

カラーヒストグラムを利用した フルカラー連続生体断面画像からの抽出法の検討

本多英晴^{*†}，竹本智子^{†#}，横田秀夫[†]，覚正信徳[†]，
姫野龍太郎^{†#}，三島健稔^{†#}，大竹政光^{*}

^{*}明治大学大学院 理工学研究科
神奈川県川崎市多摩区東三田 1 - 1 - 1
e-mail:hideharu@riken.jp

[†]独立行政法人 理化学研究所 生体力学シミュレーション特別研究ユニット
埼玉県和光市広沢 2 - 1

[#]埼玉大学大学院 理工学研究科
埼玉県さいたま市桜区下大久保 2 5 5

1. はじめに

3次元内部構造顕微鏡(3D-ISM) [1, 2]からは，高精細なフルカラー連続生体断面画像の取得が可能である．この画像から生体組織領域の抽出・認識を行うことで，生体三次元モデルの構築が期待できる．

現在それらは専門家の手作業に頼っているが，作業量が膨大なため自動化が望まれている．そのため，コンピュータによる自動抽出法の研究がなされているが，特に生体フルカラー画像では決め手となる手法はない．また従来手法では，色や位置，形状など，多くの情報を特徴量とした抽出を行っているため，どの情報が有効であるかが不明である．

そこで我々は，特徴量を色情報に限定し，生体フルカラー断面画像からの抽出法の検討を行っており，その有効性を示してきた[3]．本稿では，カラーヒストグラムを利用した抽出法における，頻度を利用した領域判別の可能性，およびカラーヒストグラムを拡張するパラメータの検討を行った．

2. フルカラー画像におけるセグメンテーション

2.1. フルカラー画像

画像の構成単位は画素(Pixel)であり，画素が集まって画像を形成する．フルカラー画像の場合，画素はR, G, Bそれぞれ8bitで表される画素値を持つ．Rは赤，Gは緑，Bは青である．RGBそれぞれは独立した変数であるため，画素値は3次元のベクトルで表すことができる．例えば，ある画素Pの画素値をR=198, G=69, B=14とした場合，Pの画素値は(198, 69, 14)と表すことができる．また，画素値を3次元空間に表現したものをRGB色空間(Fig. 1)と呼ぶ．画素値はRGB色空間上の一点に対応する．

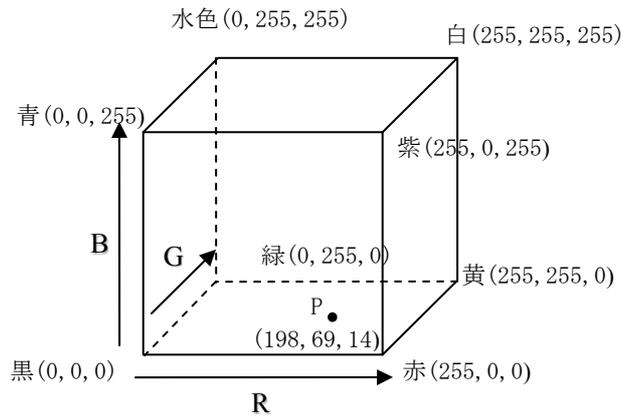


Fig. 1 RGB 色空間

2.2. セグメンテーション

一般に、セグメンテーションとは画像をある一定の特徴をもつ小領域ごとに分割する処理であり、領域分割とも呼ばれる[4]。本研究でのセグメンテーションとは、注目する特定部位の領域を識別し、抽出する処理までを指すものとする。抽出する領域を関心領域、それ以外を非関心領域と呼ぶ。セグメンテーションの例をFig. 2に示す。この例では楕円形の領域に注目するものとし、その領域を関心領域、それ以外の領域は非関心領域と呼ぶ。つまり、この画像に対するセグメンテーションとは関心領域である楕円形のみを抽出することである。

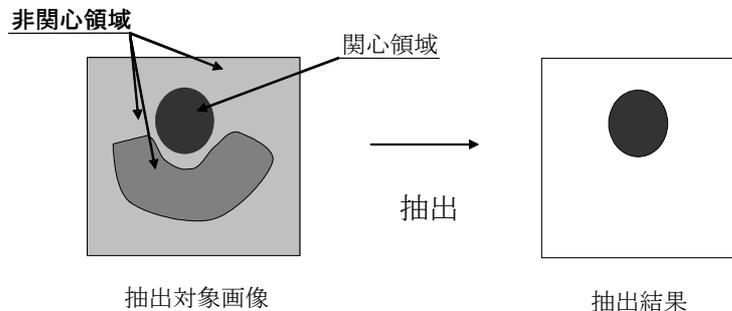


Fig. 2 セグメンテーション

3. 色情報に基づく従来手法の問題点

色情報に基づく基本的な抽出手法として画素値への閾値の適用が挙げられる。この手法には大きく2つの問題がある。

まず、RGB 色空間において、画素値が複雑な分布をしている領域の抽出が不可能であることである。閾値による抽出は RGB 色空間上で直方体で画素値を選択することに他ならない。本研究で対象としている生体画像では、RGB 色空間上で画素値が複雑な分布をしているため、直方体で関心領域のみを選択することはできない。

次に、関心領域の画素値と非関心領域の画素値が重複した場合に対処できないこと

である。閾値による抽出では、非関心領域に関心領域と同じ画素値が含まれていた場合に、その非関心領域に関心領域とみなす誤抽出（過抽出）が起こる。これは関心領域と非関心領域の画素値が重複した場合は、その判別ができないことを意味する。

以上の問題点を解決するために、カラーヒストグラムを利用した抽出手法を提案する。次章より提案手法を詳述する。

4. カラーヒストグラムを用いた抽出法

4.1. カラーヒストグラム

カラーヒストグラムとは、RGB 色空間において画素値の出現頻度を表したものである。通常、画像には同じ画素値をもつ画素が複数存在するため、画素値に出現頻度を与えることができる。提案手法ではこのカラーヒストグラムを利用する。

