

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^{†1} 中森 眞理雄^{†1}

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いわれている。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計算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^{†1} and MARIO NAKAMORI^{†1}

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

今日、パソコンやテレビなどに代表される電子機器は日常生活にとって切り離せない存在となっている。すべての電子機器には基板が内蔵されている。したがって、内蔵されているプリント基板の生産効率は、電子機器の生産効率の向上にとって非常に重要である。

部品が取り付けられシステムとして機能する基板の作成には複数の工程が存在する。それらの中で、基板に部品を装着する工程が最も基板生産効率に影響が出る、といわれている。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が求められている。

部品装着機は、基板に部品を装着する機械である。基板上には、多くの装着点が存在し、機械内部に取り付けられているロボットアームが、部品を基板上の定められた装着点に装着する。部品装着機にはさまざまな種類が存在する。本論文で対象とする部品装着機は複雑な構造を持ち、基板生産時間を最小化するために、基板上の装着点の装着動作といった最適化すべき要因が機械の内部には複数存在する。しかも、それらはお互いに影響を与える関係にある。基板生産時間の最小化を考えるうえで、それらすべての最適化を行うことは、非常に難しい問題であり、1 機械最適化問題と呼ばれている。

さらに、現場では 1 台の機械ではなく、複数台の機械を用いて部品を装着する部品装着機の運用がなされている。すなわち、複数の機械を 1 列に並べたライン生産の形態をとり、部品の装着量を分散させることで、生産時間の短縮を図っている。ライン生産では、各機械の動作時間が同程度になるように、作業量を分担させるのが望ましい。その結果、各機械の装着時間のバランスがとれるように、各機械に対する装着部品の割付けを含めた、各機械に対する 1 機械最適化を行うラインバランシング問題を考えなければならない。しかし、この問題は、最適解を得ることが難しい 1 機械最適化問題の特徴を含んでおり、解くことが 1 機械最適化問題よりさらに難しい問題となっている。

本来のラインバランシング問題は、各作業の所要時間が分かっているときに、作業を複数の機械や人に割り付ける問題である。本論文で扱う問題は、1 台の装着機械に部品を割り付けたときの最短装着所要時間を求めるだけでも多大な時間を要するので、既存のラインバランシング問題のアルゴリズムを用いることはできない。仮に、すべての部品割付けを生成してそれぞれに対してラインの総所要時間を求めるという方針で解くなら、指数関数的計算時間を要する。一方では、部品装着機におけるラインバランシング問題を解くうえでの許容計算時間は近年、非常に短いものとなっており、数分で解くアルゴリズムが求められている。基板生産の現場では、装着機を含むラインバランシング問題に対する解法アプローチとして、各機械に対する装着部品の割当てのフェイズと、各機械における 1 機械最適化のフェイズに分けて解く方法が考えられている。このアプローチは、第 1 のフェイズで何らかのアルゴリズムによって、各機械に対する装着部品の割当てを行い、それらを入力として第 2 フェ

^{†1} 東京農工大学大学院工学府

Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

イズで各機械の1機械最適化問題を解くという方法である。しかし、各機械の装着時間は、部品を機械に割り当てた後に、その機械における1機械最適化問題を解いてはじめて分かるため、各機械に対して部品の割り当てを行った時点では、各機械間のバランスがとれているかどうか分からないのが欠点である。現実には、簡単に計算できる装着時間の評価指標を別に用いて、その値のバランスがとれるように各機械への部品の割り当てが行われている。たとえば、装着する部品の数を生産時間の評価指標と見なし、その評価指標値のバランスがとれるように各機械に対して装着部品の割り当てを行うということは、現場では広く行われている。これは、装着部品の数が多いほど、基板生産時において部品の装着のときに発生するロボットアームの上下動作回数やアームの移動時間は大きくなるからである。しかし経験によれば、装着部品の数と装着時間は必ずしも正の相関関係にあるわけではない。しかし、計算に時間がかかるような高度な評価指標を設けると、各機械に対する部品の割り当ての計算時間が大幅に増加してしまい、1機械最適化も含めた全体の計算時間が許容限度を満たせなくなる恐れもある。

これらをふまえたうえで、本論文では、各機械に対する部品の割り当てにおいて、機械の動作の特性をふまえて、かつ現実的な計算時間内で得られるような生産時間の評価指標を提案する。まず、部品装着機におけるラインバランス問題のモデル化を行う。そして、各機械に対する部品の割り当てのフェイズにおいて、機械の動作を考慮した新たな生産時間の評価指標を提案し、従来の装着部品の個数を評価指標とした手法と比較を行う。評価実験では、複数の実基板データを用いて、かつ1機械最適化問題に対するアルゴリズムは同等なものを使用したうえで、従来手法との生産時間の比較を行い、提案評価指標を用いた部品の割り当ての、基板生産時間の従来手法からの改善における有用性について検証を行う。

本論文では、2章で部品装着機における各部名称や動作について述べる。3章では、部品装着機における最適化問題に対して行ったモデル化について述べ、問題の構造を明確にする。また、本研究で用いた1機械最適化問題に対するヒューリスティックアルゴリズムについて述べる。4章では、各機械に対する部品の割り当てに対して適用したヒューリスティックアルゴリズムを述べ、用いるヒューリスティックアルゴリズムにおいて、提案する評価指標のアルゴリズムにおける位置付けについて述べる。5章では、4章で述べたアルゴリズムにおいて用いる、本論文の提案評価指標について述べる。6章において、実際の基板データを用いた評価実験を行い、現場で用いられている従来手法と比較した結果を述べる。7章において、結論および今後の課題を述べる。

