

## プリント基板における部品自動配置問題 に適したコーディングに関する一考察

吉川大弘, 古橋武, 内川嘉樹  
名古屋大学 工学部

最近の電子機器の多機能化に伴い、プリント基板の自動配置の必要性が急速に高まってきている。しかし自動配置の実現は難しく、現状では人手による配置が行われている。本稿では、組み合わせ最適化問題に適するといわれている遺伝的アルゴリズム (GA) をこのプリント基板自動配置問題に適用することを試みる。2種類のコーディング法を提案し、それぞれの手法による配置結果を比較検討する。

## A Study on Coding Methods for Automatic Placements of Parts on Printed Circuit Boards

Tomohiro Yoshikawa, Takeshi Furuhashi, Yoshiki Uchikawa  
(Nagoya University)

For computer aided design (CAD) / design automation (DA) for printed circuit board (PCB), automatic placements of parts have been strongly needed. It is, however, very difficult to realize the automatic placement, since the parts have wide variety in size and these parts should be placed under various constraints.

This paper presents two coding methods of parts placement on the PCB for application of genetic algorithms (GAs). Experiments are done to show the feasibility of the new automatic placement method.

## 1. はじめに

最近の電子機器の多機能化に伴い、電子部品の集積化・小型化が著しく進んでいる。また、プリント基板の小型化・高密度化も要求されてきている。そのため、プリント基板の実装設計の自動化もしくは支援を行うシステムの構築は非常に困難になってきている。プリント基板の実装の問題は配線問題と配置問題に分けることができる。このうち配線に関しては、比較的自動化が進んでいるが、部品配置の自動化は非常に遅れている。プリント基板上における部品配置問題では、極端に大きさの異なる部品を、さまざまな制約条件を満たしながら配置しなくてはならないため、現状ではほとんど人手に頼らざるを得ない状況にある<sup>[1][2]</sup>。文献[1]では過去に提案された種々のアルゴリズムの紹介がなされ、それらが部品配置の自動化には不十分なことを指摘している。また文献[2]では設計者のノウハウを知識ベースとして構築し、AI的手法によりその知識を利用する配置手法が提案されている。しかし、知識の抽出、知識ベースの管理などの知識獲得が問題になると思われる。

最近、生物の進化過程を模倣した遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)<sup>[3]</sup>が注目されている。このアルゴリズムは問題の解候補を数字、記号等により表現した染色体に対して、淘汰・増殖、交叉、突然変異などの遺伝的演算を行うことにより、解の改善を図るものである。GAは組み合わせ最適化問題に有効であることが指摘され、種々の応用研究が進められている<sup>[4]</sup>。

この遺伝的アルゴリズムをプリント基板自動配置問題に適用する研究がなされている<sup>[5][6]</sup>。文献[5][6]では部品の大小にかかわらず、均等に格子点上に配置を行う手法であるために、基板面積の有効利用ができず、高密度実装に対応できないという問題があった。筆者らは、大小様々な部品を基板上につめて配置する問題に遺伝的アルゴリズムを適用する手法を検討し、仮想基板を用いて自動配置を行った<sup>[7][8]</sup>。本稿では、2種類のコーディング法を提案し、実際の電子回路のデータを用いたプリント基板自動配置問題に対して本手法を適用する。その際には、本問題に適した評価関数につい

