



SPIDER開発を通して見たデジタル画像処理アルゴリズムの現状 (5)

—— 領域分割 ——

横矢直和 富田文明 田村秀行 (電子技術総合研究所)

1. まえがき

画像処理——特に、画像の構造を記述する場合——においては、画像内に含まれている個々の対象物(object)の抽出が重要な問題となる。この問題は画像のセグメント化†(Image Segmentation)と呼ばれており、アプローチには、(1)対象物の輪郭に相当するエッジを線として抽出する方法(エッジ検出)と(2)画像を対象物に対応した部分画像に分割する方法(領域分割)とがある。

画像のセグメント化では、「画像内で1つの対象物に対応した部分では特徴(濃度、色、テクスチャなど)が均一または滑らかに変化しており、異なる対象物間の境界部分では特徴が急変している」という仮定が暗黙のうちに設定されている。領域分割は特徴の均一性に注目したアプローチで、対象物領域を直接検出するため、対象物の境界は必ず閉じており、画像の大局的な構造を把握し易い利点がある。しかしその反面、クラック(図1参照)を検出できないという欠点をも持ち合わせている。一方、エッジ検出では、特徴の急変性に注目して対象物の境界を見つけようとするが、画像が複雑になると、閉じた線が得られない。しかし、クラックの検出は可能である。このように両手法は相補的な特長をもっている。

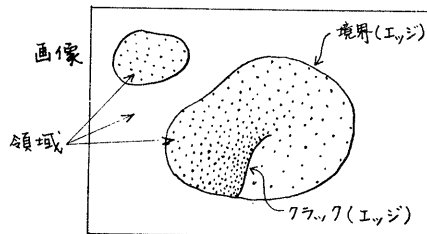


図1. 画像のセグメント化における領域とエッジ

本報告では、画像処理サブルーチンパッケージSPIDER[78]の開発経験に基づいて、これまでに提案されている領域分割法を概観する。なお、

† 画像の分割ともいう。

エッジ検出法については文献[44],[75]に詳しい。

Horowitz & Pavlidis[25]は領域分割を数学的に次のように定義した。

(画像Xの領域 X_1, X_2, \dots, X_N への分割)

$$(i) \bigcup_{i=1}^N X_i = X, X_i \cap X_j = \emptyset \text{ for } i \neq j$$

[分割の完全性]

$$(ii) X_i, i=1, 2, \dots, N \text{ is connected}$$

[領域の連結性]

$$(iii) P(X_i) = \text{true for } i=1, 2, \dots, N$$

P: 述語 [分割の決定条件]

$$(iv) P(X_i \cup X_j) = \text{false for } i \neq j,$$

where X_i and X_j are adjacent

[領域の最大性]

すなわち、領域はある述語(P)を満足する最大の連結画素集合として与えられている。Zuckerによる解説論文[105]もこの定義に従って1974, 5年頃までの文献を扱っている。

ここでは、定義を若干緩めて、領域分割を“特徴の異なる部分画像への分割”程度に考える。すなわち、条件(ii)あるいは(iv)を満足しないものも領域分割に含まれる。

領域分割法を画素の(広義の)クラスタ化と捉えた観点から、クラスタ化を行なう空間の違い——画像平面であるか、あるいは特徴空間であるか——に基づいて、2種類に分けて概観する(2., 3.)。そして、処理対象に関する知識の利用法について、いくつかの具体例を紹介し(4.)、最近の研究の動向にも言及する(5.)。

2. 画像平面でのクラスタ化による領域分割

画像の局所的な特徴の類似性に基づいて、与えられた画像の平面上で画素(または小領域)のクラスタ化を行ない、画像を特徴の異なる連結領域群に分割する方法で、領域拡張法(Region Growing[105])と呼ばれることもある。領域の形成過程の違いによって、統合、分離、分離・統合、画素の結合の4種に分けることができる。

2.1 統合法

画像を一旦、小領域(最小単位は画素)に分離しておいて、隣接した小領域間の類似度を計算し、似た小領域を順次統合していった領域を形成する方法である。

2.1.1 統計的仮説検定法

小領域の特徴の類似性を統計的仮説検定によって判定する方法で、Holmes[24], Muerle & Allen[43], Muerle[42], Gupta & Wintz[17],[18], 秋山他[2], Ketting & Landgrebe[36]などがある。統計的仮説検定法にはノンパラメトリックなものパラメトリックなものがある。文献[24],[42],[43]では累積型ヒストグラムに基づくノンパラメトリックなKolmogorov-Smirnov検定やsmoothed difference 仮説検定[43]が用いられているが、後者の方が良い結果を与えている。一オ、文献[2],[17],[18],[36]では、各小領域において特徴(濃度)が正規分布することを仮定したパラメトリックな検定法——F-検定、t-検定——が採用されている。

2.1.2 ヒューリスティック法

Brice & Fennema[6]は、まず入力画像を濃度の一定な基本領域(atomic region)に分割し、以下に示す2つのヒューリスティック(評価関数)を利用して隣接領域の統合を繰り返す方法を提案した。(Phagocyte heuristic)

任意の隣接領域 R_1, R_2 について、それぞれの境界長を P_1, P_2 とし、また弱く共通境界(境界の両側での濃度差がある閾値 θ 以下)の長さを W としたとき、

$$\frac{W}{\min\{P_1, P_2\}} > \theta_1 \quad ; \quad \theta_1: \text{閾値}$$

ならば R_1 と R_2 を統合する。

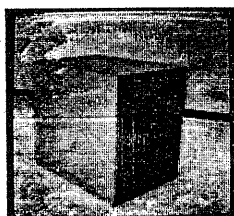
(Weakness heuristic)

$$\frac{W}{I} > \theta_2 \quad ; \quad \left(\begin{array}{l} I: \text{共通境界長} \\ \theta_2: \text{閾値} \end{array} \right)$$

