

博士論文審査報告書

論文題目

高階エネルギー最適化手法に基づく医用画像
セグメンテーション技術の開発

Development of Medical Image Segmentation Methods
based on Higher-Order Energy Minimization

申請者

北村 嘉郎

Yoshiro KITAMURA

情報理工学専攻 コンピュータービジョン研究

2016年2月

医用画像取得技術の進歩により、得られる大量のデータをどのように活用するかが重要な問題となっている。特にCTやMRIなどの3次元医用画像については従来、医師が2次元断層を表示したのを見て3次元的な状態を想像していたが、解像度が上がり断層の数が増えるとともに、これがますます難しくなっている。そこで、臓器毎に領域を分割（セグメンテーション）し、領域境界を表面として3次元グラフィックスとして見やすく表示することによる利便性および効率の向上が大きい。またデータに基づく医療の立場からは、定量的な評価による診断のために、画像から体積や形状などの3次元情報を正確に得ることが重要であるが、そのためにも解剖学的特徴毎に画像領域を分割するセグメンテーションが基本的かつ重要な第1段階である。さらに将来の自動画像診断においては、画像中に腫瘍等の病変を自動的に見つけることが必要になるが、セグメンテーションはそのための必須技術となる。

セグメンテーションの代表的な方法に、エネルギーと呼ばれる、セグメンテーションを評価する関数を定義し、それを最小にするセグメンテーションをグラフカットなどの最適化アルゴリズムにより求める、エネルギー最小化法がある。最近、従来の1階エネルギーよりも複雑な画素間の統計的依存関係を使ってセグメンテーションを評価できる、高階エネルギーを使用することが可能になった。すなわち、エネルギーは画素の部分集合に依存するポテンシャル関数の和として表されるが、一つ一つのポテンシャルが依存できる変数（画素）の数が、従来の2から高階エネルギーでは3以上になった。すると、画素間の依存関係に関するより複雑な条件をポテンシャル関数で表現可能になるが、一方で、多くなったポテンシャル毎の画素の配置をどうするかという問題が生じる。そこで本論文は、ポテンシャル関数の依存する変数の集合（クリーク）の配置を、解剖学的知見を活用しつつ与えられた画像に適応的に決定し、さらにポテンシャル関数のパラメーターを、正解データを持つ症例から機械学習する一連の手法を提案している。

第1章は緒論である。本研究の背景と目的を概観し、論文全体を展望してその提案と成果の概要を述べている。

第2章では、医用画像とそのセグメンテーションについて、また特にエネルギー最小化法について、本研究の技術的文脈を概観するとともに、以下各章に共通する技術的背景および諸手法の背後にある、高階エネルギー最小化法によるセグメンテーションにかかる本研究の基本的原理を説明している。本研究の原理に基づく諸手法に共通する利点の一つは、従来の1階ポテンシャルでは、2画素間の関係を記述することしかできなかつたため、境界の局所的な分離困難性を表現できる程度であったが、高階ポテンシャルであれば、形状などの多数の画素に依存する性質をエネルギーに表現することができることである。また、本研究では高階エネルギーを、1階に変換したとき劣モジュラーになる形のものに限定しているため、変換後の最適化において常に

大域的最小解が効率的に得られるという利点もある。これが高速化を可能にし、これらの手法が臨床現場で既に使われていることから分かる高い実用性につながっている。

第3章では、本研究の原理を応用した第一の手法として、肺の血管についての解剖学的知見を利用した肺動静脈抽出に適用した手法を提案している。肺の血管をCT撮影すると、動脈と静脈は画素値や形状等の局所的な画像特徴からは区別が困難である。そのため、動静脈の認識が可能な根元部分の太い血管から辿って末端まで分類することを目指す。解像度の限界から画像内では異なる血管が場所により接触しているため、単なる連結性に頼って辿ることは不可能である。そこで、肺の中の血管は比較的直線的であるという解剖学的性質に着目し、より直線的な血管の辿り方をするようにエネルギーを設計する。直線的というような多数の画素に依存する性質をエネルギーに表現するためには高階ポテンシャル関数が必須であり、そこに本手法の従来手法に対する優位性がある。高階ポテンシャル関数のクリークは、与えられた画像内で最短経路アルゴリズムにより見つかった直線的な構造を持つ候補として与えられる。こうして、多くの潜在的な候補形状に対応するポテンシャル関数を持つ高階エネルギー関数を生成し、1階劣モジュラー関数に変換後、グラフカットにより大域最小化することにより高速に動静脈セグメンテーションを得る。提案手法は定量的に従来手法と比較され、優位性を示された。従来手法には気管支の情報が既知であるときにそれを利用したものがあるが、この要素を加えることにより、気管支データが正確な場合にはさらに性能が上がることも確認された。提案手法はさらに、医療従事者である第三者による主観評価によって臨床的な価値をも評価され、初の全自動肺動静脈セグメンテーション手法として臨床使用に耐えるとの評価を得た。従来は造影剤注入とのタイミングを計り複数回撮影するなどしていたのが不必要になり、新手法は患者の負担軽減に大きく寄与している。

