

プリント基板短時間組み立てのための同時吸着に有利な スケジューリング*

土屋亨^{*1}，山下淳^{*2}，金子透^{*2}，金子康弘^{*3}，村松啓且^{*3}

Scheduling Advantageous to Simultaneous Pickup in PCB Assembly

Toru TSUCHIYA^{*4}, Atsushi YAMASHITA, Toru KANEKO, Yasuhiro KANEKO
and Hirokatsu MURAMATSU

^{*4}Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Shizuoka University,
3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

In this paper, we propose a new scheduling method for reducing assembly time in printed circuit board (PCB) assembly. The placement machines are able to pickup several components simultaneously in order to reduce the assembly time. Our method solves the schedule by prioritizing the efficient simultaneous pickup operation. 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 is 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による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、大きくロータリ式とノンロータリ式に分類されている（より詳しい分類もなされている⁽¹⁾）。

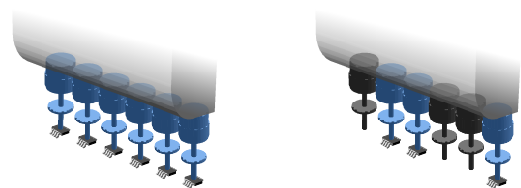
フィーダ：電子部品の供給装置

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

本論文はノンロータリ式チップマウンタを対象とする。このタイプは複数のノズルが一列に配置され、ヘッド部がフィーダと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。さらにノンロータリ式には図1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。



(a) Picking up of six components simultaneously.

(b) Picking up of three components simultaneously.

Fig. 1 An example of the simultaneous pickup.

*原稿受付 2008年10月24日

*¹学生員，静岡大学（〒432-8561 静岡県浜松市中区城北3-5-1）

*²正員，静岡大学

*³非会員，アイパルス株式会社

E-mail: {f0730066, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

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⁽²⁾，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^{(3)~(9)}．これらは組み立て効率を上げる方法としてヘッド部移動距離に着目した研究が多く，同時吸着による吸着動作回数の削減に注目した例は少ない．

そこで本論文では，同時吸着の持つ吸着動作削減効果に注目し，フィーダ配置を同時吸着に相応しいに配列に最適化することで PCB 生産時間を短縮するスケジューリング手法を提案する．

なおフィーダ配置取得問題は組み合わせ構造を持った NP 困難であることから，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）法を用いる^{(10),(11)}．本研究では最適化の評価値として同時吸着数を取り入れることにより，同時吸着に有利なフィーダ配置へ最適化する．

2. チップマウンタとプリント基板組み立ての概要

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 2 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 つず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

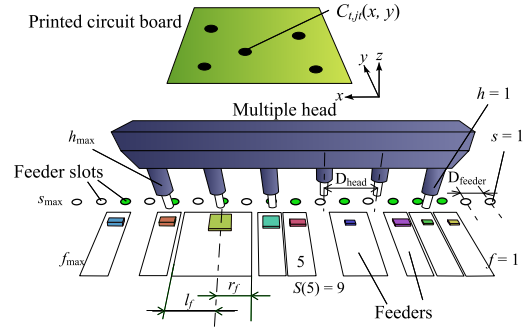


Fig. 3 The structure of our model with the notations ($h_{max} = 6$, $f_{max} = 9$, $s_{max} = 18$, $D_{head}/D_{feeder} = 2$).

でなければ 1 へ戻る．

4. 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 3 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
- 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