2. 部品装着機

2.1 部品装着機の動作

本節では、部品装着機の構成および各部名称や、機械の動作について述べる。本論文で扱う部品装着機は、アーム、テーブル、認識カメラ、基板部で構成されている(図1)。

以下に、各部について説明する。基板部は、基板を設置する箇所である。部品装着機は基板部に設置された基板に対して部品を装着する。テーブルは基板に装着するための部品を配置する場所であり、スロットと呼ばれる部品を配置するためのものが複数並んでいる。基板に装着する部品にはさまざまな種類があり、各スロットに対して1種類の部品を配置することができる。1台の機械において、スロットの数には限りがあり、基板生産に必要な部品をすべて配置できないときは、機械を止めてスロットに配置している部品の交換を行う。しかし本研究では使用スロット数に制限がないものとする。各部品には基板に対して装着すべき個数が設定されており、基板上には、その個数分に対応した装着点が存在する。あるスロットに対して部品を配置することは、そのスロットには、生産する基板上に存在する装着点の数だけ部品が格納されることになる。たとえば、ある基板において、基板上に60カ所の装着点が存在するような部品があるとする。あるスロットに、その部品が配置されている場合、そのスロットには60個の部品が格納されていることになる。認識カメラは、アーム

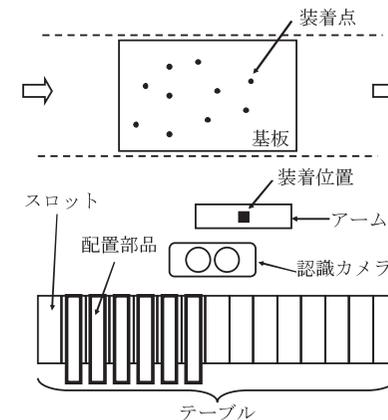


図1 部品装着機

Fig.1 Placement machine.

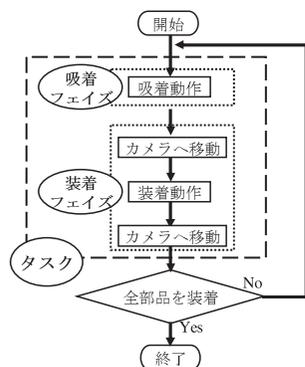


図 2 機械動作
Fig. 2 Machine action.

に取り付けられる部品の認識を行う。

アームは、部品の吸着および装着を行う。まずアームはテーブル上での上下動作により、各スロットに配置されている部品の吸着を行い、アーム上に部品を持つ。アームには、持つことが可能な部品の個数の上限が決まっており、その個数以下の範囲内で、複数の部品を吸着することができる。その後、アームは認識カメラに移動し、認識カメラを起点として、基板上に部品を運搬し、基板に対して持っている部品を装着する。その際、アームは、アーム中央部の装着位置の上下動作によって、基板に対して部品を装着する。アームは、基板上の定められた装着点に対して、その時点で持っている複数の部品をすべて装着するように、基板上を移動する。アームは x 軸と y 軸が独立したモータで動き、ある装着点から別の装着点に移動する際、アームの移動距離はその 2 点間のチェビシェフ距離になる。アームは、持っているすべての部品を装着した後に認識カメラに戻り、テーブル上で部品の吸着動作を再び行う。この吸着と装着、2 つの動作はその機械が持つすべての部品を、その機械の基板部に設置されている基板に対して装着し終え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。すなわち 1 回のタスクで、アームはテーブルと基板上を 1 往復する。部品装着機の一連の動作を図 (図 2) で示す。

2.2 吸着フェイズ

本節では、吸着フェイズにおけるアームの動作について説明する。吸着フェイズでは、アームはテーブル上を移動しつつ、複数回のアーム上下動作による吸着動作を行う。ここで、部

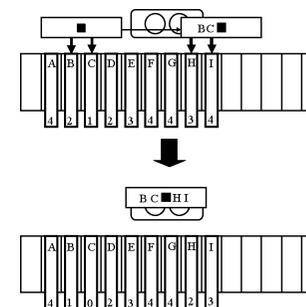


図 3 吸着動作例
Fig. 3 Example of pick action.

品の吸着のためのアーム上下動作を吸着動作と呼ぶ。アームは、1 回の吸着動作で、複数部品の同時吸着が可能である。その際、吸着動作を行うアーム位置において同時吸着が可能な部品は、テーブルにおける各スロットの配置部品によって変わる。テーブル上の各アーム位置において、そのアーム位置でのアームの直下のスロットに配置されている部品が、同時吸着が可能な部品である。吸着フェイズでは、吸着動作を行うアーム位置、およびそのアーム位置で吸着する部品を選択し、部品を吸着する。なお、1 回の同時吸着によって吸着する部品の個数の上限は、アームが持つことができる部品の個数の上限である。

あるタスクでの吸着フェイズにおける吸着動作例を図 3 で示す。図 3 のテーブル上の配置部品の文字は部品の種類を示す。またその文字の下に記された数値は、その部品の個数を示す。図 3 では、アームが持つことができる部品の個数の上限は 4 個である。したがって、同時吸着が可能な部品の個数は最大で 4 個である。左端のアーム位置において、そのアーム位置でのアームの直下のスロットに配置されている部品は A, B, C, D である。したがって、左端のアーム位置での、アームの同時吸着が可能な部品は A, B, C, D である。図 3 では、まず、左端のアーム位置で 2 つの部品 B, C を 1 回の吸着動作により同時吸着を行う。その後、別のアーム位置にて 2 つの部品 H, I を 1 回の吸着動作により同時吸着を行う。この時点で、アームは B, C, H, I の 4 つの部品を持ち、部品をこれ以上持つことができないため、このタスクでの吸着フェイズの動作は終了する。このタスクでは、アームは 2 回の吸着動作で 4 つの部品を吸着したことになる。図 3 の例のように、1 回の吸着動作によって同時吸着が可能な部品はすべて違う種類である。1 回の吸着動作で 1 つのスロットから 1 つの部品しか吸着できない。

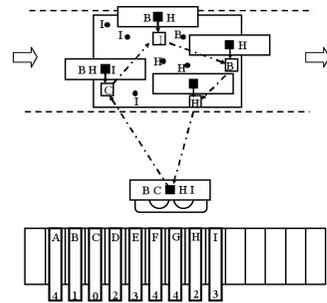


図4 装着動作例
Fig. 4 Example of mount action.

