

令和元年6月14日現在

機関番号：27401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00318

研究課題名(和文) グラフ最適化を可能にする量子ビット表現に基づく遺伝子表現法とそれを用いた進化計算

研究課題名(英文) A Quantum Bit Representation-Based Gene-Coding Method for Graph Optimization Problems and Evolutionary Computation Using the Method

研究代表者

森山 賀文 (Moriyama, Yoshifumi)

熊本県立大学・総合管理学部・准教授

研究者番号：10413866

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：量子風進化計算手法の適用範囲を拡大することを目的として、グラフ最適化が可能な遺伝子表現法を提案し、代表的なグラフ最適化問題の一つである最大カット問題を用いた計算機実験により、近似解を探索できることを示した。

さらに解探索率の向上を目指して、量子風ビットにおける確率振幅の収束状態を測定可能な指標を提案した。提案する指標を用いることで、母集団を多様化することが可能となり、解探索性能が向上した。また非一様な回転角度を個性とみなして、量子風個体に個性を導入した。厳密に回転角度を調整した従来手法とほぼ同程度の精度の解を得ることができ、回転角度の調整に係る煩雑な作業を軽減できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子風進化計算手法の適用範囲を拡張し、グラフ最適化問題の一つである最大カット問題を用いた計算機実験によって近似解を探索できることを示した。厳密な最適解を求めることが困難な問題において、限られた時間の中で近似解を発見することは非常に有用である。

一方、確率振幅の収束状態を測定可能な指標は、効率的な解探索を実現し、非一様な回転角度を用いた個性は、解の探索性能を維持しつつパラメータ調整に係る煩雑な作業を軽減する。収束状態の測定指標および量子風個体の個性は、量子ビット表現を用いる進化計算手法であれば適用可能であり、最大カット問題を含むグラフ最適化問題だけでなく最適化問題全般への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：To expand the applicable fields of the quantum-inspired evolutionary algorithm (QEA), we have proposed a gene-coding method that can represent graphs and have shown that the QEA implemented the gene-coding method can search approximate solutions through the experimental results using the maximum cut problem, which is one of the graph optimizations. Furthermore, we have proposed a new measure that can estimate the state of the qubit for improving search performance. Introducing the proposed measure enables to maintain the diversity of the population and leads the search performance improvement. We introduce a nonuniform rotation angle, which has various convergence speeds and is regarded as the individuality, into a quantum-inspired individual. Introducing the proposed individuality can eliminate the cumbersome process required to design a rotation angle while ensuring the quality of the obtained solution.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：量子風進化計算 進化計算 量子ビット表現 グラフ最適化 最大カット問題 組合せ最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子力学的原理と進化計算とを融合した確率的な最適化アルゴリズムである量子風進化計算 (Quantum-inspired Evolutionary Algorithm: QEA) は、従来の遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) とは異なり、量子ビットを模倣した量子風ビットを遺伝子に用い、ユニタリ変換により進化を繰り返すことで、大域的な解探索から局所的な解探索へと自動的に遷移する優れた特徴を持つ。QEA の適用範囲の拡張を目的として、整数や順列を取り扱える遺伝子表現法が提案されているが、グラフを解とする場合、致死遺伝子が生成される可能性がある。順列を解とする巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem: TSP) はグラフを解とする最適化問題の一つであり、異なる 2 点がすべて隣接した完全グラフの中から最短となるハミルトン閉路を求める問題である。先行研究で提案された順列解釈法および順列型遺伝子表現法はいずれも、ハミルトン閉路 (順列) が無数に存在する完全グラフを対象としており、完全ではないグラフを対象とする場合、すなわち異なる 2 点が隣接していない経路を持つグラフを解探索領域とする場合、致死遺伝子が生成される可能性があり、この点に限界がある。グラフを解とする組合せ最適化問題は実社会に数多く存在しており、量子風ビットを用いる進化計算でグラフ最適化を可能にすることは重要な課題と言える。

