

電子部品実装機械の同時吸着を優先した プリント基板組み立て順序最適化

土屋亨^{*1}, 山下淳^{*1}, 金子透^{*1}, 金子康弘^{*2}, 村松啓且^{*2}

Optimization of Printed Circuit Board Assembly Prioritizing Simultaneous Pickup in a Placement Machine

Toru TSUCHIYA^{*3}, Atsushi YAMASHITA, Toru KANEKO, Yasuhiro KANEKO
and Hirokatsu MURAMATSU

^{*3}Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Shizuoka University,
3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561, Japan

In this paper, we propose a new method for reducing assembly time in printed circuit board (PCB) assembly by prioritizing efficient simultaneous pickup operation of placement machines. There are three major problems of the scheduling: (1) component feeder location (affects efficiency of pickup operation), (2) mounting sequencing (affects total distance of the mounting tour), and (3) simultaneous pickup (affects efficiency of pickup operation). To solve these problems, this paper proposes the following approaches. We solve (1) and (3) in a heuristic way by using a random multi-start local search. We solve (2) greedily with putting the result of the feeder array to effective use. The effectiveness of the proposed method was shown through simulations.

Key Words : Optimization, Scheduling, Printed Circuit Board Assembly

1. 緒 言

本論文では、プリント基板を組み立てる電子部品実装機械（チップマウンタ）のスケジューリングにおいて、生産時間の短縮効果が高い、複数電子部品の同時吸着を優先した、プリント基板組み立て順序の最適化方法を提案する。

電子機器市場の急速な発展に伴い、電子部品を搭載したプリント基板（Printed Circuit Board: PCB）を取り巻く表面実装技術も日々進歩してきている。表面実装技術の進歩によって、PCB上に小さな電子部品を多数搭載可能になった反面、組み立て時のスケジューリングが複雑になる問題が生じている。このためチップマウンタの一動作が高速・高精度であるとしても、組み立て効率の善し悪しが生産時間を大きく左右するようになってきた。スケジューリングの最適化は、生産時間を短縮する上での大きな課題である。

チップマウンタは主に以下の要素で構成され、図??のようにロータリ式とノンロータリ式に大きく分類できる（より詳しい分類もなされている?）。

フィーダ : 電子部品の供給装置

ノズル : 電子部品の吸着、実装装置

ヘッド部 : ノズルを搭載した部品運搬装置

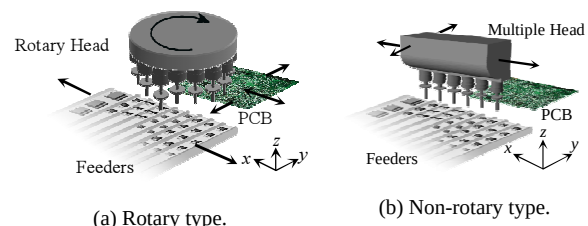


Fig. 1 An example of the two different types of the placement machines.

ロータリ式のチップマウンタにはヘッド部に複数のノズルが円形に配置されている。ヘッド部はその場で回転しながら、吸着位置にあるノズルにはフィーダが、実装位置にあるノズルにはPCBが位置合わせすることで吸着と実装の動作が独立に連続して行われる。

一方ノンロータリ式チップマウンタは、複数のノズルが一列に配置されている。固定されたフィーダとPCBを往復して電子部品を吸着・実装する。ロータリ式に比べて安価で省スペースなことから、性能の向上も相まって現在広く普及している。

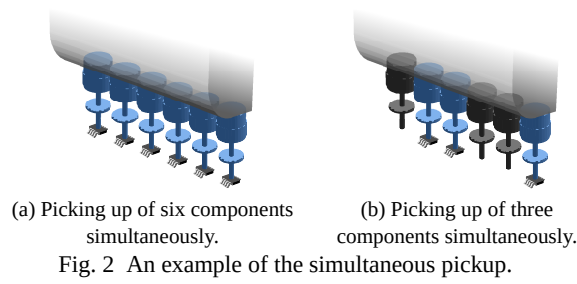
ロータリ式におけるPCB組み立て順序の計画に係る諸問題は8つの課題に分類されており?, ノンロータリ式にも同様の課題がある。その多くが解決に非常に計算コストのかかるNP困難な問題であり、過去には様々な発見的解法が提案されてきた?。?

