

## 基板生産における生産ラインの ラインバランシング問題に対するヒューリスティックな解法

山田 剛史<sup>†</sup>, 中森 眞理雄<sup>†</sup>,

<sup>†</sup> 東京農工大学工学府

基板生産において生産時間に最も影響を与える部分は、部品装着機を用いた部品の装着工程だと言われている。本論文では、基板生産時間に影響を与える問題である、部品装着工程におけるラインバランシング問題に注目した。ラインバランシング問題に対して適用するアルゴリズムにおいて、新たな生産時間の指標を用いることを提案した。実際の基板を用いた実験の結果から、従来の生産時間の指標と比較してほぼ同等な時間で精度が良い解を得ることができた。

## A Heuristic Algorithm of the Line Balancing Problem in Producing Printed Circuit Boards

Tsuyoshi YAMADA<sup>†</sup>, Mario NAKAMORI<sup>†</sup>,

<sup>†</sup> Faculty of Engineering, Tokyo Agriculture and Technology University

Today, almost all circuits of electronic devices are implemented on printed circuit boards. In the present paper, we consider the line balancing problem in the part of component placement. We propose a new indicator to evaluate production time in the line balancing problem. Using the proposed indicator, we obtain good solutions from the experimental results with real instances.

### 1 はじめに

電子機器の生産において、内蔵されているプリント基板の生産は非常に重要である。高い生産効率を得るためには、プリント基板の生産工程の一つである部品装着工程の作業時間の改善が最も重要であると言われている。この工程では、部品装着機が、基板に部品を装着する。近年、部品装着機のハードウェアとしての改良は限界に来ており、さらなる生産効率の向上のために、良い生産スケジュールを求められている。

### 2 部品装着機

部品装着機は、アーム、部品テーブル、認識カメラ、基板部で構成されている(図1)。基板部は、部品を装着するための基板を設置する箇所である。部品テーブルは装着する部品をストックする場所であり、複数のスロットがある。基板上に装着するための部品にはさまざまな種類があり、1つのスロットに対して1種類の部品を配置することができる。各部品種類には装着すべき個数が基板上に対して設定されており、あるスロットに対して部品種類を配置することは、そのスロットには、その部品種類に設定された部品個数が格納されることになる。認識カメラは、アームに取り付けられる部品

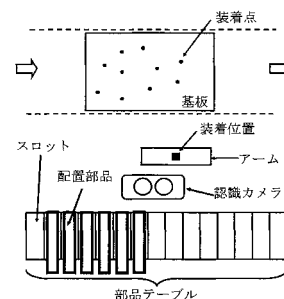


図 1: 部品装着機

の認識を行う。

アームは、部品の吸着および装着を行う。アームは部品テーブル上における上下動作により、各スロットに配置されている部品の吸着を行う。その後、アームは認識カメラに移動し、認識カメラを始点として、基板上に部品を運搬し、基板上に部品を装着する。アームは、基板上の定められた装着点に対して、吸着した複数の部品をすべて装着するように、基板上を移動する。吸着した部品を装着すると、アームは認識カメラに戻ってくる。この吸着と装着、2つの動作はすべての部品を装着し

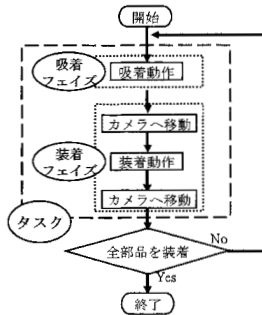


図 2: 機械動作

終わるまで繰り返し行われる。ここで、吸着におけるアームの動作を吸着フェイズ、装着におけるアームの動作を装着フェイズと呼ぶ。そして、この2つのフェイズをセットにしてタスクと呼ぶ。部品装着機におけるアームの一連の動作を図2に示す。

### 2.1 吸着フェイズ

部品装着機は、1回の吸着動作で複数の部品を吸着することができる。これを同時吸着と呼ぶ。部品テーブルのスロットに配置されている複数の部品種類を1回の吸着動作で吸着することができる。しかし、同時吸着が可能な部品種類は、吸着部品が配置されているスロットに対して隣り合っているスロットに配置されている部品種類である。アームの長さを $h$ とすると、最大で $h$ 個分の隣り合っているスロットに配置されている部品種類に対して同時吸着を行うことができる。同時吸着を行うことで、吸着回数を抑えることができる。吸着フェイズでは、アームに設定された最大吸着個数を上回らない限り、部品テーブル上の各アーム位置で、同時吸着を含めた吸着動作を繰り返す。

