

量子ビット遺伝子表現法を用いた順列最適化

Permutation Optimization Using a Gene-Coding Method of Quantum Bit

飯村 伊智郎[†]森山 賀文[‡]大野 友嗣[‡]中山 茂[§]

Ichiro Iimura Yoshifumi Moriyama

Tomotsugu Ohno Shigeru Nakayama

1. はじめに

量子ビットを模倣した遺伝子表現 (量子ビット表現) を用いた Quantum-inspired Evolutionary Algorithm (QEA) [1, 2] や QEA based on Pair Swap (QEAPS) [3] は, 多様な大域的探索から集中化した局所的探索へと自動的に遷移するという優れた特徴を持つ. 一方, 量子ビット表現を用いたこれらのアルゴリズムは, その性質上, バイナリ値を解とする最適化問題にしか適用できない. そこで, 量子ビット表現の適用範囲を広げべく, 整数値を解とする最適化問題に適用するための量子ビット表現に基づく整数型遺伝子表現法 [4], さらには重複した要素のない順列を解とする最適化問題に適用するための整数型遺伝子表現法における順列解釈法 [5] が提案されている. 巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem: TSP) を対象とした実験において, 量子ビット表現を用いても順列最適化が可能であることが示されているものの, 探索性能の面で改善の余地がある. そこで本研究では, 探索性能の改善を目的として, 量子ビット表現を用いても順列最適化を可能とする新たな遺伝子表現法を提案する.

2. 順列解を取扱える量子ビット表現に基づく新たな遺伝子表現法

QEA や QEAPS は, 個体の遺伝子に量子ビット表現を用い, ユニタリ変換による進化を繰り返す. その際, 個体 i は量子ビットで表現された染色体 q_i と, それまでの探索で得られた最良解のバイナリ情報 b_i を保持する. 図 1 は, 提案する遺伝子表現法を用いた個体から順列を得るまでの流れ, および最良解として保持する情報を図示したものであり, QEA や QEAPS における「 q_i の観測」, 「 p_i の修正」, 「 b_i の更新」の処理に相当する. なお, その後の処理である「回転角度リスト u_i の作成」や「ユニタリ変換による q_i の更新」については変更がないため, 図 1 では省略した. 以下に, TSP を対象として, 提案する遺伝子表現法の要点を述べる.

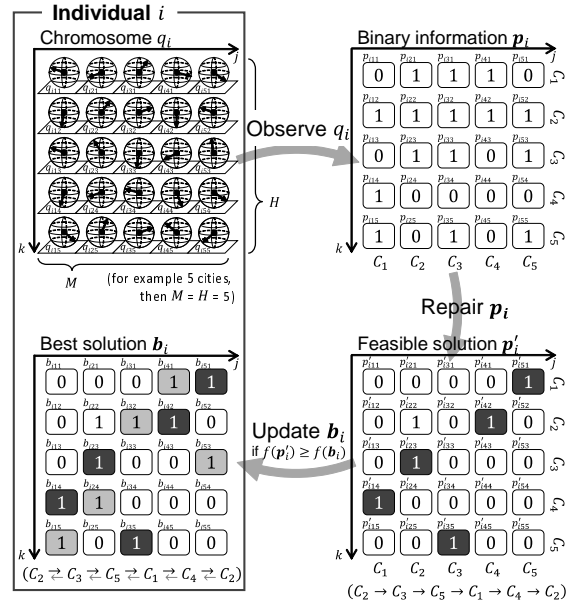
染色体のコーディング 対象とする問題の都市数を N とすると, 個体 i の遺伝子には, $N \times N$ 個 ($M = H = N$) の量子ビット q_{ijk} をコーディングし, 全都市および全都市間の経路に 1 つずつ量子ビットを割り当てる. なお, q_{ijj} ($k = j$) は都市 C_j に割り当てられた量子ビットを, q_{ijk} ($k \neq j$) は 2 都市 C_j, C_k 間の経路に割り当てられた量子ビットを表す.

[†]熊本県立大学, Prefectural University of Kumamoto

[‡]有明工業高等専門学校, National Institute of Technology, Ariake College

[§]鹿児島大学, Kagoshima University

[¶]QEA は従来の古典的コンピュータ上で動作する探索アルゴリズムであり, 量子コンピュータ上で動作する量子アルゴリズムではない. “Quantum-inspired” という名称は量子アルゴリズムであるとの誤解を招きやすいため, 注意いただきたい.