吸着動作の後、アームは認識カメラに移動する。認識カメラとテーブルの距離は非常に近く、アームは複数回の吸着動作を終えた後、すぐに移動可能である。したがって、本研究では認識カメラへのアームの移動時間はないものとする。

2.3 装着フェイズ

本節では、装着フェイズにおけるアームの動作について説明する。アームは、認識カメラを起点として、同じタスク内の吸着フェイズにより吸着され、アーム上で持っている部品の装着を行う。部品の装着は、アーム中央の装着位置により行われる。あるタスクでの装着フェイズにおける装着動作例を図4に示す。図4では、アームが吸着し、アーム上に持っている部品はB, C, H, Iである。基板上には1つの部品に対し複数の装着点が存在するため、アームは各部品に対応した装着点を1つ選択し、順番に装着する。図4では、アームは認識カメラを起点とし、基板上に移動して、C, I, B, Hの順で装着する。アームは、そのタスクで吸着し、アーム上で持っているすべての部品を装着後、認識カメラに移動する。図4上では、装着点間に線を結んでいるが、アームの実際の移動距離は各装着点間のチェビシェフ距離に相当する。

2.4 生産ライン

本節では、生産ラインについて説明する。生産ラインでは、複数の部品装着機が1列に並び、各機械がそれぞれ割り当てられた部品の装着を行う。生産ラインにおいて、生産する基板の種類によっては、前の機械で装着された部品が、後の機械での部品の装着時間に影響を及ぼすことがある。しかし、本研究では生産ラインにおける機械の前後関係による装着時間の影響はないものとする。生産ラインにおける部品割当て例を図5に示す。図5中

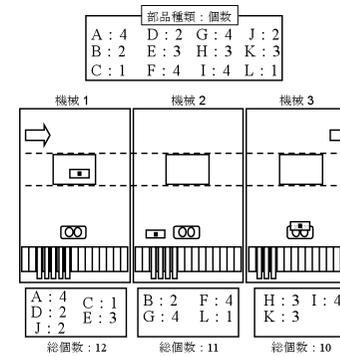


図5 生産ラインの例
Fig. 5 Example of assembly line.

の上部は、基板に必要な部品および個数を示している。機械は3台あり、機械図の下部に、割当てによって定められた、その機械が装着する部品を示している。図5では、たとえば1台目の機械は部品A, C, D, E, Jを装着する。すなわち、1台目の機械は、部品A, C, D, E, Jに対して、前節で述べた吸着フェイズによる吸着動作、装着フェイズによる装着動作で部品を基板上に対して装着する。部品A, C, D, E, Jの数の合計は12である。したがって、基板は、1台目の機械が、基板上に対して各部品に対応した装着点の合計である12の装着点に対して部品を装着し終わったら、2台目の機械の基板部に移動する。複数の機械に対して、部品の個数を分割して割り当てることもできるが、本研究では図5のように、各部品は1つの機械に対してのみ割り当てられることとする。また、各機械に割り当てられている部品は、テーブル上の各スロットに対して必ず隣接して配置されるものとする。

3. 部品装着機における最適化問題

3.1 ラインバランシング問題

本節では、部品装着機におけるラインバランシング問題について説明する。

3.1.1 定義

下記に、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 : 部品の種類数
- N : 部品集合, $N = \{1, 2, \dots, n\}$
- $j (\in N)$: 部品番号
- q_j : 部品 j の装着点数
- K : 装着点集合, $K = \{1, 2, \dots, \sum_{j \in N} q_j\}$
- $k (\in K)$: 装着点番号
- D : 装着点 k と部品 j の関係式, $D : K \rightarrow N$
- $d_{kk'}$: 装着点 k と装着点 k' の距離
- d_{0k} (d_{k0}) : 認識カメラと装着点 k の距離
- h : 1 タスクの吸着 (装着) 部品の上限数
- α : 1 回のアーム平均吸着時間
- β : 1 回のアーム平均装着時間
- γ : 基板上での単位距離あたりのアーム平均移動時間

各機械の動作時間は、全タスクにおける吸着フェイズにおける吸着時間および装着フェイズにおける装着時間の合計である。ラインバランシング問題において求めるものであり、吸着フェイズにおける吸着時間や、装着フェイズにおける装着時間に影響を与えるものが、テーブルにおける各スロットへの配置部品、および吸着動作、装着動作である。そして、これらに大きく影響を与えるものが、各機械への割当て部品である。各スロットへの配置部品や吸着動作、装着動作の説明の前に、以下の定義を記す。

- C_i : 機械 i への割当て部品集合, $C_i \subset N (\forall i)$
- $Q(C_i)$: 機械 i に割り当てられた部品の総装着点数,
 $Q(C_i) = \sum_{j \in C_i} q_j (\forall i)$
- L_i : 機械 i における総タスク数
- T_i : 機械 i におけるタスク番号の集合,
 $T_i = \{1, 2, \dots, L_i\} (\forall i)$
- $t (\in T_i)$: タスク番号
- S_i : 機械 i における使用スロット番号の集合,
 $S_i = \{1, 2, \dots, |C_i|\} (\forall i)$
- $s (\in S)$: スロット番号
- A_i : 機械 i におけるアーム位置集合,
 $A_i = \{1, 2, \dots, |C_i| - h + 1\} (\forall i)$

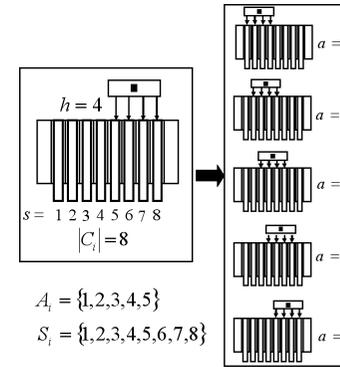


図 6 アームの移動範囲
Fig. 6 Moving area of an arm.