第4章では、第二の手法として、冠動脈の内壁に付着するプラークによる血管狭窄の定量的な評価のため、血管の外壁、プラーク、血流の可能な内腔の3部分に冠動脈の造影CT画像をセグメンテーションする手法を提案している。造影剤によりコントラストを高めたCT画像であっても、プラークと血管等の組織は画素の輝度による区別が難しい。そのためここでは、血管外壁の断面はプラークの付着に関わらず円形を保つという点に着目し、プラークあるいは内腔と血管壁の境界は円筒状になる傾向が高いようなポテンシャル関数を設計する。またプラークのうちカルシウム成分の多い石灰化プラークが球形に近い形状をしているという性質を使って、それらの候補形状を見つけている。前章と同様、ポテンシャルのパラメータは正解を持つデータセットから学習している。本手法では領域を3部分に分けるため、2値でない多クラスセグメンテーションの手法を用いるが、これを直接高階エネルギーに適用可能としたことにも、アルゴリズム上の新規性がある。提案手法の

評価は、人間の作成した正解セグメンテーションとの比較により行われ、公開されているデータによって共通の評価基準でアルゴリズムを比較する技術ベンチマークに参加し、参加15チーム中、世界トップの成績を収めた。

第5章では、本研究の原理を応用した第三の手法として、大腰筋のセグメンテーション手法を紹介している。大腰筋は体の内側と外側に大きく分けたとき内側にある筋肉（インナーマッスル）の代表的なもので、その量を測定することにより、健康状態や手術後の予後を予測する上での重要な指標として用いることができる。筋肉量を画像から自動測定するためには、筋肉部分をセグメンテーションする必要がある。本手法では大腰筋の形状についての解剖学的事前知識を利用して高階エネルギーを設計し、グラフカットによるエネルギーの大域最小化によりセグメンテーションを実現する新しいアプローチを提案している。まず大腰筋の中心線を検出し、その周りをロジスティック関数により表される曲線を一回りさせた樽形の曲面で大腰筋の表面をモデル化する。このロジスティック関数のパラメータを変えることにより多様な形状を表すことができ、個人差を含む多くの候補形状をクリークとするポテンシャルを持つ高階エネルギーを与える。候補形状とポテンシャルの重みは画像に適応的に決定される。本手法は定量評価され、最近の手法と同等以上の性能を得られることが確認された。

以上を要するに、本論文では高階エネルギー最小化による医用画像のセグメンテーションのために、与えられた画像等のデータに基づいてクリークの変数を適応的に配置し、またその係数を機械学習により決定する一連の方法を提案している。本研究の成果は、医用画像の3次元表示や、病態変化の正確な量的把握によるコンピューター支援診断のための基本技術として寄与するところが大きいだけでなく、既に医療の現場で活用されていることからわかるとおり実用性も高い。よって、本論文は博士（工学）早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める。

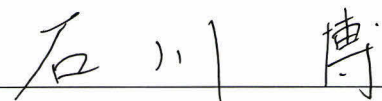
2016年2月

審査員

主査 早稲田大学教授

Ph.D. (ニューヨーク大学)

石川 博

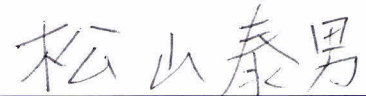


早稲田大学教授

工学博士（早稲田大学）

Ph.D. (スタンフォード大学)

松山 泰男



東京農工大学教授

博士（工学）（名古屋大学）

清水 昭伸

