

# 遺伝的アルゴリズムによる量子テレポテーション回路の生成

## Genetic Algorithms for Quantum Teleportation Circuit Design

矢吹 太朗

伊庭 齊志

Taro Yabuki

Hitoshi Iba

yabuki@miv.t.u-tokyo.ac.jp iba@miv.t.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院新領域創成科学研究科基盤情報学専攻

Department of Frontier Informatics, Graduate School of Frontier Sciences,

The University of Tokyo

We propose a method to apply genetic algorithms to the quantum circuit design. We show by experiments that without any deep knowledge of the problem it is possible to evolve a circuit for the quantum teleportation simpler than ever known.

### keywords

genetic algorithms, quantum teleportation, quantum computer, quantum computation, quantum circuit

## 1 はじめに

量子アルゴリズムの具体的な表現が量子回路である。量子ビット (qubit) が持つ重ね合わせの状態を長時間保つことが現在の技術では難しいため、よりシンプルな、つまりゲートの少ない回路が望まれるが、その設計にはさまざまな困難がある。遺伝的アルゴリズム (GA) [3] はランダムな解の候補から始めることができ、その回路全体を見て評価することだけでできれば実行できるため、この問題に向いていると思われる。

我々は、量子計算の比較的単純で扱いやすいが興味深い例である量子テレポテーションの回路生成に GA を応用した。人間が作った正しい回路を与えて進化させた既存の研究と異なり、本質的な条件と望ましい出力を考慮するだけで正しい回路を獲得できること、それによってこれまで知られていたよりもシンプルな回路が得られることを本稿では示す。

## 2 量子テレポテーション

量子テレポテーションは、2つの古典的なビットを転送するだけで、qubit の状態を離れたところに伝えることができる情報伝達法である。このための具体的な回路が図1である<sup>1</sup>[1]。このアリスからボブへの通

信は 11 個のゲートでできる。

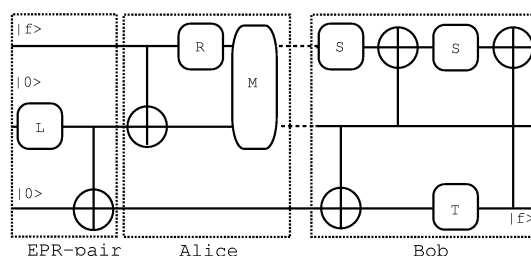


図1: Brassard's circuit[1].

## 3 提案する手法・結果

我々が進化論的計算をするにあたって導入した仮定は、3-qubit のシステムであること、EPR-pair 生成部では 0 番目と 1 番目の qubit しか操作できないこと<sup>2</sup>、アリスは 1 番目と 2 番目の qubit しか操作できないこと<sup>3</sup>、観測は 1 回のみであること、使用するゲートは {CNOT, L, R} であることのみである。

遺伝子は例えば次のような {0, 1, 2, 3} のいずれかの文字から成る 1 次元の固定長の配列で、表1に従って

<sup>1</sup>図中の L は  $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$ 、R は  $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ 、S は  $\begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 、T は  $\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$ 、M は観測のことである。

<sup>2</sup>2 番目の qubit はアリスのところにあるため

<sup>3</sup>0 番目の qubit はボブのところにあるため

3文字をひとまとまりとするコドン単位で解釈される。

EPR-pair
アリスの操作
ボブの操作

112|231|001|331|
132|012|221|302|
001|100|002|201

Separator の後はアリスの操作となり、別の表を用いる。ボブの操作についても同様の表を用意する（詳細は [4]）。

		2文字目				
		0	1	2	3	
0		CNOT <sub>01</sub>	CNOT <sub>10</sub>			0
		CNOT <sub>01</sub>	CNOT <sub>10</sub>			1
		CNOT <sub>01</sub>	CNOT <sub>10</sub>			2
1	1	L <sub>0</sub>	L <sub>1</sub>			0
		L <sub>0</sub>	L <sub>1</sub>			1
		L <sub>0</sub>	L <sub>1</sub>			2
2		R <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>			0
		R <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>			1
		R <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>			2
3		separator				*