ノンロータリ式には図??に示すような、複数の電子部品を同時に吸着できる特徴があり、その有無が組み立て効率を左右する新たな課題となっている。ノズル

^{*1}静岡大学 (〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1)

^{*2}アイパルス株式会社

E-mail: f0730066@ipc.shizuoka.ac.jp



とフィーダは共に等間隔に並んでおり、吸着位置に移動したヘッド部は、一度に複数のノズルで同時に電子部品を吸着できる。図を例にすると、常に6部品を一度に同時吸着できれば、吸着動作回数を「総電子部品数」/「ヘッド部ノズル数(6)」回に最小化できる。

組み立て効率を上げるためには、吸着動作回数の削減とヘッド部移動距離の短縮を同時に実現することが必要である。そのためには、同時吸着に相応しいフィーダ配置を探索することが求められているが、組み合わせ構造を持ったNP困難な問題である。

そこで本論文では、組み合わせ最適化問題に対する効率的な近似解法の中でも単純でロバストな、多スタート局所探索 (Multi-start Local Search: MLS) 法を用いて解決する²。

2. チップマウンタの概要

本論文で対象とするノンロータリ式チップマウンタの詳細を図??に示す。電子部品は部品種類毎にリールに巻かれてフィーダに収められている。フィーダはノズルの吸着位置に1つつ部品を送り出す機構を有しており、等間隔に並んだフィーダスロットに固定される。フィーダの幅は搭載部品の大きさによって異なり、1つ以上のスロットを占有する場合もある。そのためフィーダを配置する際には、隣り合うフィーダと重ならないように適宜間隔を空けた設置を求められる。あらかじめ計画した吸着・実装順序に従って一般

的には以下のようにPCBが組み立てられる。

1. ヘッド部がフィーダ上のある位置に移動する。
2. ノズルがフィーダに供給された部品を同時吸着する。
3. 全ノズルが部品を吸着していれば4に進み、そうでなければ1へ戻る。
4. 吸着した部品種類に従い、PCB上の決められた位置へノズルを位置決めして実装する。吸着した全部品を実装したら1へ、そうでなければ4を繰り返す。

3. チップマウンタのモデル化

現在多様な機構を備えたチップマウンタが流通しているが、本論文では前章で述べたノンロータリ式のチップマウンタを基本とし、次の前提条件を付加する。

- ノズルは全種の部品吸着することができ、ノズル交換の必要がない。
- チップマウンタの機械的制約はなく、ヘッド部はあらゆる位置に到達できる。
- 実装する部品の高さは十分低く、PCB組み立て時に移動するヘッドと衝突しない。

本論文では図??に示すようなモデルを定義し、以下に示す記号を使用する。

$p_{\max}$: 総実装地点数

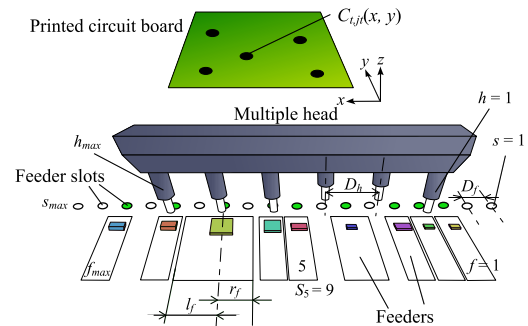


Fig. 4 The structure of our model with the notations ($h_{\max} = 6$, $f_{\max} = 9$, $s_{\max} = 18$, $D_h/D_f = 2$).