4.2. 教師カラーヒストグラムによる抽出

本手法では、各領域のカラーヒストグラムにおける各画素値の出現頻度を、その領域に含まれる可能性として利用する。このようにカラーヒストグラムを利用することで、画素値がどの領域に含まれる可能性が高いかを判別することができる。

関心領域を抽出するため、まず関心領域及び非関心領域それぞれのカラーヒストグラムを作成する。このカラーヒストグラムを教師カラーヒストグラムとよぶ。Fig. 3 及びFig. 4は教師カラーヒストグラムの例を示しており、青色に近ければ出現頻度が低く、赤色に近ければ高いことを意味する。両カラーヒストグラムの各画素値の出現頻度の大小を比較し、関心領域の頻度が大きい画素値を、可能性が高いとして選択する。

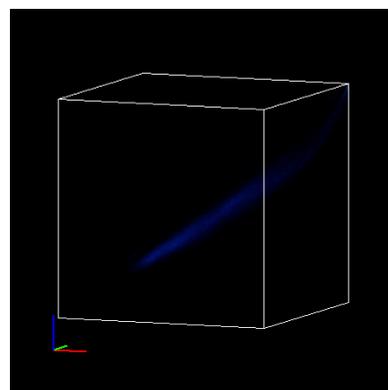
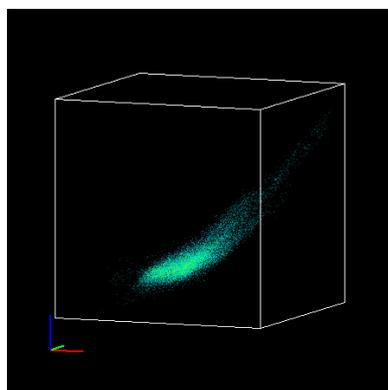


Fig. 3 関心領域教師カラーヒストグラム Fig. 4 非関心領域教師カラーヒストグラム

通常、関心領域と非関心領域で画素値が重なった場合は、色情報のみでは領域判別は不可能である。これは閾値抽出でも同様である。しかし、カラーヒストグラムの頻度情報を用いることで、領域の可能性を、判別に利用することができる。また、両領域の可能性が同程度である場合は、判別を人間に委ねることも可能である。本稿における検討では、領域判別には可能性が少しでも高い方の領域を採用した。次節に提案手法の生体連続断面画像への適用可能性を述べる。

4.3. 教師カラーヒストグラムによる生体断面画像からの抽出における問題点

教師カラーヒストグラムによる抽出を，生体連続断面画像へ適用する場合を考える．まず，教師画像を利用して画素値とその出現頻度を与えることで，関心領域，非関心領域の教師カラーヒストグラムを作成する．教師画像は，画素値とその出現頻度さえ適切に表現したものであればどのような画像でもよいが，ここでは臓器の任意断面の正解画像を利用する．一般に，生体断面画像の正解画像の作成は専門家の抽出による．次に連続断面の全画素に対し，両カラーヒストグラムにおける出現頻度を比較し，頻度が大きい領域へ判別する．最後に，関心領域と判断された画素を抽出することで，領域抽出を達成する．

しかしながら，本研究で対象とする生体連続断面画像は，断面毎に色が僅かに変化する．そのため，両カラーヒストグラムには存在しない画素値が出現した場合は，その判別ができない問題が発生する．この問題の対処として，ロバストカラーヒストグラムによる抽出を提案する．

4.4. ロバストカラーヒストグラムによる抽出

ロバストカラーヒストグラムとは，教師カラーヒストグラムに存在する画素値の出現頻度を利用して，存在しない画素値の出現頻度を推定したものである．本研究の抽出の対象である臓器は，断面が変化しても同じ臓器であれば色の変化は小さいという特徴がある．色の変化が小さいため，近い画素値における出現頻度は同程度になる．つまり，教師カラーヒストグラムに存在する画素値とそれに近い画素値の出現頻度はほぼ同じになると考えられる．そこで，教師カラーヒストグラムの各画素値の出現頻度を RGB 色空間上で回りに伝播することで，教師カラーヒストグラムに存在しない画素値の出現頻度の推定を行う．

出現頻度の伝播方法は以下のとおりである．ロバストカラーヒストグラムの画素値 (l, m, n) の頻度 r_{lmn} は，教師カラーヒストグラムの画素値 (i, j, k) の頻度 t_{ijk} を用いて，式 (1) のように表される．

$$r_{lmn} = \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} \sum_{k=0}^{255} f(d((l, m, n), (i, j, k))) \times t_{ijk} \quad (1)$$

ここで $d((l, m, n), (i, j, k))$ は (l, m, n) と (i, j, k) の RGB 色空間上でのユークリッド距離， $f(d)$ は距離 d に応じて減少する係数関数である．本手法では $f(d)$ としてガウス関数 (式 (2)) に基づく式 (3) を用いた． $\sigma = 1.0$ と $\sigma = 10.0$ の $f(d)$ のグラフを Fig. 5, Fig. 6 に示す．

$$f(x) = \frac{1}{N} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

$$f(d) = e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式 (3) において， σ は任意に設定可能であり， σ の値によって伝播の仕方を変化させることができる．そのため， σ はロバストカラーヒストグラムを決定付けるものであ

る. Fig. 7, Fig. 8にロバストカラーヒストグラム of 例を示す. Fig. 7, Fig. 8は $\sigma = 2.6$ としてFig. 3及びFig. 4から作成した.

