

令和 4 年 6 月 18 日現在

機関番号：27401
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2019～2021
 課題番号：19K12160
 研究課題名(和文) グループの概念を有しない多目的量子風進化計算手法とその整数計画問題への展開

研究課題名(英文) Quantum-Inspired Multi-Objective Evolutionary Algorithm without the Concept of Group and the Application of It to Integer-Programming-Problems

研究代表者
 森山 賀文 (Moriyama, Yoshifumi)
 熊本県立大学・総合管理学部・教授

研究者番号：10413866
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：一般的に、問題の規模や最適化する目的数が増えるにつれて探索空間が拡大し、新たな解生成に他の解情報が寄与することが困難となる。本研究では、各個体が過去の探索で得た各最良解情報に基づき基本的に単独で進化し、大域的探索から局所的探索に自動的に移行する、グループの概念を有しない multi-objective quantum-inspired evolutionary algorithm based on isolation strategy (MQEA/I) を提案した。多目的0-1ナップザック問題および多目的巡回セールスマン問題を用いた計算機実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 実社会の問題では目的関数が唯一とは限らない。多目的最適化問題では複数存在する目的関数間のトレードオフ関係を考慮した最適化が必要である。提案するMQEA/Iは、各個体の自己最良解を保持する機構を有し、各世代の非優越解などの優良解を保持する機構を導入することで、グループの概念が無く、グループ数の調整が不要である。また、提案する解探索の停滞を回避可能な回転角度ルックアップテーブルを用いることで、広範囲に広がる非優越解セットを探索できる。多様で質の高い非優越解セットの獲得は、トレードオフの関係を考慮した上で、どの目的関数を重視するかというユーザの意思を反映することができ、非常に有用である。

研究成果の概要(英文)：In general, as the size of the problem or the number of objectives to be optimized increases in multi-objective optimization problems, the distribution range of the Pareto optimal solution set in the search space expands. Expanding the search space makes it difficult for the variable information of other solutions to contribute to generating new solutions. This study proposes a multi-objective quantum-inspired evolutionary algorithm based on isolation strategy (MQEA/I). In MQEA/I, each individual basically evolves in isolation using the personal best solution and can automatically shift from global search to local search. MQEA/I has only one parameter, the rotation angle, except for the population size and the termination condition. We confirmed the effectiveness of the proposed algorithm by computer experiments using multi-objective 0-1 knapsack problems and multi-objective traveling salesman problems.

研究分野：情報学

キーワード：多目的進化アルゴリズム 量子風進化アルゴリズム 多目的量子風進化アルゴリズム 多目的最適化 多目的0-1ナップザック問題

1. 研究開始当初の背景

実社会における問題の多くは目的関数が唯一とは限らない。多目的最適化問題では、個々の目的関数における最適解が全て一致する、完全最適解が存在する特別な場合もあるが、一般的には各目的関数間のトレードオフ関係を考慮してパレート最適解を探索することを目的とする。多くの多目的進化アルゴリズムでは交叉を用いて新たな解を生成するが、一般的に、問題の規模や最適化する目的数が増えるにつれて探索空間が拡大し、新たな解生成に他の解情報が寄与することが困難となる。

多目的量子風進化アルゴリズムである **multi-objective quantum-inspired evolutionary algorithm (MQEA)** は、母集団を複数のグループに分割し、最上位グループに属する解に近くように、量子風ビットの確率振幅を更新して解探索を行う。しかし、パレート最適解は一般的にグループ数よりも多いため、グループ数の概念を有することで解探索範囲に制約が生じる。

一方、遺伝子に量子風ビットを用いた場合、量子風ビットの観測結果として得られる値は **0** または **1** であるという性質上、**0-1** ナップザック問題 (**0-1KP**) のようにバイナリ配列を解とする問題に適用することは容易であるが、例えば整数配列や順列を解とする整数計画問題への応用が困難であり、**MQEA** の探索性能を、多目的 **0-1KP** 以外の問題を対象として調査した先行研究はほとんど見られない。