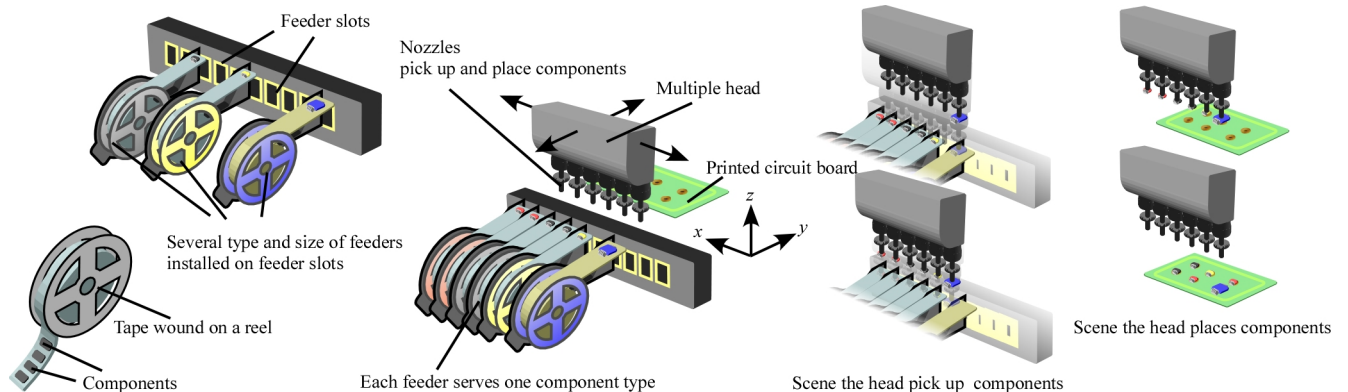


Fig. 3 The structure of the placement machine.

t : 部品種類番号 ($t = 1, \dots, t_{\max}$)
 j_t : 部品種類 t の部品の通し番号 ($j_t = 1, \dots, j_{\max_t}$)
 $C_{t,j_t}(x,y)$: j_t の実装地点座標
 f : フィーダ通し番号 ($f = 1, \dots, f_{\max}$)
 s : フィーダスロット通し番号 ($s = 1, \dots, s_{\max}$)
 S_f : フィーダ f を設置したフィーダスロット番号
 T_f : フィーダ f に搭載する部品種類番号
 Q_f : フィーダ f の搭載部品点数
 r_f : フィーダ f の右側幅
 l_f : フィーダ f の左側幅
 D_h : ヘッドへのノズル取り付けピッチ
 D_f : フィーダスロットへのフィーダ取り付けピッチ
 h : ノズル通し番号 ($h = 1, \dots, h_{\max}$)

4. 問題設定と解決方法の概要

効果的な組み立て順序を決定する中で、特に同時吸着は部品吸着回数を決定づける重要な行程で、組み立て時間に与える影響が最も大きい。この同時吸着の実行のしやすさはノズルとフィーダの位置関係で決まるため、組み立て時間はフィーダ配置に大きく関係している。

そこで本研究はこの同時吸着に最適なフィーダ配置を優先的に決定するため、組み立て順序最適化をフィーダ配置最適化処理と実装順序最適化処理の大きく2つに分ける。フィーダ配置の組み合わせ探索には多スタート局所探索 (MLS) 法を用いて解決する。実装順序決定に先だってフィーダ配置を決定するため、評価基準には組み立て時間を使用しない。その代わりに理想的なフィーダ配置に求められる種々の条件をMLS法の評価基準として盛り込み、この評価が最も高い最適なフィーダ配置の取得を目指す。得られたフィーダ配置からは、同時吸着を含めた効率的な吸着パターンが決定できる。実装順序決定は吸着パターン中の部品種類に依存するため、実装順序最適化は吸着パターン毎の最短実装巡回路決定問題と捉えてこれを解決する。