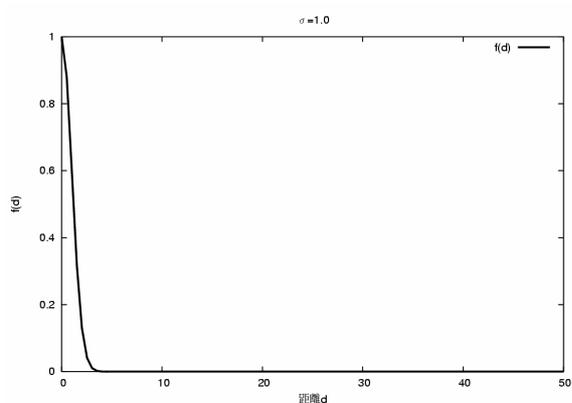


Fig. 5 $\sigma = 1.0$ の $f(d)$

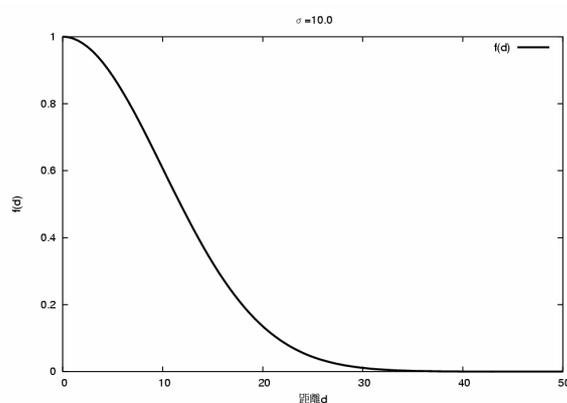


Fig. 6 $\sigma = 10.0$ の $f(d)$

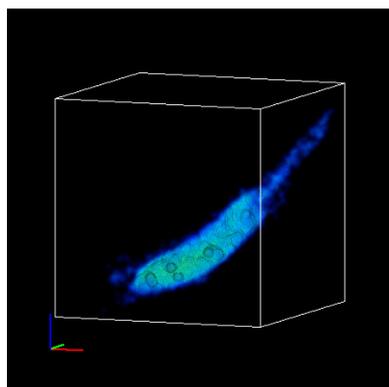


Fig. 7 関心領域ロバストカラーヒストグラム

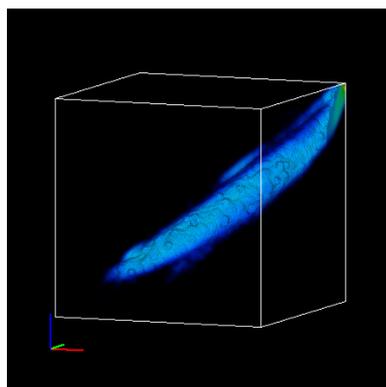
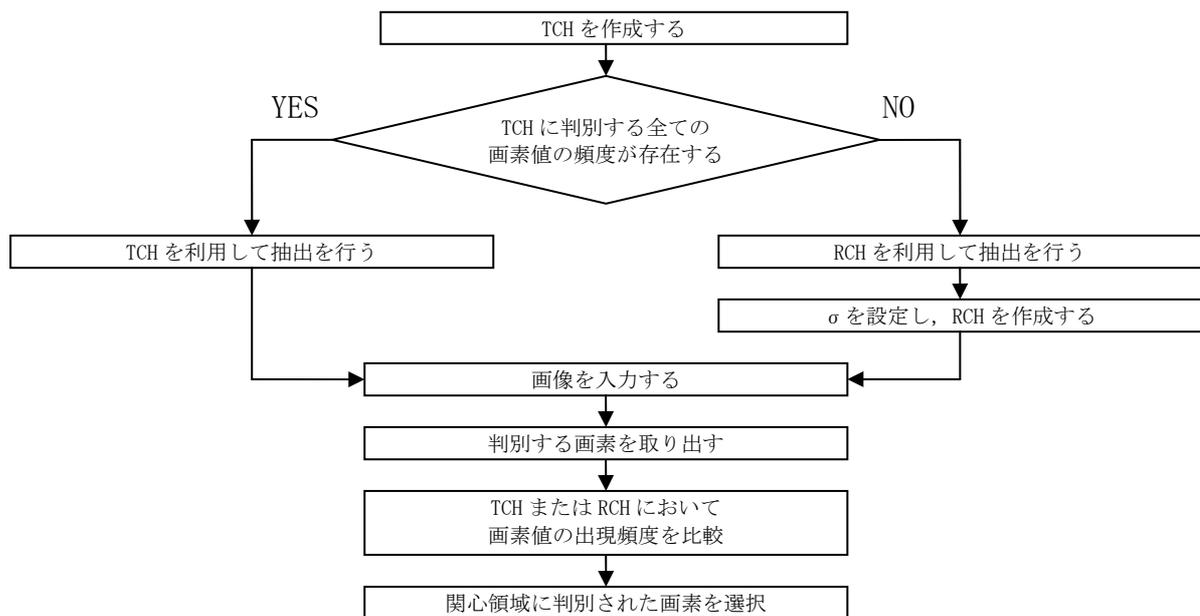


Fig. 8 非関心領域ロバストカラーヒストグラム

4. 5. 提案手法まとめ

以上までに提案した2つの手法をまとめる. 処理の流れをFig. 9に示す. 正解画像から作成した教師カラーヒストグラムが, 判別する全ての画素値の出現頻度をもつ場合は, 教師カラーヒストグラムによって抽出を行う. 一方, 教師カラーヒストグラムに存在しない画素値が出現する場合は, ロバストカラーヒストグラムによる抽出を行う. 本稿で対象となる生体連続断面画像では, ロバストカラーヒストグラムを用いて抽出を行う.



