

## マンガ・カラー化のための領域判定

山田嘉人<sup>†</sup> 山口泰<sup>††</sup>

モノクロマンガをカラー化するには、塗りつぶすための領域判定が必要となる。本研究では画像が持つパターンとエッジの情報を組み合わせることで、塗りつぶす領域を簡単に判定ができるような手法を提案した。パターン認識にはハールウェーブレット変換を、領域判定にはグラフカットを用いている。これらの手法を組み合わせることで、ユーザの入力になるべく簡単になるようパラメータの調整やUIの実装を行っている。

### A new segmentation algorithm for Manga colorization

YOSHIHITO YAMADA<sup>†</sup> YASUSHI YAMAGUCHI<sup>††</sup>

Segmentation is crucial for colorizing old Manga which is usually monochromatic. This paper proposes a new segmentation algorithm for Manga colorization based on patterns and edges within an original image. The algorithm exploits Haar wavelet transform for pattern analysis and Canny edge detector for extracting edges from an image. Graph-cut is used for optimizing the result. The paper also explains some methods for tuning parameters and GUI implementation to improve user-friendliness.

### 1. はじめに

近年、過去の日本マンガを海外マーケット向けに輸出したり、携帯電話向けのコンテンツとして配信したりする場面が増えてきている。とりわけデジタルコンテンツとしてマンガを提供する際、過去のモノクロマンガ作品を全編にわたってカラー化するという作業が行われることがある。しかし、これを一つ一つ手動で行った場合の手間は大変なものである。

このような場面においてモノクロマンガをカラー化する場合、始めからデジタルで制作したマンガを着色する場合とは異なる問題が発生する。ゴミや汚れの入り込みによる塗りつぶしの阻害、スクリーントーン箇所の領域指定、途切れがある輪郭線への対処などが代表的な例である。これらは一般的なペイントツールに常備されているような塗りつぶしツールでは画一的に処理することができない。

本研究では、次章で紹介する任陶による先行研究をもとに手法の改良、最適化を行うことで、実用的なマンガのカラー化手法を確立することを目的としている。

まず、境界決定の方法として利用されていた高速レベルセット法を廃止し、新しくグラフカットを導入する。画像から得られるエッジやパターンの情報を異なった手法で境界決定の材料とするのである。これにより大幅な処理の高速化とパラメータ数の削減、元画像に忠実な境界を持った結果が期待できる。次に、先行研究で示されたハールウェーブレット変換 (Haar Wevelet Transform) によるパターン認識の手法を全体的に見直す。より幅広いパターンを漏れなく認識することに加え、パターン認識自体の精度、つまりはパターン間の差異を正確に取得することを目指す。これらの手法には依然としてパラメータが存在し、画像の持っている特徴によって値を調整していかなければ適切な領域判定を行うことができない。この点を解決するため、本研究ではパラメータの自動調整も導入し、より簡単な領域判定環境の構築を目指す。

最後に、これらのパターン認識や境界決定の方法だけでは意図する領域判定ができないような、例外的な特徴を持ったマンガにも柔軟に対応するため、実用化に向けたユーザインタフェースを考案していく。

<sup>†, ††</sup> 東京大学

## 2. 先行研究

### 2.1 Manga Colorization

日本マンガのカラー化を題材にした研究は Y.Qu らによるものがある 1). 彼らは陰関数表現により領域境界を定義し、領域を分割するレベルセット法を用いている。パターンの連続性と画像の輝度変化の情報を取得し、適切な着色領域をレベルセット法によって判定する手法を提案した。この研究の手法ではレベルセット法の実行とパターン情報の抽出に非常に大きな計算量を要するため、リアルタイムな処理を行うことはできない。いずれの手法にもパラメータが多数存在するが、画像の特徴に応じて微調整を行いつつ色塗りを行っていくには無理があると考えられる。