5. 組み立て順序最適化の手順

5.1 多スタート局所探索法 MLS法は組み合わせ最適化問題に対する効果的な近似解法 (メタ戦略) の一つであり、ロバストで導入が簡単な利点がある。初期解 x を生成し、 x を少しずつ変化させて x よりも評価の高い x' を探索する (近傍探索)。 x' が見つければ x' を改めて x と定義しながら (解の更新)、 x' が発見できなくなるまで探索を繰り返すことで、初期解から一つの最適解へと収束させることができる。MLS法は初期解を多数生成することによって、収束した解の中から最良解を出力する手法である。

5.2 フィーダ配置最適化

ステップ1: 初期解生成 フィーダスロットのフィーダ取り付け状態の配列を解として定義し、次のように初期解を生成する。

1. フィーダスロット配列をフィーダ未設置を意味する0で初期化する。
2. フィーダスロット配列から $f_{\max}$ 箇所をランダムに選択する。
3. 2. で選択したスロット配列へランダムにフィーダ番号 f ($f = 1, \dots, f_{\max}$) を入力する。

ステップ2: 近傍探索 フィーダスロット配列の中からランダムに選択した2つの配列要素を入れ替える。

ステップ3: 評価 「フィーダ設置可能性」, 「ヘッド部動作効率」, 「同時吸着実行可能性」の3つの評価基準から得られる解の評価値をそれぞれ V_1 , V_2 , V_3 とし、式 (1) で算出される評価値 V を最終的な解の評価値として用いる。

$$V = \alpha V_1 + \beta V_2 + \gamma V_3 \quad (1)$$

ここで α , β , γ は各評価値の重み係数である。本論文ではこの評価値を最小化する方向にMLS法の処理を進める。

ステップ3-a: フィーダ設置可能性 V_1 ランダムに生成される解の中には、図??に示すようにフィーダ幅の関係上互いに干渉して設置できないものも含まれる。図はフィーダスロット1, 3, 5, 6, 7に、通し番号の2, 5, 1, 3, 4のフィーダが設置される解の状態を例示している。通し番号1と3のフィーダが他のフィーダに干渉を受け、その量は $A(1)$ と $A(3)$ で計算される。ここで $A(f)$ はフィーダ番号 f の干渉量を表す。

解に多様性を持たせながらも最終的には干渉しない解を取得するため、式 (2) によって解を評価する。

$$V_1 = \sum_{f=1}^{f_{\max}} A(f) \quad (2)$$

ステップ3-b: ヘッド部動作効率 V_2 吸着と実装にかかるヘッド部の動作距離を短縮するため、フィーダをできるだけ密集させ、より搭載部品数の多いフィーダをPCBの付近に設置するのが好ましい。そ

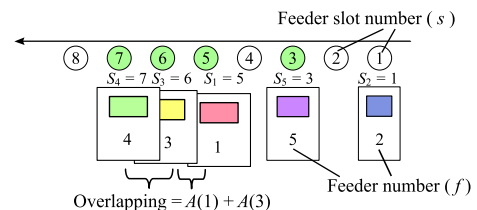


Fig. 5 An example of the overlapping.

ここで式 (3) によってヘッド部動作効率を評価する。

$$V_2 = \sum_{f=1}^{f_{\max}} Q_f |S_{G_{Tf}} - S_f| \quad (3)$$

ここで G_{Tf} は式 (4) で計算される、部品種類 T_f の実装地点座標の相加平均を意味し、 $S_{G_{Tf}}$ は G_{Tf} に最も近いフィーダスロット番号である。

$$G_{Tf} = \sum_{n=1}^{j_{\max T_f}} C_{Tf,n}(x,y) \quad (4)$$

ステップ3-c：同時吸着実行可能性 V_3 同時吸着にはヘッド部が一度に吸着する部品数に応じて $h_{\max}$ 個の吸着タイプがある。以降は簡単のために、例えば一度に n 個の部品を吸着することを「同時 n 吸着」と表記する。