図 1: 順列解を取扱える遺伝子表現法 ($N = 5$ の場合)

訪問開始都市の選択 q_i を観測することで得られたバイナリ情報 p_i において, $p_{ijj} = 1$ ($k = j$) を最初に訪問する都市とし, $p'_{ijj} = 1$ とする. ただし, 選択可能な都市が複数存在する場合には, その中から 1 つの都市をランダムに選択する. 一方, 選択可能な都市が存在しない場合には, 全都市の中から 1 つの都市をランダムに選択する.

巡回路の選択 観測結果 $p_{ijk} = 1$ ($k \neq j$) を都市 C_j から都市 C_k への経路と考え, $p'_{ijk} = 1$ とする. ただし, 都市 C_j から選択可能な経路が複数存在する場合には, その中から 1 つの経路をランダムに選択する. 一方, 未訪問都市が残っているにも関わらず選択可能な経路が存在しない場合には, 未訪問都市への経路の中から 1 つの経路をランダムに選択する. 上述の処理を訪問開始都市から順に繰り返すことで, 各都市を結ぶ経路を逐次決定し, 1 つの巡回路を得る.

更新する最良解情報 得られた解 p'_i が最良解 b_i よりも優れている場合, 得られた巡回路情報 p'_i (順方向) およびその逆方向の巡回路情報を重ね合わせた情報を, 最良解情報として更新する.

両方向の巡回路情報を最良解情報として保持することで, 世代を重ねるごとに, 観測結果 p_i が最良解 b_i に近づくように量子ビットの確率振幅が更新され, 順方向の経路だけでなく逆方向の経路も選択されやすくなる. そのため, 探索の過程で都市の訪問順が一部反転した新たな巡回路が得られる

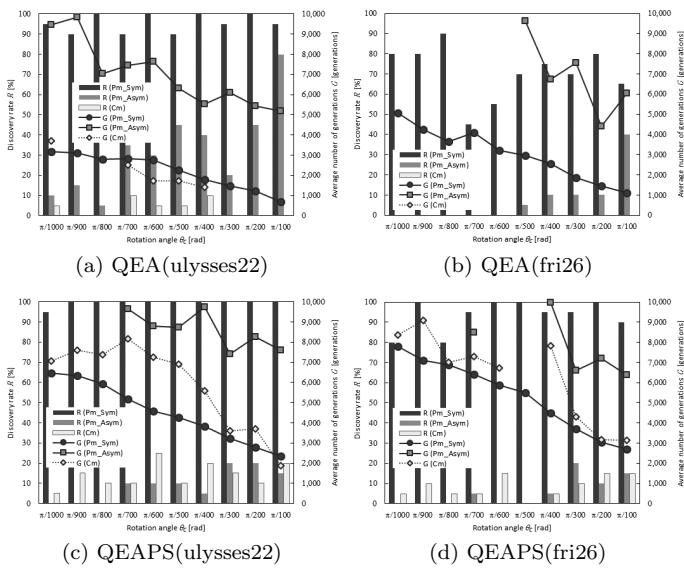


図2: 探索性能の比較 (最適解発見率 R : 棒グラフ, 平均最適解発見世代数 G : 折れ線グラフ)

ことで, k -Opt 法のような解の改善が期待できる。

3. 評価実験

本研究では提案した遺伝子表現法の探索性能を分析・評価するため, TSPLIB の burma14, ulysses16, ulysses22, gr24, fri26 を用いて計算機実験を行った。探索アルゴリズムには, 提案する両周りの巡回路情報を最良解として持つ遺伝子表現法 (Pm_Sym), 片方周りの巡回路情報を最良解として持つ遺伝子表現法 (Pm_Asym), つまり図1における b_i の更新に p'_i をそのまま用いる手法, および先行研究 [5] である整数型遺伝子表現法における序数に基づく順列解釈法 (Cm) をそれぞれ実装した QEA および QEAPS を用いた。QEA, QEAPS 共通のパラメータである個体数を 100 個体, 進化の終了条件としての適応度 (巡回路長) の評価回数を 1,000,000 回, つまり 10,000 世代進化させ, QEA 特有のパラメータであるグループ数を 5 個, 大域的移住間隔を 100 世代とした。また, ユニタリ変換時の回転角度 θ_C [rad] を $\theta_C = \{\pi/1000, \pi/900, \pi/800, \pi/700, \pi/600, \pi/500, \pi/400, \pi/300, \pi/200, \pi/100\}$ と変化させてそれぞれ 20 回試行した。 θ_C は, 収束速度と得られる解の質に影響するパラメータである。