2. 研究の目的

本研究では、唯一の母集団のみを用いての解探索を行うことで、グループ数の調整を不要とした多目的最適化を可能とする新たな量子風進化計算手法 **MQEA based on isolation strategy (MQEA/I)** を提案する。また、多目的 **0-1KP** のようなバイナリ列を解とする組合せ最適化問題だけでなく、順列を解とする問題にも適用可能範囲を拡大し、計算機実験を通して提案する最適化手法の特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 2019 年度

Kim らの多目的量子風進化アルゴリズム **MQEA** では、各個体は過去の探索で獲得した自己最良解情報を持たない。**MQEA** は非優越ソートおよび混雑距離ソートの順位に従い、母集団を幾つかのグループに分割し、グループ内の最良解情報に基づいて進化する。しかし、パレート最適解は一般的にグループ数よりも多いため、グループ数の概念を有することで解探索範囲に制約が生じる。2019 年度は、グループ数の調整が不要な、多目的最適化を可能とする新たな量子風進化アルゴリズムを検討した。グループの概念を有しない提案手法は、各個体がこれまでの探索で獲得した自己最良解を保持する機構を導入し、優良解情報を個体間で交換することで、非優越解が形成するパレートのフロントを維持できる。対象問題として 2 目的 **0-1KP**、比較対象アルゴリズムとして **MQEA** および **NSGA-II** を用い、提案手法の探索性能を分析した。

(2) 2020 年度

バイナリ値を解とする多目的 **0-1KP** において有用性を確認できた提案手法 **MQEA/I** の適用範囲拡張を目的として、順列を解とする多目的 **KP** を用いた計算機実験を行った。量子ビットを用いた順列の遺伝子表現法には、順方向と逆方向の巡回路情報を自己最良解情報として保持することで、巡回セールスマン問題の近似解法の一つである **k-opt** 法と同様の局所改善効果を期待できる遺伝子表現法を用いた。対象問題として 2 目的巡回セールスマン問題、比較対象アルゴリズムとして **MQEA**、**NSGA-II**、および **SPEA2** を用い、提案手法の有用性を検証した。

(3) 2021 年度

提案手法は、量子ビットの確率振幅が $|0\rangle$ または $|1\rangle$ へと徐々に収束することで大域的探索から局所的探索へと自動的に遷移する。しかし、解探索終盤、確率振幅が $|0\rangle$ または $|1\rangle$ へとほぼ収束してしまうと、新たな解の探索が困難となる。そのため、確率振幅更新の回転角度を決定する回転角度ルックアップテーブルを再検討した。解探索終盤では各個体が自己最良解と全く同じ解を得る可能性が高くなる。そこで、自己最良解と同じ解を得た場合、各量子ビット(遺伝子)の確率振幅を自己最良解情報とは逆方向への回転を許容した、つまり改悪を許す回転角度ルックアップテーブルを考案した。調整すべきパラメータは増えない。

提案する回転角度ルックアップテーブルおよび優良解の保持機構の有用性を検証するため、対象問題として 2, 3, 4 目的の **0-1KP** を用い、提案する回転角度ルックアップテーブルを使用する **MQEA/I**、従来の回転角度を使用する **MQEA/I**、および優良解の保持機構を除いたそれぞれの **MQEA/I** による、探索性能の比較実験を行った。

4. 研究成果

(1) 非優越解を含む優良解の保持機構

提案手法では、各個体は過去の探索で得た自己最良解を有する。自己最良解は、新しい解を生

成するための情報源としてだけでなく、非優越解を含む最良解を保持する役割を担う。

任意の世代において、生成した解および自己最良解が共に優れた個体 \mathbf{v} と、生成した解および自己最良解が共に劣った個体 \mathbf{w} が共存する場合がある。自己最良解の更新処理により、個体 \mathbf{v} が持つ優れた解のいずれかが失われ、個体 \mathbf{w} の劣った解が次世代に引き継がれる。つまり、個体 \mathbf{v} においては非優越解などの有用な解情報が失われ、個体 \mathbf{w} においては質の低い自己最良解を用いた進化により非効率な解探索となる可能性がある。そこで優良解情報を個体間で交換して、優良解を保持し、劣った自己最良解を持つ個体の解探索効率を向上させる機構を導入した。