- $a (\in A_i)$: テーブル上のアーム位置
- w_{it} : 機械 i のタスク t に吸着 (装着) する部品個数

機械 i における総タスク数 L_i は、機械 i での各タスクにおける吸着フェイズで吸着する部品 (装着フェイズで装着する部品) の個数によって変化する。たとえば毎タスク、アームが吸着 (装着) する部品の個数が 1 個の場合、 L_i は機械 i に割り当てられた部品集合 C_i の総部品装着点数 $Q(C_i)$ となる。各タスクで吸着もしくは装着する部品の個数は、吸着フェイズにおける吸着動作および装着フェイズにおける装着動作によって変化する。

機械 i におけるテーブルでは、テーブルの使用スロット数は、各機械への割当て部品の集合 C_i の要素数である $|C_i|$ 分である。使用するスロット数 $|C_i|$ および吸着部品の上限数 h によって、テーブル上のアームの移動範囲は変わってくる。図 6 の例では、吸着部品の上限数 h は 4 であり、割当て部品の数 $|C_i|$ は 8 である。したがって、図 6 中の機械での使用スロット数は 8 になる。また、アームの移動範囲は割当て部品の種類数 $|C_i|$ および吸着部品の上限 h によって異なり、 $|C_i| - h + 1$ で定義される。吸着部品の上限 h は、1 回の吸着動作で同時吸着できる部品の個数の上限でもありアームの長さを示している。図 6 の例のように、各スロットに配置されている部品すべてを吸着するためのアームの移動範囲は、使用スロット数 $|C_i|$ よりも小さく済み、アームが長いほどその値は小さくなる。図 6 の場合、アームのとりうる位置は 5 か所となる。 a が 1 のときは、アームの位置はテーブル上における左端を示す。 a の値を 1 ずつ増やすことは、アームの位置がテーブル上を右側に移動することを示す。各機械のテーブルにおけるアームの移動範囲や使用スロット数は、

その機械への割当て部品の種類数によって変化する．

3.1.2 吸着フェイズにおける吸着時間

各タスクにおける吸着フェイズにおける吸着時間の，全タスクの合計を総吸着時間と呼ぶ．総吸着時間は，テーブル上における各スロットへの部品の配置および吸着動作によって変化する．ここで，テーブルの各スロットに対する部品の配置を部品配置と呼ぶ．配置に使用するスロット数は，割り当てられる部品の数である．なお，配置に使用する各スロット間は空いてないものとする．これらをふまえて，ラインバランシング問題で求めるべきものの1つである，各機械でのテーブルにおける部品配置を次のように定義する．

$f_{is} (\in C_i)$: 機械 i のスロット s への配置部品

F_i : 機械 i の部品配置，

$$F_i = \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{i|C_i|}\} (\forall i)$$

吸着動作は，各アーム位置において吸着可能な部品によって大きく変化する．そして，各アーム位置において吸着可能な部品は，部品配置 F_i で決定する．機械における吸着フェイズは，その機械に割り当てられた部品のすべての装着点に対して部品を装着するように，アームがすべての部品を吸着し終わるまで繰り返される．タスク数 L_i は，そのときの吸着フェイズが繰り返される回数である．各タスクにおける吸着フェイズの，各アーム位置で吸着する部品は1つとは限らず，同時吸着によって複数の部品を吸着することがある．これらのことから，ラインバランシング問題で求めるべきものの1つである各機械での吸着動作を次のように定義する．

$v (\in V)$: 吸着動作番号

V : 吸着動作番号の集合，

$$V = \{1, 2, \dots, h\}$$

$P_{itav} (\subset C_i)$: 機械 i のタスク t においてアーム位置 a で v 回目に吸着する部品集合

$TPA_{it}^{F_i}$: 機械 i における部品配置 F_i 上でのタスク t における吸着動作，

$$TPA_{it}^{F_i} = \{P_{it11}, P_{it12}, \dots, P_{it1h}, P_{it21}, \dots, P_{it2h}, \dots, P_{it(|C_i|-h+1)1}, \dots, P_{it(|C_i|-h+1)h}\} (\forall i, \forall t)$$

$PA_i^{F_i}$: 機械 i における部品配置 F_i 上での吸着動作，

$$PA_i^{F_i} = \{TPA_{i1}^{F_i}, TPA_{i2}^{F_i}, \dots, TPA_{iL_i}^{F_i}\} (\forall i)$$

a はアーム位置を示し，機械 i における a がとりうる範囲は，前節で示したように $|C_i| - h + 1$ である． v は吸着動作番号を示し，あるタスクのあるアーム位置で行われた吸着動作は，そのタスクのそのアーム位置での何回目の吸着動作かを示す．1タスクにおいて吸着動作は最

大で h 回で行われる．したがって， v は h 以下である． P_{itav} は，機械 i のタスク t において，アーム位置 a で v 回目に吸着する部品集合を示す．機械 i のタスク t における，アーム位置 a での v 回目の吸着動作において，同時吸着により複数の部品を吸着する場合は， P_{itav} はそれらの部品番号を要素とする集合となる．