2. 研究の目的

量子風ビットを用いる進化計算の適用範囲を拡張することを目的として、完全でないグラフを表現可能な遺伝子表現法を提案する。さらに、提案する遺伝子表現法を実装した QEA を用いて、グラフを解とする代表的な組合せ最適化問題へと適用し、提案する遺伝子表現法の探索性能を評価する。

3. 研究の方法

本研究は 3 年計画で行った。

(1) 2016 年度

Han らによる量子ビットを模倣した表現 (量子ビット表現) に基づく遺伝子表現の適用範囲を拡張し、対象問題が完全でないグラフであっても最適化を可能にする量子ビット表現に基づく遺伝子表現法を提案した。提案手法では、個体の遺伝子として、グラフの要素である各点に対して 1 つずつ量子風ビットを割り当て、各量子風ビットを観測することでバイナリ値を取得し、各点が属する集合を決定する。それぞれの集合にまたがる枝の重みの総和を求めることで、解を評価できる。なお、この遺伝子表現法を用いれば致死遺伝子の生成を抑制できる。

提案する遺伝子表現法を QEA に実装し、グラフを解とする代表的な組合せ最適化問題の一つである最大カット問題 (Maximum Cut Problem) を対象とした計算機実験を行い、提案する遺伝子表現法の解探索性能を分析した。

(2) 2017 年度

2016 年度に提案したグラフ最適化が可能な遺伝子表現法を用いることで、グラフを解とする代表的な組合せ最適化問題の一つである最大カット問題を対象とした計算機実験を行った結果、限られた時間の中で近似解を発見することができた。しかしながら、厳密な最適解の発見には至らず、この点に改善の余地があった。提案した遺伝子表現法について探索性能の解析を行い、量子ビット表現における確率振幅の収束状態が解探索の停滞に深く関わっていることに着目し、

量子風ビットおよび最大カット問題の特徴を考慮した突然変異手法、および量子風ビットにおける確率振幅の収束状態測指標 (収束度) を提案した。さらに、回転角度の調整に要する煩雑な作業の軽減を目的として、量子風個体への個性導入法を提案した。

過剰に確率振幅が収束することで局所解へと陥る可能性が高くなる。そこで、局所解からの脱出を目的として、量子風ビットおよび最大カット問題の特徴を考慮した 2 種類の突然変異手法を提案し、計算機実験により解探索性能を比較した。

量子ビット表現における確率振幅の収束状態が解探索の停滞に深く関わっていることに着目し、量子風ビットにおける確率振幅の収束状態を測定する収束度を提案した。収束度を用いることで、解探索の停滞を推定できる。均質化した母集団を多様化可能なノアの箱舟戦略を用い、収束度を用いて適用タイミングを決定して、ノアの箱舟戦略の適用とその適用タイミングによる解探索性能への影響を、計算機実験を行って分析した。

量子風個体に非一様な回転角度を持たせそれを個性とみなして、個性の多様性に依拠して 3 種類の個性導入法 $C-O$ 、 $C-E$ 、 R を提案し、解探索性能を比較した。図 1 は提案する個性導入法 の概念を示したものである。矩形の色の濃さは、各遺伝子座に割り当てられた回転角度の大きさを表す。個体 i が有する遺伝子座 j の回転角度を θ_{cij} とするとき、個性導入法 R では、各遺伝子座の回転角度 θ_{cij} をランダムに決定した個体を用いる。個性導入法 $C-O$ および $C-E$ では、全遺伝子座の回転角度がすべて等しい個体 ($\theta_{ci} = \theta_{ci1} = \theta_{ci2} = \dots = \theta_{ciM}$) を用いる。 M は個体が有する遺伝子数である。 $C-O$ と $C-E$ とではグループ化の手法が異なる。 $C-O$ では回転角度の大きさが近い量子風個体を集めグループ化する。 $C-E$ では各グループの平均回転角度が均等になるようグループ化する。個性導入の効果も、最大カット問題をういた実験により検証した。