表 1: EPR-pair 生成部

最終状態  $(a_{j,i})$  と望ましい最終状態  $(a|00) + b|01) + c|10) + d|11)) \otimes (p|0) + q|1)) = (ap\ aq\ bp\ bq\ cp\ cq\ dp\ dp)$  のずれを、

$$error_j \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=0,2,4,6} \left| \frac{a_{j,i}}{a_{j,i+1}} - \frac{p}{q} \right|$$

で表す<sup>4</sup>。個体の適合度  $f$  は、 $f = 1/(1+10 \sum error_j)$  で与える。ただしこの  $f$  が 1、つまり正しい回路が得られている場合は  $f$  に (1/ゲートの数) を加え、回路の大きさでも淘汰圧をかける。5,000 個体を用い、最大 1,000 世代まで計算する。

GA によって得られた回路で最もシンプルなものを図 2 に示した。8 個のゲートでテレポテーションはできる。

<sup>4</sup>ここで  $n$  は  $(0,0)$  でない  $(a_{j,i}, a_{j,i+1})$  ( $i$  は偶数) の数で、和はそれらについてのみ取る。最終状態が  $0$  の場合は  $error_j = 100$  とする。望ましい最終状態になっていれば  $error_j = 0$  である。また  $j$  は観測によって状態が分岐し最終状態に複数の可能性がある場合に、それを識別するための添え字である。

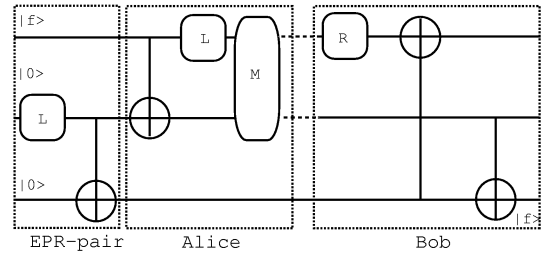


図 2: Circuit for teleportation (this work)

## 4 考察・おわりに

遺伝子長 60 (ゲートは最大で 20 個) の場合は常にゲート数 8 の回路が生成された。この回路は平均 350 世代 (標準偏差 280) で発見できているが、それまでに試す回路は  $5,000(\text{個体}) \times 350(\text{世代}) \sim 1.8 \times 10^6$  通りである。一方、ゲートは全部で 14 種類あるため<sup>5</sup>、回路のすべての可能性は  $20^{14} \sim 10^{18}$  通りである。解がどの程度の密度で存在するかわからないため、これらの数値を直接比べることはできないが、この効率ならば他の回路生成にもこの手法は適用できると思われる。

Williams らは量子テレポテーションをユニタリー変換・観測・ユニタリー変換という 3 つの部分に分け、ユニタリー変換の部分で GA を使ってより基本的なユニタリー変換から合成している [2]。目標のユニタリー変換を与えて進化させていることと、ユニタリー変換としては正しいが、量子テレポテーションとしては適当でない回路を生成してしまう可能性があるという点で彼らの方法には不満がある。

これに対し、我々は本質的な条件と若干の仮定のみのもとで進化論的計算を行った。その結果正しい回路を獲得でき、さらにそれはこれまで知られていたよりもシンプルな回路であった。

## 参考文献

- [1] G. Brassard. Teleportation as a quantum computation. In *Proceedings of the Fourth Workshop on Physics and Computation*, p. 44. New England Complex Systems Institute, 1996. quant-ph/9605035.
- [2] C. P. Williams and A. G. Gray. Automated design of quantum circuits. In *QCC'98 LNCS 1509*, p. 113. Springer-Verlag, 1999.
- [3] 伊庭斉志. 遺伝的アルゴリズムの基礎. オーム社, 1994.
- [4] 矢吹太郎, 伊庭斉志. 遺伝的アルゴリズムによる量子回路生成. 信学技報 Vol.100 No.89, p. 9. 電子情報通信学会, 2000.

<sup>5</sup>CNOT が 6 通り、L, R がそれぞれ 3 通り、そして観測と区切りである。