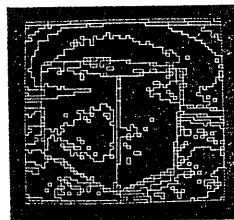
ならば R_1 と R_2 を統合する。

多面体世界を対象とする画像にまずPhagocyte heuristicを適用し、その結果に対してWeakness heuristicを適用することによって、多面体の各面を識別し(図2参照)、線画化された多面体世界の認識に利用した。

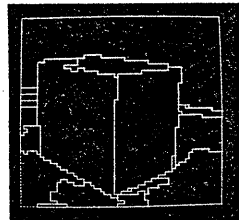
Brice & Fennemaの方法は以後の研究に大きな



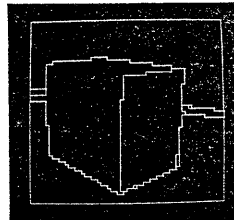
(a) 入力画像(16レベル)



(b) 基本領域(60x60)



(c) "Phagocyte"による統合
($\theta_1=2, \theta_2=0.45$)



(d) "Weakness"による統合
($\theta_2=0.75$)

図2. ヒューリスティック法[6]による領域分割

影響を与えた。例えばBarrow & Poplestone[4]は、濃度に±1のばらつきのある連結成分を基本領域として、"Weakness"に似た基準——共通境界の平均コントラストがある閾値以下ならば統合——によって統合を行なった。そして、領域分割結果から各領域の属性と領域間の関係を求め、画像の構造を関係グラフの形で記述し、最終的にモデルとの照合によって対象物の同定を行なった。

ヒューリスティック法については種々の改良版が提案されている。Freuder[15]は領域の面積と平均濃度に基づく統合基準を考えており、また、横矢他[100]は濃度の分散をも考慮している。Tenenbaum & Weyl[83]はカラーコントラストを利用している。

2.1.3 関数近似法

Pavlidis[60]は線形や平面曲線の分割における1変数に対するアルゴリズム[61]を画像の領域分割に応用した。まず、画像 $f(x, y)$ を1次元の切片 $f(x, y_0)$ $y_0=1, 2, \dots$ に分割し、次に各切片を基本領域に最良分割することによって、正分的線分で近似する。そして、基本領域間の(非)類似度を近似線分の傾きの差で表現し、depth-firstな探索に基づいて統合を行なう。

Pavlidisの方法[60]は分割に際して準最適解しか与えないが、神田他[28]は球形に對して最適解を与えるアルゴリズムを用い、画像を正分的平面で近似した。また、辻他[90]は、処理対象を、一様な表面反射率をもつ多面体、円柱、円錐からなる画

像に限定して、線分近似によって得られた1次元の基本領域を記号化した後、言語的手法によって統合する方法を開発した。

2.2 分離法

画面全体から出発して、領域内の特徴が一様でない限り、(長方形)部分領域への分割を繰り返す方法で、例えば、Robertson [68], [69]、棟上 [74] などがある。この種の方法は、後処理として類似領域の統合を行わなければ、対象物領域の抽出には利用できない。実際、データ圧縮やリモートセンシングにおける領域別分類(perfield classification)の前処理として利用されている [68]。

2.3 分離・統合 (Split-and-Merge) 法

2.1の統合法は最小領域から出発してボトム・アップ的に統合を繰り返すことによって領域を形成し、また、2.2の分離法では逆に、画面全体から出発してトップ・ダウン的に領域を分離した。

Horowitz & Pavlidis [25], [26], [27] は上記2手法の制御構造を組み合わせた分離・統合法を開発した。中間レベルの分割画像から出発して、まず各領域を定数(平均濃度)で近似する。そして、近似精度の低い領域は分離し、似た近似をもつ隣接領域は統合する。なお、アルゴリズムの停止基準は近似誤差に対する閾値によって定まる。

分離・統合法は、統合法、分離法に比べて、分離あるいは統合の回数が少なくてすむ。ただし、このことは他の個々の手法に較べて効率が高いことを必ずしも意味しない。分離・統合法はピラミッド型画像データ構造 [29], [80] と関連して議論されることが多いが、このデータ構造の複雑さのため、プログラミングが容易でない。

Chen & Pavlidis [7] は領域の特徴として、正規化された co-occurrence 行列を用い、分離・統合法によってテキスト画像の領域分割を試みている。

2.4 画素の結合による領域形成

隣接した画素間に何らかの関係を導入し、関係の成り立つ画素対を順次結合していった領域を形成する方法である。逐次型のアルゴリズムでは領域の統合を行なっているように見えるが、実際には、画素を節点に対応させ、関係の

成り立っている画素間に辺をもたせたグラフを構成しており、このグラフが構成された段階で分離は一意に決まる。連結部分グラフが領域に対応し、領域の形成はグラフ探索によって達成される。

横矢他 [100], [101], [103] は局所的な窓内での画素の類似性に基づく双方向の関係を定義しており、また、Narendra & Goldberg [47], [49] は濃度勾配に基づく単方向の関係を定義している。このような画素の結合によって領域を形成する方法は multiple linkage clustering と呼ばれる。

この種の方法はアルゴリズムの停止基準がはっきりしており、また、分割結果に重大な影響を及ぼす絶対閾値を必要としない利点がある。しかし反面、画像の大局的な特徴を領域形成過程で利用しにくい。

今まで述べてきた方法はいずれも、画像平面上でのクスタ化によって領域を形成しており、領域は1.の連結性に関する条件(ii)を満足する。

統合法の中には、結果が画像の走査順序に依存するものがある(例えば [18], [43], [6] など)。これは領域の拡張を逐次的に行なっているためであり、この問題——order dependence——は、基本的には、アルゴリズムを並列型に変更することによって解決できる [4], [13]。なお、order dependenceの問題は文献 [105] で詳しく論じられている。

3. 特徴空間の分割による領域分割

2.で述べた手法はすべて画像平面に注目しているが、特徴空間に注目した領域分割法もある。特徴空間に重点を置いた方法では、図3(次頁)に示すように、まず画像平面内の画素を特徴空間に写像する。そして、特徴空間内の画素クラスを識別関数やクスタ化によって識別し、各クラス内の画素にラベル付けを行なった後に、もとの画像平面に逆写像する。ただし、実際には、画素のかわりに小領域を用い、完全な多次元特徴空間のかわりに座標軸への1次元射影を用いることもある。この方法は、画素(または小領域)をパターンと見做したパターン認識理論の応用である。

