

# 迷路法と遺伝的アルゴリズムに基づく 一層配線手法

金杉 昭徳      中谷 直司  
埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科

〒338-8570 浦和市下大久保255  
TEL/FAX 048-858-3473  
E-mail: kanasugi@ees.saitama-u.ac.jp

あらかし

遺伝的アルゴリズムは、生物の進化の過程にヒントを得た最適化アルゴリズムの一つであり、大域的探索に優れるという特長を持つ。

一層配線においては配線経路は複雑になり、高い配線能力が要求される。そこで本論文では、迷路法と遺伝的アルゴリズムに基づく一層配線手法を提案し、計算機実験により有効性を示す。

キーワード      詳細配線, 一層配線, 遺伝的アルゴリズム, CAD

## A Single-Layer Routing Method based on Maze Router and Genetic Algorithm

Akinori KANASUGI and Naoshi NAKAYA  
Department of Electrical and Electronic Systems, Saitama University

255 Shimo-okubo, Urawa, 338-8570 Japan  
TEL/FAX 048-858-3473  
E-mail: kanasugi@ees.saitama-u.ac.jp

Abstract

Genetic algorithm is a powerful global optimization method which is based on mechanics of natural selection and genetics. In single-layer routing problems, high connection ability is required because the wire shapes are complex. This paper presents a single-layer routing method based on the maze router and genetic algorithm. The principle of method and the results of computer experiment are discussed in detail.

key words      detailed routing, single-layer routing, genetic algorithm, CAD

## 1 まえがき

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm) は、生物の進化の過程にヒントを得た最適化アルゴリズムの一つであり、大域的探索に優れるという特長を持っている [1][2]. この手法は、解の候補を染色体と呼ばれる配列形式で表現 (コード化) した後、交叉、突然変異等の遺伝的操作を繰り返すことにより、解の改善を図るものであり、集積回路の設計への応用についても報告されている [3][4][5][6].

通常の集積回路の配線には、複数の配線層が用いられる。しかしながら製造期間を極力短縮するために、一層だけでカスタマイズするゲートアレイが提案されている。この場合、配線領域の面積増が問題になるが、微細化技術の向上により、その影響は軽減されつつある。

一般に、一層配線においては配線経路は複雑になり、高い配線能力が要求される。そこで本論文では、大域的最適解探索に優れた遺伝的アルゴリズムを用いた一層配線手法を提案し、計算機実験により有効性を示す。

## 2 遺伝的アルゴリズムの概要

遺伝的アルゴリズムでは、対象としている問題の解候補を生物の染色体を模倣した1次元配列形式にコード化し、ランダムに生成された初期集団に対して、交叉、突然変異、評価、選択という操作を繰り返し適用することによって、最適解を探索する方法である。以下に各操作について述べる。

**コード化** 対象とする事柄を遺伝的アルゴリズムで扱えるように染色体形式で表現する。

**初期集団の生成** ランダムなモジュールの並びを持った複数の個体を生成し、これを初期集団とする。初期集団は、第1世代の親の集団となる。

**選択** 集団の中から、2つの個体を選択する。選択の仕方は、適応度の高い優秀な個体ほど選ばれやすくなる。

**交叉** 選択された2つの個体から、それぞれの特徴を受け継いだ子となる個体を生成する。交叉においては、親の優れた性質 (スキマタ) を壊すことなく子に継承させることが重要である。

**突然変異** 突然変異は、一部の個体に対してランダムに配列の要素を操作する。この操作によって、交叉、選択だけでは作りだせない個体を作り出し、新たな解の探索を可能にする。

**評価** 集団に含まれている各個体を適応度により評価する。この評価値によって、次の世代での交叉に加わる確率が異なるようにして、より優秀な個体が残るようにする。

これらの選択、交叉、突然変異を一世代として、これを予め定められた世代数実行し、最終的に得られた解の中で、最も優秀な解を最終解とする。

## 3 提案する配線手法

一層配線問題においては、配線経路の複雑化は避けられない。そこで経路の探索能力に秀でた迷路法をベースとし、配線順序を遺伝的アルゴリズムによって決定する方法を提案する。

