

博士論文概要

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

2015年11月

近年 CT や MRI などの撮像装置が進化し、画像診断で扱われる画像が数枚から数百枚（ボリューム画像）へと大幅に増加した。医師はボリューム画像が持つ膨大な情報を容易に解釈できないが、3D 画像化することで解剖が一目瞭然となり効率よく利用できる。この 3D 画像化には関心ある臓器を高精度にセグメンテーションする必要があるが、セグメンテーション技術が未熟なため臨床に普及する際の妨げとなっている。一方、先進各国では増大する医療費を削減するために、過去の実績に基づいた診断のベストプラクティスを診断標準として規定することが推進されている。誰もが実践可能な診断標準を規定するために、診療指標を定量化することが重要視されている。ここでも 3 次元画像を取り扱う難しさから、病態変化の正確な把握が可能な 3 次元情報（体積や形状）を定量化し活用することが進んでいない。以上のように画像が持つ 3 次元情報を可視化、定量化することは医療の質と効率の向上につながり、3 次元情報を抽出するためにセグメンテーションは必須のプロセスである。

セグメンテーションの代表的な手法にグラフカットがあり近年広く応用されている。グラフカットの基本は 2 変数（画素）以下がとるラベルの組み合わせにポテンシャルを与える 1 階エネルギーを最小化するものである。最近の発展により 3 つ以上の任意の変数群に依存する高階エネルギーを最小化することが可能になった。高階エネルギーはセグメンテーション問題における複雑な関係を表現でき、従来の認識性能の限界を突破することが期待される。しかし階が増えるごとに解の組み合わせ数が指数的に増大するため、エネルギーの設計が困難になると同時に計算コストが増すことが問題であり、効果的な応用方法は未だ研究途上である。

本研究は高階の有効性と高速性を両立させた、実用性高い高階エネルギーの活用手法の開発を主題とする。特に、高階エネルギーの中でも高速に最小化可能なサブモジュラな関数に注目すると、そのエネルギーは関連する変数群（クリーク）が全て同一のラベルをとる場合にだけエネルギーが小さくなり、それ以外は値が変化しない。この特性を利用し、クリークの選び方によってセグメンテーション結果をコントロールすることを考える。例えば直線状のクリークを選択してそのクリークが同一のラベルをとるときのエネルギーを小さくすると、セグメンテーション結果は直線的なパターンを形成しやすくなる。この概念に基づき、セグメンテーション対象の形状に関する事前知識を活用してクリークを選択することにより、高階エネルギーを設計する手法を提案する。

クリーク選択に基づく高階エネルギー設計の有効性を実証するため、第 1 に肺動静脈セグメンテーションの問題を取り扱う。肺がんはがんによる主要な死因である。肺がんの外科手術においては患者負担を減らすために胸腔鏡手術が増えているが、視野の狭さと操作性の低さから大変難しい手技であり、3D 画像化による術前シミュレーションが高い臨床価値を持っている。しかし、動脈と静脈は肺

野内のいたるところで接触しており，動脈と静脈の全自動分離に成功した例は報告されていない．本研究は肺動静脈セグメンテーションの性能を向上するため，肺内の血管は原則として直線的に走行することを利用し，最短経路探索アルゴリズムに基づいて直線状のクリークを探索するアルゴリズムを提案する．高階エネルギーはパラメータが多く設計が困難であるが，クリーク選択のためのパラメータおよび最小化問題に組み込む高階エネルギーの重みは正解データセットから学習させる．提案手法の有効性を検証するため，正解のセグメンテーション結果が付帯したテストデータセットを用いて評価実験を行った．提案手法を一般的な1階エネルギーによるグラフカットおよび先行技術と比較した結果，提案手法が大幅に高いセグメンテーション性能を示した．また第3者の医療機関において，実際の臨床データを用いてセグメンテーション性能を評価した．その結果，本技術のセグメンテーション性能が臨床上許容可能なレベルに達しており臨床現場でルーチン的に利用可能であると結論付けられた．