以下では、特徴空間の分割方式を中心に、画像

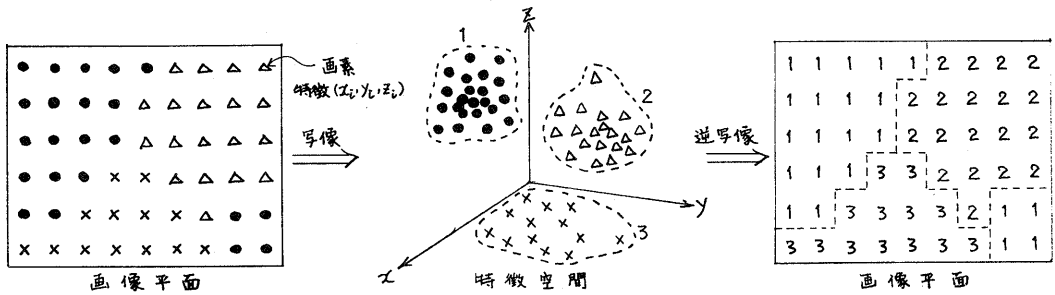


図3. 特徴空間の分割による画像の領域分割

の領域分割法を概観する。

3.1 閾値処理

特徴空間の分割を画像平面に写像する最も簡単な方法は閾値処理であり、文字図形のように濃度の分布が比較的単純な場合には、対象物領域の検出(主としてZ値化)に良い結果を与える[11]。閾値選択の方法は濃度ヒストグラムを利用するものが多く、例えば、P-タイル法[5],[12]、モード法[64]などがある。また、大津[57],[58]は判別分析の立場からヒストグラムに基づいて最適閾値を与える方法を開発した。なお、閾値選択法については文献[41],[71],[95]に詳しい。

次に、閾値選択と閾値処理の利用法について参考になる2つの手法を紹介する。

3.1.1 動的閾値処理

濃淡画像のZ値化のための閾値は画面全体に対して必ずしも一定ではなく、画像の局所的な性質によって変えなければならぬ場合が多い。特に、シェーディングの影響がある画像に対しては、このような動的閾値が有効である。

Chow & Kaneko[8]は、双峰性ヒストグラムの2つの正規分布の和による最小二乗誤差近似に基づいて、画像の各点に対してZ値化の閾値を動的に決定した。Z値化のために動的閾値を用いた例には、他に、富岡他[85]、Akita & Kuga[1]などがある。

3.1.2 再帰的閾値処理

Z値化を目的とした場合には、濃度ヒストグラム解析による閾値処理がかなり良い結果を与える。しかし、画像内に異なる濃度をもつ複数個の対象物が存在すると、1つのヒストグラムからだけではすべての対象物を検出できない場合が多い。

Ohlander[52]は閾値処理法のこの欠点を克服するために、複数のヒストグラムを用いた両帰的閾値処理による領域分割法を開発し、カラー風景写真に適用した。アルゴリズムの概要を以下に示す。

- (1). カラー風景写真から、R, G, B, 濃度, 色相, 彩度, およびテレビ信号に対応したY, I, Q について計9種のヒストグラムを計算する。
- (2). 領域の抽出に最も適したヒストグラムから顕著なピークを検出し、画像からピークに対応した領域を切り出す。
- (3). 画像の残りの部分に対して(1), (2)の処理を、少数の点しか残らなくなるまで繰り返す。
- (4). 画像全体を上記(1)~(3)で得られた領域に置き換えて、(1)~(3)の処理をすべてのヒストグラムに顕著なピークがなくなるまで繰り返す。

Ohlanderはヒストグラムのピーク検出手動で行っていたが[52]、Price[65]がこれを自動化し、Ohlander-Price segmentor と呼ばれる[53],[66]。なお、複数の次元ヒストグラムの利用と両帰的閾値処理による領域分割の基本的な考え方は坂井他[74]、Fuji & Tomita[91]にまでさかのぼる。大田他[64],[55],[73](図4参照)、Milgram & Kahl[39]も同様の

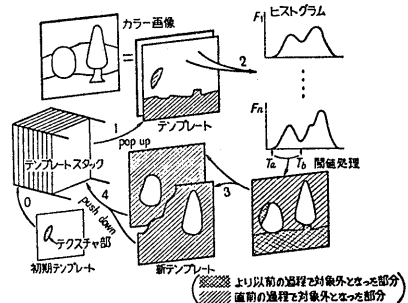


図4. 再帰的閾値処理による領域分割[55]

アプローチを併用しているが、その中で、大田地[55]はOhlanderの9種類のカラー特徴が冗長であることを指摘し、R+G+B, R-Bの2つのカラー特徴でもほぼ満足いく分割結果が得られることを示した。三池地[30]は濃淡画像を対象として、濃度、エッジの値および方法についてのヒストグラムを利用してテキスト画像を領域に分割した。

3.2 (濃度, エッジ値)空間の分割

先にも述べたように、画面全体に対する濃度ヒストグラムだけでは、対象物と背景を区別できない場合がある。このような場合には、(濃度, エッジ値)の二次元空間の分割によって画像を対象物と背景に2値化する方法も比較的簡単かつ有効である[31],[59]。

Panda & Rosenfeld [59]はいくつかの分割線(識別関数)について比較実験を行なっている。ただし、この方法の欠点は、対象物および背景に対応した画素クラスタの分離度が低いために、分割線の自動決定が困難なことである。

この他に、濃淡画像の2値化にエッジ情報を利用したものとして[93],[94]などがある。

3.3 多次元特徴空間でのクラスタ化

多次元特徴空間での画素あるいは部分領域の分類・クラスタ化によって、画像を領域に分割する方法で、マルチスペクトル画像を対象にしたものが多く、リモートセンシング画像の解析によく利用されている。