TCH: 教師カラーヒストグラム
RCH: ロバストカラーヒストグラム

Fig. 9 処理の流れ

5. 基礎実験

5.1. 基礎実験 1 (閾値抽出が不可能である画像)

人工画像を用いて提案手法の有効性の検討を行った。Fig. 10 に対象画像 (256×256pix.) を示す。関心領域は左部 256×128pix. とする。関心・非関心領域ともに画素値の分布は $0 \leq R \leq 255$, $0 \leq G \leq 255$, $0 \leq B \leq 255$ である。このため、閾値で関心領域を抽出することは不可能である。なお、この画像は関心領域と非関心領域で重複する画素値が存在しない。Fig. 12に閾値を $64 \leq R \leq 192$, $64 \leq G \leq 192$, $64 \leq B \leq 192$ とした抽出例を示す。また、関心領域は赤、非関心領域は緑、閾値設定範囲は中央の緑で表した。このような閾値範囲では関心領域と非関心領域双方の領域を選択するため、関心領域のみを抽出することは不可能であった。

この画像に対し、教師カラーヒストグラムを用いる提案手法を適用した。その結果をFig. 11に示す。Fig. 11で黒い領域は関心領域と判別されなかったことを意味する。この実験では、判別する画素値の出現頻度は全て教師カラーヒストグラムに含まれているため、教師カラーヒストグラムで判別が可能であった。さらに、関心領域・非関心領域において過抽出や未抽出はまったくなかった。以上から提案手法は判別する画素値が重ならない場合では、閾値抽出が不可能であった領域の抽出も可能であることが示された。

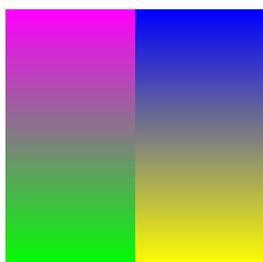


Fig. 10 基礎実験1対象画像

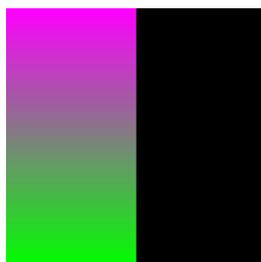


Fig. 11 基礎実験1提案手法抽出結果

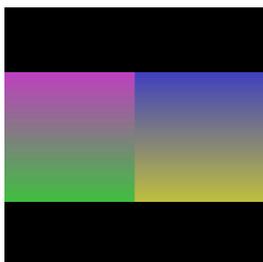


Fig. 12 基礎実験1閾値抽出結果

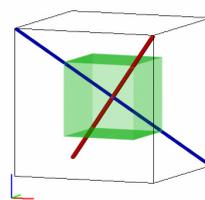


Fig. 13 画素値分布と閾値適用例

5.2. 基礎実験2 (領域間で色が重複する画像)

Fig. 14に示す人工画像(256×256pix.)を用いて頻度を用いた関心領域と非関心領域の判別の検討を行った. 関心領域は画像左部 256×128pix. とする. この画像では関心領域と非関心領域で青色が重複しているが, 非関心領域に多く出現していることがわかる. 閾値による抽出では, 青色がどの領域なのか区別できない.

この画像に対し, 教師カラーヒストグラムを用いる提案手法を適用した. その結果をFig. 15に示す. 青色を非関心領域と判断したため, 関心領域内の青色は抽出できなかったが, 非関心領域は正しく判断することができた. もし, 青色を関心領域とした場合は, 非関心領域も関心領域として抽出するため, さらにエラーが大きくなる. 提案手法は色情報に基づくため, 重複した色を関心領域と非関心領域に分離して抽出することは不可能であるが, 頻度情報を利用してエラーを低く抑えることができることが示された. また, どちらも可能性がある場合は, その領域だけ最終的な判断を人間の手に委ねることも可能である. 以上から, 頻度を用いて領域判別を行うことは有効であるといえる.

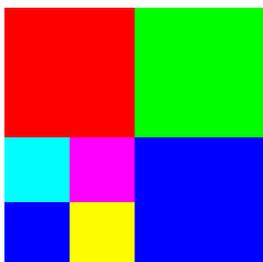


Fig. 14 基礎実験2対象画像

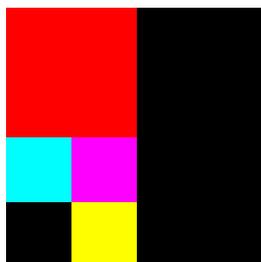


Fig. 15 基礎実験2提案手法抽出結果

6. 生体画像に対する実験

6.1. 実験対象生体画像

実験に用いた生体画像は 3D-ISM で撮影したマウス (ICR ♀ 8 週齢) の連続断面画像である。対象試料は次のように作成した。まず、対象試料に麻酔を施した後、水酸化アルミニウム 0.9ml (制酸薬) で胃洗浄を施し、その後蛍光物質 (FITC) 含有 10%ゼラチン水溶液を 0.7ml 嚥下させた。屠殺後、3D-ISM で観察を行うために 35mm x 24mm x 150mm の型枠に OCT コンパウンド (サクラファインテック (株)) で埋め、 -80°C 条件で凍結包埋を行った。

次に、3D-ISM を用いて、白色光条件下とマルチバンドフィルターを用いた蛍光条件下で連続断面像の撮影を行った。各断面の分解能は $(x, y) = (50\ \mu\text{m}, 50\ \mu\text{m})$ 、断面間隔を $20\ \mu\text{m}$ として撮影を行った。取得した画像の総数および解像度は、白色光条件下での画像 (以下、白色光画像) および蛍光条件下での画像 (以下、蛍光画像) とともに 1401 枚、 $640 \times 480\text{pix.}$ であった。

以上で得たマウス連続断面白色光画像を対象に、マウスの胃領域を抽出することを本実験の目的とする。なお、比較対象の画像が作成できなかったため、あらかじめ小腸は抽出/評価対象から除外した。

6.2. 正解画像

正解画像は蛍光画像から作成した。マウスに嚥下させた蛍光物質は消化器系にのみ存在するため、蛍光画像は消化器系のみが強調された画像となる。そこで、蛍光画像の G 値に対し、自動閾値 [5] を設定して胃の抽出を行った。得られた蛍光画像の胃領域を白色光画像に適用したものを正解画像とした。なお、上方および下方の断面では抽出が不完全であり、正解画像として不適切であったため本実験では利用しないものとした。

6.3. 実験

6.3.1. 教師カラーヒストグラムによる抽出

上記のマウス連続断面画像 100 枚について実験を行った。まず、1 枚目の正解画像をカラーヒストグラムを作成する教師画像として採用した。教師画像の関心領域、及び非関心領域から、それぞれの教師カラーヒストグラムを作成した。1 枚目と 100 枚目の元画像および正解画像をそれぞれ Fig. 16, Fig. 17 に示す。黒領域は除外した小腸領域である。