て検討を行う。実験を行い、本手法により仮想配線長、配線密度、部品密度、部品の整列度合を準最適とする部品配置ができることを示す。

## 2. 遺伝的アルゴリズムの適用

本章では、上述の遺伝的アルゴリズムをプリント基板の自動配置問題に適用する。そして部品配置問題に適した2種類のコーディング法、評価関数について検討を行う。

### 2.1 コーディング法1

#### <2.1.1>コーディング法

文献[5][6]では染色体を部品番号で表現する手法が用いられていた。本稿では、染色体を部品番号、それぞれの部品の回転角( $0^\circ \cdot 90^\circ \cdot 180^\circ \cdot 270^\circ$ )、左空隙、上空隙及び整列フラグで表し、染色体の長さは部品数に等しくする。回転角は、部品間の結線位置に応じて部品の向きを変えることで、より最適な配置を得るために導入した。整列フラグは同じ形の部品を揃えて並べることでより効率よく部品を配置するために設けたものであり、同じ形の部品には同じ数値のフラグが立つようにしている(初期状態は確率  $Pln0$  でフラグが立つ)。整列フラグは0もしくは所定の数値のどちらかの値をとり、下・右の2方向を整列の方向として持つ。これは、実際の基板においては同じ形の部品が多く用いられ、それらの部品を揃えて配置することが良く行われていることを自動配置に取り込むためである。図1は染色体の例とこの染色体から得られる表現型の例を示す。この染色体の例では、10個の部品に0~9の番号がつけられている。縦一列のコラムが一つの遺伝子座に相当する。図1の例では左から染色体の表現する部品番号順3,7,2,...に、その遺伝子座の持つ回転角だけ回転させて基板上に左上から右へと部品を並べていく。その際、部品に対して基板の上の方向に浮力を働かせ、部品が上方に詰まるようにする。また部品の左側・上側にはその遺伝子座の持つ左空隙・上空隙の空隙を設ける。なおこの例では、0,1番の部品はコネクタとし、あらかじめ位置が指定されているものとする。染色体の指示する順に部品を配置していくときに、その部品に整列フラグが立っている場

合には、同じ数値のフラグが立っている他の部品を染色体上の順番よりも優先してその部品の右もしくは下にフラグの示す方向へと並べていく。その際、回転角・空隙はそれぞれ先頭の回転角・先頭から2つ目の部品の空隙に合わせる。図1の表現型では、例えば7番の部品の右に5番の部品が並べられている。

### <2.1.2>淘汰・増殖

染色体の初期収束をできるだけ避けるため、一定の割合の染色体を適応度の高い順に選択し、保存する(この割合を  $P_s$  とする)。この際、同一の染色体が複数ある場合には1つだけ選択する。例えば  $P_s = 0.5$  の時、染色体100個であれば、50個をこの方法で保存し、残り50個を100個の染色体からルーレット法<sup>9)</sup>により選択する。

### <2.1.3>交叉

染色体は部品番号の順序表現となっているので、通常の交叉では部品番号の重複を許してしまい配置不可能な基板が生じてしまう。そこで交叉には、順序交叉(Order Crossover: OX)<sup>9)</sup>を用いる。

交叉は確率  $P_{cr}$  で行う。ただし、最も適応度の高い染色体が交叉・突然変異の対象となった時にはその染色体を2個に増幅し、1個は交叉及び突然変異の対象からはずして、エリート保存を行う。

### <2.1.4>突然変異

交叉と同様、通常の突然変異では部品番号の重複が生じるので、図2に示すような突然変異を行う<sup>10)</sup>。

(a)交換(exchange)：染色体の中で任意の2つの部分列を選び、交換する。

(b)シフト(shift)：染色体の中で任意の部分列を選び、先頭の文字を一番最後に移動し、他の文字は順に一文字づつ前にずらす。逆回りもある。

(c)逆位(inversion)：染色体の中で任意の部分列を選び、その要素を逆順に並び替える。

確率  $P_m$  で個体を選ばれた後に、1/3の確率でこれら3種類の突然変異のいずれかを適用する。また、これらの突然変異とは別に、確率  $P_m$  で選ばれた染色体に対して回転角・左空隙・上空隙の変更をそれぞれの遺伝子座に確率  $P_{meach}$  で行う。

さらに確率  $P_{in}$  で選ばれた染色体に対し、0である整列フラグの中からランダムに選ばれた整列フラグを立て、 $P_{lnbrk}$  で選ばれた染色体に対し、立っているフラグの中からランダムに選ばれたフラグを0にもどす。また  $P_{lndr}$  で選ばれた染色体に対し、整列方向(下・左)を変える。

以上の突然変異は部品の重複を許すことなく、致死遺伝子を生じない。

### <2.1.5>評価関数

本プリント基板自動配置問題ではマンハッタン距離で求めた仮想配線長の短縮と配線密度、部品密度の低減、整列部品数の増加を併せて考慮する。評価関数  $E$  はこれら4つの要素に重みづけをした次式を用いる。