### 2.2 日本マンガのインタラクティブなカラー化手法

任陶はこの研究をもとに改良を加え 2), 処理の高速化（高速レベルセット法、ハールウェーブレット変換）や途切れ部分での漏れをおさえつつ輪郭の際ギリギリまでを領域として判定する手法を提案した（図 1）。領域の輪郭もピクセルごとの輝度ではなく、エッジ（鋭い輝度変化）を抽出して用いるため、より幅広い画像に対応できるようになっている。しかし依然として残る大量のパラメータは適切な設定を必要とするため、自動で塗りつぶしを行うことは困難であった。また、パターン認識の精度にも不安があり、特に全体的な色が濃いものや粗いものに対しては正確に認識を行うことができない。これらの点を解決するためには全体的な手法の見直し、調整が必要だと思われる。

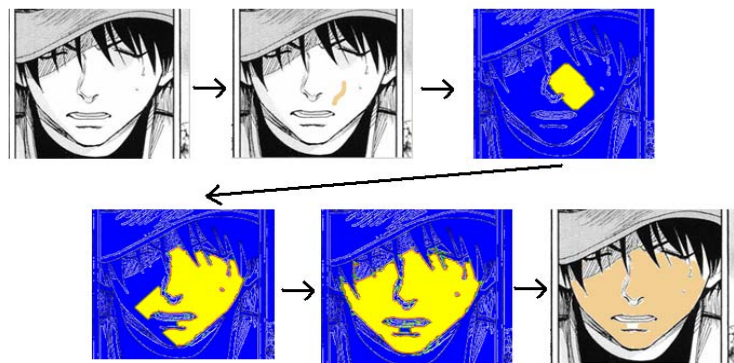


図 1 任陶による領域判定の結果

### 2.3 問題点のまとめ

先行研究の問題点をまとめると以下のようになる。

- ① レベルセット法の限界
- ② パターン認識の精度
- ③ パターンの使い方

#### ① レベルセット法の限界について

レベルセット法はシステム全体で多くのパラメータを持ち、非常にシビアな調整を必要とすることもあり、得られる結果が不安定である。また、任の研究ではエッジの内判判定を不安定な処理で行っていたため、元画像に忠実な美しい境界とならない。このような問題はレベルセット法を使う限り解決が難しく、他の方法の導入も考える必要がある。

#### ② パターン認識の精度について

任の研究で用いられていたハールウェーブレット変換は様々な階層のサブバンド画像を参照することにより粗いパターンなどにも対応できるはずだが、実際にはうまく認識できないパターンが非常に多い。粗いパターンや、むらのあるパターンに対しても確実にパターン認識を行えるようにしたい。

#### ③ パターンの使い方について

ウェーブレット変換を深い階層まで参照することにより粗いパターンに対応できるようになる一方、パターン認識の解像度が落ちて細かい入り込みができなくなる。細かい入り込みなどにも対応するためには画像の特徴に応じてウェーブレット変換の階層の深さや、その他パラメータの切り替えを行う必要がある。簡単な領域確定をするためにも、パラメータの自動調整などを議論する必要がある。

次章ではこれらの問題点の解決に取り組んでいく。

## 3. 境界決定の方法

### 3.1 グラフカットの概要

先行研究では高速レベルセット法を用いて境界発展を行い、領域を判定していたが、問題は多く単純には解決できないものばかりだった。まず、画像に合わせて非常に多くのパラメータを適切に設定しないと正常に動作しない。また境界発展を終了するタイミングを予め決めることが難しく、サイズの大きな画像では処理量が加速度的に

増えてしまう傾向にあった。他にも領域の内外を判別するための処理が不安定な点も問題だった。このような問題点の多くは、与えられたスピード関数が局所的に0に近づくように反復計算によって境界決定を試みるレベルセット法の枠組みや、そこで用いられるスピード関数の定義などに根本的な原因があると考えられる。

そこで本研究ではレベルセット法の利用をあきらめて、パターンとエッジの情報から画像を分割する離散的な最適化手法として、グラフカット4)を用いることにした。グラフカットでは離散的な最適化を行うため、処理量が比較的小さく済む。また、大域的な最適化が可能であり、画像全体を考慮した結果が得られる。局所的な評価にもとづいて反復計算を行うレベルセット法よりも本研究の目的とする領域分割に向いていると思われる。