Fig. 16 1枚目元画像 (左) と正解画像 (右)

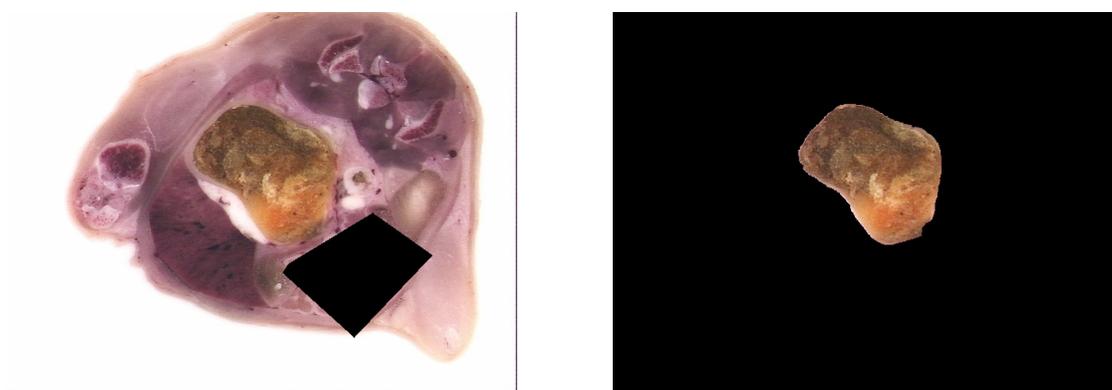


Fig. 17 100枚目の元画像 (左) と正解画像 (右)

教師カラーヒストグラムを用いて全100枚の断面画像抽出を行った。抽出正解率をFig. 18に、1枚目と100枚目における抽出結果をFig. 19に示す。教師画像として利用した1枚目の関心領域は、100%の正解率で抽出できている。しかし、100枚目においては約16%しか抽出できていない。これは、他断面における画素値が教師カラーヒストグラムに存在せず、領域の判別できないためであった。

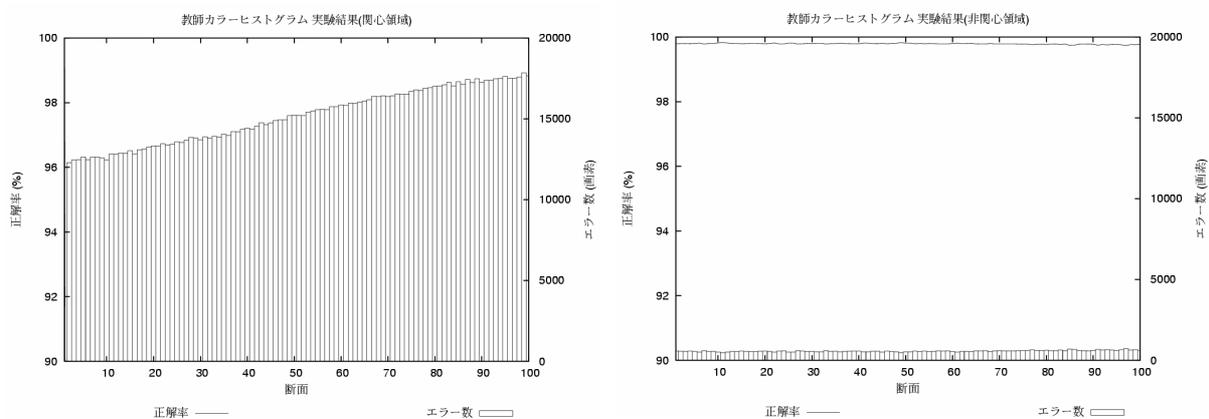


Fig. 18 教師カラーヒストグラムによる抽出正解率 (左: 関心領域 右: 非関心領域)



Fig. 19 教師カラーヒストグラムによる抽出結果 (左: 1枚目 右: 100枚目)

6.3.2. ロバストカラーヒストグラムによる抽出

式(3)の σ を $\sigma=2.6$ と設定して作成したロバストカラーヒストグラムを利用して100枚の抽出を行った. 抽出正解率をFig. 20に示す. また, 1枚目および100枚目での抽出結果をFig. 21に示す.

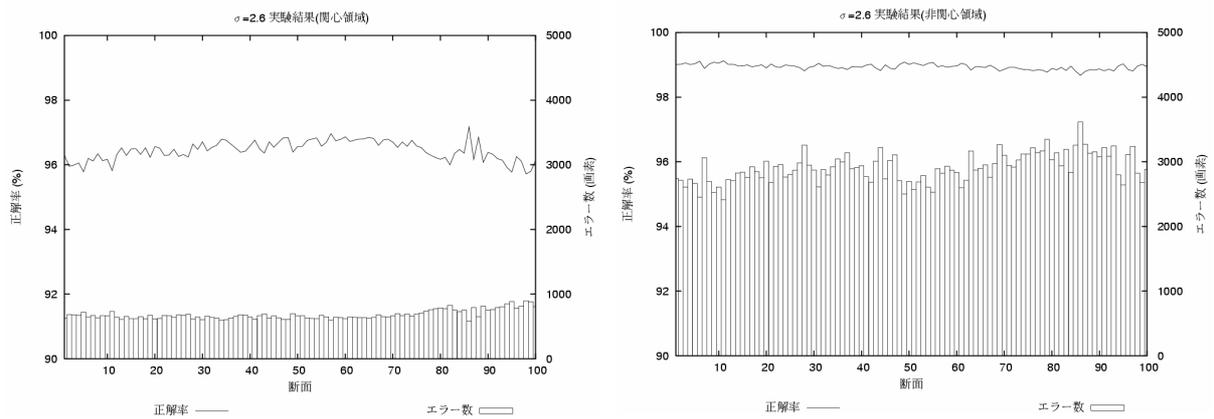


Fig. 20 $\sigma = 2.6$ における抽出正解率 (左: 関心領域 右: 非関心領域)



