

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：53701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330297

研究課題名(和文) エントロピー最大化ファジィクラスタリングとアニーリングの統合アルゴリズムの開発

研究課題名(英文) Development of integrated algorithm of fuzzy clustering with entropy maximization and annealing

研究代表者

安田 真 (YASUDA, Makoto)

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：80353275

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)： Tsallisエントロピー最大化法を適用したファジィ c 平均法と確定的アニーリング法との組合せにおいて、Tsallisエントロピーのqパラメータとアニーリング温度が帰属度関数の形状に及ぼす影響を定量的に評価し、qパラメータを近似する温度関数を得た。同関数を用いることで、qパラメータの設定を不要となる。さらに、ファジィクラスタリングとアニーリングを統合したq値増加アルゴリズムを開発し、従来法より精度が向上することを確認した。

エントロピー関数・アニーリング法・冷却関数を組み合わせたファジィクラスタリングの特徴分析では、特にクラスタから遠方での帰属度関数の形状の温度依存性を明確にした。

研究成果の概要(英文)： By applying deterministic annealing to FCM maximized with Tsallis entropy, a DA-FCM algorithm has been developed. One of the challenges of this method is to determine an appropriate initial annealing temperature and a q value, according to the data distribution. Quantitative relationships between the temperature and q are examined, and it is confirmed that the temperature should be inversely proportional to q. Based on this result, a q reduction algorithm is developed in which q is defined as an inverse of a decreasing pseudo-temperature. Experiments are performed, and it was confirmed that, in many cases, appropriate q value is determined automatically from the temperature. Furthermore, the proposed methods improve the accuracy of classification and are superior to the conventional method. Characteristics of FCM combined with entropy maximization and annealing methods are also examined, and dependencies of shapes of membership functions according to the temperature are clarified.

研究分野：ソフトコンピューティング

 キーワード：ファジィクラスタリング ファジィ c 平均法 エントロピー最大化 アニーリング Tsallisエントロピー  
 - Shannonエントロピー ファジィエントロピー

## 1. 研究開始当初の背景

ファジィ c-平均 (FCM) 法にエントロピー最大化法を適用すると、温度の概念を導入して FCM 法を統計物理学的に意味づけることができる。しかし、このような観点の研究は、Rose らによる Shannon エントロピー最大化法と確定的アニーリング (DA) 法の統合という先駆的業績以降、進展は見られない。これに対して研究者は、特に以下のような研究成果を得ていた。

- ・ ファジィエントロピー最大化 FCM 法において、クラスタリングメカニズムの統計物理学的な解釈法を確立した。
- ・ ファジィエントロピー最大化 FCM 法から Fermi-Dirac 型の帰属度関数を導出し、シミュレーテッドアニーリング (SA) の広域探索と DA の高速探索を組み合わせた複雑なクラスター形状を表現可能なアルゴリズムを開発した。
- ・ 近年、物理学に留まらず様々な分野で注目され、その有用性が検証されている Tsallis エントロピーについて、Tsallis エントロピー最大化 FCM 法の帰属度関数の形状の特徴を明らかにした。これを利用して Tsallis エントロピーの q パラメータの推定を行い、クラスタリングの分類精度を向上させた。
- ・ SA の効率的な冷却方法である超高速アニーリング関数について、DA への適用が可能であることを示し、高速化の効果について検証した。
- ・ 電力系統の配電ネットワークの最適構成問題について、区間負荷を近傍解として近傍制限を導入した SA による、配電ネットワーク構成の最適化を行った。

## 2. 研究の目的

FCM 法にエントロピー最大化法を適用して温度の概念を導入したファジィクラスタリングにおいて、アニーリング関数と帰属度関数を一体化したモデルを導出する。これにより、従来、試行錯誤しながら設定していた初期パラメータ数を減らして設定を容易にすると共に、様々なデータ分布に適用可能なアルゴリズムを開発する。さらに、配電ネットワーク最適化問題へ応用して実用化する。

具体的には、

- ・ エントロピー最大加法に基づく FCM 法の構成要素は、FCM 法以外にエントロピー関数 (Shannon エントロピー、ファジィエントロピー、Tsallis エントロピー)・アニーリング手法 (DA, SA)・冷却関数 (指数関数、対数関数、超高速アニーリング (VFA))・制約条件 (確率的、非確率的) がある。これらは個別に開発された関数とアルゴリズムであり、多くはその組み合わせ方や組み合わせ手法としての有用性は不明である。そこで、FCM 法に制約条件を課し、エントロピー最大化法を適用して帰属度関数を導出する。次に、各帰属

度関数の形状と温度依存性を分析した上で、帰属度関数・アニーリング法・冷却関数を 1 つの温度関数モデルとして表現する。これにより、全体のパラメータ設定、及び手法としての分析と評価を容易にする。

- ・ 上記成果を配電ネットワーク構造最適化問題に応用してアルゴリズムを実用化する。そのため、開閉器の状態に応じて定まる距離を定義してファジィクラスタリングによるアプローチを可能とする。