### 2.2 装着フェイズ

装着フェイズでは、吸着フェイズにおいて吸着された部品を装着する。アームは、認識カメラを始点および終点とし、装着動作を行う。1種類の部品に対応する装着点は複数あるため、アームはそのタスクで吸着した部品種類に対応した装着点を選択し、その位置まで移動して装着動作を行う。アームは、装着点から装着点に移動する際、その2点間のチェビシェフ距離分だけ移動する。それら装着動作は、そのタスクで吸着した部品の数だけ発生する。

### 2.3 部品装着機における最適化問題

総部品装着時間は、吸着フェイズにおける総吸着時間および装着フェイズにおける総装着時間の合計である。吸着時間は部品の吸着回数に影響さ

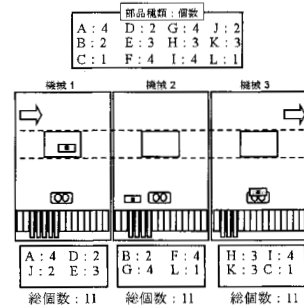


図 3: 各機械に対する部品割当て

れ、装着時間は基板上における部品の装着回数およびアームの移動時間に影響される。吸着回数は、部品テーブルにおける各スロットの配置部品およびアームの吸着動作によって変わってくる。また、装着時間は基板上における部品の装着順序によって変わってくる。機械の総部品装着時間を最小化するような部品配置、吸着動作、装着動作を求める問題を1機械最適化問題<sup>1, 2)</sup>と呼ぶ。1機械最適化問題に対してさまざまな手法が提案されているが、この問題は最適解を得ることが難しい問題、といわれている。

基板に部品を装着する工程では通常、複数台の機械を用いており、各機械に対して装着する部品を分散させている。各機械の総部品装着時間が等しくなるように装着部品量を分担させるのが望ましいが、各機械に対して、どの程度の部品装着量を分担させるかという問題がある。これは、ラインバランシング問題と呼ばれている。

部品装着機における厳密なラインバランシング問題は、1機械最適化問題を内包し、機械間における総部品装着時間のバランスが取れるような各機械の部品配置や吸着動作、装着動作を求める事が難しい問題と言われている。そのため、各部品種類を各機械に対して割当てる問題を解く部分と、得られた部品種類集合を入力として、各機械における1機械最適化問題を解く部分に分解して、解く事が考えられている。しかし、1機械最適化問題を解く事で、その機械の総部品装着時間が得られるため、各機械に対して部品種類を割当てる部分において、割当てた後の機械間における総部品装着時間のバランスが取れるかわからない。そのため、部品の装着個数を指標とした上で(図3)、それを生産時間の指標値と見なし、その指標を考慮したアルゴリズムで、各機械に対して部品種類の割当てを行っているのが現状である。

本研究では、各機械に対する部品種類の割当て

において、問題の構造を踏まえた新たな指標を用いた手法を用いることを提案し、従来の指標を用いた手法と比較を行う。なお、これ以降、機械に対して部品を割当てる問題をラインバランシング問題と呼ぶこととする。

### 3 ラインバランシング問題

下記に、ラインバランシング問題における入力定数について以下のように記号を定義する。

$m$  : 機械台数

$M$  : 機械集合,  $M = \{1, 2, \dots, m\}$

$i (\in M)$  : 機械番号

$n$  : 総部品種類数

$N$  : 部品種類集合,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$

$j (\in N)$  : 部品種類番号

$q_j$  : 部品種類  $j$  の部品個数

$h$  : 最大同時吸着部品数

(タスクにおける吸着部品数の上限)

$\alpha$  : 1 回のアーム平均吸着時間

$\beta$  : 1 回のアーム平均装着時間

$\gamma$  : 単位距離あたりの平均アーム移動時間

ここで、機械  $i$  に対して割当てられた部品種類集合を  $C_i (\in N)$ 、その時に発生する総部品装着時間の指標値を  $Cost(C_i)$  とする。本研究におけるラインバランシング問題は、各機械の指標値の最大値が最小となるような、各機械において装着する部品種類集合を求める問題であり、次のように記述することができる。

$$\text{minimize } \max_{i \in M} Cost(C_i)$$

本研究では、各機械に対する部品種類の割当ては貪欲法を用いて解く。各機械に対して、各機械の指標値の最大値である  $\max_{i \in M} Cost(C_i)$  の値が小さくなるように、各部品種類を反復して各機械に対して割当てる。