本章では提案する配線手法について、配線モデル、コード化、交叉手法、突然変異、評価関数、初期集団の生成に分けて述べる。

### 3.1 配線モデル

本論文で扱う配線モデルは一層で、各層の配線は水平方向もしくは垂直方向だけに限定し、斜め配線は扱わない。また配線はグリッド上の上ののっているものとする。なお、一般に一層配線においては別の層に補助配線を用意したり、またプリント基板ではジャンパー線が発生させることが欠かせない。しかしながら本論文では、一層内における配線能力の評価を目的として、100%配線可能な例題だけを扱う。

### 3.2 コード化

本手法では、配線の順序を遺伝的アルゴリズムによって最適化する。そこで遺伝子には配線順序の情報を持たせる。いま、 $N_1 \sim N_5$  の5本のネットがあり、 $\{N_5, N_1, N_3, N_2, N_4\}$  の順に配線するという情報のコード化を考える。最も単純に実現するには、添字を並べ、 $\{5, 1, 3, 2, 4\}$  とすれば良いように思われる。しかしながら、この方法では交叉段階において多量の致死遺伝子<sup>1</sup>が生じる。そこで本論文では、順序表現を用いる [1]。概要を以下に示す。

まず、ネット名のリスト  $L$  を作成しておく。

$$L = \{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5\} \quad (1)$$

最初に  $N_5$  に注目すると、これは先頭から5番目にあるので、染色体  $P$  の先頭に "5" を入れ、リスト  $L$  から  $N_5$

<sup>1</sup> 1つの遺伝子内に同一ネットが複数回現れたり、または1つも現れない等の解として不適格な遺伝子

を削除する。すなわち、

$$P = \{5\}, \quad L = \{N_1, N_2, N_3, N_4\} \quad (2)$$

次に  $N_1$  はリスト  $L$  の先頭にあるので、

$$P = \{5, 1\}, \quad L = \{N_2, N_3, N_4\} \quad (3)$$

とする。ネット  $N_3$  は残りのリストの 2 番目なので、

$$P = \{5, 1, 2\}, \quad L = \{N_2, N_4\} \quad (4)$$

となる。また  $N_2$  は先頭にあるので、

$$P = \{5, 1, 2, 1\}, \quad L = \{N_4\} \quad (5)$$

となり、最終的には、

$$P = \{5, 1, 2, 1, 1\}, \quad L = \{\} \quad (6)$$

を得る。このようなコード化手法を用いると、 $P$  の 1 桁目には 1~5, 2 桁目には 1~4, 3 桁目には 1~3, 4 桁目には 1~2 の数値が入り、そして 5 桁目は常に 1 となる。これら各桁の値のとり得る範囲は交叉後も不変であり、またリストにはネット名が重複なく存在するため、致死遺伝子が生成されることはない。

### 3.3 交叉手法

交叉手法は一様交叉を用いる。これは、2 つの染色体の同一座標（遺伝子座）の遺伝子をランダムに相互に交換する交叉手法である。

### 3.4 突然変異

突然変異を行う際には、各桁の最大値に注意する。すなわち、ネット本数を  $N_n$  とすれば、遺伝子における第 1 桁目の最大値は、 $N_n$ 、第  $i$  桁目は  $N_n - i + 1$ 、そして最後尾（第  $N_n$  桁目）は常に 1 である。

### 3.5 評価関数

一般に配線手法の評価項目としては、結線率、配線長、ビア数等がある。本手法では、(1) 迷路法をベースにしているため配線長は最短化され、(2) 一層配線のためビアは存在しないと考え、結線率だけを評価項目とする。したがって評価関数  $f$  を、総配線本数を  $N_n$ 、結線された配線本数を  $N_c$  としたとき、

$$f = \frac{N_c}{N_n} \quad (7)$$

と定める。

### 3.6 初期集団の生成

初期集団は、ランダムに発生させる。ただし、突然変異の項で述べたように各桁の数値のとりうる範囲に注意する。

## 4 計算機実験 A

提案した手法の有効性を確認するため、計算機実験を行った。Windows95 上の Visual Basic (コンパイラ) を用いて実装し、DOS/V パソコン (Pentium 133MHz) で実行した。なお例題は、100%配線可能な 2 端子間ネットリストを乱数を用いて生成した。ただし端子間のマンハッタン距離は、配線領域の横方法のグリッド数を  $N_x$ 、縦方向のグリッド数を  $N_y$  としたとき、 $[5, N_x + N_y]$  となるようにした。また遺伝的アルゴリズムに関するパラメータは、個体数 10、世代数 25、エリート保存数 2、突然変異率 5% とした。