図 1 に 4 目的 750 アイテムの 0-1KP を用いた実験結果を示す。初期の解は確率振幅が $|0\rangle$ または $|1\rangle$ に収束しておらずほぼランダムに生成されるため、優良解交換率 R 、つまり全個体に占める他の個体から優れた解を受け取る個体の割合は、第 1 世代ではおおよそ 0.25 である。初期フェーズ以降は 0.05 未満へと推移する。つまり、各個体は基本的に孤立して解探索をしているといえる。一方、優良解の保持機構 (SSS) を有する MQEA/I^(PLT) および MQEA/I^(CLT) は、保持機構を有しない MQEA/I^(PLT,SSS) および MQEA/I^(CLT,SSS) よりも高い位置で hypervolume が推移しており、優れた非優越解セットを得ている。優良解情報を個体間で交換することで、非優越解セットが形成するパレートフロントを保持し、また解探索が停滞した個体の解探索効率が向上する。

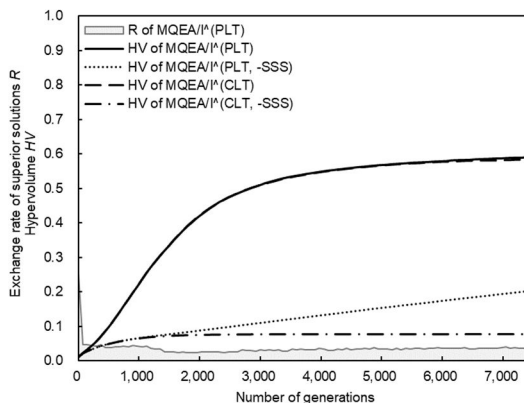


図 1: 解交換率および hypervolume の遷移 (4 目的 750 アイテム 0-1KP)

(2) 解探索の停滞を回避可能な回転角度ルックアップテーブル

個体は遺伝子として有する量子ビットの確率振幅を更新して進化する。任意の世代における、個体 i の解 $\mathbf{p}_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iM}]$ および自己最良解 $\mathbf{b}_i = [b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{iM}]$ (M は遺伝子数) に基づいて、量子ビット $q_i = [q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iM}]$ の確率振幅 α_{ij} および β_{ij} を更新する。回転角度の大きさの最大値は θ_{cij} である。表 1 に従来回転角度ルックアップテーブル (CLT) と提案する回転角度ルックアップテーブル (PLT) を示す。PLT では \mathbf{p}_i と \mathbf{b}_i が同一である場合、解探索が停滞していると考え、自己最良解情報とは反対方向への回転、つまり改悪を許した進化により、生成する解の多様性が高まる。図 1 および図 2 のように、PLT を用いた MQEA/I^(PLT)、MQEA/I^(PLT,SSS) は解探索終盤においても解探索が停滞していない。一方、最終的に得られる解セットは、図 3 のように、MQEA/I^(PLT) を用いた場合は広範囲に広がる。MQEA/I^(CLT) を用いた場合は、MQEA/I^(PLT) よりも狭範囲ではあるが、より質の高い非優越解セットを得ることができる。