(3) 2018 年度

2017 年度に提案した 収束度および 個性の探索性能をより詳細に分析するために、追加実験を行った。さらに、分布推定アルゴリズム (Estimation of Distribution Algorithm: EDA) との比較、および多目的最適化問題へ展開により、提案手法の有用性を示した。

収束度を導入して解探索の停滞を推定し、均質化した母集団を多様化するためにノアの箱舟戦略を適用する。ノアの箱舟戦略の適用タイミングが解探索性能へ及ぼす影響を詳細に検証するために、対象とする最大カット問題の規模を拡大し、計算機実験を行った。さらに、母集団を形成する個体数を変化させ、母集団サイズが及ぼす解探索性能への影響を調査した。

個性を導入した QEA について、収束度の推移、および最終的に得られる解探索精度を分析し、提案する 3 つの個性の特徴を明らかにした。さらに最も探索性能の高かった個性を実装した QEA について、回転角度の刻みを変化させて解探索性能への影響を調査した。

提案する遺伝子表現法を導入した量子風進化計算手法の有用性を確認するために、Population-Based Incremental Learning (PBIL) および Univariate Marginal Distribution Algorithm (UMDA) との比較実験を行った。さらに提案する遺伝子表現法を、Kim らによる複数の目的関数を有する多目的最適化が可能な Quantum-inspired Multiobjective Evolutionary Algorithm (QMEA) へと実装し、多目的最大カット問題を用いた計算機実験を行い、適用範囲の拡張を試みた。

4. 研究成果

(1) グラフ最適化可能な遺伝子表現法

提案する遺伝子表現法を QEA に実装し、グラフを解とする代表的な組合せ最適化問題の一つである最大カット問題を対象とした計算機実験を行った。提案する遺伝子表現法を用いることで、限られた時間の中で近似解を発見することができた。

上記成果に関しては、国内学会で 1 件 (学会等名: 2016 年度情報文化学会九州支部研究会) の報告を行った。

(2) 量子風ビットおよび最大カット問題の特徴を考慮した突然変異手法

量子風ビットおよび最大カット問題の特徴を考慮した 2 種類の突然変異手法を用い、突然変異率を変化させて計算機実験を行った結果、突然変異率を調整することで状態 $|0\rangle$ または $|1\rangle$ への過剰な収束を回避し、母集団が多様化して、得られる解の精度が向上した。

上記成果に関しては、国内学会で 1 件 (学会等名: 平成 29 年度 (第 70 回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会) の報告を行った。

(3) 量子風ビットにおける確率振幅の収束状態の測定指標

提案する確率振幅の収束状態測定法を導入することで、ノアの方舟戦略などの均質化した母集団を多様化する手法の適用が可能となり、20 ノードの比較的小規模な最大カット問題においては最適解発見率が向上し、800 ノードの問題においては、QEA を用いた場合、解探索精度が向上した。実験結果を分析した結果、解探索アルゴリズムの特徴を考慮して母集団を多様化する必要があることが分かった。

上記成果に関しては、国内学会で 1 件 (学会等名: 2017 年度情報文化学会九州支部研究会)、国際会議で 1 件 (学会等名: 2017 IEEE 10th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA)) の報告を行った。さらに、学術論文 (査読有) を 1 件 (雑誌名: International Journal of Computational Intelligence Studies) まとめた。

(4) 非一様な回転角度を用いた個性の導入

量子風個体における非一様な回転角度を個性とみなし、量子風個体における 3 種類の個性 $C-O$, $C-E$, R を提案した。図 2 は、個性を導入した QEA_{C-E} , QEA_{C-O} , QEA_R , および従来の QEA を用いた場合の探索性能を示したものである。計算機実験の結果、回転角度を厳密に調整した場合とほぼ同程度の解を探索することができ、回転角度の調整に要する煩雑な作業を軽減することがで