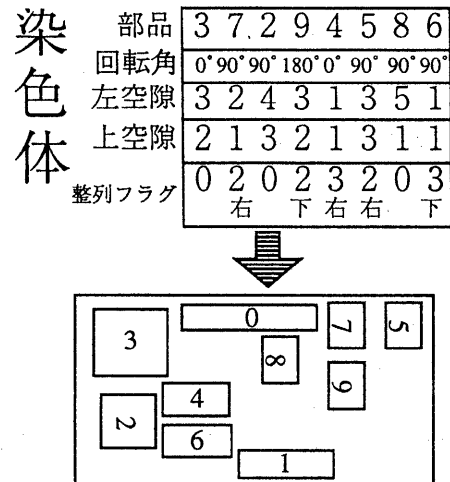


図1 コーディング法1とその表現型  
Fig. 1 Coding method 1 and phenotype

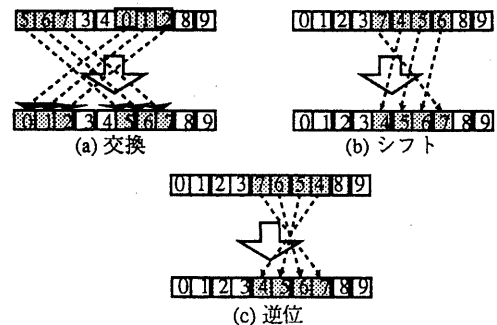


図2 突然変異  
Fig. 2 Mutations

$$E = w_i \sum_i L_i + \alpha w_{ld} \sum_i LD_i + \beta w_{pd} \sum_i PD_i + \gamma w_{ln} \sum_i LN_i \quad (1)$$

ここで $L_i$ は配線長、 $LD_i$ は配線密度、 $PD_i$ は部品密度、 $LN_i$ は未整列数、 $w_i$ は配線長に対する重視度、 $w_{ld}$ は配線密度に対する重視度、 $w_{pd}$ は部品密度に対する重視度、 $w_{ln}$ は未整列の部品数に対する重視度(ただし $w_i + w_{ld} + w_{pd} + w_{ln} = 1.0$ )、 $\alpha, \beta, \gamma$ は次元の異なる $L_i, LD_i, PD_i, LN_i$ 間の調整パラメータである。重視度 $w_{ld}, w_{pd}, w_{ln}$ が0の時は配線長の短縮を最優先することになり、 $w_i, w_{ld}, w_{ln}$ が0の時は部品密度の軽減を最優先する。 $w_i, w_{ld}, w_{pd}, w_{ln}$ を適当な値に設定することにより配線長、配線密度、部品密度、部品の整列度合のバランスをとることができる。なお、配線密度 $\sum LD_i$ 、部品密度 $\sum PD_i$ 、未整列数 $\sum LN_i$ の求め方は次の通りである。

**配線密度** 基板を $m_{xc} \times m_{yc}$ のマス目に区切り、配線を直線で結んだときマス目ごとにマス目内に入る配線の長さの総和 $l_i$ を求め、 $l_i$ の平均 $\bar{l}_i$ との差の絶対値を $LD_i$ とし、全マス目について $LD_i$ の総和を求める。

**部品密度** 基板を $m_{xp} \times m_{yp}$ で区切り、枠内の部品の面積をマス目ごとに求める。その他は配線密度と同様である。

**未整列数** 整列フラグにより同じ種類の部品の下もしくは左に整列している部品の数を全部品数から引く。

## 2.2 コーディング法II

### <2.2.1>コーディング法

コーディング法Iでは、部品を左から順次つめて配置するため、左側の遺伝子の変化が全体の部品配置に大きく影響する。そこで2次元のコーディング法について検討する。

基板に $g_x \times g_y$ の格子点を設定する。格子点は基板の左上を原点、横方向を $x$ 、縦方向を $y$ とした整数座標で表される。染色体を $x, y$ 座標、それぞれの部品の回転角、及び整列フラグで表し、染色体の長さは部品数に等しくする。本手法では、 $x, y$ 座標の初期設定に際して、部品の重なりを優先する。部品