## 3. 研究の方法

### (1) Tsallis エントロピー最大化ファジィクラスタリングアルゴリズムの開発

Tsallis エントロピーは SA への応用例はあるが、ファジィクラスタリングへの応用例はほとんど見られない。また、ファジィクラスタリングへの応用に当たって、与えられたデータ分布に対して最適な Tsallis エントロピーの q パラメータ値の選び方は知られていない。

そこで、Tsallis エントロピー最大化 FCM 法に q パラメータ値をデータ分布に合わせて適応的に調整する機能を加えた、新たなファジィクラスタリングアルゴリズムを開発する。

### (2) エントロピー関数・アニーリング手法・冷却関数・制約条件を組み合わせたファジィクラスタリング手法の特徴の分析

エントロピー関数・アニーリング手法・制約条件の組み合わせから、エントロピー最大化 FCM 法の帰属度関数を求める。

次に、冷却関数と組み合わせて帰属度関数の形状のアニーリング温度依存性を調べる。これにより、代表的なアニーリング温度と、その温度で帰属度関数の近似関数が満たすべき条件を明らかにする。

### (3) エントロピー関数・アニーリング法・冷却関数・制約条件を組み合わせたファジィクラスタリングの統合モデルの開発

エントロピー関数・アニーリング法・冷却関数はいずれも温度に依存するため、これらを単一のファジィクラスタリングモデルとして統合する。これにより、全体のパラメータ数を減らしてデータ分布に合わせたパラメータの設定の困難さを緩和すると同時に、モデルの解析を容易にしてその適用限界を定量的に明らかにしやすくする。

### (4) 提案アルゴリズムの配電ネットワーク構造最適化問題への応用

配電ネットワーク構造の問題へファジィクラスタリングを応用するためには、まず、問題に即した距離の定義が必要である。そこで、ネットワークの開閉器のオン・オフ状態に着目して距離を定義する。

次に、Tsallis エントロピー最大化ファジィクラスタリングを適用してネットワーク構造最適化問題の初期解を生成する。

#### 4. 研究成果

- (1) 下記(3)に示すファジィクラスタリングのアニーリング温度と Tsallis エントロピーの  $q$  パラメータ値の定量的関係の評価結果を利用する。アニーリング温度と  $q$  値を個別にどのように変化させれば両者の帰属度関数の形状変化の残差を最小化できるかを数値的に調べた。

これに基づき、アニーリング温度を固定したまま Tsallis エントロピーの  $q$  パラメータのみ増加させるクラスタリングアルゴリズムを開発した。数値データと Iris データを用いた評価実験により、従来の DA を用いたファジィクラスタリングと同等の分類性能と収束性が得られることを確認した。

さらに、クラスタ毎に異なる  $q$  パラメータを割り当てるように関数を拡張し、クラスタ毎に最適なファジィクラスタリングを行う手法を開発した。これにより、(Tsallis エントロピー最大化 FCM 法に限らず) FCM 法に基づくファジィクラスタリングでは対応不可能な非均一なサイズのクラスタ分布に対して、従来の DA を用いた手法よりもよりデータ分布に即した帰属度関数が得られると期待される。数値データを用いた評価実験では、クラスタサイズを表すパラメータをうまく与えることができれば、気体通りの結果が得られた。

- (2) FCM 法を Shannon エントロピー・ファジィエントロピーの各エントロピー関数の最大化し、さらに確率的制約条件を満たす帰属度関数を導出した。(Tsallis エントロピーについては(1),(3)にて評価を行った)次に、指数型、及び超高速アニーリング型の冷却関数を用いてアニーリングを行いながら、特にファジィクラスタリングにおいて重要なクラスタ中心から遠方での帰属度関数の形状変化を調べた。その結果、ファジィエントロピー最大化 FCM 法は指数関数により温度を緩やかに減少させるべきであることを見出した。これは、帰属度関数の形状により、クラスタ中心から遠方のデータの影響を受けにくいことによる。

- (3) アニーリングに基づくファジィクラスタリングでは、温度の減少に伴い 帰属度関数の分布の広がりが狭まっていくことでデータのクラスタへの帰属が定まっていく。一方、Tsallis エントロピー最大化 FCM 法の 帰属度関数は、 $q$  パラメータ値の増加によっても同様に分布の広がりが狭まることが分かっている。そこで、 $q$  パラメータ値とアニーリ

ング温度が帰属度関数形状に及ぼす影響を定量的に評価することで、 $q$  パラメータを近似する温度関数を得た。すなわち、アニーリング温度から直接  $q$  パラメータ値を計算する方法を得た。この温度関数は逆関数に極めて近いものとなった。(なお、本手法は(1)で述べた通り、温度と  $q$  パラメータ値をそれぞれ変化させながら求めた帰属度関数の形状差から数値的に算出したものである。よって、温度関数の適用可能な温度と  $q$  パラメータの範囲は関数算出時の条件に限定される。そこで、後に、帰属度関数から直接解析的に近似関数を導出して結果が一致することを確認した)