Fig. 21 $\sigma = 2.6$ における抽出結果 (左: 1枚目 右: 100枚目)

Fig. 20より，全断面を通して関心領域を96%前後の正解率で抽出できていることがわかった．また，非関心領域では過抽出によるエラーが発生しているが99%前後の正解率であった．なお，このエラーの多くは離れた領域に存在するため，ラベリング処理などで除去が可能である．以上より，ロバストカラーヒストグラムによる抽出は断面移動による色変化に追従し，安定した抽出ができたといえる．

次に，ロバストカラーヒストグラムを作成する際の σ が抽出結果へ与える影響を検討する．100枚目の画像に対し，複数の σ で作成したロバストカラーヒストグラムを用いて抽出を行った．Fig. 22に抽出正解率を示す．また， $\sigma = 0.1, 2.6, 10.0, 20.0$ における抽出結果をに示す．

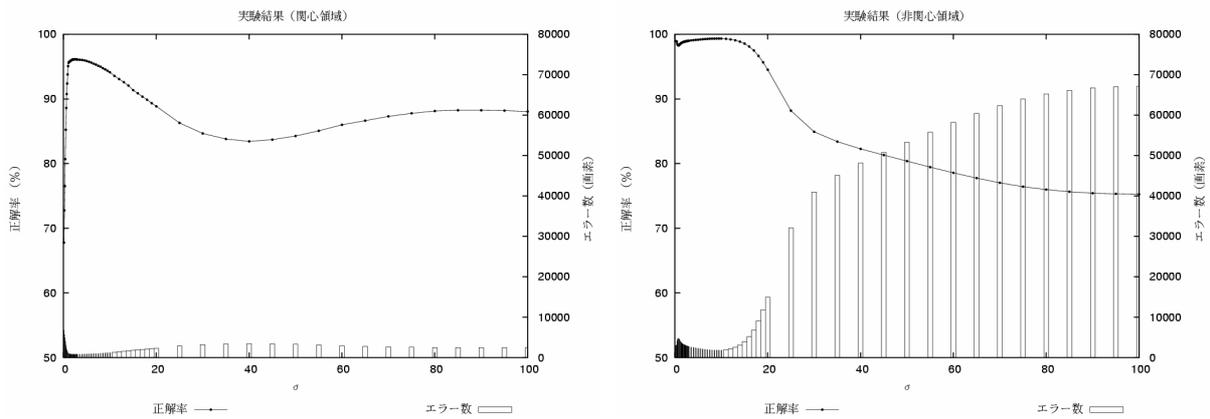


Fig. 22 σ に関する抽出正解率 (左：関心領域 右：非関心領域)

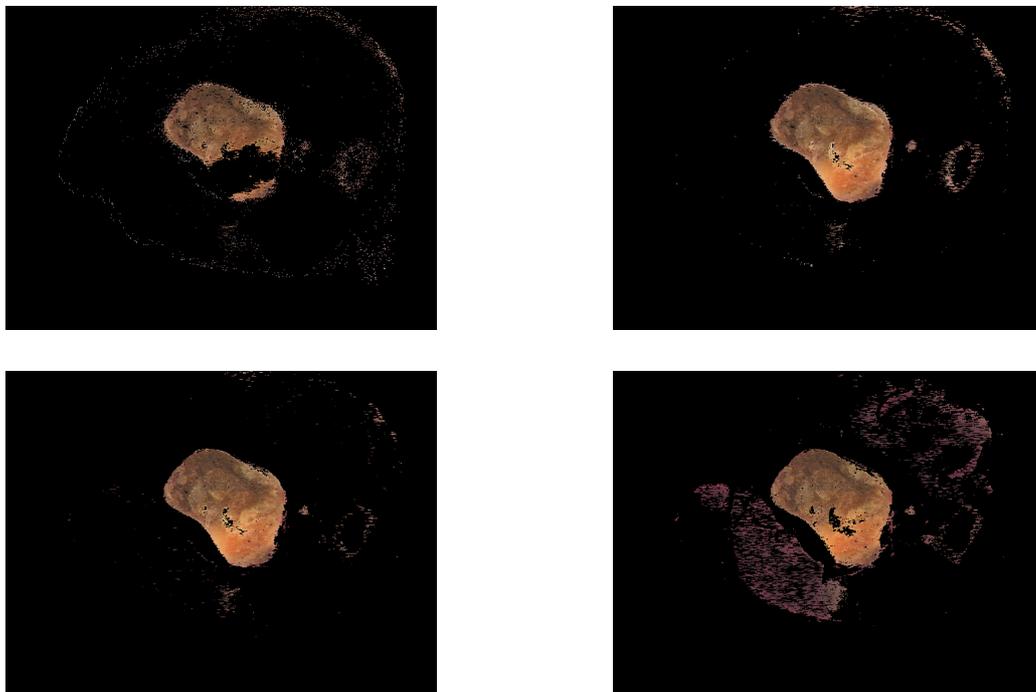


Fig. 23 $\sigma = 0.1, 2.6, 10.0, 20.0$ における抽出結果
(左上：1.0 右上：2.6 左下：10.0 右下：20.0)

Fig. 22において、関心領域の抽出正解率に注目すると、 σ が0付近では低いことがわかる。これは、教師カラーヒストグラムからの出現頻度の伝播量が少なく、推定が不完全であることが原因であると考えられる。Fig. 23の $\sigma=1.0$ のロバストカラーヒストグラムを用いて抽出した画像では、教師カラーヒストグラムと比較すると、高い精度で抽出できているものの、胃下部の色が変化している部分の抽出が正しく行われていない。

$\sigma=2.6$ 前後においてFig. 22では高い抽出正解率を得られているため、推定が最良であると考えられる。Fig. 23の $\sigma=2.6$ のロバストカラーヒストグラムで抽出した画像は局所的に未抽出や過抽出があるものの、画像全体ではよく抽出ができています。