最初に、グリッドサイズ  $10 \times 10$ 、ネット 9 本の条件で、5 種類のネットリスト ( $N_{10a} \sim N_{10e}$ ) の配線を実行した結果を表 1 に示す。ここでは各ネットリストについて 5 回ずつ実行したときの結線率 (評価値) とその平均値を示した。また迷路法単独で各ネットリストを 10 回ずつ試行したときの平均値も併せて示した (配線順序はランダムに与えた)。

表 1: サイズ  $10 \times 10$  (9 本) における結線率 A

ネット	1	2	3	4	5	平均
$N_{10a}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$N_{10b}$	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
$N_{10c}$	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
$N_{10d}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$N_{10e}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
平均	-	-	-	-	-	0.96
迷路法	-	-	-	-	-	0.87

同様に、グリッドサイズ  $20 \times 20$  (ネット 20 本) ~  $50 \times 50$  (ネット 50 本) の結果を表 2~表 5 に示す。

これらの結果から、迷路法に比べて結線率は著しく向上していること、また各試行での結線率のばらつきは少ないことが判る。ただし、計算時間はおよそ 250 倍要している<sup>2</sup>。また以上の結果を未結線本数で見ると、

- ・サイズ  $10 \times 10$  (ネット 9 本) … 0 ~ 1 本
- ・サイズ  $20 \times 20$  (ネット 20 本) … 0 ~ 3 本

<sup>2</sup> 個体数 (10) × 世代数 (25) = 250

表 2: サイズ 20 × 20 (20 本) における結線率 A

ネット	1	2	3	4	5	平均
$N_{20a}$	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
$N_{20b}$	1.00	1.00	0.95	1.00	1.00	0.99
$N_{20c}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$N_{20d}$	0.90	0.95	0.85	0.95	0.95	0.92
$N_{20e}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
平均	-	-	-	-	-	0.97
迷路法	-	-	-	-	-	0.69

表 3: サイズ 30 × 30 (30 本) における結線率 A

ネット	1	2	3	4	5	平均
$N_{30a}$	0.90	0.90	0.90	0.93	0.90	0.91
$N_{30b}$	0.83	0.90	0.87	0.87	0.90	0.87
$N_{30c}$	0.97	0.93	0.97	0.97	0.87	0.94
$N_{30d}$	0.93	0.93	0.90	0.97	0.90	0.93
$N_{30e}$	0.87	0.90	0.93	0.87	0.87	0.89
平均	-	-	-	-	-	0.91
迷路法	-	-	-	-	-	0.62

- ・サイズ 30 × 30 (ネット 30 本) … 1 ~ 5 本
- ・サイズ 40 × 40 (ネット 40 本) … 2 ~ 12 本
- ・サイズ 50 × 50 (ネット 50 本) … 3 ~ 11 本

となる。さらに実行時間を表 6 にまとめて示す。ここで計算時間は問題の規模の 4~5 乗に比例している。その内訳は、(横方法のグリッド数  $N_X$ ) × (縦方向のグリッド数  $N_Y$ ) × (配線本数  $N_n$ ) × (平均配線長) で約 4

表 4: サイズ 40 × 40 (40 本) における結線率 A

ネット	1	2	3	4	5	平均
$N_{40a}$	0.70	0.75	0.75	0.70	0.73	0.73
$N_{40b}$	0.88	0.93	0.90	0.93	0.90	0.91
$N_{40c}$	0.90	0.93	0.93	0.88	0.90	0.91
$N_{40d}$	0.83	0.83	0.93	0.85	0.88	0.86
$N_{40e}$	0.83	0.95	0.90	0.85	0.93	0.89
平均	-	-	-	-	-	0.86
迷路法	-	-	-	-	-	0.58

表 5: サイズ 50 × 50 (50 本) における結線率 A

ネット	1	2	3	平均
$N_{50a}$	0.90	0.88	0.94	0.91
$N_{50b}$	0.80	0.84	0.78	0.81
$N_{50c}$	0.78	0.82	0.88	0.86
平均	-	-	-	0.86
迷路法	-	-	-	0.60

表 6: 実行時間の比較 (個体数 10, 世代数 25)

問題の規模	実行時間 (sec)
サイズ 10 × 10 (ネット 9 本)	1
サイズ 20 × 20 (ネット 20 本)	17
サイズ 30 × 30 (ネット 30 本)	112
サイズ 40 × 40 (ネット 40 本)	461
サイズ 50 × 50 (ネット 50 本)	910