の配置位置をランダムに決定した際に、その部品が他の部品と重ならなければその座標は確定とする。他の部品と重なる場合にはその座標を新たにランダムに決め直し同様に重なりを調べることを繰り返す。

図3は染色体とその表現型の例を示す。左から2,3,4...の部品が対応し、その順にその遺伝子座の持つ座標を中心に回転角だけ回転させて基板上に配置する。回転角が $0^\circ$ のとき、遺伝子座の持つ座標が部品の左上となる。0,1番の部品はあらかじめ位置が指定されているものとする。配置する際、整列フラグが立っている場合には、回転角を先頭の部品の回転角に合わせてフラグの示す方向に整列させる。

本手法と異なり、部品の重なりを許容したまま染色体に部品配置のコーディングを行い、表現型において重なりを解消する手法も考えられるが、基板が高密度であるほどGAにより得られた解との相違が大きくなり、GAの演算結果が反映されにくくなると思われる。

### <2.2.2>突然変異

本稿ではまず、突然変異のみで配置改善を検討する。部品同士が重ならないよう、図4に示すような突然変異を行う。

(a)移動(変異確率 $P_{mo}$ ):任意の部品を1つ選び、その部品を他の空いている場所へ移動させる。

(b)回転( $P_{ro}$ ):任意の部品を1つ選び、その

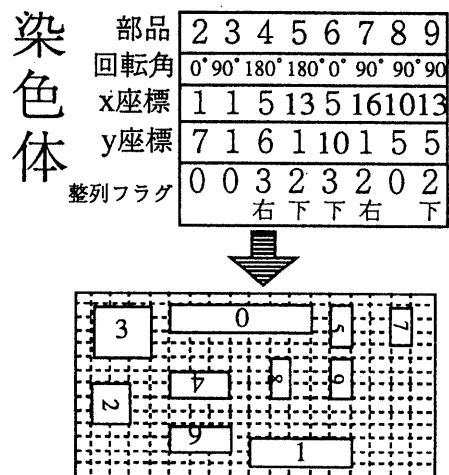


図3 コーディング法IIとその表現型

Fig. 3 Coding method II and phenotype

部品を回転させて他の部品と重ならなければ回転させる。

(c)反転 (*Pre*) : 複数部品からなる一区画を選び、その区画を反転する。反転には横方向・縦方向反転, 180° 回転がある。

(d)交換 (*Pch*) : (c)と同様に一区画を選び、同じ大きさの他の区画と交換する。

(e)主要部品の移動 (*Pmom*) : 以上の(a)~(d)の突然変異では、大きな部品の位置が変わりにくいため、本突然変異により、LSIなどの主要部品を移動させる。任意の主要部品を1つ選び、その座標位置を変える。このとき、移動先に置かれていた部品は空いている場所へと移動させる。

エリートとして保存される最も適応度の高い染色体以外の染色体に対して上記の(a)~(e)のいずれかの突然変異を、それぞれの確率で施す。また整列フラグをコーディング法Iと同じ方法で変更する。以上の突然変異は部品の重なりを生じない。初期配置において部品の重なりを解消しておけば、以後、部品の重なりを生じることはない。

評価関数及び淘汰・増殖の方法はコーディング法Iと同じとする。

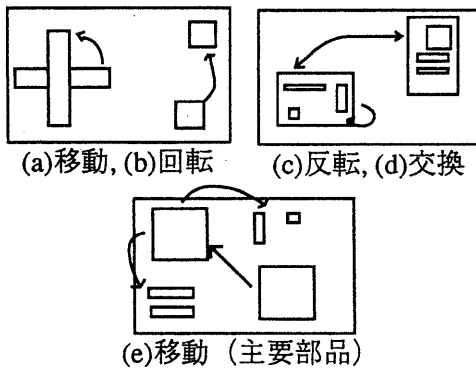


図4 突然変異II  
Fig. 4 Mutations II

### 3. 実験

#### < 3.1 > 配置問題

図5に本手法の検証のために用いた実際の基板と部品の配置図を示す。表1は図5の0~49の部品の大きさ・面積を示す。

基板は大きさ130×100(mm<sup>2</sup>)であり、部品は

それぞれ10(mm<sup>2</sup>)から1023(mm<sup>2</sup>)までの50個がある。なお、0,1番の部品はコネクタとし、あらかじめ位置を指定する。さらに「LSIやICの周りにはある程度の空隙をとる。」という情報を取り込むため、2,3番の部品の周辺を最低5mmは空けることにする。

