないという歪みの問題点を解決するために、輪郭線の本数による評価手法を提案する．一般的に形状情報は画像の特徴を表す有効な情報である．二値画像の場合、形状は輪郭線として記述可能である．

図 8 に連結領域の画素数ごとに計測した、ファイルサイズと輪郭線の本数を示す．図 8(b) より、画素数の小さい領域で輪郭線の本数を比較すると、ガウスフィルタリング手法の方が少ない．小さな周囲長の輪郭線が減少し

ているということから、細部の形状が失われていることがわかる．図 8(c), 図 8(d) より、画素数が中程度以上では輪郭線の本数はほとんど変わらない．ただし、ガウスフィルタの半径を大きくすると複数の領域が結合してより大きな連結領域となるため、輪郭線の本数は減少する．

以上をまとめると、輪郭線の本数はガウスフィルタの半径に応じて減少し、つぶれによる画質の劣化を反映していると言える．また、連結領域の面積に関係なく、輪郭線の本数のみによってつぶれによる画質劣化を評価可能であると言える．よって、図 8(a) より、ガウスフィルタは半径を大きくすると輪郭線の本数が減少し、つぶれが発生していると評価できる．

また、輪郭線の本数と平均誤差の関係を、10 枚の画像について調査した結果を図 9 に示す．図 9 より、輪郭線の本数と平均誤差はほぼ比例関係にあることが確認できる．よって、輪郭線の本数を用いることによって、つぶれの評価のみならず、絶対的な誤差も十分に評価可能であることがわかった．また、図 7 で示した主観品質に影響

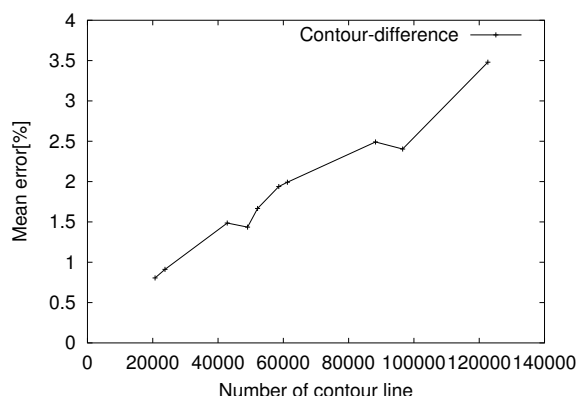


図9 輪郭線の本数と差分の関係

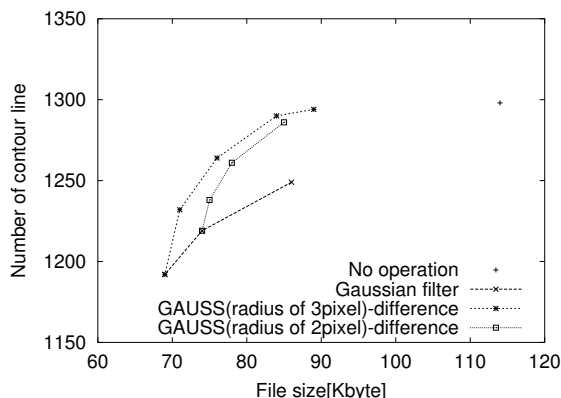


図11 差分を考慮したガウスフィルタ

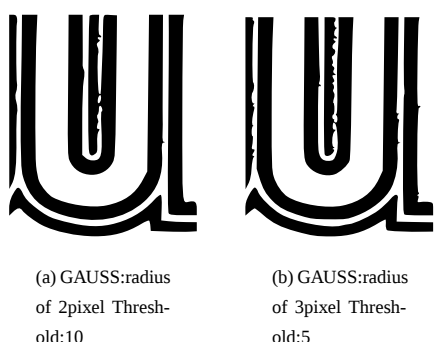


図10 細部を復元するガウスフィルタリングによる画像

響しない誤差は、輪郭線の本数にも影響を及ぼさない。以上より、輪郭線の本数によるベクタ変換後の画像の画質評価は有効であると考えられる。

4. シミュレーション実験

4.1 細部を復元するガウスフィルタの有効性の検証

細部を復元するガウスフィルタリング手法による処理画像を図10に示す。図10(a)は、入力画像と半径2画素のガウスフィルタをかけた画像の差分のうち、その周囲長が10画素以上の差分を処理として加えない操作を行った画像、図10(b)は、半径3画素のガウスフィルタでしきい値5画素の処理による画像である。図10より、図2のガウスフィルタをかけたのみの画像と比べて、つぶれた細部を再現できることがわかる。よって、この提案手法によって、細部の再現性の高いベクタ変換が可能となることが確認できた。

4.2 輪郭線による評価手法の有効性の検証

ガウスフィルタによる手法と細部を復元するガウスフィルタリングにおける、輪郭線の本数による評価を図11に示す。横軸にファイルサイズ、縦軸に輪郭線の本数をとる。ガウスフィルタによる処理では、半径を大きく

すると、ファイルサイズと輪郭線の本数は共に減少する。

一方、細部を復元するガウスフィルタリング手法を施すことによって、ファイルサイズは増加し、輪郭線も増加する。この手法において閾値を小さくした場合、ファイルサイズ、輪郭線の本数は共に増加する。よって、細部のつぶれを輪郭線の本数によって正確に評価できた。以上より、輪郭線の本数を用いた手法により、ベクタ変換後の画質評価が可能であることが確認できた。

5. ま と め

本稿では、ベクタ変換における符号量削減手法と、ベクトル化した二値画像の画質評価手法について検討を行った。符号量削減手法としては、ガウスフィルタリングによる従来手法と、その問題点を解消する提案手法を示した。また、画質評価としては、平均誤差による評価を示し、輪郭線の本数による評価手法を提案した。シミュレーション実験により、主観品質とレートディストーションの観点から提案手法の有効性を確認した。提案手法により、細部の再現性と符号化効率の高いベクタ変換が可能となった。また、つぶれを考慮した客観的な評価手法が得られた。今後は、輪郭線の本数と画質の関係をさらに分析し、ベクトル表現の画質評価の一般的な尺度としていく。

文 献

- [1] 河村, 渡辺, 富永, “網点を含んだ2値画像のベクトル表現に関する検討,” 画像符号化シンポジウム PCSJ2003, P-2.13, Nov.2003.
- [2] 山本, 河村, 渡辺, 富永, “二値画像のベクトル化における符号量削減に関する検討,” 画像符号化シンポジウム PCSJ2004, P-2.04, Nov. 2004.
- [3] “Potrace,” <http://potrace.sourceforge.net/>
- [4] J.Seward, “bzip2, ver.1.0.2,” <http://sources.redhat.com/bzip2/>
- [5] Franti P, Ageenko E I, and Kolesnikov A, “Vectorizing and feature-based filtering for line-drawing image compression,” IEEE Pattern Anal, Appl, Vol2, No.4, pp.285-291, Nov.1999