3.3.1 画素のクラスタ化

Coleman & Andrews [10]は特徴として、スペクトル情報以外に、Sobel オペレータ[75]の出力等の二次情報も使い、K-means クラスタ化アルゴリズムに基づく領域分割法を開発した(図5)。なお、この

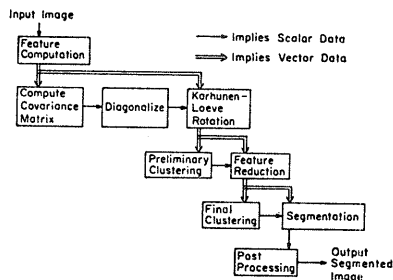


図5. Coleman segmentorの概要[10]

領域分割アルゴリズムについてはColeman[9]に詳しい。この方法では、前処理にも注意が払われており、クラスタ化結果の評価に基づいてクラスタ数(K)も自動的に決定されるが、かなりの計算量が予想される。

Narendra & Goldberg [48], Yoo & Huang [104]なども特徴空間での画素のクラスタ化による領域分割法を提案している。また、リモートセンシング等における画素別分類は手法としてはこの範疇に入るものが多い[68]。

3.3.2 領域のクラスタ化

まず、何らかの方法で画像を連結な部分画像群に分割し、次いで、特徴空間で部分画像の分類・クラスタ化を行なう方法である。例えば、Haralick & Kelly [21], Nagy & Tolaba [46], Robertson [68],[69], Jayroe [32], Gupta & Wintz [17],[18], Haralick & Dinstein [20], Fukada [16]などがある。なお、Fukada [16]は領域クラスタ化によって求まるクラスタの平均ベクトルによって画素を両分類している。

前処理としての分割では、適当な大きさの長方形領域への分割もあるが、一般には、2.で述べた領域分割法が応用されることが多い[18],[69]。

この種の方法は空間クラスタ化(spatial clustering)あるいは領域別分類(perfield classification)と呼ばれる。リモートセンシング画像の地勢分類などによく利用され、画素別分類に比べて、雑音に強く、領域としての分類精度が高い点に特長がある。

ここで述べた方法はいずれも(濃度などの)特徴のみによって画像を分割しており、画像平面上での空間的な連結性を、分類・クラスタ化の段階では、考慮していない。従って、特徴の類似した領域ならば空間的に離れていても、同一のラベルが割り当てられる。すなわち、1.の連結性に関する条件(ii)を満足しない。従って、領域について連結性が要求される場合には、連結していない領域についてラベル付けをし直さなければならない[72]。なお、Ohlander-Price segmentorでは、ヒストグラムのピーク検出によって領域を抽出した段階でこの連結成分処理を行ない、領域の連結性を確保している[53]。

4. 領域分割における意味情報の利用

リモートセンシング画像の処理などでは、最終的には、スペクトル情報のみを用い、3.3で述べたようなパターン認識的な手法によってパターン分類を行うことが多いが、シーン・アナリシスでは、単なるスペクトル情報以外に、領域の空間的な関係や意味情報をも考慮に入れた解析が行なわれている。

これまでの研究では、領域分割処理によって得られた領域を節点とし、領域間の関係を辺で表すグラフを作成し、それとあらかじめ与えられている処理対象に関するグラフとの照合によって各領域を解釈する方法 (descriptive approach) がとられてきた [4], [22], [63]。この方法は対象物に対応した領域が正しく抽出されていることが前提になっているが、実際には領域分割に問題がある。統合法を例にとると、対象物に対応した領域が得られるまで統合を繰り返そうとした場合、正しい対象物領域が来る前に過統合が生じる。そこで、領域分割の段階で画像の意味情報を利用することが考えられた。以下では、意味情報の利用法について、具体例を紹介する。

4.1 決定理論的枠組の利用

Yakimovsky & Feldman [14], [9], [98] は意味情報を確率の組で表現し、決定理論的枠組を用いて領域に解釈を施した。

まず、ヒューリスティック法によって、画像を領域に分割し、次に画面全体に対する解釈の確からしさ

$$P\{\text{global interpretation} \mid \text{context, measurements}\} \\ = \prod_i P\{R(i) \text{ is INT}(i) \mid \text{measurements on } R(i)\} \\ \times \prod_{i,j} P\{B(i,j) \text{ between INT}(i) \text{ and INT}(j) \mid \\ \text{measurements on } B(i,j)\}$$

を最大にする解釈 $\text{INT}(i), i=1, 2, \dots$ を求める。

各確率はあらかじめ領域の属性に基づいて近似しておき、実際のシステムでは、最も確からしい領域の解釈を固定し、その解釈に基づいて確率を修正し、新たに領域の解釈を1つ固定するといった操作を全領域の解釈が固定されるまで繰り返す。そして、隣接領域に対して同じ解釈

が与えられた時点で領域を統合する。

4.2 弛緩法の応用

Tenenbaum & Barrow [81], [82] は対象に関する知識を領域の解釈に対する“拘束”として表現し領域分割に利用した。

ヒューリスティック法によって画像を領域に分割し、各領域に対する解釈の候補として、その属性と矛盾しないすべての解釈を与える。次に、表1のような対象に関する拘束を利用し、各領域について矛盾する解釈を棄却する。そして、解釈が棄却されるたびに、周囲の解釈が生き残った解釈と矛盾しないか調べる。このようにして領域の解釈を徐々に限定し、隣接領域について異なる解釈が与えられる可能性がなくなった時点で統合する。ただし、このとき領域の解釈が一意に決まっているとはかぎらない。

表1. 領域の解釈に対する拘束 [82] (室内風景の場合)

1. Within (Picture within wall) (Doorknob within door)	2. Beside (Wall beside door) (Baseboard beside door)
3. Above (Wall above baseboard) (Baseboard above floor) (Door above floor)	3. Size (Small doorknob) (Small picture)

領域の解釈を限定していく過程は Waltz [92] のフィルタリング・アルゴリズムを一般化したものであり、Rosenfeld et al. [70] によって提案された弛緩法 [76] の離散モデルと考えることもできる。