乗となる。したがって大規模な問題に対しては配線領域を分割して適用する等の工夫を要する。

続いて図 1 にネットリスト  $N_{20b}$  (サイズ 20 × 20, ネット 20 本) の 5 回目の配線結果を示す。また、この例における世代数と評価値の関係を図 2 に示す。図中、実線は最良値、破線は平均値を表す。この例では、8 世代で全て結線され、収束が大変速いことが判る。

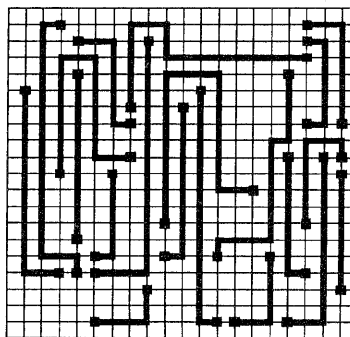


図 1: 配線結果の一例 (ネット  $N_{20b}$ , 未結線 0 本)

同様に、ネットリスト  $N_{30c}$  (サイズ 30 × 30, ネット 30 本) の 1 回目の配線結果を図 3 に示す。この場合は 7 世代で飽和し、未結線が 1 本生じた。

最後に、ネットリスト  $N_{40e}$  (サイズ 40 × 40, ネット

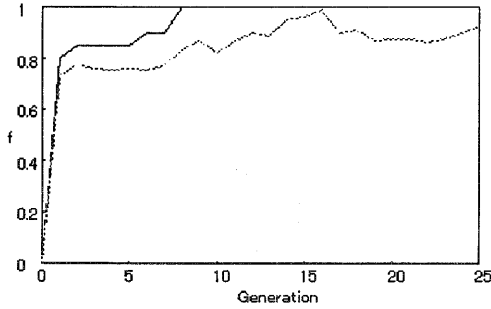


図 2: 世代数と評価値の関係 (ネット  $N_{20b}$ )

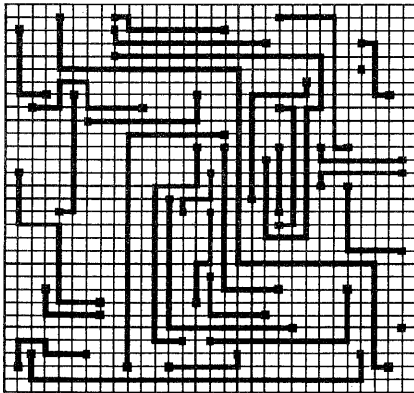


図 3: 配線結果の一例 (ネット  $N_{30c}$ , 未結線 1 本)

ト 40 本) の 2 回目の配線結果を図 4 に示す. この場合は 12 世代で飽和し, 未結線が 2 本生じた.

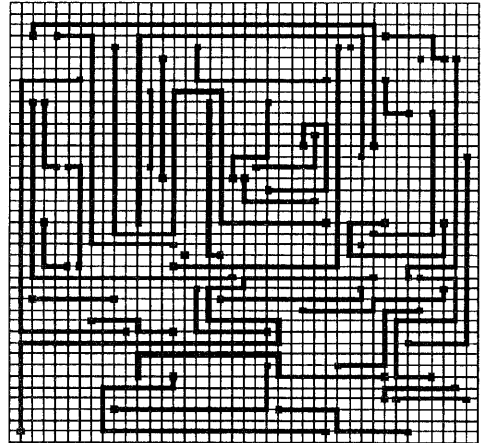


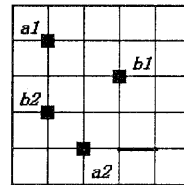
図 4: 配線結果の一例 (ネット  $N_{40e}$ , 未結線 2 本)

位置は同じでも迷路法における経路探索が, まず垂直方向の経路を探し, それが不可能な場合は水平方向を探した場合だと, (d) と同じ結果になる. したがって, 配線順序の情報だけでは不十分な場合があることが解る. これがグリッドサイズ  $10 \times 10$  の例でも未結線が生じる理由の 1 つと思われる.

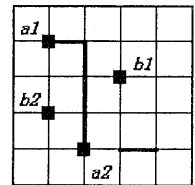
## 5 考察

本手法の有効性は計算機実験により確認できたが, グリッドサイズ  $10 \times 10$  の例においても未結線が生じる場合がある. そこでまず, 個体数を 100, 世代数を 250 に増やし, 100 倍の計算時間をかけて実行したが, 改善は見られなかった. この原因は以下のように考えられる.