提案手法 Pm_Sym, Pm_Asym および従来手法 Cm を, QEA, QEAPS にそれぞれ実装した場合の実験結果を図2に示す。20 回の試行の中で最適解を発見できた割合 (最適解発見率) R を棒グラフで表し, 最適解が得られた試行における最適解の発見までに要した平均世代数 (平均最適解発見世代数) G を折れ線グラフで表す。

また, 提案手法の k -Opt 的な局所改善効果を確認するために, $f(p'_i) > f(b_i)$ となる新たな解 p'_i が得られたときの k -Opt 的改善頻度を調べた。実験で使用したパラメータ値は前実験と同様である。前実験と同様の TSP を用い, 20 回試行して, $k = 2, 3, \dots, N$ の k -Opt

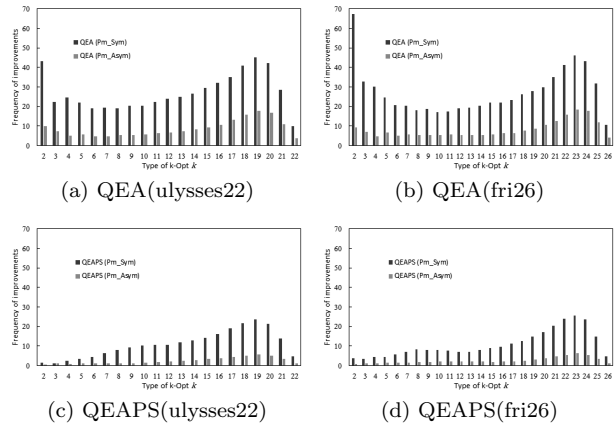


図3: k -Opt 的改善頻度 ($\theta_C = \pi/500$ [rad])

的改善回数をそれぞれ調べた。ただし, k は k -Opt 的改善の種別を表し, N は対象問題の都市数を表す。図3に実験結果を示す。なお, 最適解が発見されるとその時点で解探索が終了し, 最適解が発見されない場合には終了条件である 10,000 世代で解探索が終了するため, 試行ごとに解探索を行った世代数が異なる場合がある。そこで, 各 k -Opt 的改善回数を試行ごとの世代数で正規化し, 20 回の試行の平均値を求め, 100 世代あたりの k -Opt 的改善頻度を求めた。

4. おわりに

提案した遺伝子表現法では, 全都市および全経路に 1 つずつ量子ビットを割当て, 得られた順方向の巡回路のみならず, 逆方向の巡回路情報も最良解情報として併せ持つ。提案する遺伝子表現法の特徴を確認するために, まずは比較的規模の小さな 5 つの TSP を用いた計算機実験を行った。その結果, 提案手法は k -Opt 法のような解改善の効果が期待でき, 従来手法に比べて高確率で最適解を探索できることを明らかにした。今後は, より大きな規模の TSP へ適用し, 提案手法をより詳細に分析・評価したい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25330265, 26580097 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] K.-H. Han and J.-H. Kim: Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization, *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 6, pp. 580–593 (2002).
- [2] K.-H. Han and J.-H. Kim: On setting the parameters of QEA for practical applications: Some guidelines based on empirical evidence, *Genetic and Evolutionary Computation – GECCO 2003*, pp. 427–428 (2003).
- [3] S. Nakayama, T. Imabeppu, and S. Ono: Pair swap strategy in quantum-inspired evolutionary algorithm, *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*, Seattle, Washington, USA. (2006).
- [4] 飯村伊智郎, 森山蒼文, 中山茂: 観測後ビット列の復号処理の違いによる整数型遺伝子の量子ビット表現法に関する探索性能分析, *情報学論*, Vol. 55, No. 2, pp. 1110–1115 (2014).
- [5] Y. Moriyama, I. Imura, T. Ohno, and S. Nakayama: An experimental study on optimization in permutation spaces by quantum-inspired evolutionary algorithm using quantum bit representation, *J. Signal Processing*, Vol. 19, No. 6, pp. 227–234 (2015).