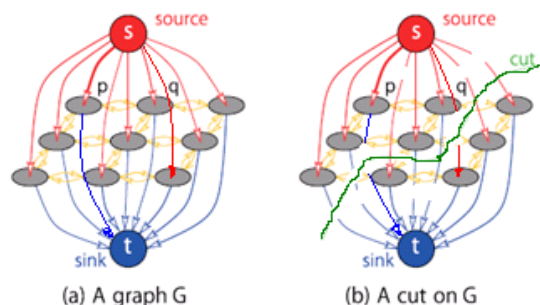


図2 グラフカットの概念 (7)からの抜粋

グラフカットの具体的な仕様については、紙面の都合上省略する。

### 3.2 導入の方法

グラフカットのソルバとして Baykou と Kolmogorov の開発したプログラム 8) があり、本研究でもこれを用いることとした。このプログラムを利用するにあたっては、グラフと各リンク間のエネルギーとを定義すればよい。

### 3.3 結果と効果

グラフカットを用いてエッジとパターン情報を生かした領域判定が可能となる。実行結果は図3のようになった。



図3 グラフカットの実行結果

実験を様々な画像に対して繰り返していると、レベルセット法に比べて優れている点に分かってきた。まず、パラメータの数が少ないということがある。パターンにおけるエネルギーにおけるパラメータ  $a$  は事実上固定となっているため、調整の必要があるパラメータはエッジとパターンの影響の配分を決める係数  $k$  だけである。

また、係数を細かく調整しなくともレベルセット法を用いる手法に比べて多くの画像を適切に処理できるというのがグラフカットの特徴である。数多くのパラメータを細かく調整することが前提となっていた先行研究の手法に比べ、これは非常に優れている点である。

また、図4のように判定領域の境界がエッジに忠実な線となっていることもレベルセット法に比べ優れている点である。レベルセット法ではエッジ付近での領域の内外情報を不安定な処理により補っていたが、グラフカットではその必要がなく、Cannyのエッジ検出法から得られた情報をそのまま利用できる。領域境界がエッジに沿うことになり、マンガの色塗りには非常に適した結果が得られるようになった。

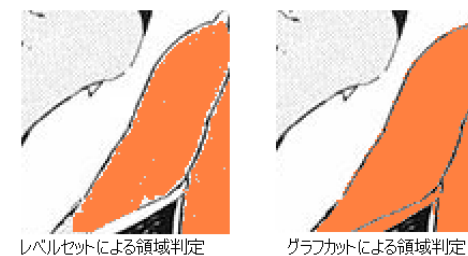


図4 手法による境界の違い

大域的な最適化を行うメリットもある。パターン認識の精度が悪く、パターン内に亀裂や穴が生じていた場合、レベルセット法だとその地点で発展が止まってしまう。グラフカットだと画像全体の傾向を見て領域分割を行うため、少々の欠損ならば影響を受けることなく処理できる。

## 4. パターン認識の改善

### 4.1 パターン差異の閾値に関する考察

パターン認識においてまず問題となるのは、ハールウェーブレット変換によって作られるサブバンド画像から計算する特徴値の分散が大きいものを処理する場合である。このようなパターンは一般に粗いパターンや不規則なパターンが対応する。なぞった領域から得られたサンプリングベクトルと各ピクセルが持つ特徴ベクトルとのパターン差異度が、設定した閾値内にあるピクセルを同パターンとみなすため、閾値を適切に設定しなければパターン認識をうまく行うことができない。閾値を不用意に上げると、取りたい領域の外側までもが同パターンとして認識されてしまう。実際に図5の場合では、パターン全体を覆うために閾値を上げると、本来認識すべきではない外側までが、なぞった領域と同パターンだとみなされてしまっている。