4.3 その他の方法

4.1, 4.2 の方法はいずれもボトム・アップ的な統合法の枠組の中に知識を埋め込んでいるが、Harlow & Eisenbers [23] は、処理対象を画像内の対象物の相対的な位置関係が不変なもの (例えば胸部 X 線写真) に限って、対象物間の関係に関する知識を階層的な関係グラフで表現し、トップ・ダウン的な領域拡張法によって画像を領域に分割している。また最近、大田他 [56] はボトム・アップ処理とトップ・ダウン処理を組合せた方式を提案している。なお、処理対象に関する知識を用いた領域分割法については文献 [3], [77] でも解説されている。

5. 領域分割法の最近の傾向

Yakimovsky [98] 以来, 4. で述べたように, 領域分割の段階で対象に関する知識を利用するための枠組がいくつか提案されており, 一般的な知識表現の問題 [40] と関連して興味深い。知識を用いた領域分割法に共通する問題点は, 手法が複雑な事と同一の枠組がはたして任意の対象に応用できるかということである。注目すべきは多くの方法が (知識を用いない) 低レベルの領域分割結果から出発している点である。このことは低レベル処理の充実によって, 高レベルの処理が簡単になり——従って, 異なる処理対象への応用が容易になる——, 処理精度が向上する可能性を秘めている。

最近発表された領域分割法を眺めてみると, 低レベルの処理としての充実を目差したものが多くなっている。ここでは, 最近の方法に特徴的ないくつかの傾向を拾ってみよう。

5.1 エッジのぼけを抑えた平滑化

領域分割は本来, 特徴 (濃度など) の均一な領域の抽出を目的としているが, 実際の画像では雑音等の影響で特徴にばらつきが見られる。そこで, 領域分割の前処理として, 対象物の境界部分でのぼけを抑えた非線形平滑化操作が考えられている [3], [45], [89]

富田他 [89] は画像内の各点について, 平均化の窓の位置と大きさを動的に選択する方法を開発し, 田村他 [77], 池田他 [80] もこれを利用している。また, 松山他 [45] は窓の形にも変化をもたせた。浅野他 [3] は固定窓を用いて平均化の対象となる点を選択する方法を提案し, 平滑化の能力等について定量的に分析した。

5.2 エッジ情報の利用

領域分割とエッジ検出が相補的な関係にあることは 1. で述べた。2. で述べた方法では領域分割の信頼性を高める目的で, エッジ情報を直接利用するハイブリッドな手法がある [47], [51], [97]。統合法では過統合を防ぐためにエッジ情報の利用が特に有効である。また, Perkins [62] はエッジ領域の膨張・収縮操作によって, 画像を

特徴の異なる領域と境界領域に分割している。3. の方法でも, 領域のクラスタ化を行なう場合には, 前処理でエッジ情報が利用されている [20], [32]。

最近, 領域分割とエッジ検出を対比させた論文 [50], [67], [107] や 2 つのアプローチを統合的に議論した論文 [19] も目立つ。

5.3 プランの利用

粗画像に対する処理結果 (プラン) を利用して精画像を効率的に処理しようとする試みであり, ピラミッド型画像データ構造 [29] と関連して議論される。

エッジ検出では比較的古くからプランの利用が考えられていたが [35], [80], 領域分割でもいくつかの試みが報告されている [23], [37], [53], [102]。ピラミッド画像を利用する場合には, 粗画像としてピラミッドのどのレベルを選ぶかが問題となる。一般には, 適当に選ぶことが多いが, Levine [37], [38] はエッジ情報に基づいて領域分割の初期レベルを自動的に決定している。この方法は 5.2 と関連して興味深い。

5.4 テクスチャ画像の領域分割

本報告で紹介した方法はほとんどが, 画像の局所的な特徴として, 濃度やカラー等の値そのものを想定しているが, テクスチャ画像については値の配置を考慮しなければならぬ。また, 画素レベルでテクスチャ特徴が正しく計算できる場合には, 従来の方法をテクスチャ画像の領域分割に応用できる。テクスチャの解析については富田他 [86], [88] の解説に詳しい。

6. まとめ

画像処理サブルーチンパッケージ SPIDER の開発経験をもとに, 領域分割法を概観した。領域分割法を歴史的に眺めてみると, 初期にはエッジ検出法の1つの変形と見做された時期があり [44], 続いて, Brice & Fennema [6] 辺りからエッジ検出法と区別されるようになる。そして最近では, 両手法を統合的に捉える傾向がでてきた [19], [67]。

領域分割を目的としてこれまでに開発された手法は, 本報告で再出せなかったものを含めると,

かたりの数に上ると思われるが、性能についての比較研究は全く行われていない。Yasnoff et al. [9]は分割誤差を測る尺度を提案し、心理実験を行なったが、手法の比較は行っていない。

また、昨年の IEEE Computer Society Conference on Pattern Recognition and Image Processing において、Image Segmentation Session への投稿者は同一のデータを使用しているが、これも性能の比較には至っていない。比較研究は今後の重要な課題である。

領域分割アルゴリズムを利用する場合、まず与えられた処理対象と処理目的とによってアプローチとして領域分割法が適当か否かを判断する必要があるが、それ以外に、各種手法の評価が確立していない現状では、各アルゴリズムにおいて(暗に)仮定されている画像の性質と処理対象画像の性質が一致しているか否かを各自が判断しなければならない。そのために本報告が少しでも役立てば幸いである。

最後に、SPIDERの領域分割ルーチン一覧を表2に示す。なお、SPIDERは、これらのルーチン以外に、領域分割に関連するものとして、閾値選択と閾値処理のルーチンをそれぞれ数種類含んでいる。

表2. SPIDERの領域分割ルーチン

ルーチン名	機能
RMRG1	Muerle & Allen [43]
RMRG2	Brice & Fennema [6]
RMRG3	Tomita et al. [87]
RSAM	Horowitz & Pavlidis [25]
RCRS	Yokoya et al. [103]
SLTH	(Ohlander et al. [53] ただし、2つの閾値を用いたマスク 領域の二値化のみ)