また、部品間にはあらかじめ決められた243本の結線があり、線続部分は部品のピンの位置により指定がなされている。ただし、結線は1本で最大84個のピンと接続されている。接続されるピンが3個以上の時は仮想的な配線は図6のように行う。図で、点Pは点ABCの重心である。

コーディング法Iを用いて、各パラメータ等の検討を行う。染色体数を200、世代数を1000とした。

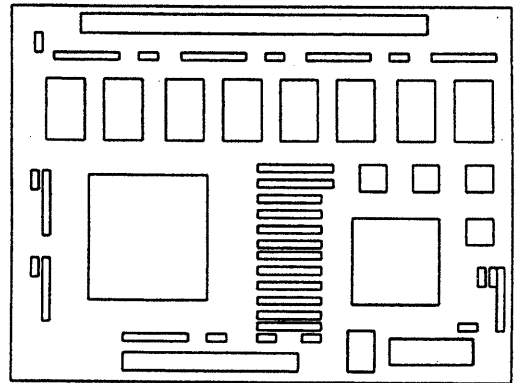


図5 基板と部品配置 (実データ)  
Fig. 5 Printed circuit board and parts (Actual data)

表1 部品サイズ  
Table I Sizes of parts

No.	幅 (mm)	高さ (mm)	面積 (mm <sup>2</sup> )	No.	幅 (mm)	高さ (mm)	面積 (mm <sup>2</sup> )
0	91	5	455	6~13	16	10	160
1	46	5	230	14~17	7	7	49
2	33	31	1023	18~19	20	2	40
3	23	23	529	20~37	17	2	34
4	22	7	154	38~47	5	2	10
5	11	7	77	48~49	5	2	10

### < 3.2 > パラメータの検討

はじめに、(1)式の評価関数 $E$ の調整パラメータ $\alpha, \beta, \gamma$ の値を決める。 $\alpha, \beta, \gamma$ は配線長 $L_i$ 、配線密度 $LD_i$ 、部品密度 $PD_i$ 、未整列数 $LN_i$ の次元の異なる各パラメータ間の調整用であるので、概略の値が求まればよい。そこで(1)式の $w_l = 0.5, w_{ld} = 0.15, w_{pd} = 0.25, w_{ln} = 0.1$ とし、試みに $\alpha = 0.5, \beta = 10, \gamma = 0$ として遺伝的演算を行った。各世代ごとの(配線長の平均)/(配線密度の平均)、(配線長の平均)/(部品密度の平均)の500世代までの推移を図7に示す。これは、 $\alpha, \beta$ の値を種々変更してもほぼ同じ結果となった。そこで、 $\alpha = 1.6, \beta = 12$ と決めた。同様にして $\gamma = 1300$ とした。これにより、 $w_l, w_{ld}, w_{pd}, w_{ln}$ が重視度としての意味を持つ。

次に、種々のパラメータ値について検討する。例として、 $P_{ln0}$ の値を $P_{ln0} = 0.0, 0.5, 1.0$ としたときの $E$ の推移を図8に示す。図は5回試行を行った時の平均の推移である。評価関数に未整列数が含まれているために $P_{ln0} = 0.5$ のものが途中の世代で $P_{ln0} = 1.0$ のものに追いついた形になっているが、 $P_{ln0} = 1.0$ のほうが早い世代から評価値が下がっていることから、 $P_{ln0} = 1.0$ とした。その他のパラメータについても、同様にいくつかの値をふり決定した。

表2に各パラメータを示す。

### < 3.3 > 実験結果

評価関数 $E$ の重視度( $w_l, w_{ld}, w_{pd}, w_{ln}$ )を(1.0, 0., 0.0, 0.0), (0.0, 1.0, 0.0, 0.0), (0.0, 0.0, 1.0, 0.0), (0.0, 0.0, 0.0, 1.0)とした時の1000世

