

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300075

研究課題名(和文) 高階エネルギーの近似最適化と学習

研究課題名(英文) Approximate optimization and learning of higher-order energy

研究代表者

石川 博 (Ishikawa, Hiroshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60381901

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：劣モジュラでない多値エネルギーを近似的に最小化するアルゴリズムを実現した。高階2値エネルギーを1階エネルギーに還元するアルゴリズムで、既存手法では変数を付加していたが、付加せずに還元することを可能にし、より少ないメモリでより高速な最適化を可能とした。これら高階エネルギー最小化法の応用として、肺の血管のCT画像を動脈と静脈に分けるセグメンテーションに高階エネルギーを使い、肺血管の形状をエネルギー中に表現することを可能にした。また、心臓の冠動脈中に生じるプラークと血管壁を区別したセグメンテーションを、血管内腔、プラーク、血管壁の3ラベルのラベル付け問題と考へ高階エネルギーを使って高精度化した。

研究成果の概要(英文)：We realized an algorithm that approximately minimize non-submodular multi-label energies. We also made it possible to minimize binary higher-order energies faster and with less memory by enabling to reduce them into first-order energies without adding additional variables in certain cases. As applications of higher-order energies, we used them for segmentation of pulmonary artery-vein segmentation, where we represented the shapes of pulmonary blood vessels by higher-order potentials. We also improved algorithms to segment coronary lumen and plaques from CT angiography, also using higher-order shape priors.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：最適化 コンピュータビジョン

## 1. 研究開始当初の背景

エネルギー最小化は、特にグラフカットや信念伝播法などの比較的新しいエネルギー最小化法が広がってから、コンピュータビジョンやパターン認識のあらゆる用途において広く使われている。そこでは、問題を画素などにラベルを割り当てる「ラベル付け」として定式化し、エネルギーという評価関数を最小化するラベル付けを見つけることで問題を解決する。現在までに使われてきたエネルギーのほとんどは、1階、すなわち最大2点のみに依存する項の和として書けるものに限られている。しかし、より精度の高い問題解決を目指すためには、各項がより多くの点に依存できる、高階のエネルギーを使うことが必要である。高階エネルギーの必要性は認識されてきたが、効率よく最小化する方法がなかったため実際にはあまり利用されなかった。代表者は数年前に高階エネルギーの効率的な最小化を可能にしていたが、これらのアルゴリズムでは階数について指数的に変数の数が増えるため、最小化可能なエネルギーの階数は最高5～6階程度にとどまっていた。

## 2. 研究の目的

これは、一般の高階エネルギーの1階問題への正確な還元をしている限りは避けられない。なぜなら、高階エネルギーの一般の項はその階数について指数的な個数の任意の値をとることができ、それだけの情報は還元後のエネルギーがどこかに持たねばならないからである。そこで本研究では、この還元アルゴリズムを近似的な還元とすることを許すことにより、高階エネルギー最小化アルゴリズムの実用上の効率を劇的に向上することと、それを今まで実用不可能だったビジョン・画像処理等における高階問題に応用することをめざした。

## 3. 研究の方法

そのために、高階2値エネルギーの同値な1階エネルギーへの還元を近似的な還元とすることを許すことにより、還元後の変数の数を抑え、アルゴリズムの実用上の効率を劇的に向上し、併せて高階エネルギーの学習を検討するとともに多値エネルギーのための融合移動の高速化を計り、これらのアルゴリズムの実問題への応用を期した。還元アルゴリズムの改良においては、学習したエネルギーに適用可能にするため、与えられた任意の高階エネルギーについて、できるだけ値を正確に保ったまま自動的に最適なエネルギー値の組を決める。そのために一般化高階グラフカットの自由度を活用し、一定幅より近い値を同一にすることを許し、最小化した場合にとり得ない大きな値を全て同一にする等の方針をとった。