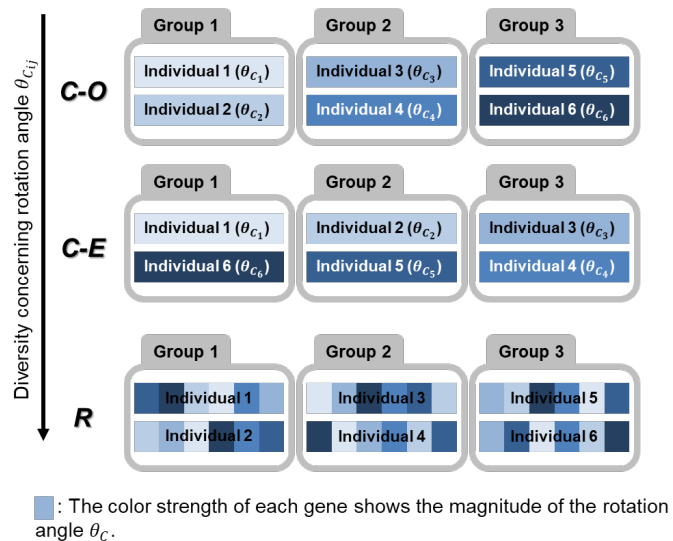


図 1: 非一様な回転角度を用いた個性の概念

きた。一方、提案する3つの個性の探索性能を比較すると、 $QEA_R > QEA_{C-E} > QEA_{C-O}$ の順となっている。量子風ビットにおける確率振幅の収束度の推移を分析することで、回転角度に関する多様性が高いほど、解探索の序盤では大域的な解探索を行い、終盤では局所的な解探索を行っていることが明らかとなった。つまり、回転角度に関する多様性が高い個性導入法ほど、量子ビット表現が持つ大域的探索から局所的探索へと自動的に遷移する特徴を増強し、得られる解精度が向上することが分かった。また回転角度の刻み幅が小さいほど得られる解の精度が高くなることから、回転角度の範囲のみの設定で個性導入効果が得られることを示唆する結果が得られた。

上記成果に関しては、国際会議で1件(学会等名:2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP2018))の報告を行った。さらに、学術論文(査読有)を1件(雑誌名:Journal of Signal Processing)まとめた。

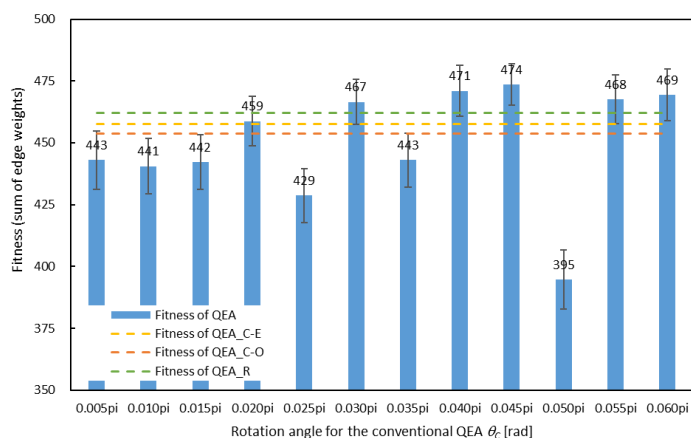


図2: 個性を導入したQEAと個性を有しない従来のQEAとの探索性能比較

(5) 多目的最大カット問題への展開

提案する遺伝子表現法を実装したQMEAを解探索アルゴリズムとし、対象問題として250, 500, 750ノードの多目的最大カット問題を用いて、計算機実験を行った。図3に示すように、実験の結果、提案する遺伝子表現法を用いることで、多目的最大カット問題のパレート解を探索可能であることを確認した。