吸着動作回数を減らすには同時 $h_{\max}$ 吸着をできるだけ多く実行する必要がある。同時 $h_{\max}$ 未満の吸着でも、より n の大きな同時 n 吸着が多く実行できることが吸着動作回数削減の可能性を高める。

そこで図??(a) に示すようなヘッドテンプレートを用い、搭載部品数を記号「□」でヒストグラム化した解のフィーダ配置（図??(b)）から、後述の手順に従って同時 n 吸着実行数を計算する。ヘッドテンプレートはノズルピッチ D_h とフィーダスロットピッチ D_f の比、 D_h/D_f を元に定義する（図は $D_h/D_f = 2$ を例に示してある）。図?? (c) の場合、ヘッドテンプレートによって同時5吸着ができると判断できる。吸着した部品を図??(b) のヒストグラムから差し引くと図??(c) が得られる。同時吸着は次の手順に従って計算される。

1. 解のフィーダ配置を元に、フィーダスロット番号を横軸とした搭載部品数のヒストグラムを求める。
2. 部品を有するフィーダスロット番号の中で最小の番号を選択する。
3. ヘッドテンプレートの $h = 1$ を2. で選択したスロットに合わせる。

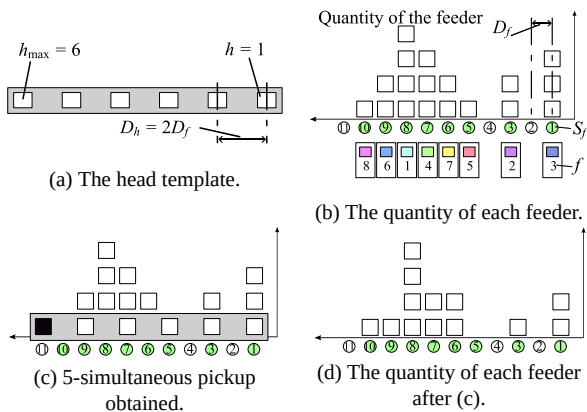


Fig. 6 An example of calculating the number of the simultaneous pickups ($h_{\max} = 6$, $f_{\max} = 8$, $s_{\max} = 11$, $D_h/D_f = 2$).

4. 同時吸着数を計算し、ヒストグラムから対応するフィーダの部品を1つずつ減らす。

5. 2. で選択したフィーダスロットの部品数を0するまで4. を繰り返したら6. へ。

6. 「最小」を「最大」（または「最大」を「最小」）と読み替えて2. を繰り返す。

同時吸着実行可能性は式 (5), (6) を用いて評価する。

$$V_3 = \sum_{n=1}^{h_{\max}} (h_{\max} - n + 1) B(n) \quad (5)$$

$$B(n) = \begin{cases} (p_{\max} - C_n) & \text{if } n = h_{\max} \\ C_n & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

ここで C_n は手順 1. – 6. で計算した同時 n 吸着の実行可能数を表す。

ステップ4：解の更新 入れ替え前後の解の評価値 V を比べ、入れ替え後の解が優れていた場合は入れ替え後の解を暫定最適解として保存し、それを元の解と再定義してステップ2から繰り返す。入れ替え後の解が劣っていた場合は、解の再定義はせずにステップ2から繰り返す。この繰り返し操作を解が収束するまで行い、最終的な暫定最適解を保存しておく。収束した場合は新たにステップ1から処理を繰り返し、あらかじめ決められた回数の初期解を生成した時点でMLSを終了、最も評価の高かった暫定最適解を出力する。

5.3 吸着のグループ化 MLS法で得られた最適なフィーダ配置に対し、同時吸着実行可能性で述べた手順 1. – 6. を使い、図?? (a) に示すような同時 n 吸着の組を取得する。同時 $h_{\max}$ 吸着以外は図?? (b) に示すように、同時吸着を組み合わせて $h_{\max}$ 個のまとまりにグループ化する必要がある。