表2 パラメータ  
Table II Parameters

$\alpha$	1.6	$P_{\alpha}$	0.5
$\beta$	12	$P_{\beta}$	0.05
$\gamma$	1300	$P_{meach}$	0.02
$m_{xc}$	5	$P_{ln0}$	1.0
$m_{yc}$	4	$P_{ln}$	0.2
$m_{xp}$	11	$P_{lnbrk}$	0.2
$m_{yp}$	8	$P_{lndrt}$	0.2
$P_s$	0.5		

代目における配置・配線の様子の例を図9(a)(b)(c)(d)に示す。それぞれ左側が部品配置を示し、右側が各結線箇所を直線で結んだ場所の配線の様子を示す。それぞれ重視度に応じて(a)では配線長が短く、(b)では配線密度が小さく、(c)では部品密度が小さく、(d)では部品が整列したものとなっている。なお、配線長、配線密度、部品密度は実際に完成された基板

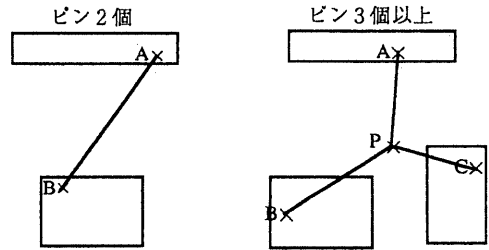


図6 仮想配線

Fig. 6 Imaginary connections

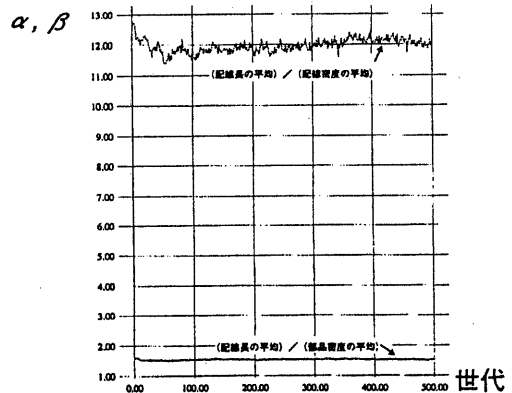


図7 調整パラメータ $\alpha, \beta$ の推移  
Fig. 7 Transition of  $\alpha, \beta$

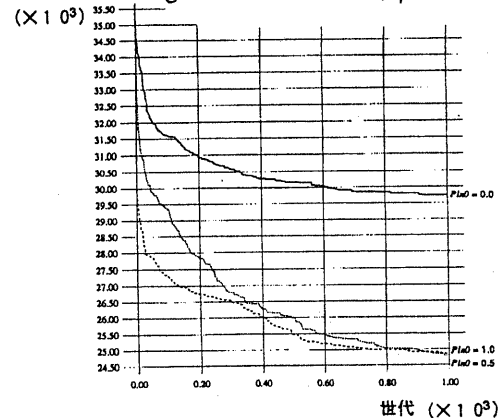


図8 評価関数 $E$ の推移(試行5回)  
Fig. 8 Transition of  $E$  at 5 operation

データから得た値を100としている。

本手法において交叉・突然変異の有効性を調べるために、(1)交叉・突然変異・フラグ変化を用いる、(2)交叉なし、(3)突然変異なし、(4)フラグ変化なしとしたそれぞれについて1000世目までの評価関数  $E$  の変化の様子を調べた。図10は1000世目までの5回の試行において、それぞれの最もよかった表現型の評価関数値の平均の推移を示す。(1)の交叉・突然変異・フラグ変化を用いたものが、良好な結果を得ていることから、本手法において交叉・突然変異・フラグ変化が、有効に働いていることがわかる。また、図から多様性が残されている初期の世代において交叉が有効に働き、突然変異は全世代にわたって有効に働いていることがわかる。

#### <4.4> 配置結果の比較

コーディング法Iにおいて、( $Wl$ ,  $Wld$ ,  $Wpd$ ,  $Wln$ ) = (0.5, 0.15, 0.25, 0.1)とした時の配置及び配線の様子の例を図11に示す。各要素がバランスされた配置がなされている。また、同じ重視度でコーディング法IIにより得られた配置結果を図12に示す。