現場においては、各機械の装着部品個数が均等になるように、各部品種類を各機械に対して割当てることを考えているのが現状である。装着部品個数を生産時間の指標値と見なしたラインバランシングを目的として考えた場合、 $Q(C_i) = \sum_{j \in C_i} q_j$  とすると、 $Cost(C_i) = Q(C_i)$  と表すことができる。

### 4 提案指標

総部品装着時間は、吸着フェイズにおける総吸着時間および装着フェイズにおける総装着時間の合計である。提案する指標値を  $Time^e(C_i)$  とし、また、総吸着時間の指標値を  $PTime^e(C_i)$ 、総装着時間の指標値を  $MTime^e(C_i)$  とする。ここで、提

案する指標値  $Time^e(C_i)$  を次のように定義する。

$$Time^e(C_i) = PTime^e(C_i) + MTime^e(C_i)$$

#### 4.1 吸着時間

吸着フェイズにおける総吸着時間は、部品の吸着回数に比例する。部品の配置のために使用されているスロットの中で、最も左端のスロット番号を 1 とし、スロット番号を 1 つずつ増やすと、番号が示すスロットは右に移動していくとする。またスロット番号を  $s$  とした上で、機械  $i$  のスロット  $s$  に配置されている部品種類を  $c_{is}$  とする。今、部品配置の状態が、部品個数が多いものから順にスロットに配置されている状態と仮定する。上記の部品配置は、次の条件を満たす。

$$q_{c_{i1}} \geq q_{c_{i2}} \geq \dots \geq q_{c_{i|C_i|}}$$

上記の条件を満たす部品配置において、吸着回数が最小となるような吸着動作を求める問題を考える。この問題を貪欲法で解いたときに、得られる吸着回数を  $NPick(C_i)$  とすると、 $NPick(C_i)$  は

$$NPick(C_i) = q_{c_{i1}} + q_{c_{i(1+h)}} + \dots + q_{c_{ir}}$$

と計算することができる。 $r$  は、スロット番号 1 から  $h$  個分だけ選択していったときに  $(1, \dots, h, 1+h, \dots, 2h)$  と選択し、最後に余る複数スロット  $(r, r+1, \dots, |C_i|)$  の中で、最も左端のスロット番号を指す。

さらに、最悪の場合における吸着回数  $Q(C_i)$  を考慮した上で、吸着フェイズにおける指標値  $PTime^e(C_i)$  を次のように定義する。

$$PTime^e(C_i) = \alpha(NPick(C_i) + Q(C_i))/2$$

#### 4.2 装着時間

装着フェイズにおける総装着時間は、基板上におけるアームの移動時間および装着回数に比例した装着時間に分けられる。装着動作は、認識カメラと基板上の移動、装着点間の移動に動作が分けられる。ここで、認識カメラと基板上の移動および装着点間の移動の 2 つに分けて指標値を設計する。

認識カメラと装着点間の移動は、タスク数だけ発生する。タスク数は、各タスクで装着する部品個数によって変化する。各タスクで装着する部品個数が常に  $h$  個（最終タスクを除いた）であるような装着動作であれば、最小のタスク数で、全ての部品を装着し終える。ある機械  $i$  において、取りうる最小のタスク数を  $L_i^{min}$  とすると、 $L_i^{min}$  の値は次のように計算することができる。

$$L_i^{min} = \lceil (Q(C_i)/h) \rceil$$

各タスクにおける、認識カメラと装着点間の移動距離は、各タスクにおける装着動作によって変化する。認識カメラと装着点間の移動は、タスク数だけ発生し、認識カメラと基板との移動回数は、1タスクにおいて認識カメラを始点とした場合と、終点とした場合の2回である。 $C_i$ に対応する全ての装着点座標の平均座標点と認識カメラとの距離を $d_0^{avr}(C_i)$ とする。これらのことから、認識カメラと基板との総移動距離の指標値を $2L_i^{min}d_0^{avr}(C_i)$