上記成果に関しては、国内学会で1件(学会等名:2018年度情報文化学会九州支部研究会)の報告を行った。

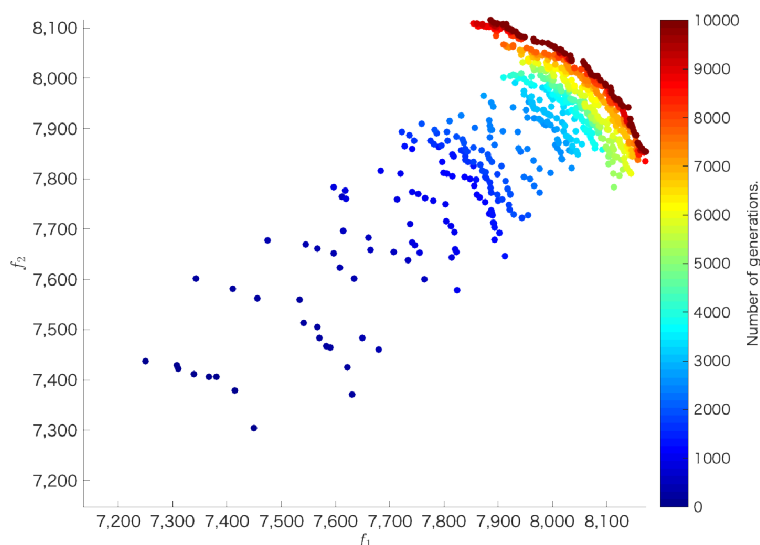


図3: 提案する遺伝子表現法を実装したQMEAが獲得した多目的最大カット問題におけるパレートフロントの遷移

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Yoshifumi Moriyama, Ichiro Iimura, and Shigeru Nakayama, "Individuality for Quantum-Inspired Individuals Based on Non-Uniform Convergence Speed in Maximum Cut Problem", Journal of Signal Processing, Vol.22, No.6, pp.315-326, 2018 (refereed paper).

DOI: 10.2299/jsp.22.315

Yoshifumi Moriyama, Ichiro Iimura, and Shigeru Nakayama, "Search Performance Analysis of Qubit Convergence Measure for Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm Introducing on Maximum Cut Problem", International Journal of Computational Intelligence Studies, Vol.7, Nos.3/4, pp.231-252, 2018 (refereed paper).

DOI: 10.1504/IJCISTUDIES.2018.096185

[学会発表](計6件)

森山賀文, 飯村伊智郎, 中山茂, "多目的最適化を可能とする量子風進化計算 QMEA の多目的グラフ最適化問題への展開", 2018年度情報文化学会九州支部研究会, OP-A1, 2019.

Yoshifumi Moriyama, Ichiro Iimura, and Shigeru Nakayama, "Study on Non-uniform Convergence Speed of Quantum-Inspired Individuals on QEA in Maximum Cut Problem", 2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP2018), 5PM2-3-4, pp.235-238, 2018.

森山賀文, 飯村伊智郎, 中山茂, "量子風進化計算を用いたグラフ最適化における量子ビット収束状態測定法", 2017 年度情報文化学会九州支部研究会, OP-C4, 2018.

Yoshifumi Moriyama, Ichiro Iimura, and Shigeru Nakayama, "Investigation on Introducing Qubit Convergence Measure to QEA in Maximum Cut Problem", 2017 IEEE 10th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA), CFP1761U, pp.73-78, 2017.

森山賀文, 飯村伊智郎, 中山茂, "グラフ最適化のための量子ビット表現に基づく遺伝子表現法に関する一考察", 平成 29 年度 (第 70 回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 11-2A-07, pp.365-366, 2017.

森山賀文, 飯村伊智郎, 中山茂, "グラフ最適化問題における量子ビット表現に基づく遺伝子表現法の検討", 2016 年度情報文化学会九州支部研究会, OP-A4, 2017.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.pu-kumamoto.ac.jp/~ilab/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：飯村 伊智郎

ローマ字氏名：IIMURA, Ichiro

所属研究機関名：熊本県立大学

部局名：総合管理学部

職名：教授

研究者番号 (8 桁) : 50347697

(2)研究協力者

研究協力者氏名：中山 茂

ローマ字氏名：NAKAYAMA, Shigeru

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。