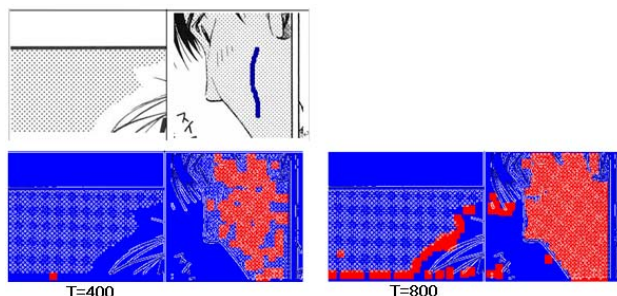


図5 必要のない領域まで認識してしまう例

このような問題点を解決するため、特徴ベクトルの作り方とパターンの差異度を再考する必要がある。

### 4.2 パターン間の差異

先行研究ではガボールウェーブレット変換やハールウェーブレット変換を用いてパターン認識が行われたが、その効果、適用できる範囲については十分に説明されていなかった。実際にハールウェーブレット変換を用いて実験を繰り返していると、既存の計算法ではパターン間の差異をうまく表現できていないように感じられる。特に粗いパターンの場合にはその傾向が顕著となる。ウェーブレットの階層を深くすることによって粗いパターンについても特徴量をとらえられるはずであるが、利用法を工夫する必要がある。

そこでパターンの特徴量の値を調べてみたところ、階層が深いほど値が小さくなる傾向にあることが実験から分かった。そのため階層の深さによる特徴値の不均衡を解決するためにマハラノビス距離を用いることにした。今までのSSDはベクトルの各成

分を等しく扱っていた。これに対してマハラノビス距離は特徴ベクトルの共分散を考慮した差異を扱える。つまり、各成分のばらつきが距離に反映されるため、ウェーブレット変換の階層によって生じる不均衡を吸収し、上手くパターン間の差異を表現できる可能性がある。

平均が  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_p)^T$  で、分散共分散行列（2変数間の共分散を配列した行列）が  $\Sigma$  であるような多変数ベクトル  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)^T$  で表される一群の値に対するマハラノビス距離は、次のように定義される：

$$D_M(x) = \sqrt{(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)}$$

図6にSSDによる認識結果と、マハラノビス距離を用いた認識結果を示した。



図6 マハラノビス距離を用いた結果の比較

## 5. パラメータ調整の自動化とユーザインタフェース

### 5.1 概要

本研究では領域判定の基本アルゴリズムとして高速レベルセットに代わりグラフカットを用いることにより、パラメータ数の減少、滑らかな境界の抽出、処理の高速化などを実現できた。またパターン認識の方法を様々な観点から考察し、精度の向上を試みた。これらの手法により先行研究の持っていた問題点をいくらか解決することができたが、領域判定にあたってユーザの負担を軽減するためにはまだ議論すべき点があ

る。

まず挙げられるのはパラメータ調整である。グラフカットによってパラメータ数はかなり減らすことができたとはいえ、エッジ抽出やパターン認識においても調整すべきパラメータは複数存在する。ユーザに優しい領域判定の環境を実現するためには、ユーザが直接数値を入力するような場面をできるだけ減らすべきである。本章では、まず画像の特徴値をもとに、パラメータの値を自動的に調整する手法を提案する。パラメータ調整の自動化により、ユーザの負担を減らすことができる。

さらに、たとえパラメータ調整が適切であったとしても、意図する領域判定を簡単に行えない場合もある。たとえば塗りつぶしたい領域の輪郭が大きく欠けていると、パラメータ調整だけでは領域を判定できない。他にも、自動化では対応しきれないパラメータ調整はユーザに委ねる必要があったり、領域判定にあたって画像を見ながらの直接操作が必要となる場面も多い。このような問題に対応するために適切名ユーザインタフェースが欠かせない。