$TPA_{it}^{F_i}$ は，全アーム位置および全吸着動作番号における P_{itav} から構成される集合である． P_{itav} は機械 i において，あるタスク t 内のアーム位置 a における吸着部品を示し，そのタスク t の全アーム位置における吸着動作，すなわちタスク t の吸着動作を示したのが $TPA_{it}^{F_i}$ である．なお $TPA_{it}^{F_i}$ は同じ要素の重複を許す集合とする． $TPA_{it}^{F_i}$ が機械 i のタスク t における吸着動作を表し，全タスクの吸着動作を要素とした集合が $PA_i^{F_i}$ である．吸着動作は部品配置 F_i に影響され， F_i によって大きく変化する．したがって本論文では，吸着動作を示す $TPA_{it}^{F_i}$ および $PA_i^{F_i}$ は， F_i を上付きにして定義する．

図7に部品配置 F_i と吸着動作 P_{itav} の例を示す．今，機械 i において，アームの吸着部品の上限数 h が4であり，部品配置 $F_i = \{5, 4, 9, 15, 1, 3, 7, 12\}$ と仮定する．部品配置 F_i の，タスク t において，3カ所のアーム位置 2, 3, 5 でアームが部品を吸着したとする．アーム位置 2 では部品 9 を，アーム位置 5 では部品 12 を吸着したとする．また，アーム位置 3 では部品 9 と部品 15 を同時吸着したとする． P_{itav} は各アーム位置で吸着する部品の集合である．アーム位置が 2, 3, 5 において，1回ずつ吸着動作を行ったため，この動作は $P_{it21} = \{9\}$ ，

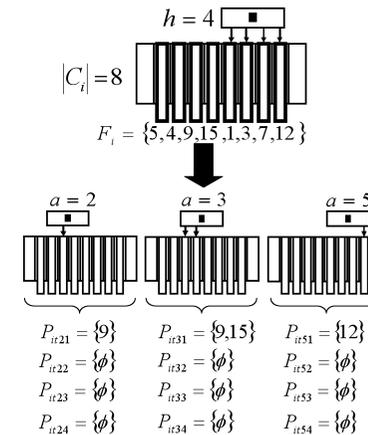


図7 部品配置と吸着動作の関係(例1)

Fig. 7 Relationship between F_i and P_{itav} (Example1).

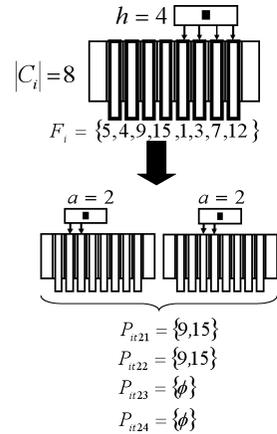


図 8 部品配置と吸着動作の関係 (例 2)

Fig. 8 Relationship between F_i and P_{itav} (Example2).

$P_{it31} = \{9, 15\}$, $P_{it51} = \{12\}$ で表される。そして、アーム位置 2, 3, 5 以外のアーム位置では吸着動作はまったく行われず、吸着動作を行ったアーム位置 2, 3, 5 では 2 回以上の吸着動作は行われなかったため、 $TPA_{it}^{F_i}$ 内における、 P_{it21} , P_{it31} , P_{it51} 以外の集合は空集合となる。したがって、 $TPA_{it}^{F_i} = \{\{9\}, \{9, 15\}, \{12\}\}$ となる。たとえば、図 8 のように、アーム位置 3 で部品 9 と部品 15 を吸着した後、アーム位置 3 でさらに部品 9 と部品 15 を吸着することができる（この場合、4 つの部品を吸着したため他のアーム位置では、もう吸着動作は行うことができない）。その場合、 $P_{it31} = \{9, 15\}$, $P_{it32} = \{9, 15\}$ となり、他の集合は空集合となる。したがって、そのときにおける動作では、 $TPA_{it}^{F_i} = \{\{9, 15\}, \{9, 15\}\}$ となる。

吸着動作は部品配置に依存し、部品配置が変わると各アーム位置で吸着可能な部品が変わってくる。この部品配置と吸着動作の関係は、次のように記述することができる。

$$P_{itav} \subseteq \{f_{ia}, f_{i(a+1)}, \dots, f_{i(a+h-1)}\} \quad (\forall i, \forall t, \forall a, \forall v)$$

吸着動作において、各アーム位置で吸着する部品は、そのアーム位置で吸着可能な部品に含まれる。図 7 の、アーム位置 3 で吸着可能な部品はスロット番号 3, 4, 5, 6 に配置されている部品であり、 $f_{i3} = 9$, $f_{i4} = 15$, $f_{i5} = 1$, $f_{i6} = 3$ である。図 7 のアーム位置 3 での吸着動作は、 $P_{it31} = \{9, 15\}$ であり、上記の関係式が成り立っていることが分かる。

総吸着時間はすべての部品の吸着のためにかかったアームの吸着回数と 1 回の吸着平均時間 α の積、およびテーブル上でのアームの移動時間で表すことができる。ただし、本研究では吸着フェイズにおける吸着時間は、アームの吸着回数だけに影響されるものとする。したがって、機械 i の総吸着時間を $Ptime(PA_i^{F_i})$ 、機械 i のタスク t における吸着回数を $NPick(TPA_{it}^{F_i})$ とすると、次のように表すことができる。

$$Ptime(PA_i^{F_i}) = \alpha \sum_{t \in T_i} NPick(TPA_{it}^{F_i}) \quad (\forall i)$$

なお、吸着動作 $TPA_{it}^{F_i}$ は機械 i のタスク t において、各アーム位置において吸着する部品集合の集まりであり、吸着動作を行わないアーム位置は空集合となる。したがって、吸着動作 $TPA_{it}^{F_i}$ の空集合を除いた集合の数が機械 i のタスク t における吸着回数となる。たとえば図 7 において、このときの $TPA_{it}^{F_i}$ の要素である集合の数は 3 つであり、この集合の数が吸着回数を表す。 $NPick(TPA_{it}^{F_i})$ は、 $TPA_{it}^{F_i}$ を用いて、次のように表すことができる。

$$NPick(TPA_{it}^{F_i}) = |TPA_{it}^{F_i}| \quad (\forall i, \forall t \in T_i)$$