References

Abbreviations

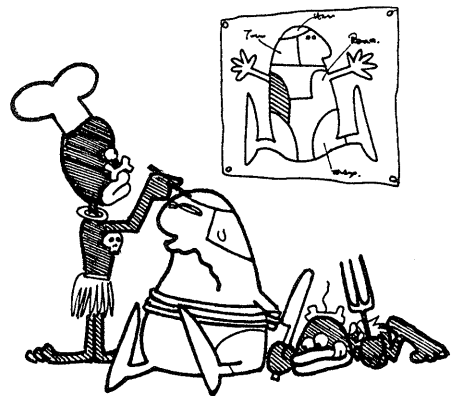
- PR: Pattern Recognition
- AI: Artificial Intelligence
- CGIP: Computer Graphics and Image Processing
- PRIP'xx: Proceedings of 19xx IEEE Computer Society Conference on Pattern Recognition and Image Processing

- nIJCP: Proceedings of n-th International Joint Conference on Pattern Recognition
- nIJCAI: Proceedings of n-th International Joint Conference on Artificial Intelligence

- [1] K.Akita and H.Kuga, "Towards understanding color ocular fundus images," 6IJCAI, pp.7-12, 1979.
- [2] 秋山, 金子, 村井, 奥田, "経済的な教師なし分類の一手法," 情報処理学会論文誌 22-2, 1979.
- [3] 浅野, 橋本, 大塚, 保田, "領域解析に適したフィルターの提案とその比較," 情報処理, PRL 77-13, 1977.
- [4] H.G.Barrow and R.J.Popplestone, "Relational description in picture processing," in Machine Intelligence 6, Edinburgh Univ. Press, 1977.
- [5] M.B.Bartz, "Optimizing a video preprocessor for OCR," 1IJCAI, pp.79-90, 1969.
- [6] C.R.Brice and C.L.Fennema, "Scene analysis using regions," AI, Vol.1, No.3, pp.205-226, 1970.
- [7] P.C.Chen and T.Pavlidis, "Segmentation by texture using a co-occurrence matrix and a split-and-merge algorithm," CGIP, Vol.10, No.2, pp.172-182, 1979.
- [8] C.K.Chow and T.Kaneko, "Automatic boundary detection of the left ventricle from cineangiograms," Comput. Biomed. Res., Vol.5, pp.388-410, 1972.
- [9] G.Coleman, "Image segmentation by clustering," USCIPI Report 750, Univ. of Southern California, 1977.
- [10] G.B.Coleman and H.C.Andrews, "Image segmentation by clustering," Proc. IEEE, Vol.67, No.5, pp.773-785, 1979.
- [11] L.S.Davis, A.Rosenfeld and J.S.Weszka, "Region extraction by averaging and thresholding," IEEE Trans., Vol.SMC-5, No.3, pp.383-388, 1975.
- [12] W.Doyle, "Operations useful for similarity-invariant pattern recognition," J.ACM, Vol.9, pp.259-267, 1962.
- [13] D.Ernst, B.Bargel and F.Holdermann, "Processing of remote sensing data by a region growing algorithm," 3IJCP, pp.679-683, 1976.
- [14] J.A.Feldman and Y.Yakimovsky, "Decision theory and artificial intelligence: I. A semantics-based region analyzer," AI, Vol.5, No.4, pp.349-371, 1974.
- [15] E.C.Freuder, "Affinity: A relative approach to region finding," CGIP, Vol.5, No.2, pp.254-264, 1976.
- [16] Y.Fukada, "Spatial clustering procedures for region analysis," 4IJCP, pp.329-331, 1978.
- [17] J.N.Gupta and P.A.Wintz, "Computer processing algorithm for locating boundaries in digital pictures," 2IJCP, pp.155-156, 1974.
- [18] J.N.Gupta and P.A.Wintz, "A boundary detection algorithm and its applications," IEEE Trans., Vol.CAS-22, No.4, pp.351-362, 1975.
- [19] R.M.Haralick, "Edge and region analysis for digital image data," CGIP, Vol.12, No.1, pp.60-73, 1980.
- [20] R.M.Haralick and I.Dinstein, "A spatial clustering procedure for multi-image