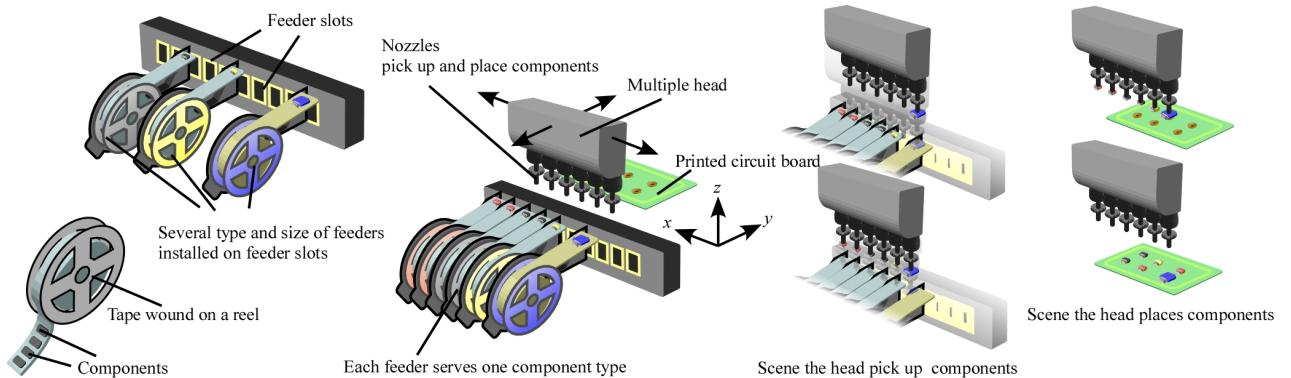


Fig. 2 The structure of the placement machine.

$Q(f)$: 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_{head} : ヘッドへのノズル取り付けピッチ

D_{feeder} : 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. 提案手法

効率が求められる組み立て工程の中で、同時吸着は部品吸着回数を決定づける重要な行程であり、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。

そこで筆者らはこれまで同時吸着に着目し、組み立て順序決定に先立って同時吸着に最適なフィーダ配置をあらかじめ決定する方法を提案してきた^{(10),(11)}。つまり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、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を取得する。

実装順序は吸着パターン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。

4.1 フィーダ配置最適化 組み合わせ最適化問題の効率的な近似解法である MLS 法を用い、次のステップ1-4にしたがって最適なフィーダ配置を求める (詳細は前稿⁽¹⁰⁾を参照されたい)。

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、フィーダをランダムに格納して初期解とする。

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。

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。ステップ3における評価値は次式(2)-(6)を用いた。

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

ここで $A(f)$ は、フィーダ f に隣り合うフィーダが幅広で取り付けスペースがない場合、どの程度フィーダ同士が重なり合っているかを表す干渉量である。

$$V_2 = \sum_{f=1}^{f_{\max}} Q(f) |S_{\text{near}}(f) - S(f)| \quad (3)$$

ここで $S_{\text{near}}(f)$ は $G(f)$ に最も近いフィーダスロット番号である。 $G(f)$ は式(4)で計算され、実装地点座標のうちフィーダ f が搭載する種類の部品による相加平均を意味する。

$$G(f) = \sum_{n=1}^{j_{\max T(f)}} C_{T(f),n}(x,y) \quad (4)$$

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

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

ここで C_n は同時 n 吸着の実行可能数を表す。

4.2 評価式決定の予備実験

V_2 : ヘッド部動作効率 評価値 V_2 を求める際、式(3)を用いた評価方法を提案した。

そこで、実際に希望通りの解が得られるかを実験した。MLS 法の評価値は $V = V_2$ とし、純粋にヘッド動作効率だけが評価されるように設定した。60箇所のスロット、部品数498個、20本のフィーダを使用し、簡単のためにフィーダの幅は D_{feeder} としてフィーダが干渉しないように設定した。また、部品種類も1つだけとし、 $S_{\text{near}}(1) = 37$ とする。つまり、理想的にはスロット番号37を中心として部品搭載点数のヒストグラムが山形に密集するようなフィーダ配置が求まることになる。

初期解生成回数を500回とし、使用する乱数系列を変えて3回の実験を行った結果の平均を図4(a)に示す。また比較対象として、 $Q(f)$ と $|S_{\text{near}}(f) - S(f)|$ を変化させたときに、取得できるヒストグラムがどのよ

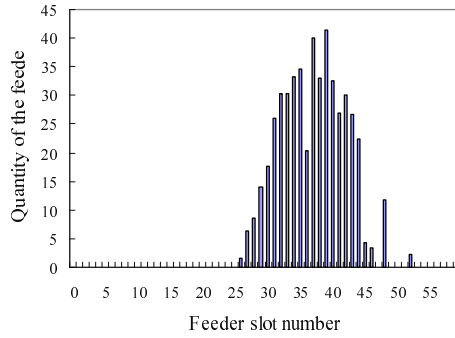
うに変化するのかを調べた． V_2 の計算式を式(7)とした結果を図4(b)に，式(8)とした結果を図4(c)に示す．