グループ化の組み合わせ方法は様々に考えられるが、本論文では表1に示すような組み合わせ表を使った方法を提案する。Rank 1は同時6吸着のグループ化を意味し、Rank 2は同時5吸着と単吸着のグループ化を意味している。Rank1の組み合わせから優先的にグ

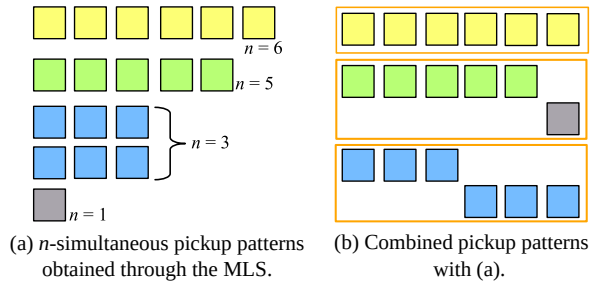


Fig. 7 An example of pickup patterns before combination and after combination ($h_{\max} = 6$).

Table 1 The combination list ($h_{\max} = 6$)

Rank	Number of pickup times					
	1	2	3	4	5	6
1	6					
2	5	1				
3	4	2				
4	3	3				
5	4	1	1			
6	3	2	1			
7	2	2	2			
8	3	1	1	1		
9	2	2	1	1		
10	2	1	1	1	1	
11	1	1	1	1	1	1

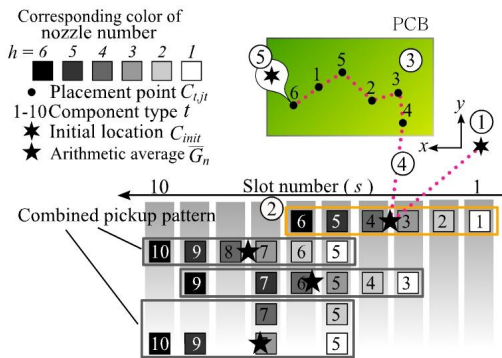
ループ化を行い，吸着動作回数ができるだけ少ない吸着グループを得る．上位 Rank を優先するため，グループ化に不足する同時吸着パターンがある場合は別の同時吸着パターンを分割する．組み合わせ表は次の条件を満たすように作られている．

1. グループ中にはノズル数 $h_{\max}$ 個の部品を含む
2. 上記の条件 1. を少ない吸着回数で満たすグループ化を優先する
3. 1 回の吸着部品数が多いグループ化を優先する

5.4 実装順序最適化 得られた吸着グループを元に吸着の順序付けを行い，実装順序を決定する．

$D_h/D_f = 1$ のチップマウンタを例とした実装順序最適化の概要を図??に示す．

フィーダスロット 1-10 には部品種類番号 1-10 のフィーダが設置され，搭載部品のヒストグラムを吸着グループ毎に積み重ねて表示してある．記号「□」の数字は部品種類番号を表し，吸着するノズルの番号で色分けされている．★は n 番目の吸着グループの部品を供給するフィーダが設置された，フィーダスロット座標の相加平均 $\bar{G}_n$ である．初期値 (①) に最も近い吸着グループ (②) が吸着した部品の，実装地点 (③) の最短巡回路 (④) が決定され，最終実装地点を初期値と再定義している (⑤)．

Fig. 8 The overview of the pickup and placement sequencing ($D_h/D_f = 1$).