- data," IEEE Trans., Vol.CAS-22, No.5, pp.440-449, 1975.
- [21] R.M.Haralick and G.L.Kelly, "Pattern recognition with measurement and spatial clustering for multiple images," Proc. IEEE, Vol.57, No.4, pp.654-665, 1969.
- [22] C.A.Harlow, "Image analysis and graphs," CGIP, Vol.2, No.1, pp.60-82, 1973.
- [23] C.A.Harlow and S.A.Eisenbeis, "The analysis of radiographic images," IEEE Trans., Vol.C-22, No.7, pp.678-689, 1973.
- [24] W.S.Holmes, "Automatic photointerpretation and target location," Proc.IEEE, Vol.54, No.12, pp.1679-1686, 1966.
- [25] S.L.Horowitz and T.Pavlidis, "Picture segmentation by a directed split-and-merge procedure," 2IJCP, pp.424-433, 1974.
- [26] S.L.Horowitz and T.Pavlidis, "Picture segmentation by a tree traversal algorithm," J.ACM, Vol.23, No.2, pp.368-388, 1976.
- [27] S.L.Horowitz and T.Pavlidis, "A graph-theoretic approach to picture processing," CGIP, Vol.7, No.2, pp.282-291, 1978.
- [28] 中田清野, "図形のセグメンテーション," 信学論(D), Vol.J59-D, No.6, pp.438-439, 1976.
- [29] T.Ichikawa, "A pyramidal representation of images and its feature extraction facility," 信学技報, PRL 78-41, 1978.
- [30] 池田谷内田, 辻, "テクスチャ領域の境界線の抽出," 情報学会コンピュータ研究会 4-3, 1980.
- [31] 猪瀬, 菅藤, 中川, "曲線図形の識別の一方式——出土古瓦の唐草紋様への応用——," 信学論(D), Vol.J61-D, No.6, pp.419-426, 1978.
- [32] R.R.Jayroe, Jr., "Unsupervised spatial clustering with spectral discrimination," NASA Tech. Note, TN D-7312, 1973.
- [33] 金出, "人工知能の目目——曲面物体と風景の認識——," bit臨時増刊ロポント, pp.695-710, 1976.
- [34] T.Kanade, "Region segmentation: Signal vs. semantics," 4IJCP, pp.95-105, 1978.
- [35] M.D.Kelly, "Edge detection in pictures by computer using planning," in Machine Intelligence 6, Edinburgh Univ. Press, pp.397-409, 1971.
- [36] R.L.Kettig and D.A.Landgrebe, "Classification of multispectral image data by extraction and classification of homogeneous objects," IEEE Trans., Vol.GE-14, No.1, pp.19-26, 1976.
- [37] M.D.Levine, "Region analysis using a pyramid data structure," McGill Univ. Tech. Repo. No.78-5R, March 1978.
- [38] M.D.Levine and J.Leemet, "A method for non-purposive picture segmentation," 3IJCP, pp.494-498, 1976.
- [39] D.L.Milgram and D.J.Kahl, "Recursive region extraction," CGIP, Vol.9, No.1, pp.82-88, 1979.
- [40] M.Minsky, "A framework for representing knowledge," in The Psychology of Computer Vision, McGraw-Hill, pp.211-277, 1975.
- [41] 森, 大津, "認識問題としての二値化と各種方法の検証," 情報学会イメージング研究会 15-1, 1977.
- [42] J.L.Muerle, "Some thoughts on texture discrimination by computer," in Picture Processing and Psychopictorics, Academic Press, pp.371-379, 1970.
- [43] J.L.Muerle and D.C.Allen, "Experimental evaluation of techniques for automatic segmentation of objects in a complex scene," in Pictorial Pattern Recognition, Thompson, pp.3-13, 1968.
- [44] 長尾, 金出, "パターン認識における線線の抽出," 信学誌, Vol.55, No.12, pp.1618-1627, 1972.
- [45] 長尾, 松山, "エッジを採ったスムージング," 信学技報, PRL 77-67, 1978.
- [46] G.Nagy and J.Tolaba, "Nonsupervised crop classification through airborne multi-spectral observation," IBM J. Res. Develop., Vol.16, No.2, pp.138-153, 1972.
- [47] P.M.Narendra and M.Goldberg, "A graph-theoretic approach to image segmentation," PRIP'77, pp.248-256.
- [48] P.M.Narendra and M.Goldberg, "A non-parametric clustering scheme for LANDSAT," PR, Vol.9, No.4, pp.207-215, 1977.
- [49] P.M.Narendra and M.Goldberg, "Image segmentation with directed trees," IEEE Trans., Vol.PAMI-2, No.2, pp.185-191, 1980.
- [50] R.Nevatia and K.Price, "A comparison of some segmentation techniques," Proc. Image Understanding Workshop, pp.55-57, 1977.
- [51] 新田, 渡辺, 片山, 橋本, "補遺線による濃淡画像の局所領域解析と領域分割," 第9回画像工学コンファレンス論文集, pp.87-90, 1978.
- [52] R.Ohlander, "Analysis of natural scenes," Ph.D Thesis (Comp.Sci.), Carnegie-Mellon Univ., 1975.
- [53] R.Ohlander, K.Price and D.R.Reddy, "Picture segmentation using a recursive region splitting method," CGIP, Vol.8, No.3, pp.313-333, 1978.
- [54] 大田, 金出, 坂井, "計算機による屋外風景写真の認識——画像の全領域分割と記述的モデルを用いた解析——," 情報学会イメージング研究会 10-3, 1977.
- [55] 大田, 金出, 坂井, "全領域分割処理によるカラー画像情報の構造化," 情報処理, Vol.19, No.12, pp.1130-1136, 1978.
- [56] 大田, 金出, 坂井, "ボトムアップ制御とトップダウン制御の組合せによる領域解析," 情報学会論文誌, Vol.21, No.2, pp.116-124, 1980.
- [57] 大津, "濃度分布からの閾値決定法," 昭和三十七年情報学会全国大会, No.145, 1977.
- [58] N.Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," IEEE Trans., Vol.SMC-9, No.1, pp.62-66, 1979.
- [59] D.P.Panda and A.Rosenfeld, "Image segmentation by pixel classification in (gray level, edge value) space," IEEE Trans., Vol.C-27, No.9, pp.875-879, 1978.
- [60] T.Pavlidis, "Segmentation of pictures and maps through functional approximation," CGIP, Vol.1, No.4, pp.360-372, 1972.
- [61] T.Pavlidis, "Waveform segmentation through functional approximation," IEEE Trans., Vol.C-22, No.7, pp.689-697, 1973.
- [62] W.A.Perkins, "Area segmentation of images using edge points," IEEE Trans., Vol.PAMI-2, No.1, pp.8-15, 1980.
- [63] F.P.Preparata and S.R.Ray, "An approach to artificial nonsymbolic cognition," Inform. Sci., Vol.4, No.1, pp.65-86, 1972.
- [64] J.M.S.Prewitt and M.L.Mendelsohn, "The analysis of cell images," Ann. N.Y. Acad. Sci., Vol.128, pp.1035-1053, 1966.
- [65] K.Price, "Change detection and analysis in multispectral images," Ph.D Thesis (Comp. Sci.), Carnegie-Mellon Univ., 1976.
- [66] K.E.Price, "Segmentation," PRIP'79, pp.512-514.
- [67] E.M.Riseman and M.A.Arbib, "Computational