表 1: 従来回転角度ルックアップテーブルと提案する回転角度ルックアップテーブル

p_{ij}	b_{ij}	Relation between b_i and p_i	Conventional lookup table				Proposed lookup table			
			$\alpha_{ij}\beta_{ij} > 0$	$\alpha_{ij}\beta_{ij} < 0$	$\alpha_{ij} = 0$	$\beta_{ij} = 0$	$\alpha_{ij}\beta_{ij} > 0$	$\alpha_{ij}\beta_{ij} < 0$	$\alpha_{ij} = 0$	$\beta_{ij} = 0$
0	1	b_i dominate p_i	θ_{cij}	$-\theta_{cij}$	—	$\pm\theta_{cij}$	θ_{cij}	$-\theta_{cij}$	—	$\pm\theta_{cij}$
1	0		$-\theta_{cij}$	θ_{cij}	$\pm\theta_{cij}$	—	$-\theta_{cij}$	θ_{cij}	$\pm\theta_{cij}$	—
0	0	b_i equals to p_i	0	0	—	0	$\pm\theta_{cij}$	$\pm\theta_{cij}$	—	$\pm\theta_{cij}$
1	1		0	0	0	—	$\pm\theta_{cij}$	$\pm\theta_{cij}$	$\pm\theta_{cij}$	—
Otherwise			0	0	0	0	0	0	0	0

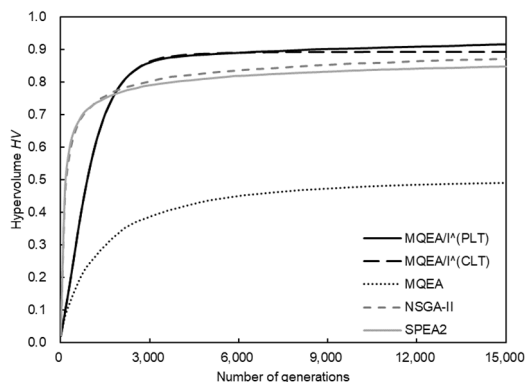


図 2: hypervolume の遷移 (2 目的 750 アイテム KP)

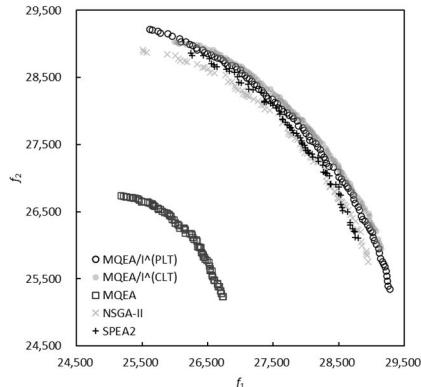


図 3: 非優越解セット (2 目的 750 アイテム KP)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshifumi Moriyama, Ichiro Iimura, and Shigeru Nakayama	4. 巻 (accepted)
2. 論文標題 Isolation Strategy for Multi-Objective Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Intelligence Studies	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 森山賀文, 飯村伊智郎, 中山茂
2. 発表標題 グループの概念を有しない多目的量子風進化計算手法の提案
3. 学会等名 平成29年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森山賀文, 飯村伊智郎, 中山茂
2. 発表標題 多目的0-1KPIにおける多目的量子風進化計算手法QMEA based on Single Populationの探索性能評価
3. 学会等名 2019年度情報文化学会九州支部研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川上竜矢, 森山賀文, 飯村伊智郎, 中山茂
2. 発表標題 多目的量子風進化計算手法QMEA-SPによる多目的順列最適化の試み
3. 学会等名 2020年度情報文化学会九州支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯村伊智郎, 森山賀文, 中山茂
2. 発表標題 量子機械学習における変分量子固有値法による数分割問題の研究
3. 学会等名 2020年度情報文化学会九州支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshifumi Moriyama, Ichiro Imura, and Shigeru Nakayama
2. 発表標題 Consideration on Isolation Strategy for Multi-Objective Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm
3. 学会等名 2021 IEEE 12th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IEEE IWCIA2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村山光太郎, 森山賀文, 中山 茂
2. 発表標題 量子小切手の真贋鑑定処理における閾値の検証
3. 学会等名 2022年情報文化学会九州支部研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯村伊智郎, 中山茂
2. 発表標題 Julia量子ゲート方式による量子Nクイーン問題の研究
3. 学会等名 2022年情報文化学会九州支部大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	飯村 伊智郎 (Iimura Ichiro) (50347697)	熊本県立大学・総合管理学部・教授 (27401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------