吸着・実装順序は以下の手順に従って決定する．

1. ヘッド部待機位置座標 C_{init} を入力する．
2. C_{init} との差が最小の $\bar{G}_n$ を選び， n 番目の吸着グループを吸着する．
3. 2. で吸着した部品種類の実装地点の中で $\bar{G}_n$ に近い座標を選択する．
4. 3. で選択した実装地点を最短で巡回するように実装順序を決定する．
5. 1. の C_{init} を 4. で最後に実装した地点の座標と再定義し，全ての部品を実装するまで繰り返す．

6. 数 値 実 験

本実験では以下に示すパラメータを使用する．

- ランダムに生成した 498 箇所の実装地点 ($p_{\max} = 498$) ．
- フィーダ数 20 ($f_{\max} = 20$ ，表 2 を参照) ．
- フィーダスロット 60 箇所 ($s_{\max} = 60$) ．
- ノズルピッチ 30mm ($D_h = 30$)，スロットピッチ 15mm ($D_f = 15$) ．

6.1 重み係数の決定 式 (1) において， $\alpha = 0.5 \sim 1.5$ ， $\beta = 0.5 \sim 1.5$ ， $\gamma = 0.5 \sim 1.5$ の間を 0.25 刻みで変化させ，5 段階 $\times$ 5 段階 $\times$ 5 段階の計 125 通りの重み係数の組み合わせを用意した．1000 回の初期解生成を MLS 法の終了条件として 125 種類の最適なフィーダ配置を取得し，これらのフィーダ配置を元に 125 種類の組み立て順序を作成した．シミュレータを用いて組み立て時間を算出し，最短の実装時間を得た組み合わせ $\alpha = 1.5$ ， $\beta = 5$ ， $\gamma = 7.5$ を用いる．

6.2 実験結果および考察 1000 回の初期解生成を MLS 法の終了条件とし，提案手法による組み立て順序の最適化を 5 回施行した．以降の結果はその平均値を使用している．

同時 n 吸着取得に対する MLS 法の効果を調べるため，最適解に含まれる同時 n 吸着実行回数の推移を初期解生成回数を横軸にして図 9 に示す．処理の初期段階では解にほとんど含まれていなかった同時 6 吸着が処理が進むに従って増加し，最終的には全体の 40% を占める解を取得できていることがわかる．本手法が実

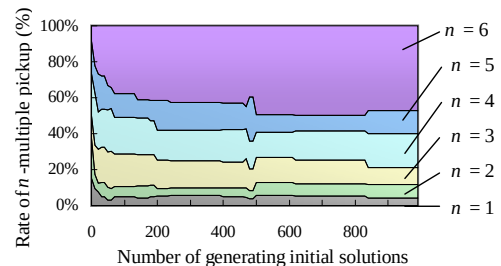
Fig. 9 Rate of n -simultaneous pickup.

Table 2 Parameters of the feeder

Feeder number (f)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Component type (T_f)	1	1	1	2	2	2	3	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Quantity of feeder (Q_f)	30	30	30	40	40	40	29	29	19	19	22	13	32	44	17	7	36	6	10	5
Left half of width (r_f)	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	11.0	11.0	11.0	13.0	13.0	8.5	8.5	16.0	16.0	22.8	23.5	36.3
Right half of width (l_f)	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	12.0	12.0	12.0	14.0	14.0	10.8	10.8	12.2	12.2	18.0	19.9	32.8

装時間をどの程度短縮できるのかを調べるために、本手法とは別に以下の基準で生成した組み立て順序 (AD1–AD5) を用いて実装時間を比較した (図 10)。

AD1: 提案手法による組み立て順序

AD2: AD1で得た同時吸着を単吸着で行う組み立て順序

AD3: MLS法の初期解生成を1回とした提案手法による組み立て順序

AD4: ヘッド部動作効率を特に優先させるため、MLS法の重み係数を $\beta = 50$ とした提案手法による組み立て順序

AD5: 同時吸着実行可能性を特に優先させるため、MLS法の重み係数を $\gamma = 75$ とした提案手法による組み立て順序

なお図 10 はシミュレータの単位時間で表してある。

組み立てに最も時間を要したのがAD2であることから、同時吸着が組み立て時間の短縮に大きく寄与していることがわかる。さらにAD4とAD5の組み立て時間が提案手法を上回っていることは、重み係数のバランスが重要であることを確認できる。