- techniques in the visual segmentation of static scenes," CGIP, Vol.6, No.3, pp.221-276, 1977.
- [68] T.V.Robertson, "Extraction and classification of objects in multispectral images," Proc. Symp. on Machine Processing of Remotely Sensed Data, pp.27-34, 1973.
- [69] T.V.Robertson, K.S.Fu, and P.H.Swain, "Multispectral image partitioning," LARS Inf. Note 071373, Purdue Univ., 1973.
- [70] A.Rosenfeld, R.A.Hummel and S.W.Zucker, "Scene labeling by relaxation operations," IEEE Trans., Vol.SMC-6, No.6, pp.420-433, 1976.
- [71] A.Rosenfeld and A.C.Kak, "Digital Picture Processing," Academic Press, 1976.
邦訳:長尾也, ティジタル画像処理, 近代科学社, 1978.
- [72] A.Rosenfeld and J.Pfaltz, "Sequential operations in digital picture processing," J.ACM, Vol.13, No.4, pp.471-494, 1966.
- [73] T.Sakai, T.Kanade and Y.Ohta, "Model-based interpretation of outdoor scene," 3IJCP, pp.581-585, 1976.
- [74] 坂井, 長尾, 橋本, "領域分割法による図形の記述," 第3回画像工学コンファレンス論文集, pp.21-24, 1972.
- [75] 坂根, 田村, "SPIDER開発を通じて見たデジタル画像処理アルゴリズムの現状(3) — エッジ線の検出 —," 情報学会コンピュータビジョン研究4-4, 1980.
- [76] 坂根, 同上(2) — 弛緩法の応用 —, 同上3-3, 1979.
- [77] 白井, "物体・背景の認識と理解," 情報処理, Vol.19, No.10, pp.969-976, 1978.
- [78] 田村, 坂根, 富田, 橋本, 坂上, 金子, "SPIDER — ネットワーク画像処理ソフトウェアパッケージ," 情報学会コンピュータビジョン研究3-7, 1979.
- [79] 田村, 山田, "テクスチャ領域の分割への自己回帰モデルの有用性の検討," 情報処理, PRL 78-88, 1979.
- [80] S.Tanimoto and T.Pavlidis, "A hierarchical data structure for picture processing," CGIP, Vol.4, No.2, pp.104-119, 1975.
- [81] J.M.Tenenbaum and H.G.Barrow, "IGS: a paradigm for integrating image segmentation and interpretation," 3IJCP, pp.504-513, 1976.
- [82] J.M.Tenenbaum and H.G.Barrow, "Experiments in interpretation-guided segmentation," AI, Vol.8, No.3, pp.241-274, 1977.
- [83] J.M.Tenenbaum and S.Weyl, "A region-analysis system for interactive scene analysis," 4IJCAI, pp.682-687, 1975.
- [84] 坂上, "領域分割法による図形の特徴抽出," 昭和三十九年情報学会全国大会, No.302, 1975.
- [85] 富田, 田中(祐), 田村, 田中(清), "血管構造に基づく眼底写真の結合せ," 情報処理, Vol.19, No.2, pp.135-144, 1978.
- [86] 富田, 白井, 辻, "テクスチャの解析," 情報処理, Vol.19, No.2, pp.173-182, 1978.
- [87] F.Tomita, Y.Shirai and S.Tsuji, "Description of textures by structural analysis," 6IJCAI, pp.884-889, 1979.
- [88] 富田, 田村, "SPIDER開発を通じて見たデジタル画像処理アルゴリズムの現状(4) — テクスチャ解析 —," 情報学会コンピュータビジョン研究5-3, 1980.
- [89] 富田, 谷内田, 辻, "テクスチャ識別のための非線形フィルタ," 信学論(D), Vol.58-D, No.2, pp.102-103, 1975.
- [90] 辻, 藤原, "言語的方法による濃淡画面の分割," 信学論(D), Vol.59-D, No.12, pp.866-873, 1976.
- [91] S.Tsuji and F.Tomita, "A structural analyzer for a class of textures," CGIP, Vol.2, No.3, pp.216-231, 1973.
- [92] D.L.Waltz, "Understanding line drawing of scenes with shadows," in The Psychology of Computer Vision, McGraw-Hill, pp.19-91, 1975.
- [93] 渡辺, 沼上, 岸山, 玄地, "濃淡図形の領域検出に関する一手法 — 細線の画像処理への応用 —," 昭和三十九年情報学会全国大会, No.102, 1972.
- [94] J.S.Weszka, R.N.Nagel and A.Rosenfeld, "A threshold selection technique," IEEE Trans., Vol.C-23, No.12, pp.1322-1326, 1974.
- [95] J.S.Weszka, "A survey of threshold selection techniques," CGIP, Vol.7, No.2, pp.259-265, 1978.
- [96] Y.Yakimovsky, "On the recognition of complex structures: Computer software using artificial intelligence applied to pattern recognition," 2IJCP, pp.345-353, 1974.
- [97] Y.Yakimovsky, "Boundary and object detection in real world images," J.ACM, Vol.23, No.4, pp.599-618, 1976.
- [98] Y.Yakimovsky and J.A.Feldman, "A semantics-based decision theory region analyzer," 3IJCAI, pp.580-588, 1973.
- [99] W.A.Yasnoff, J.K.Mui and J.W.Bacus, "Error measures for scene segmentation," PR, Vol.9, No.4, pp.217-231, 1977.
- [100] 橋本, 浅野, 大久保, 田中, "不対称類似性の概念に基づく濃淡画像の領域分割," 情報処理, Vol.18, No.12, pp.1223-1230, 1977.
- [101] 橋本, 浅野, 大久保, 田中, "濃淡画像からの対象物の切り出し," 情報処理, Vol.19, No.8, pp.730-737, 1978.
- [102] 橋本, 北橋, 浅野, 田中, "階層的領域拡張法," 昭和三十九年情報学会全国大会, No.4F-1, 1978.
- [103] N.Yokoya et al., "Image segmentation scheme based on a concept of relative similarity," 4IJCP, pp.645-647, 1978.
- [104] J.R.Yoo and T.S.Huang, "Image segmentation by unsupervised clustering and its applications" Purdue Univ. Tech. Repo. TR-EE 78-19, 1978.
- [105] S.W.Zucker, "Region growing: Childhood and adolescence," CGIP, Vol.5, No.3, pp.382-399, 1976.



領域分割?!