## 5.2 パラメータ調整の自動化

領域判定においてパラメータ調整が重要となるが、ここではいくつかのパラメータを画像の特徴に応じて自動的に設定する方法を提案する。Cannyのエッジ検出法とハールウェーブレット変換によるパターン認識、これにグラフカットを用いて領域判定を行う際に、画像の特徴量から自動調整可能なパラメータとして、以下のものが挙げられる。

「エッジの閾値」「パターンの閾値」「 $k$  (エッジとパターンの比率)」  
これらのパラメータを画像から得られる値を元にあらかじめ調整した値に動かすことにより、ユーザの負担を減らすことができた。

## 5.3 ユーザインタフェース

ユーザインタフェースによってパラメータの自動調整を行ったとしても領域判定が困難となる場合に対処できるようにする。本研究において提案する手法は「輪郭線の書き足し」「パラメータの直接指定」の2つである。これらを順に説明する。

まずは輪郭線の書き足しである。前節において、輪郭線に大きな途切れのある領域がある場合は既存の手法で対処できないことを紹介した。そこで、輪郭線を書き足せるようにした。領域指定のためにその一部をなぞる操作は、コントロールキーを押すことで切り換えられるようにした。図7では目の左右の箇所を輪郭を書き足してから顔の領域判定を行った結果である。



図7 輪郭線の書き足し

最後にパラメータの直接指定を考える。前節で述べたパラメータの自動化は、本研究の手法に含まれる全てのパラメータを扱うものではなく、直接操作が必要なものも残されている。図8のようにパラメータを直接指定できるユーザインタフェースを提供した。自動調整が可能なものは赤字で書いてあり、それ以外は手動のみでの調整が必要となる。

自動調整ができないパラメータのうち、手動での調整、切り替えが必要となるものとして、以下のものが挙げられる。場合によってはこれらのパラメータの調整にはユーザの試行錯誤が必要となる。これらのパラメータの調整によって必要とされる効果が得られるので、これら以外のパラメータを調整する必要は事実上ない。

「ウェーブレット変換の回数」

パターン認識に用いるウェーブレット変換の深さである。深い階層までを利用すると粗いパターンが認識可能になる一方で、認識の解像度が低下する。これらを両立することはできないため、画像の特徴によって切り替える必要がある。

「単色処理 (flood fill)」

この機能を用いると、Windowsのペイントにおけるバケツツールのように、同色の領域を塗りつぶすことができる。領域にパターンが存在せず、なおかつ輪郭の途切れが無い場合にしか使うことができないが、最適な方法となることもまれにある。