$$V_2 = \sum_{f=0}^{f_{\max}} Q(f)^2 |S_{\text{near}}(f) - S(f)| \quad (7)$$

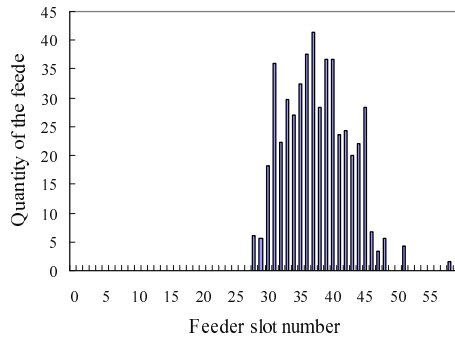
$$V_2 = \sum_{f=0}^{f_{\max}} Q(f) |S_{\text{near}}(f) - S(f)|^2 \quad (8)$$

図4(a)はスロット番号39，図4(b)，(c)は37を頂点としたヒストグラムが得られた．密集の度合いで見ると図4(a)が最も密集したフィード配置を得られている．これら3つの中で決定的に優れた結果とはいえないが，式(3)によるヒストグラムが比較的山形に近く，尚且つフィードが一番密集しているということから V_2 は式(3)を使用する．

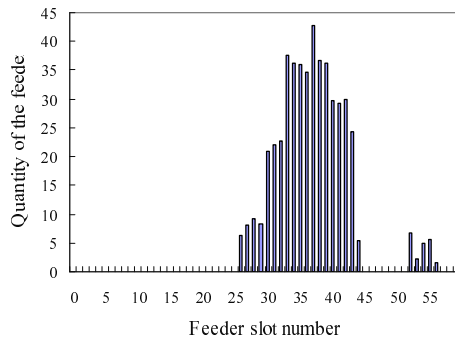
V_3 ：同時吸着実行可能性 評価値 V_3 を求める際，式(5)を用いた評価方法を提案した．



(a) $V_2 = \sum_{f=1}^{f_{\max}} Q_f |S_{\text{near}}(f) - S_f|$.



(b) $V_2 = \sum_{f=0}^{f_{\max}} Q_f^2 |S_{\text{near}}(f) - S_f|$.



(c) $V_2 = \sum_{f=0}^{f_{\max}} Q_f |S_{\text{near}}(f) - S(f)|^2$.

Fig. 4 Histogram of quantity of the feeder.

そこで前項で使用した問題設定を用い，実際に希望通りの解が得られるかを実験した．MLS法の評価値は $V = V_3$ とし，純粋に同時吸着実行可能性だけが評価されるように設定した．同時 $h_{\max}$ 吸着が最優先されるようにするため，評価が $h_{\max} - n + 1$ に比例するように重みを設定する式(5)と， $(h_{\max} - n + 1)^2$ に比例するように重みを設定する式(9)，式(10)を用意して実験を行った．MLS法の初期解生成回数を500回とし，使用する乱数系列を変えて3回行った．

$$V_3 = \sum_{n=1}^{h_{\max}} (h_{\max} - n + 1)^2 \quad (9)$$

$$V_3 = \sum_{n=1}^{h_{\max}} (h_{\max} - n + 1)^2 B(n) \quad (10)$$

式(5)と設定して得られたフィード配置による同時吸着数の結果を図5(a)に示す．横軸に初期解生成回数，縦軸は同時 n 吸着の占める割合として面グラフで表した．また式(9)，式(10)で得られたグラフをそれぞれ図5(b)，(c)に示す．

得られた同時6吸着を比べると，式(5)としたときにより多くの同時6吸着を得られており，今回の場合では同時吸着実行可能性 V_3 は式(5)を使用すれば，意図どおりの結果を得られることがわかった．

4.3 実装順序最適化 MLS法で得られた最適なフィード配置に対し，同時 $h_{\max}$ 吸着以外は同時吸着を組み合わせ $h_{\max}$ 個のまとまりにグループ化する．

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．

$D_{\text{head}}/D_{\text{feeder}} = 1$ 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6に示す．

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ドが設置された，フィード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)．