σ が大きくなるにつれ、関心領域の正解率が下がるとともに、非関心領域のエラーが大きくなる。これは、頻度の伝播量が大きすぎるために、各画素値特有の頻度が失われ、各画素値の頻度が同じような値になったために判別を誤ったためである。

なお、提案手法で用いたロバストカラーヒストグラムを作成する計算量は膨大であった。教師カラーヒストグラムの各画素値の出現頻度を、RGB色空間における全ての画素値の出現頻度へ伝播するには、そこに存在する画素値数の 256^3 倍のステップ数が必要になる。これは教師として与える画素値数が多くなると、通常のPCでは現実的ではない。本稿の実験ではRSCCを用いて計算を行ったが、関心、非関心領域の教師カラーヒストグラムの合計画素値数は112,658色あり、RSCCの16CPUを用いて計算に約40分かかった。

6.4. 実験結果に対する考察

RGB色空間内の関心領域と非関心領域との判別に対する、 σ の値の影響を考察する。まず、 $\sigma=1.0, 2.6$ で作成したロバストカラーヒストグラムを用いて行った各画素値の判別領域をRGB色空間上で表現した。B=60のRG断面をFig. 24に示す。関心領域と判別した部分を赤色、非関心領域と判別した部分を青色で示している。黒色は頻度情報がないため、関心領域・非関心領域のどちらにも判別しない部分である。また、白点は関心領域の正解、濃い灰色の点は非関心領域の正解、薄い灰色は関心領域と非関心領域が重なった部分である。

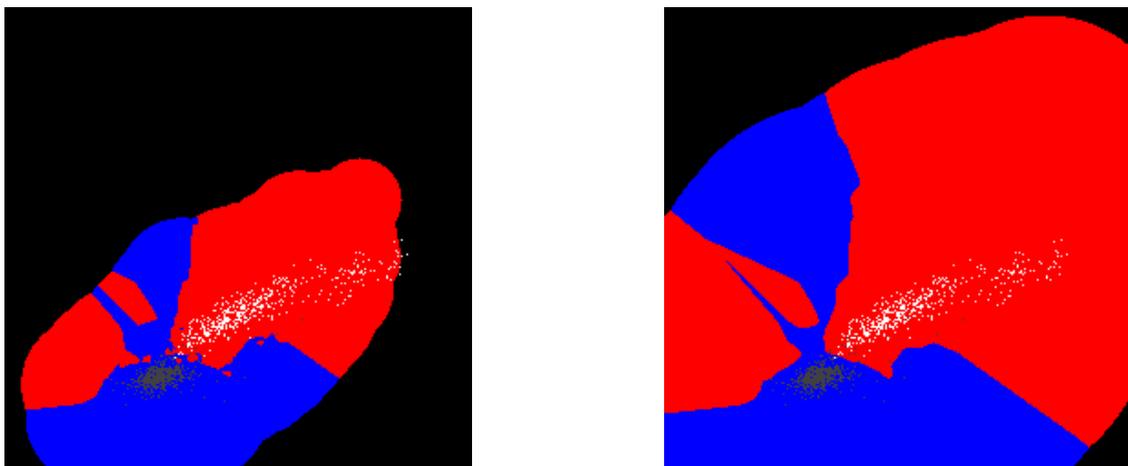


Fig. 24 RGB色空間における判別した各領域 (B=60, 左 $\sigma=1.0$, 右 $\sigma=2.6$)

Fig. 24において、 $\sigma=1.0$ では判別できない領域に正解の色が存在しているが、これは断面が変化したことで色に変化が起きたことによる。 $\sigma=2.6$ の場合はその色変化に追従して関心領域に判別することができている。このことから、 σ の値を大きくすることで、色変化に追従できることが示された。

次に、 $\sigma=2.6, 10.0$ で作成したロバストカラーヒストグラムを用いて判別した場合を比較する。Fig. 25に $\sigma=2.6, 10.0$ での判別領域を示す。Fig. 24と同様に表示している。

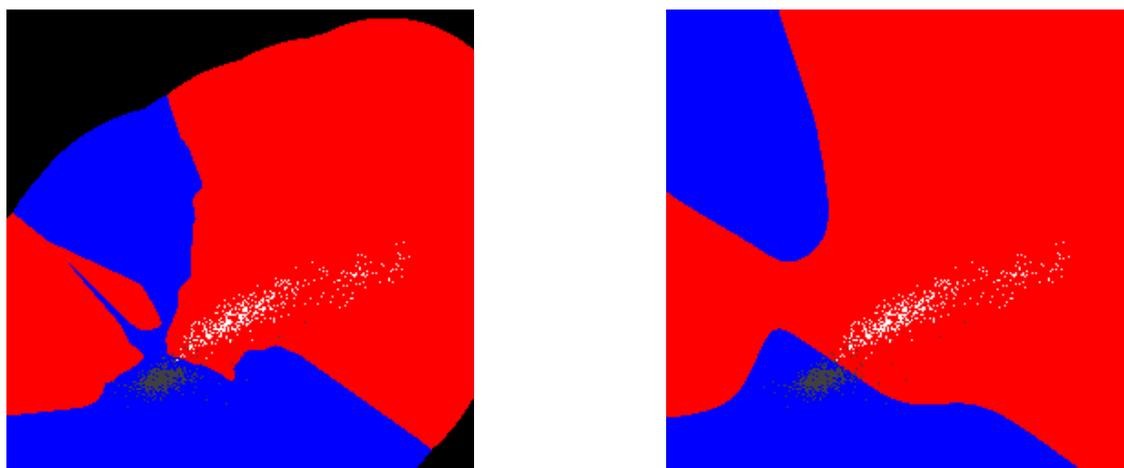


Fig. 25 RGB 色空間における判別した各領域 (B=60, 左 $\sigma=2.6$, 右 $\sigma=10.0$)