提案手法とAD3を比較すると、組み立て時間を約12%短縮できた。MLS法による多数の初期解生成によって優れた解が探索できることがわかる。

AD1, 2, 4, 5の計算には一般的なPC (CPU: Pentium D 2.8GHz, メモリ: 1GB, OS: Windows XP) を用いて約5分、AD3には約10秒の計算時間を要した。一般的に組み立て順序は生産開始前に用意できるため、5分の計算時間は現実的であるといえる。

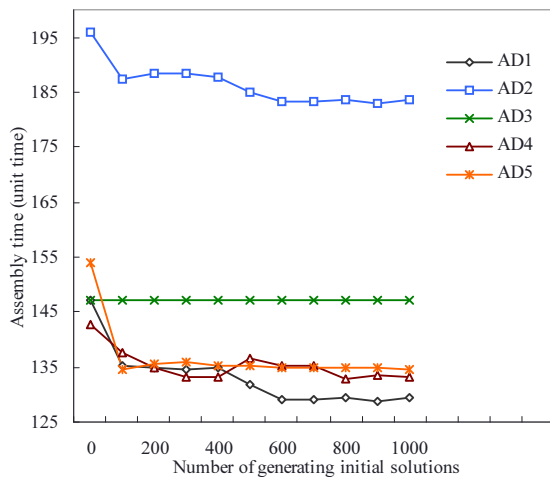


Fig. 10 Assembly time of AD1-AD5.

以上より、同時吸着を優先した提案手法が組み立て時間短縮に有効であることが示された。

7. 結 言

PCB組み立て時間を最も左右する行程である同時吸着に着目し、これを評価基準として評価関数中に盛り込むことで、同時吸着を多く実行する組み立て順序の最適化手法を提案した。実験では、多くの同時吸着が実行できるフィード配置を取得し、実装時間の短縮に本手法が効果的であることが示された。

今後はノズル交換や部品高さなど、実際の現場の仕様に合わせた手法への発展が課題である。また今回使用したMLS法以外にも、GAといった他のメタ戦略との比較検討を行い、更なる性能向上の可能性を研究する必要がある。

文 献

- (1) Ayob, M., Cowling, P. and Kendall, G., Optimisation for Surface Mount Placement Machines, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT2002)*, Vol. 1 (2002), pp. 498–503.
- (2) Crama, Y., van de Klundert, J. and Spieksma, F., Production Planning Problems in Printed Circuit Board Assembly, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 123, No. 1–3 (2002), pp. 339–361.
- (3) Burke, E., Cowling, P. and Keuthen, R., The Printed Circuit Board Assembly Problem: Heuristic Approaches for Multi-Headed Placement Machinery, *Proceedings of the 2001 International Conference on Artificial Intelligence (IC-AI2001)*, (2001), pp. 1456–1462.
- (4) Ayob, M. and Kendall, G., A Nozzle Selection Heuristic to Optimise the Hybrid Pick and Place Machine, *Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent System*, Vol. 2 (2004), pp. 1259–1264.
- (5) Csaszar, P., Tirpak, T. and Nelson, P., Optimization of a High-Speed Placement Machine Using Tabu Search Algorithms, *Annals of Operations Research*, Vol. 96, No. 1 (2000), pp. 125–147.
- (6) Lee, W., Lee, S., Lee, B. and Lee, Y., Genetic Optimization Approach to Operation of a Multi-Head Surface Mounting Machine, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics*, Vol. E83–A, No. 9 (2000), pp. 1748–1756.
- (7) Tsuchiya, T., Yamashita, A., Kaneko, T., Kaneko, Y. and Muramatsu, H., Scheduling Optimization of Component Mounting in Printed Circuit Board Assembly by Prioritizing Simultaneous Pickup, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2007)*, (2007), pp. 2913–2918.