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．

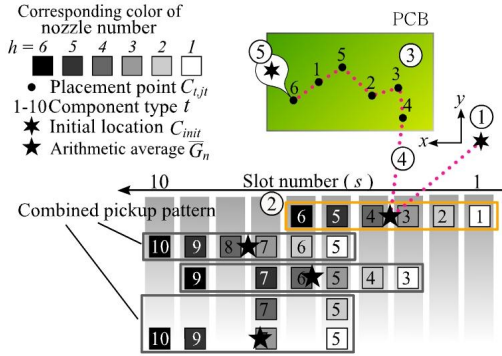
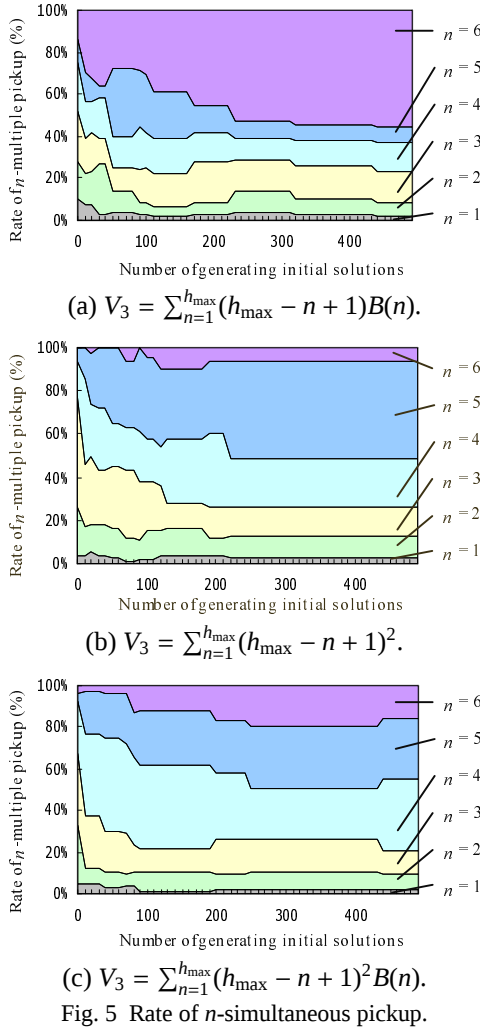


Fig. 6 The overview of the pickup and placement sequencing ($D_{head}/D_{feeder} = 1$).

5. 数 値 実 験

本実験では以下に示すパラメータを使用する．

- 90 箇所の実装地点 ($p_{max} = 90$) ．
- フィーダ数 26 ($f_{max} = 26$) ．
- フィーダスロット 60 箇所 ($s_{max} = 60$) ．
- ノズルピッチ 30mm ($D_{head} = 30$) ，スロットピッチ 15mm ($D_{feeder} = 15$) ．

500 回の初期解生成を MLS 法の終了条件として最適化を 5 回施行した．以降の結果はその平均値を使用している．式 (1) で使用する重み係数は、係数決定のための予備実験において最短の実装時間を得た組み合わせ $\alpha = 1.5$, $\beta = 5$, $\gamma = 7.5$ を用いた．

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 7 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 35% を占める解を取得できていることがわかる．

従来研究を含め本研究のようなアルゴリズムは対象のチップマウントモデルに大きく依存するため、互いの比較は困難となる⁽¹⁾．そこで本手法が実装時間をどの程度短縮できるのかを調べるため、本手法 (AD1) と、それとは別に以下の基準で生成した組み立て順序 (AD2–AD5) を用いて実装時間、改善率、吸着回数、計算時間を比較した (表 1) ．

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: 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

AD4: 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

なお実装地点数 $p_{max} = 90$ に加えて 30 , 270 の基板も用いた．

計算には市販の PC (CPU: Intel® Core™ 2 Quad 2.4 GHz , メモリ: 2 GB) を用いた．初期解生成を 1 回と 500 回とした場合の組み立て順序を作成し、シミュレータを用いて組み立て時間の算出を行った．改善率は初期解生成が 1 回の組み立て時間から初期解生成 500 回までの組み立て時間の改善率を表している．

実装時間について、実装地点数にかかわらず本手法の AD1 が最短であった．また AD3 と AD4 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．500 回の初

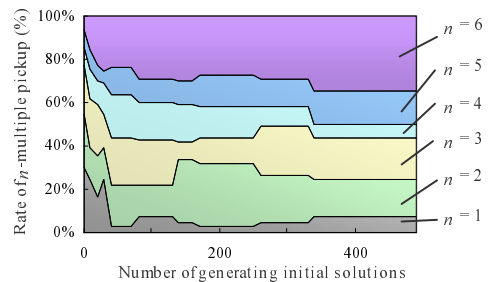


Fig. 7 Rate of n -simultaneous pickup.