「領域連結の有無」

パターン認識の際、なぞった領域とつながっている部分のみを同一パターンとみなす機能である。離れた場所にある同パターンを領域に含めるか否かを切り替えられる。

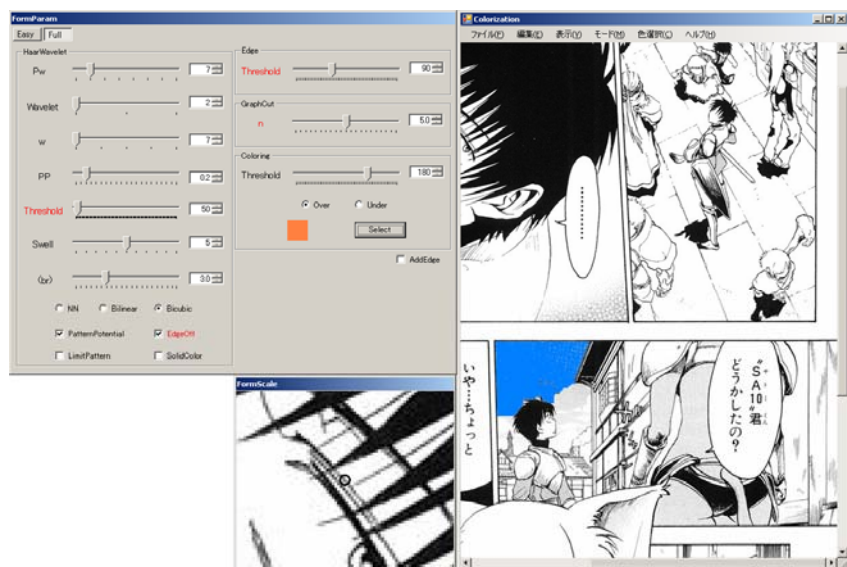


図 8 ユーザインタフェース

## 6. まとめと今後の展望

本研究では日本のモノクロマンガに注目し、簡単にカラー化が可能となるような領域判定手法の実現を目指した。

本研究では Y.Qu や任陶の先行研究の問題点を踏まえたうえで、高速レベルセット法による境界発展をあきらめ、グラフカットによる境界判定を試みた。これによりパラメータの数を大幅に減らすことに成功するとともに、処理の高速化も実現できた。またグラフカットの特性により、マンガ・カラー化に適した元画像のエッジに忠実な境界抽出が可能となった。さらにパターン認識についてはパターンのスケールについて詳しく議論した上で、パターンの差異を表す指標としてマハラノビス距離を用いることにした。これにより粗いパターンについても認識が可能となった。むらのある不規則なパターンについては特徴量を個別に調整することにより、認識範囲を広げることが可能にした。また、いくつかのパラメータについて自動調整の手法を考案した。さらに上記のような手法を用いても領域判定が難しいような場合については、ユーザが直接的に指定できるような環境を目指したユーザインタフェースを提案した。実際にいくつかの例外的な場面を想定し、対応する機能を実装した。

また、本研究ではパラメータの自動調整手法を提案したが、認識できるパターンのスケールを決定するウェーブレット変換の回数や、flood fillを行う例外的な場合などはユーザが直接指定するしかなかった。この問題を解決するためには、あらかじめ様々なスケールにおいて画像の特徴量を計算しておく必要がある。それを踏まえたうえで適切な値のみを抽出し、実際の領域判定に用いることができれば完全な自動化へ一歩近づくこととなる。ウェーブレット変換の深い階層を参照すれば元画像のサイズにおけるパターン認識の解像度が下がり、細かな輪郭の形などには対応できなくなることが手法上の限界である。本研究ではウェーブレット変換における深い階層の特徴量を利用することのみを議論したが、パターン認識の解像度を上げることを目指すとすれば、意図的に浅い階層の特徴量のみを利用することも考えねばならない。

ユーザインタフェースについてはまだまだ議論の余地があると思われる。たとえばグラフカットを導入したことにより、パターンが同一な領域が輪郭で分割されていたとしても、それぞれを個別に扱うことが難しくなってしまった。これらの点を解決することで、さらに柔軟性に富んだツールとして活用できることになる。

## 参考文献

- 1) Y.Qu, T.TWong and P.A. Heng. Manga Colorization. ACM SIGGRAPH 2006, 25(3):1214-1220, 2006.
- 2) 任陶. 日本マンガのインタラクティブなカラー化手法. 東京大学修士論文, 2008.
- 3) J.A. Sethian. Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, Computer-Aided Design, Optimal Control and Material Sciences. Cambridge Univ Pr, 1999.
- 4) S.J. Osher and R. Fedkiw. Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces. Springer, 2003.
- 5) Yonggang Shi, W.Clem Karl. A fast implementation of the level set method without solving partial differential equations. Technical Report ECE-2005-02, ECE Department, Boston University, Jan, 2005.
- 6) [Efficient Approximate Energy Minimization via Graph Cuts Yuri Boykov, Olga Veksler, Ramin Zabih, IEEE transactions on PAMI, vol. 20, no. 12, p. 1222-1239, November 2001.
- 7) 永橋知行. グラフカットによる領域セグメンテーションに関する研究, 中部大学修士論文, 2007
- 8) [An Experimental Comparison of Min-Cut/Max-Flow Algorithms for Energy Minimization in Computer Vision. Yuri Boykov and Vladimir Kolmogorov. In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, September 2004.  
<http://www.cs.ucl.ac.uk/staff/V.Kolmogorov/software.html>