## 4. 研究成果

平成24年度には、劣モジュラでない2値エネルギーを近似的に最小化する方法として

最近多用されるようになってきているQPBOアルゴリズムの多値版を与え、移動アルゴリズムのような繰り返しによらない劣モジュラでない多値エネルギーを最小化するアルゴリズムを実現した。そのために、QPBOアルゴリズムの理論的基礎であるループ双対性の概念を3元以上のラベル集合が線形順序を持つ場合に拡張し、持続性(persistency)という性質が、線形順序を持つ多値の場合にも任意階で成り立つことを示した。これを基礎に、2値の場合と同様に、与えられたエネルギーの最小値の下界を最小値として与える劣モジュラ関数(劣モジュラ緩和関数)を構成し、それを代わりに最小化する方法を開発した。1階の場合にはこの劣モジュラ緩和関数のうち最小値が最大のもの(最適劣モジュラ緩和関数)が具体的に構成できることを示し、それにより劣モジュラでない多値エネルギーを部分的に最小化するQPBOの多値版ともいべきアルゴリズムを与えた。この成果はECCV2012で発表した。

平成25年度には、高階2値エネルギーを1階エネルギーに還元するアルゴリズムの改良を行った。上記のように、既存手法では高階の2値エネルギーに還元するために変数を付加していたが、開発したアルゴリズムでは変数を加えずに還元することを可能にした。そのため結果として、既存手法より少ないメモリでより高速な還元を可能とするアルゴリズムの開発に成功し、成果はCVPR2014で発表した。また一方で、高階エネルギーの応用として、医用画像処理への応用の研究をすすめた。肺の血管のCT画像を動脈と静脈に分けるセグメンテーションは、動脈・静脈間の見た目の違いがほとんどないため難しいことが知られている。そのため、血管の根元の、動脈と静脈の分類が既知の部分からの連続性によって血管全体を分類する手法を試みた。その際、動脈と静脈が接触していたりすれ違っていたりする部位において、従来の1階エネルギーを使った手法では相互に侵食する問題があった。そこで高階エネルギーを使うことにより、肺血管が比較的まっすぐであるという性質をエネルギー中に表現することを可能にした。この成果はPIA2013で発表した。

平成26年度には、引き続き高階エネルギー最小化の応用できる問題および、高階エネルギーの学習への応用に取り組んだ。特に医用画像のセグメンテーションにおける高階エネルギー最小化の応用をさらに検討した。多臓器セグメンテーションは多ラベルのラベル付け問題と考えることができるが、高階の多ラベルラベル付け問題はセグメンテーション問題としてはまだあま応用例がない。エネルギーを正解データから学習することにより作成するために、どのような統計を使うとセグメンテーションに効果があるのかは未知であり、検討を要した。6つの高階エネルギーを提案し、実験を行った。直角三角錐

状に並んだクリークを用いた高階ポテンシャル、離れたボクセルを用いたクリークのポテンシャル、高階平滑化項、CT画像の輝度勾配を考慮して全臓器に作用する高階ポテンシャル、エッジ周辺にのみ作用する高階ポテンシャルでは、よいセグメンテーション結果を得られなかった。提案ポテンシャルを加えることで、セグメンテーション精度が悪くなる原因の一つとして、提案ポテンシャルが全体に一律に導入される場合には、確率アトラス項の邪魔になっていることが考えられる。よりよいポテンシャルを設計するには、アトラス項と共存できるポテンシャルを設計する必要がある。他方、CT画像の輝度勾配を考慮した高階ポテンシャルでは、すべての症例でセグメンテーション精度が向上するわけではないが、一部の症例では高階ポテンシャルの導入によりセグメンテーション精度の向上を確認することができた。症例間で高階ポテンシャルの導入によるセグメンテーション精度改善の有無が存在するので、今後は症例間でロバストな高階ポテンシャルを考える必要がある。

他方、心臓の動脈硬化の程度をCT画像を用いて測定するためには、冠動脈中に生じるプラークと血管壁を区別したセグメンテーションが必要だが、これを、血管内腔、プラーク、血管壁の3ラベルのラベル付け問題と考えることができる。これを高階エネルギーを使って高精度化する研究を行い、MICCAI2014で発表した。また、この高階グラフカットによる冠状動脈の狭窄検出・管腔セグメンテーションアルゴリズムは、この問題について提出されたアルゴリズムを評価し順位付けをする Rotterdam Coronary Artery Stenoses Detection and Quantification Evaluation Framework ウェブサイトで、機械による自動アルゴリズム中で一位になった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

①M. Morita, A. Okagawa, Y. Oyamada, Y. Mochizuki, and H. Ishikawa, Multiple-Organ Segmentation Based on Spatially-Divided Neighboring Data Energy, The 14th IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA 2015), pp.158-161, 2015, 査読有.