3.1.3 装着フェイズにおける装着時間

各タスクにおける装着フェイズにおける装着時間の、全タスクの合計を総装着時間と呼ぶ。装着フェイズは、吸着フェイズと同じタスク数だけ繰り返される。そして各タスク内では必ず、吸着した部品の個数 w_{it} 回だけ装着が行われる。すなわち、機械 i のタスク t でアームが装着する部品の装着点数は w_{it} である。これらのことから、求めるべきものの 1 つである各機械での装着動作を次のように定義する。

Π_{it} : 順序番号の集合、

$$\Pi_{it} = \{1, 2, \dots, w_{it}\} \quad (\forall i, \forall t)$$

$\pi (\in \Pi_{it})$: 順序番号

$m_{it\pi} (\in K)$: 機械 i のタスク t において π 番目に装着される部品の装着点番号

TMA_{it} : 機械 i のタスク t における装着動作、

$$TMA_{it} = \{m_{it1}, m_{it2}, \dots, m_{itw_{it}}\} \quad (\forall i, \forall t)$$

MA_i : 機械 i における装着動作、

$$MA_i = \{TMA_{i1}, TMA_{i2}, \dots, TMA_{iL_i}\} \quad (\forall i)$$

装着動作と吸着動作は、お互いに依存関係にある。あるタスクにおいて装着する部品は、同時にそのタスク内で吸着している部品であり、それは逆のこともいえる。この関係は、装着点番号と部品番号の関係を表す D を用いて、次のように表すことができる。

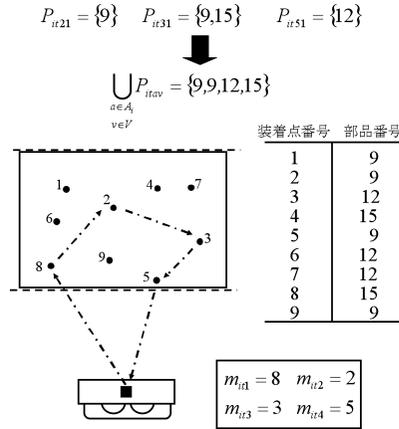


図9 装着動作と吸着動作の関係
Fig.9 Relationship between $m_{it\pi}$ and P_{itav} .

$$\{D(m_{it1}), D(m_{it2}), \dots, D(m_{itw_{it}})\} = \bigcup_{a \in A_i, v \in V} P_{itav} \quad (\forall i, \forall t)$$

図9に $m_{it\pi}$ と P_{itav} の関係の例を示す。今、 $P_{it21} = \{9\}$, $P_{it31} = \{9, 15\}$, $P_{it51} = \{12\}$ となっている。また、基板上には装着点番号1から9までが存在し、それらに対応する部品が図の表のように定まっている。図9のように装着点番号8, 2, 3, 5の順で装着するとなると、 $m_{i1} = 8$, $m_{i2} = 2$, $m_{i3} = 3$, $m_{i4} = 5$ と表される。 $D(m_{i1}) = 15$, $D(m_{i2}) = 9$, $D(m_{i3}) = 12$, $D(m_{i4}) = 9$ であり、 P_{it21} , P_{it31} , P_{it51} の要素と一致することが分かる。なお、このとき $TMA_{it} = \{8, 2, 3, 5\}$ である。

総装着時間は、アームの総上下時間と移動時間に分けられる。アームの総上下時間は、すべての部品の装着におけるアームの総装着動作回数と、1回の平均装着時間 β の積で表すことができる。また、アームの移動時間は、基板上でのアームの移動距離と、単位距離あたりのアームの平均移動時間 γ の積で表すことができる。これらのことから、機械 i の装着フェイズにおける装着時間を $Mtime(MA_i)$ 、機械 i のタスク t におけるアームの移動距離を $Mmv(TMA_{it})$ とすると、次のように表すことができる。

$$Mtime(MA_i) = \gamma \sum_{t \in T_i} Mmv(TMA_{it}) + \beta Q(C_i) \quad (\forall i)$$

また、 $Mmv(TMA_{it})$ は次のように表すことができる。

$$Mmv(TMA_{it}) = \sum_{\pi \in \Pi_{it} \setminus \{w_{it}\}} d_{m_{it\pi}} d_{m_{it(\pi+1)}} + d_{0m_{it1}} + d_{m_{it}(w_{it})0} \quad (\forall i, \forall t \in T_i)$$

3.1.4 生産ラインにおける生産時間

各機械における動作時間は、その機械の総吸着時間と総装着時間で構成される。各機械における動作時間を単機生産時間と呼ぶこととする。また、生産ラインにおける生産時間をライン生産時間と呼ぶこととする。機械 i の単機生産時間を $Time(PA_i^{F_i}, MA_i)$ とすると、単機生産時間 $Time(PA_i^{F_i}, MA_i)$ は次のように記述することができる。

$$Time(PA_i^{F_i}, MA_i) = Ptime(PA_i^{F_i}) + Mtime(MA_i) \quad (\forall i)$$

したがって、ライン生産時間を CT とすると、ライン生産時間 CT は次のように記述することができる。

$$CT = \max_{i \in M} Time(PA_i^{F_i}, MA_i)$$

3.2 問題のモデル

部品装着機におけるラインバランシング問題の目的は、ライン生産時間を最小化するような各機械の部品配置、吸着動作、装着動作を求めることであり、次のように記述することができる。

$$\text{minimize } CT$$

機械における単機生産時間は、その機械の総吸着時間と総装着時間で構成される。総吸着時間 $Ptime(PA_i^{F_i})$ は部品配置 F_i と吸着動作 $PA_i^{F_i}$ によって大きく影響される値である。部品配置 F_i と吸着動作 $PA_i^{F_i}$ の関係は、前節で述べた関係式

$$P_{itav} \subseteq \{f_{ia}, f_{i(a+1)}, \dots, f_{i(a+h-1)}\} \quad (\forall i, \forall t, \forall a, \forall v)$$