第2のアプリケーションとして，心臓CT画像からの冠動脈内腔・プラークセグメンテーションをテーマに扱った．心臓疾患は先進国における主要な死因である．CT検査が標準的検査であり，血管内腔に沈着するプラークによって起きる狭窄の程度を測ることが診断において重要である．ところがプラークはコントラストが低くその輪郭は曖昧なため，そのセグメンテーションは難しい．この問題を解決するため，本研究ではクリーク選択の概念を拡張しオブジェクトの形状をより直接的に表現して形状制約とする手法を提案する．形状制約によって曖昧なプラークの輪郭を捉える精度を向上させ，狭窄を自動検出するアルゴリズムを開発する．提案するアルゴリズムは，オブジェクトの内側の画素群が前景，外側の画素群が背景ラベルを同時にとる場合にだけエネルギーを小さくする高階エネルギーを最小化問題に付加する．これによってセグメンテーション結果は所望の形状に一致した場合にのみ小さなエネルギーをとり，一致していなければエネルギーは変化しない．本アプリケーションにおいては，血管が円筒形状をなすという事前知識に基づき，円形のクリークを選択して形状制約を与える．オブジェクトがどこにあるかは事前にわからないので，ヘッセ行列解析の一種である **Optimally Oriented Flux** と組み合わせて管状パターンの候補を検出し，検出した位置とスケールに選択的に形状制約を付加した．高階エネルギーを活用するにはその重みを設計することが難しいが，正解データから学習させることで解決した．提案手法の有効性を評価するため，冠動脈狭窄に関する **MICCAI Segmentation Challenge** (共通の画像セットと評価尺度に基づき，異なるアルゴリズムの性能を定量比較する **MICCAI** 主催の技術ベンチマーク活動) に参加した結果，全自動狭窄部検出性能において世界トップの成績を修めた．提案手法が冠動脈診断の質と効率を大きく改善することが期待できる．

上述の手法は，オブジェクトが局所的に共通して持つパターンをモデル化するものである．第 3 のアプリケーションでは，形状制約の概念をさらに発展させてオブジェクトのパターンの個人差をモデル化することを試みる．ここでは治療後の患者の予後予測に重要な筋肉量の 3 次元定量化を実現するため，大腰筋セグメンテーションをテーマに取り上げる．大腰筋は周辺の血管や臓器と接しており，それらの接触面はコントラストが低く不明瞭である．境界面を局所的な画像特徴から見分けることは難しく，グローバルな形状から予測する必要がある．ところが筋肉の形状には個人差があり，原則としてたる型の形状をしているがその曲率は個々に異なっている．そこで本研究では大腰筋の形状をロジスティック曲線で近似してモデル化する．形状モデルは個人差を表現するためのパラメータを持っており，パラメータを変化させて候補形状を複数設定する．それぞれの候補形状は高階サブモジュラ関数で実現し，最小化問題に付加する．この高階関数はセグメンテーション結果が想定する候補形状と一致する場合にのみ低い値をとるため，複数の候補形状のいずれかをセグメンテーション結果に影響させる効果がある．高階エネルギーによるグローバルな形状と，低階エネルギーの局所的な画像特徴が単一のエネルギー関数の元で最小化され，セグメンテーション問題を解くことができる．提案手法のセグメンテーション精度を，専門家によって正解が入力された 20 症例で評価した．体積のジャカル指標を評価した結果，最近の手法と比べて同等以上の性能が得られることを確認した．提案手法は定量性の高い指標値を診療に提供することができ，今後さらに多様な診断指標値を普及させていく一歩となる．

最後に本研究を総括する．高階エネルギーを活用した新しいセグメンテーション手法を提案した．提案手法は臓器の複雑な形状をモデル化し，認識に用いることが可能である．この手法に基づいて，従来自動化が難しかった肺動静脈セグメンテーション，冠動脈プラークセグメンテーション，大腰筋セグメンテーションのアプリケーションを開発した．全てのアプリケーションは高速に最小化可能なサブモジュラ高階関数で実現しており，実用性が非常に高い特徴がある．臨床現場にこれまでなかった可視化や定量化のアプリケーションを提供し，医療の質を向上することに貢献した．

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 北村 嘉郎 印

(2015年 10月30日 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
学術誌原 著論文	○Kitamura, Y., Li, Y., Ito, W., Ishikawa, H. (2015). Data-Dependent Higher-Order Clique Selection for Artery-Vein Segmentation by Energy Minimization, International Journal of Computer Vision, 1-17.
国際会議 査読あり	○Kitamura, Y., Li, Y., Ito, W., Ishikawa, H. (2014). Coronary lumen and plaque segmentation from CTA using higher-order shape prior, In Proceedings of MICCAI2014, Boston, USA, 339-347.
国際会議 査読あり	○Kitamura, Y., Li, Y., Ito, W., Ishikawa, H. (2013). Adaptive higher-order submodular potentials for pulmonary artery-vein segmentation, In the Fifth International Workshop on Pulmonary Image Analysis, MICCAI2013, Nagoya, Japan, 53-61.
国際会議 査読あり	Inoue, T., ○Kitamura, Y., Li, Y., Ito, W., Ishikawa, H. (2015). Psoas major muscle segmentation using higher-order shape prior, In Medical Computer Vision Workshop: Algorithms for Big Data, MICCAI2015, Munich, Germany, 1-9.
国際会議 査読なし	Ishikawa, H., Mochizuki, Y., Oyamada, Y., Kotaki, S., Okagawa, A., Morita, M, ○Kitamura, Y., Multiple-organ 3D Segmentation by Higher-order Energy Minimization: Progress Overview, In Proceedings of the Fifth International Symposium on the Project Computational Anatomy, 97-100, 2014.