それぞれのコーディング法による特徴は以下の通りである。

##### コーディング法I

- (a)部品を詰めながら配置を行うため、部品の重なりを容易に回避できる。
- (b)交叉・突然変異が比較的容易に行える。
- (c)同じ種類の部品の整列が容易である。
- (d)染色体が直接部品の位置に対応していない。染色体の左側の遺伝子座の内容が変わると、配置全体が大きく変わってしまう。
- (e)部品を詰めて配置しているため、部品が基板全体に広がらず、偏ってしまう。
- (f)様々な制約条件は主に評価関数に反映される。

##### コーディング法II

- (a)初期配置において部品の重なり解消の負荷が大きい。
- (b)交叉・突然変異にかなりの工夫が要る。
- (c)部品の重なり解消が優先され、部品を整列させ難い。
- (d)染色体と部品の位置が直接対応しているため、部品同士の位置関係が保存され易い。

(e)様々な制約条件は主に染色体に反映される。

## 5. 結論

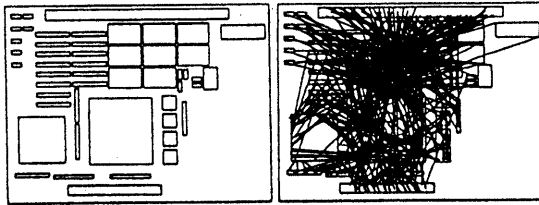
本稿では実際の基板データを用いたプリント基板自動配置問題に遺伝的アルゴリズムを適用することを試みた。そして、2種類のコーディング法を提案し、評価関数について検討した。今後、さらに部品重なりを解消方法についての工夫を行うとともに、重なりを許容しながら配置し、最終段階で重なりを解消する方法等についての検討が必要である。

## 謝辞

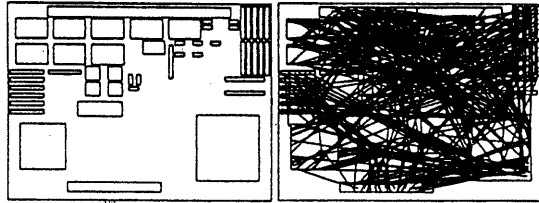
本研究を進めるにあたり、基板・部品・結線のデータを提供していただいた(株)日立製作所旭工場DA応用設計部山田則男部長、同西田稔課長に深く感謝いたします。

## 参考文献

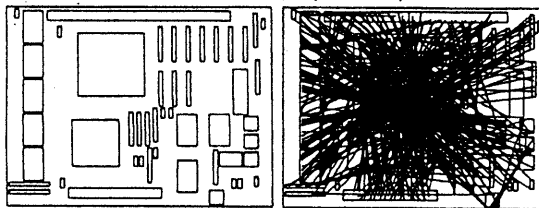
- [1] 小田原, 後藤 監修: 最新プリント配線版のCAD, ミッツデータシステム (1990)
- [2] 大岩, 吉村, 土田, 植村, 青江: プリント基板自動配置への知識利用, 情報処理学会設計自動化研究会報告, 89-DA-46-9 (1989)
- [3] D.E.Goldberg: Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning (1989), Addison Wesley
- [4] L.Davis(Editor): Handbook of Genetic Algorithm (1989), Van Nostrand Reynold
- [5] 半田: 「基板部品配置ESへのGA適用」第4回RAMPシンポジウム, pp. 145-154 (1992)
- [6] 半田: 「部品/素子レイアウト問題へのGA適用」SICE第11回システム工学部会研究会, pp. 73-79 (1993)
- [7] 吉川, 古橋, 内川: 「遺伝的アルゴリズムのプリント基板自動配置への応用」平成5年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集 pp.893-898 (1993)
- [8] 吉川, 古橋, 内川: 「遺伝的アルゴリズムのプリント基板自動配置への応用に関する一考察」平成5年電気学会東海支部連合大会,
- [9] 星野: 遺伝的アルゴリズム[1]その信仰と現実, bit, Vol.24, No.9, pp.945-955 (1992)
- [10] 森川, 中山, 古橋, 内川: 「遺伝的アルゴリズムによるLSI製造工程スケジューリング」電気学会論文誌D (掲載決定)