で示すように、吸着動作 $PA_i^{F_i}$ が部品配置 F_i に対して依存する関係にある。総装着時間 $Mtime(MA_i)$ は装着動作 MA_i によって大きく影響される値である。装着動作 MA_i は、前節で述べた関係式

$$\{D(m_{it1}), D(m_{it2}), \dots, D(m_{itw_{it}})\} = \bigcup_{a \in A_i, v \in V} P_{itav} \quad (\forall i, \forall t)$$

で示すように、吸着動作 $PA_i^{F_i}$ と相互に依存関係にある。以上のことから、部品配置、吸着動作および装着動作と、各機械における単機生産時間に影響を与える時間は図10の関係になる。

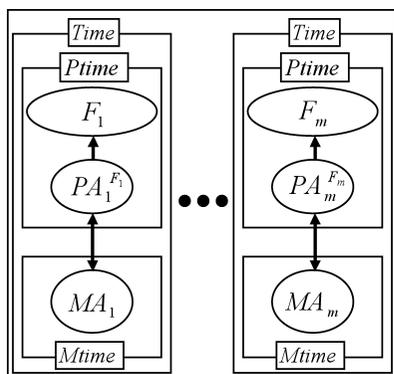


図 10 変数と生産時間の関係

Fig. 10 Relationship between variables and production time.

3.3 問題の分割

本問題は、ライン生産時間が最小となるような各機械の部品配置，吸着動作，装着動作を求める問題である。しかし、それらはお互いに影響を与える関係にあるため、最適解を求めることは非常に難しい。また、全体を考慮して解くことを考えてしまうと膨大な計算時間がかかってしまい、現実的に用いることが難しくなってしまう。

そこで従来、考えられているのが問題の分割である。まず、何らかのアルゴリズムによって各機械に対して、装着する部品を割り当てる。すなわち、機械 i への割当て部品の集合 C_i を求める。その後、割り当てられた部品集合 C_i を入力として、機械 i の単機生産時間が最小となる部品配置 F_i ，吸着動作 $PA_i^{F_i}$ ，装着動作 MA_i を、さらに何らかのアルゴリズムを用いて求めることを考える（図 11）。機械 i に対して割り当てられた部品集合 C_i を入力として、機械 i の単機生産時間が最小となるような部品配置，吸着動作，装着動作を求める問題を 1 機械最適化問題という。機械 i における 1 機械最適化問題の目的は次のように記述することができる。

$$\text{minimize } Time(PA_i^{F_i}, MA_i)$$

1 機械最適化問題に対しては、さまざまな解法が提案されている。1 機械最適化問題も非常に複雑なため、複数の問題に分割され、それぞれの問題に焦点を絞り研究が行われている。総吸着時間を最小化する部品配置や吸着動作を求める問題に対する解法^{12)–15)} や、総装

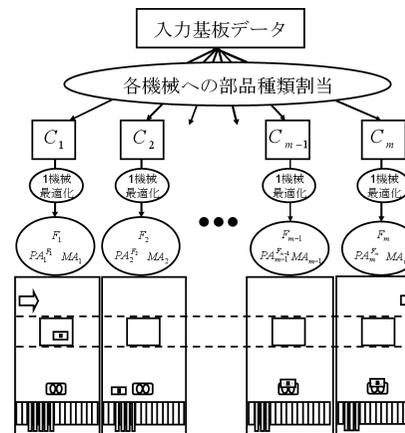


図 11 問題の分解

Fig. 11 Decomposition of the problem.

着時間を最小化する装着動作を求める問題に対する解法^{1),10)} が過去に提案されている。また、分解せずに直接それらすべてを求める解法^{2)–4)} も提案されている。

生産時間のバランシングを目的として、各機械に対する最適な部品割当てを求める問題は、各機械における使用スロット数の制限や、装着部品の先行制約を考慮するならば、SALB (Simple Assembly Line Balancing)⁷⁾ ととらえることができる。SALB は処理する仕事間における先行制約や、各機械の仕事保有数制約がある状況で、各機械に対して最適な仕事の割当てを求める問題である。SALB に対してはさまざまな解法が提案されているが、本研究で扱う部品装着機とは違う種類の機械に特化したラインバランシング問題^{8),9)} に対しても研究がされている。

3.4 1 機械最適化問題に対する解法

本研究では、生産ラインにおいて各機械に対する部品割当ての最適化に関する手法を提案する。しかし、1 機械最適化問題を解かなければ、各機械に対する部品割当ての最適化に関する提案手法に対する最終的な評価につながらない。1 機械最適化問題に対するアルゴリズムの精度に関する議論は本研究において対象外である。したがって、1 機械最適化問題に対する解法は、既存の解法を組み合わせたものを用いる。本節では本研究で用いる、1 機械最適化問題に対する解法について説明する。

3.4.1 構築法

1 機械最適化問題に対しては、さまざまなヒューリスティックな解法が提案されている。本研究では、それら既存の解法を組み合わせたものを用いる。機械 i における 1 機械最適化問題での入力となるものは、割当て部品の集合 C_i である。求めるものは部品配置、吸着動作、装着動作の 3 つであり、それぞれを構築することをまず考える。