Fig. 25において、関心領域と非関心領域の境に注目する。 $\sigma=10.0$ の場合は $\sigma=2.6$ で見られるような細かい境界ではなく、大まかな境界になっている。それにより、細かい判別が不可能になり、非関心領域である色が多く関心領域と判別されている。これは伝播量が増えたため、より遠方の出現頻度も影響し、画素値の出現頻度に差が少なくなったためである。

さらに σ を大きくした場合を検討する。Fig. 26に $\sigma=2.6, 20.0$ での判別領域を示す。表示はFig. 24と同様である。

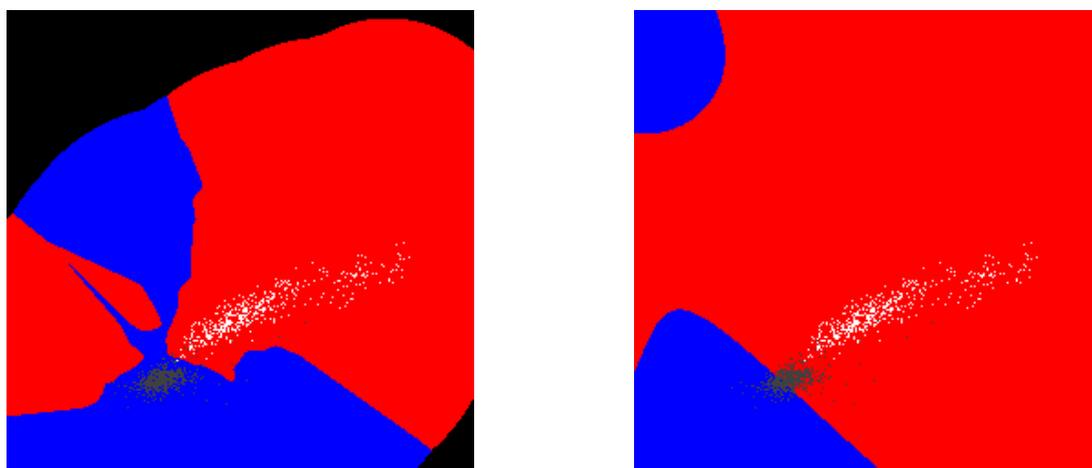


Fig. 26 RGB 色空間における判別した各領域 (B=60, 左 $\sigma=2.6$, 右 $\sigma=20.0$)

Fig. 26の $\sigma = 20.0$ では、関心領域の領域が広がり、多くの非関心領域の色を誤判断している。これは似ていない色、近くの画素値以外の画素値から出現頻度を伝播されたためであり、すでに判別領域が意味をなさなくなっている。

以上から、 σ の値が小さいと判別が不可能な画素値が出現し、 σ の値が大きいと境界があいまいになることや、遠い画素値の出現頻度が伝播されることによるエラーが発生することがわかった。 σ の値は中間の値でよい判別ができることがわかった。

7. まとめ

本研究では生体フルカラー画像からの色情報を特徴量とした抽出手法の検討を行い、特に頻度の利用による領域判別の可能性と、カラーヒストグラムを拡張するパラメータの検討を行った。

提案手法では、閾値抽出が不可能な画像に対しても抽出が可能であることを示した。また、関心領域と非関心領域で画素値が重なった場合でも、頻度を用いることで可能性の高い領域に判別できることを示した。

カラーヒストグラムを用いた抽出では、出現頻度に基づく関心領域と非関心領域の可能性を利用している。現段階ではその可能性を2値化しているが、今後は例えば「確実な関心領域」、「確実な非関心領域」、「関心か非関心かあいまい」のように可能性の多値化を行う。そして、確実な関心領域だけを抽出したい、誤抽出があっても概略が知りたいなどの目的に応じて可能性に任意の閾値を設定し、一定以上の可能性をもつ画素値を選択することが可能である。また、複数のカラーヒストグラムを作成して、複数の臓器を抽出することもできる。

ロバストカラーヒストグラムを決定付ける σ の値が、抽出へ与える影響の検討を行った。抽出のエラーが起きる原因は、 σ の値が小さい場合は色変化に追従できないこと、 σ の値が大きい場合ではRGB色空間での関心領域と非関心領域の判別境界の細かさが失われること、そして σ の値を大きくするにつれ、遠い色の出現頻度が伝播され意味のないカラーヒストグラムが作成されることであることがわかった。実験画像ではロバストカラーヒストグラムを作成する最適な σ が存在するため、式(1)(3)で作成できる最良のロバストカラーヒストグラムは存在する。しかし、それが臓器の抽出に最適なカラーヒストグラムであるとは限らない。式(1)(3)で作成できるロバストカラーヒストグラムでは、その頻度の制御を細かく設定できず、前述の境界があいまいになるなどの問題があるためである。今後は、本稿での検討で判明した問題を解決し、領域を正しく判別できる領域抽出に理想的なカラーヒストグラムの作成を目指す。

8. 謝辞

本稿の実験における計算はRIKEN Super Combined Cluster (RSCC)の利用により遂行された。ここに記して謝意を表す。

9. 参考文献

- [1] 横田秀夫, 工藤謙一, 樋口俊郎 他, “3次元内部構造顕微鏡による凍結生体試料の観察と計測,” 低温生物工学会誌 *Cryobiology and Cryotechnology*, Vol.44, No.1, pp.1-9, 1998.
- [2] 横田秀夫, 中村佐紀子, 川口龍平 他, “3次元内部構造顕微鏡による生体の侵襲的イメージング,” *Med Imag Tech*, Vol.20, No.6, pp.660-665, 2002.
- [3] 本多英晴, 竹本智子, 横田秀夫 他, “カラーヒストグラムを利用したフルカラー連続生体断面画像からの抽出法の検討,” 電子情報学会基礎・境界ソサエティ大会抄録集, A-4-20, 2004.
- [4] 安居院猛, 長尾智晴, “画像の処理と認識,” 昭晃堂, 1992.
- [5] 大津展之, “判別および最小2乗基準に基づく自動しきい値選定法,” 電子通信学会論文誌, Vol.J63-D, No.4, pp.349-356, 1980.