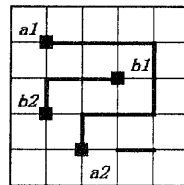
図 5 に配線問題の例を示す. (a) が例題であり,  $a_1 - a_2$ ,  $b_1 - b_2$  間を結線する. また添字 1 は始点, 2 は終点を表す. なお, 迷路法における経路探索は, まず水平方向の経路を探し, それが不可能な場合は垂直方向を探すものと仮定する. 最初に  $a$  を配線すれば, (b) に示すように失敗する. 他方  $b$  から配線すれば, (c) に示すように成功する. ところが,  $b$  の始点と終点を入れ替えると, (d) に示すように失敗に終わる. 同様に, 始点, 終点の



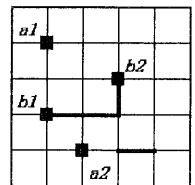
(a) 例題



(b) aを先に配線



(c) bを先に配線



(d)  $b_1$ と $b_2$ が入れ替わった場合

図 5: 配線問題の例 (1)

さらに, 始点, 終点の入れ替えや経路探索方向の入れ替えをやっても結線できない場合を図 6 に示す. (a) が例題である. まず,  $a$  を先に結線すると (b) のように失敗する. ところが,  $b$  から結線しても (c) もしくは, (d)

のような結果になり、やはり失敗する。この例の解は (e) であるが、解決法は現在、検討中である。

その他の改良としては、例えば、未結線ネットを先に配線するように順番を操作すること等が挙げられる。

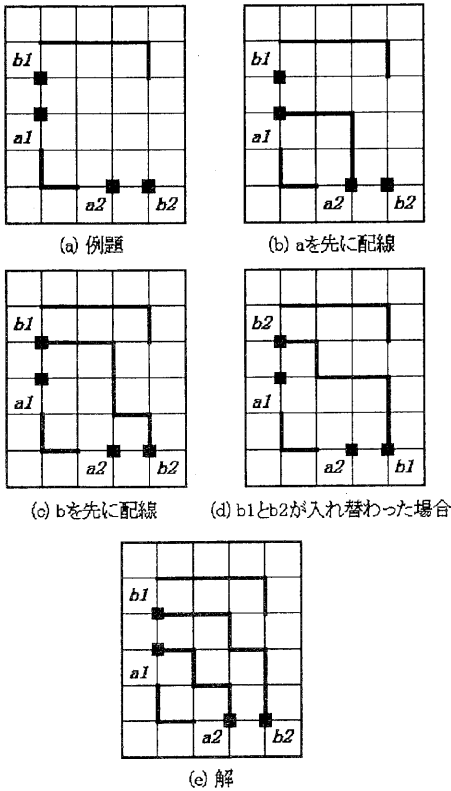


図 6: 配線問題の例 (2)

## 6 計算機実験 B

ここでは、始点と終点の入れ替えを考慮した計算機実験結果を示す。染色体情報として、以下のデータを追加する。

$$P_e = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_{N_n}\}, \quad e_i = 0 \text{ or } 1 \quad (8)$$

ここで、 $e_i$  はフラグであり、1 のときに第  $i$  番目のネットの始点と終点の入れ替えを行い、0 のときには行わないものとする。このように染色体を拡張して計算機実験 A と同じ条件で実験を行った結果を表 7~表 11 に示す。

これらの実験結果をまとめると以下ようになる。

- (1) グリッドサイズ  $10 \times 10$  (ネット 9 本) の場合: 全ての試行で、100% 結線できた。

- (2) グリッドサイズ  $20 \times 20$  (ネット 20 本) の場合: 計算機実験 A では未結線の出た例でも 100% 結線できるようにになり、平均結線率も向上した。
- (3) グリッドサイズ  $30 \times 30$  (ネット 30 本) の場合: 未結線本数が 0~6 本となり、計算機実験 A に比べてばらつきが大きくなった。平均結線率は下がったが、最良値の平均で比較すると、計算機実験 A の場合が 94% なのに対して、97% と向上した。
- (4) グリッドサイズ  $40 \times 40$  (ネット 40 本) およびグリッドサイズ  $50 \times 50$  (ネット 50 本) の場合: 計算機実験 A に比べて、平均結線率、最良値の平均とも下回った。