次に、装着点間の移動距離を考える。まず、割当てられた部品種類集合 $C_i$ の装着点のなかで、 $x$ 軸、 $y$ 軸それぞれの端に存在する4点の装着点を選択する。その4点の装着点において、下端と上端の装着点の $y$ 軸距離を $Y_{max}(C_i)$ とする。また、左端と右端の装着点の $y$ 軸距離を $X_{max}(C_i)$ とした上で、装着点間の移動距離に対する指標値を $X_{max}(C_i) + Y_{max}(C_i)$ とする。

認識カメラと基板上の総移動距離および装着点間の移動距離を上記のように定義のもとで、装着移動距離の指標値 $Mmv(C_i)$ を次のように定義する。

$$Mmv(C_i) = X_{max}(C_i) + Y_{max}(C_i) + 2L_i^{min}d_0^{avr}(C_i)$$

これらのことを踏まえて、装着フェイズにおける指標値 $MTime^e(C_i)$ を次のように定義する。

$$MTime^e(C_i) = \gamma Mmv(C_i) + \beta Q(C_i)$$

## 5 実験

評価実験では、現実の5種類の基板データを使用した。また、各基板種類に対して、機械台数が4台、5台、6台、7台、8台の5ケースを想定した。なお、1回あたりの平均吸着時間、平均装着時間、および単位座標あたりのアーム移動時間は、実際の機械の性能から決定した値を使用した。1機械最適化問題を解く部分に対しては、既存の手法を組み合わせたものを使用した。計算には、Intel Celeron(R) (2.53 GHz)、メモリ 512MB の計算機を用い、アルゴリズムの実装には Microsoft Visual C++ 2005 Express Edition を用いた。

表1に評価実験の結果を示す。各数値は、提案指標を用いた場合の、装着部品個数を指標とした場合の生産時間からの改善率を示し、表中の平均は機械台数が4台から8台までの各ケースにおける改善率の平均値を示す。また、表中の最大および最小の改善率は、各機械台数のケースの中での最小の改善率および最大の改善率を示す。

基板種類3に対しては改善が見られなかったが、それ以外の基板種類に対しては、装着部品個数を

表 1: 各基板における改善率

| 基板 | 平均 (%) | 最大 (%) | 最小 (%) |
|----|--------|--------|--------|
| 1  | 7.38   | 12.79  | 3.95   |
| 2  | 2.03   | 8.03   | 0.27   |
| 3  | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 4  | 3.22   | 6.39   | -0.23  |
| 5  | 0.85   | 8.54   | -3.92  |

指標とした場合と比較して、精度が良い解を得られる傾向が見られた。しかし提案指標を用いた場合、装着部品個数を指標とした場合と比較して悪くなる例もあった。なお、両手法における計算時間は、ほぼ同等であった。

基板3では、ある機械が1種類のみ部品を割当てられ、その機械がボトルネックとなってしまうケースであった。割当てられた部品種類は、他の部品種類と比較して非常に多くの部品個数を持ち、どのような部品種類の割当てを求めても、その部品種類が割当てられた機械が必ずボトルネックとなってしまうため、両指標を用いた場合に得られる総部品装着時間が同じ結果となった。

## 6 おわりに

本研究では、部品装着機における生産ラインのラインバランシング問題をモデル化し、ラインにおける各機械に対する部品の割当てに用いるアルゴリズムにおいて、新たな指標を提案した。評価実験から、ほぼ同等な計算時間で改善を図ることに成功した。今後の課題として、複数種類の基板を生産する状況を想定した指標の設計が挙げられる。また、直接コストが計算できないような他の大規模な最適化問題に対して、アルゴリズムの操作を変えず、指標を変えることによる改善へのアプローチが、応用可能かどうかの検証が挙げられる。

## 参考文献

- 1) Burke, E. K., Cowling, P. I. and Keuthen, R.: New Models and Heuristics for Component Placement in Printed Circuit Board Assembly, *International Conference on Information Intelligence and Systems*, pp. 133-140 (1999).
- 2) Magyar, G., Johnsson, M. and Nevalainen, O.: on Solving Single Machine Optimization Problems in Electronics Assembly, *Journal of Electronics Manufacturing*, Vol. 9, No. 4, pp. 249-267 (1999).