②A. Okagawa, Y. Mochizuki, Y. Oyamada, and H. Ishikawa, Multi-Organ Segmentation by Minimization of Higher-Order Energy for CT Boundary, The 14th IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA 2015), pp.547-550, 2015, 査読有.

③T. Ishii, Y. Mochizuki, H. Nakada, R. Nakamura, and H. Ishikawa, Surface

Object Recognition with CNN and SVM in Landsat 8 Images, The 14th IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA 2015), pp.341-344, 2015, 査読有.

④N. Kobayashi, Y. Oyamada, Y. Mochizuki, and H. Ishikawa, Three-DoF Pose Estimation of Asteroids by Appearance-based Linear Regression with Divided Parameter Space, The 14th IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA 2015), pp.551-554, 2015, 査読有.

⑤L. Prasuhn, Y. Oyamada, Y. Mochizuki, and H. Ishikawa, A HOG-Based Hand Gesture Recognition System on a Mobile Device, The IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2014), pp. 3973-3977, 2014, 査読有. DOI: 10.1109/ICIP.2014.7025807

⑥Y. Kitamura, Y. Li, W. Ito, H. Ishikawa, Coronary Lumen and Plaque Segmentation from CTA Using Higher-Order Shape Prior, The 17th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI2014), pp. 339-347, 2014, 査読有. DOI: 10.1007/978-3-319-10404-1\_43

⑦ H. Ishikawa, Higher-Order Clique Reduction Without Auxiliary Variables, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2014), pp. 1362-1369, 2014, 査読有. DOI: 10.1109/CVPR.2014.177

⑧ Y. Kitamura, Y. Li, W. Ito, and H. Ishikawa, Adaptive higher-order submodular potentials for pulmonary artery-vein segmentation, Fifth International Workshop on Pulmonary Image Analysis (PIA2013). pp.53-61, 2013, 査読有.

<http://www.lungworkshop.org/2013/styled-2/index.html>

⑨ T. Windheuser, H. Ishikawa, and D. Cremers, Generalized Roof Duality for Multi-Label Optimization: Optimal Lower Bounds and Persistency, Twelfth European Conference on Computer Vision (ECCV2012), pp. 400-413, 2012, 査読有. DOI: 10.1007/978-3-642-33783-3\_29

[学会発表] (計10件)

①石川 博、最適化としての視覚と認識、第6回暗号フロンティアセミナー(招待講演)、北陸先端科学技術大学院大学(石川県能美市)2015年3月18日

②H. Ishikawa, Higher-order Graph Cuts, ACCV2014 Area Chairs Workshop(招待講演)、Nanyang Technological University, Singapore, 2014年9月3日.

③石川 博、グラフカット・その後、画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2013). (

招待講演)、国立情報学研究所(東京都)、2013年7月29日。

④石川 博、高階マルコフ確率場における最大事後確率推定、人工知能学会 第87回 人工知能基本問題研究会(招待講演)、慶応義塾大学(神奈川県横浜市)、2012年11月17日。

⑤ H. Ishikawa, Proposal Selection in Higher-order Graph Cuts, 25th European Conference on Operational Research (EURO2012), Vilnius (Lithuania), 2012年7月10日。

[図書](計1件)

①H. Ishikawa, Graph Cuts—Combinatorial Optimization in Vision, Image Processing and Analysis with Graphs: Theory and Practice(第2章担当), pp. 25-64, 2012.

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

名称: 情報処理方法、情報処理装置およびそのプログラム

発明者: 石川 博

権利者: 早稲田大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-121876

出願年月日: 2014年6月12日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石川 博 (ISHIKAWA, Hiroshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 60381901