以上の結果から、問題が小規模のときには、うまく機能するものの、大規模な場合には依然問題があることが分かった。

表 7: サイズ  $10 \times 10$  (9 本) における結線率 B

ネット	1	2	3	4	5	平均
$N_{10a}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$N_{10b}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$N_{10c}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$N_{10d}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$N_{10e}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
平均	-	-	-	-	-	1.00
迷路法	-	-	-	-	-	0.87

表 8: サイズ  $20 \times 20$  (20 本) における結線率 B

ネット	1	2	3	4	5	平均
$N_{20a}$	1.00	1.00	1.00	0.95	0.95	0.98
$N_{20b}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$N_{20c}$	1.00	0.95	1.00	0.95	1.00	0.98
$N_{20d}$	1.00	0.95	1.00	0.90	0.95	0.96
$N_{20e}$	0.90	0.95	1.00	1.00	0.95	0.96
平均	-	-	-	-	-	0.98
迷路法	-	-	-	-	-	0.69

表 9: サイズ 30 × 30 (30 本) における結線率 B

ネット	1	2	3	4	5	平均
$N_{30a}$	0.90	0.83	0.90	0.90	0.97	0.90
$N_{30b}$	0.90	0.93	0.87	0.97	0.80	0.89
$N_{30c}$	0.97	0.97	0.87	0.93	0.93	0.93
$N_{30d}$	1.00	0.97	0.83	0.80	0.90	0.90
$N_{30e}$	0.90	0.87	0.90	0.93	0.83	0.89
平均	-	-	-	-	-	0.90
迷路法	-	-	-	-	-	0.62

表 10: サイズ 40 × 40 (40 本) における結線率 B

ネット	1	2	3	4	5	平均
$N_{40a}$	0.83	0.75	0.68	0.80	0.75	0.76
$N_{40b}$	0.85	0.85	0.85	0.90	0.85	0.86
$N_{40c}$	0.88	0.90	0.83	0.90	0.83	0.87
$N_{40d}$	0.85	0.90	0.85	0.88	0.88	0.87
$N_{40e}$	0.83	0.75	0.68	0.80	0.75	0.76
平均	-	-	-	-	-	0.82
迷路法	-	-	-	-	-	0.58

## 7 むすび

一層配線問題を、遺伝的アルゴリズムを用いて解く手法を提案し、迷路法と比較して結線率が 10%~50%向上することを計算機実験により示した。

今後、結線率の改善、計算時間の短縮、補助配線およびジャンパー線への拡張を行う予定である。

表 11: サイズ 50 × 50 (50 本) における結線率

ネット	1	2	3	平均
$N_{50a}$	0.90	0.84	0.90	0.88
$N_{50b}$	0.80	0.80	0.80	0.80
$N_{50c}$	0.78	0.80	0.82	0.80
平均	-	-	-	0.83
迷路法	-	-	-	0.60

## 参考文献

- [1] 北野宏明: “遺伝的アルゴリズム”, 産業図書 (1993)
- [2] 石田, 村瀬, 小山: “遺伝的アルゴリズムの基礎と応用”, 森北出版 (1997)
- [3] J. P. Cohoon and W. D. Paris: “Genetic Placement”, *IEEE Trans. CAD*, Vol. 6, No. 6, pp. 956-964 (1987)
- [4] 谷口, 劉, 坂本, 島本: “遺伝的アルゴリズムを用いたチャンネル配線の試み”, 信学論, vol.J76-A, No.9, pp.1376-1379 (1993)
- [5] A. T. Rahmani and N. Ono: “A Genetic Algorithm for Channel Routing Problem”, *Proc. of the 5th Int. Conf. on Genetic Algorithms*, pp. 494-498 (1993)
- [6] V. N. Davidenko, V. M. Kureichik and V. V. Miagkikh: “Genetic Algorithm for restrictive Channel Routing Problem”, *Proc. of the 7th Int. Conf. on Genetic Algorithms*, pp. 636-642 (1997)
- [7] A. Kanasugi, T. Shimayama, N. Nakaya and T. Iizuka: “A Genetic Algorithm for Switchbox Routing Problem”, *Proc. of First Int. Conf. on Rough Sets and Current Trends in Computing*, pp. 247-254 (1998).
- [8] 金杉昭徳, 島山崇, “遺伝的アルゴリズムを用いた詳細配線手法”, 情報処理学会, 設計自動化研究会資料, DA87-8 (1998).