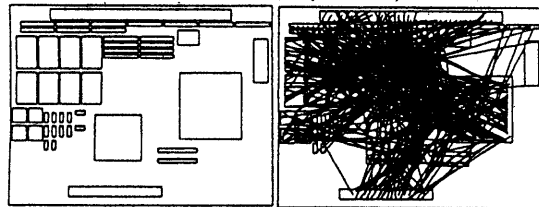
総配線長=81,配線密度=111,部品密度=132,未整列数=80  
 (a)  $Wl = 1.0, Wld = 0.0, Wpd = 0.0, Win = 0.0$



総配線長=126,配線密度=67,部品密度=139,未整列数=80  
 (b)  $Wl = 0.0, Wld = 1.0, Wpd = 0.0, Win = 0.0$



総配線長=131,配線密度=148,部品密度=65,未整列数=145  
 (c)  $Wl = 0.0, Wld = 0.0, Wpd = 1.0, Win = 0.0$



総配線長=115,配線密度=136,部品密度=140,未整列数=65  
 (d)  $Wl = 0.0, Wld = 0.0, Wpd = 0.0, Win = 1.0$

図9 異なる重視度による配置・配線状態  
 Fig. 9 Phenotypes with varying degrees of importance

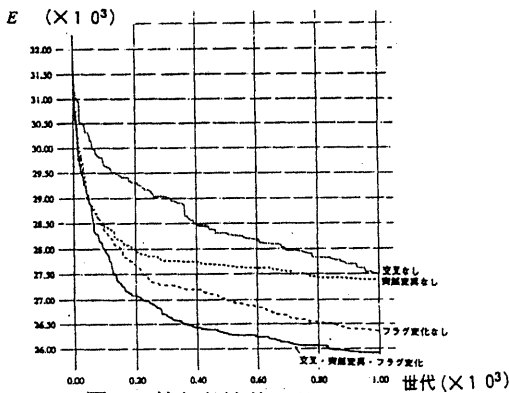
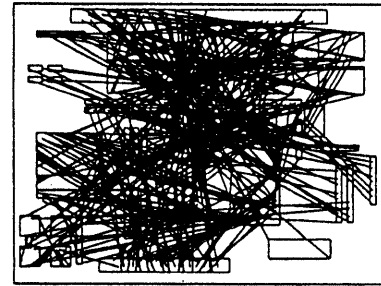
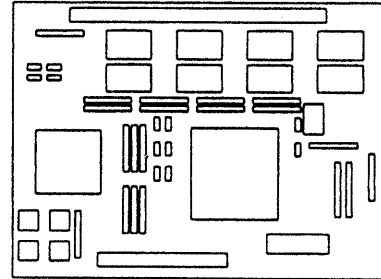


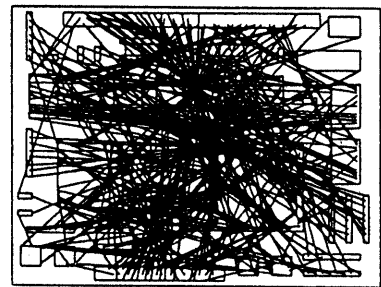
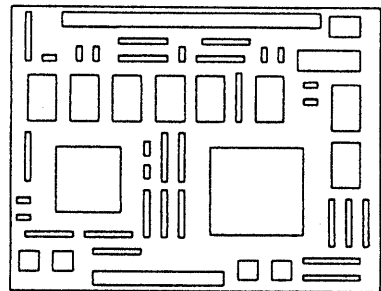
図10 遺伝的演算の効果  
 Fig. 10 Effects of genetic operators



総配線長=97,配線密度=98,  
 部品密度=101,未整列数=90

$Wl = 0.5, Wld = 0.15, Wpd = 0.25, Win = 0.1$

図11 コーディング法Iによる配置・配線状態  
 Fig. 11 Phenotypes with coding method I



総配線長=103,配線密度=98,  
 部品密度=103,未整列数=150

図12 コーディング法IIによる配置・配線状態  
 Fig. 12 Phenotypes with coding method II