Table 1 Assembly time of AD1–AD4.

$p_{\max}$	Assembly data(AD)	Assembly Time (unit time)		Improvement (%)	Number of pickup	Computation time (sec)
		After one initial solution	After 500 initial solutions			
30	1	55.0	48.4	12.0	6.0	59.0
	2	86.5	82.0	5.3	30.0	59.0
	3	63.4	54.4	14.2	8.2	61.6
	4	71.0	52.5	26.0	6.4	59.4
90	1	551.9	168.0	69.6	26.0	83.8
	2	738.0	255.0	65.5	90.0	79.8
	3	675.7	180.0	73.4	32.3	92.1
	4	703.5	191.4	72.8	26.7	85.7
270	1	692.5	521.9	24.6	91.2	163.7
	2	1009.2	755.2	25.2	270.0	161.5
	3	970.3	942.6	2.9	97.6	155.9
	4	922.2	714.2	22.6	87.6	169.7

期解生成による解の改善も行われ、特に $p_{\max} = 90$ の場合の改善率が 65.5% から 73.4% と高い値を示したことから、本手法が $p_{\max} = 90$ 付近で高い性能を示すと言える。

$p_{\max} = 30$ では AD2 の改善率が低い。これは実装地点数が少なく、実装時間の中で吸着動作時間が支配的であるために解の改善効果が少ないためと考えられる。

$p_{\max} = 270$ では AD3 の改善率が低い。シミュレータで動作再現してみると、離れたフィード同士のグループ化が比較的多く、吸着時の移動ロスが一因であった。ヘッド部動作効率化を目的としたフィード配置の山形へのバイアスが強く働き、逆に同時吸着のグループ化には負に働いていると考えられる。

一般的に組み立て順序は生産開始前に用意するため、今回の計算時間について十分現実的であるといえる。

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。

6. 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. *et al.*, Optimisation for Surface Mount Placement Machines, *Proceedings of the 2002 IEEE Inter-*

national Conference on Industrial Technology, Vol. 1 (2002), pp. 498–503.
(2) Crama, Y. *et al.*, Production Planning Problems in Printed Circuit Board Assembly, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 123, No. 1–3 (2002), pp. 339–361.
(3) Crama, Y., *et al.*, The Assembly of Printed Circuit Boards: A Case With Multiple Machines and Multiple Board Types, *European Journal of Operational Research*, Vol. 98(1997), pp. 457–472.
(4) Fujimura, K., *et al.*, Optimization of Surface Component Mounting on the Printed Circuit Board Using SOM-TSP Method, *Proceeding of the 6th International Conference on Neural Information*, (1999), pp. 131–136.
(5) Burke, E., *et al.*, The Printed Circuit Board Assembly Problem: Heuristic Approaches for Multi-Headed Placement Machinery, *Proceedings of the 2001 International Conference on Artificial Intelligence*, (2001), pp. 1456–1462.
(6) 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.
(7) Ayob, M., and Kendall, G., “A Triple Objective Function with a Chebychev Dynamic Pick-and-Place Point Specification Approach to Optimise the Surface Mount Placement Machine,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 164 (2005), pp. 609–626.
(8) Csaszar, P., *et al.*, Optimization of a High-Speed Placement Machine Using Tabu Search Algorithms, *Annals of Operations Research*, Vol. 96, No. 1 (2000), pp. 125–147.
(9) Lee, W., *et al.*, 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.
(10) Tsuchiya, T., *et al.*, 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*, (2007), pp. 2913–2918.
(11) Tsuchiya, T., *et al.*, Optimization of Printed Circuit Board Assembly Prioritizing Simultaneous Pickup in a Placement Machine, *Proceedings of the 13th Robotics Symposia*, (2008), pp.295–300. (in Japanese)