次に、DA 法により“仮想的な”アニーリング温度を減少させながら、温度関数を用いて  $q$  パラメータ値を計算することで、実際にはアニーリング温度を固定したまま、 $q$  パラメータ値のみを増加させながらファジィクラスタリングを行うアルゴリズムを開発した。数値データと Iris データを用いた評価実験により、従来の DA を用いたファジィクラスタリングとの比較を行った。“仮想的な”アニーリングの初期温度を変えながら実験を行ったところ、分類性能については初期温度依存性は小さく、かつ、従来法と同等の性能が得られることを確認した。一方、計算時間については初期温度依存性が見られたが、これも従来手法と同等以上であった。同アルゴリズムにより別々のツールであったアニーリングとファジィクラスタリングの帰属度関数が統合され、その結果、従来手法の大きな問題点であった  $q$  パラメータ値の設定を不要とすることに道を開けたと言える。

さらに、帰属度関数の温度関数として近似展開することで、 $q$  パラメータとアニーリングの初期温度を同時にデータ分布から代数的に決定可能な方法を考察し、その検証を進めている。

- (4) タブーサーチを適用した場合について区間負荷の変化量で近傍を定義し、タブーリストに区間負荷の変化量の履歴を保存してその最大値を上限として設定する戦略を提案した。配電ネットワークの数値モデルを用いた評価実験では、区間負荷の変化量と配電損失の差の間には正の相関性があり、供給点に変化があった区間の負荷の大きさを、解の類似度として用いることが妥当であることが確認された。

また、配電ネットワーク内の開閉器のオン・オフの状態変化で生じる区間負荷の変化量で距離が定義可能なことを示した。この距離に基づきクラスタリングを行う方法を提案した。

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7件)

M.Yasuda, On adjustment of q value of FCM using Tsallis entropy maximization, Advances in Fuzzy Sets and Systems, 査読有, Vol.21, No.1, pp.79-92, 2016

M.Yasuda, Quantitative analyses and development of q-incrementation algorithm for FCM with Tsallis entropy maximization, 査読有, Advances in Fuzzy Systems, Vol.2015, No.404510, 2015

安田真, 牧雪乃, 負荷の大きさを考慮したメタヒューリスティクスによる配電ネットワーク構成の最適化, 査読有, 岐阜工業高等専門学校紀要, No.50, pp.21-25, 2015

M.Yasuda, Combinatorial algorithm of q-incrementation and deterministic annealing for FCM using Tsallis entropy, Advances in Fuzzy Sets and Systems, 査読有, Vol.18, No.2, pp.151-169, 2014

M.Yasuda, Y.Orino, Multi-q extension of Tsallis entropy based fuzzy c-means clustering, 査読有, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.18, No.3, pp.289-296, 2014

H.Takano, J.Murata, M.Yasuda, Y.Maki, A study on improvement of tabu search-based determination method for distribution network configuration, 査読有, Journal of Int. Council on Electrical Engineering, Vol.3, No.1, pp.61-67, 2013

H.Takano, J.Murata, Y.Maki, M.Yasuda, Improving the search ability of tabu search in the distribution network reconfiguration problem, 査読有, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.17, No.5, pp.681-689, 2013

[学会発表](計6件)

M.Yasuda, Quantitative analyses and development of q-incrementation algorithm for FCM with Tsallis entropy maximization, 査読有, Proc. of the 12th Int. Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, pp.148-154, 2015年8月15日, Zhangjiajie (China)

安田真, Tsallis エントロピー最大化 FCM 法における q 値増加法の定量的検証, 査読無, 第31回 ファジィシステムシンポジウム講演論文集, WD4-2, pp.213-216, 2015年9月2日, 電気通信大学(調布市・東京都)

M.Yasuda, Q-increment deterministic annealing fuzzy c-means clustering using Tsallis entropy, 査読有, Proc. of the 11th Int. Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge

Discovery, pp.31-35, 2014年8月19日, Xiamen (China)

伊藤銀河, 安田真, 種々のエントロピー最大化 FCM 法の特徴の分析と最適化, 査読無, 第30回 ファジィシステムシンポジウム講演論文集, WB1-3, pp.760-763, 2014年9月3日, 高知工科大学(高知市・高知県)

M.Yasuda, Y.Orino, Multi q extension of Tsallis entropy based fuzzy c-means clustering, 査読有, Proc. of the 10th Int. Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, pp.71-76, 2013年7月23日, Shenyang (China)

金子周平, 安田真, Tsallis エントロピー最大化 FCM 法における温度と q 値の及ぼす影響の検証, 査読無, 第29回 ファジィシステムシンポジウム講演論文集, TB2-2, pp.471-474, 2013年9月10日, 大阪国際大学(枚方市・大阪府)

[図書](計0件)

[産業財産権]  
出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 真 (YASUDA, Makoto)  
岐阜工業高等専門学校・電気情報工学科  
教授  
研究者番号: 80353275

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：