まず、部品配置および吸着動作を切り離して考え、装着フェイズにおける装着時間を最小化する各タスクの装着動作を求める問題を考える。この問題は、認識カメラを出発地点とした配送経路問題と見なすことができる。配送経路問題に対しては、一般的な手法としてセービング法⁶⁾がある。まず認識カメラから各装着点へそれぞれ 1 回ずつ往復するような装着動作を初期解とする。その後、ある装着点へアームが移動した後、認識カメラに戻らず、別の装着点に移動するように経路を統合すれば、認識カメラに戻るときに比べてどれだけ距離が節約できるかを計算し、認識カメラへ戻る回数を減らしながら、アームの総移動距離を短くしていく(図 12)。セービング法で各タスクの装着動作を求める際、各タスクでアームがたどる装着点の数が h を上回らないようにする。セービング法により各タスクにおける装着動作を求めると、各タスクにおいて吸着すべき部品が定まる。

次に、部品配置および吸着動作を求める。部品配置の構築には、過去に提案されている手法¹⁴⁾を利用する。機械 i に対して割当て部品の集合 C_i の各部品に対して装着点数が多いものから順番に、以下の条件を満たすように部品をスロットに配置する。

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

上記の条件を満たすために、装着点数が多い部品を左端のスロットから順々に配置していく。次に、この構築された部品配置に基づき、かつセービング法によって求めた装着動作を

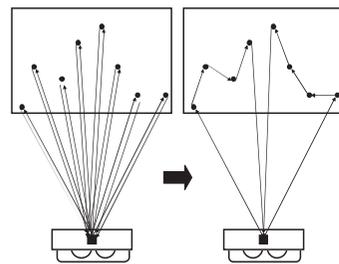


図 12 セービング法の例
Fig. 12 Example of saving method.

考慮して吸着動作を求める。各タスクにおいて装着する部品と吸着する部品は同じものでなければならない。部品配置を入力として与えられた状態で、あるタスクの吸着回数を最小化するような、そのタスクの吸着動作を求める問題は、集合被覆問題と見なすことができる。今、機械 i のタスク t に装着する部品の集合を B_{it} とする。また、タスク t で装着する部品集合のみを取り出した、アーム位置 a において吸着可能な部品集合を b_{ita} とする。

図 13 の例では、 $B_{it} = \{9, 9, 12, 15\}$ 、 $F_i = \{5, 4, 9, 15, 1, 3, 7, 12\}$ となっている。たとえば、 $a = 1$ のとき、吸着可能な部品は 5, 4, 9, 15 である。その中から、 B_{it} の要素のみを取り出すと、9, 15 である。したがって、 $b_{it1} = \{9, 15\}$ となる。このとき、機械 i のタスク t において、吸着回数が最小となるアーム位置の組合せを求める問題は、 B_{it} を台集合、各 b_{ita} をコストが 1 である部分集合とした集合被覆問題ととらえることができる。集合被覆問題に対しては、一般的な手法として貪欲法⁵⁾が提案されている。集合被覆問題における貪欲法は、台集合を最も被覆できる部分集合を、台集合の要素すべてを被覆できるまで反復的に選択していく。セービング法で求めた各タスクにおける装着動作を台集合、得られた部品配置を部分集合として、各タスクにおける集合被覆問題を貪欲法によって解く。

以上のようにして、部品配置、吸着動作、装着動作を構築する。機械 i において、割当て部品の集合 C_i を入力とし、部品配置 F_i 、吸着動作 $PA_i^{F_i}$ 、装着動作 MA_i を求める関数を $\text{ConstAction}(C_i)$ とする。機械 i における $\text{ConstAction}(C_i)$ の流れは図 14 のようになる。

3.4.2 局所探索法

$\text{ConstAction}(C_i)$ によって解を構築後に、部品配置、吸着動作、装着動作に対して局所探索

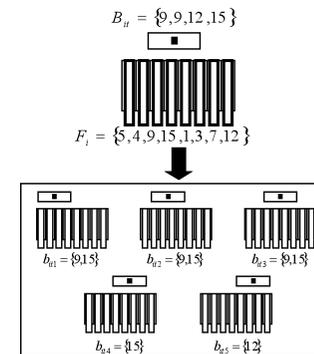


図 13 吸着動作と集合被覆問題
Fig. 13 Pick action and set covering problem.

```

ConstAction( $C_i$ )
step1 ( 装着動作の構築 )
 $MA_i$  をセービング法によって構築 ;
タスク数  $L_i$  が確定 ;
step2 ( 部品配置の構築 )
装着点数が降順になるような  $F_i$  を構築 ;
step3 ( 吸着動作の構築 )
FOR ( $t = 1 ; t \leq L_i ; t++$ ) {
   $TMA_{it}$  から台集合  $B_{it}$  を構築 ;
   $F_i$  から各  $a$  における部分集合  $b_{ita}$  を生成 ;
   $B_{it}, b_{ita}$  を入力とし貪欲法で  $TPA_i^{F_i}$  を生成 ;
}

```

図 14 ConstAction(C_i) の流れ
Fig. 14 Flow of ConstAction(C_i).

法を適用する．部品配置に対する局所探索法では 2swap 改善法を用いる．部品配置に対する 2swap 改善法は，部品配置の 2 つのスロットを入れ替え，そのつど，吸着動作を求め改善法である．吸着動作は部品配置に依存するため，配置の変更にもない吸着動作を求めなおす必要がある．吸着動作を求めるときは，ConstAction(C_i) で用いた貪欲法を利用する．機械 i における現状解の部品配置 F_i の 2swap 近傍における解の集合を $PN(F_i, PA_i^{F_i})$ ，現状解の単機生産時間 $Time(PA_i^{F_i}, MA_i)$ を $Time$ とする．また， $PN(F_i, PA_i^{F_i})$ の中で，最も小さい単機生産時間を持つ近傍解を F_i' ， $PA_i'^{F_i'}$ とし，そのときの単機生産時間 $Time(F_i', PA_i'^{F_i'})$ を $NewTime^P$ とする．もし $NewTime^P$ が $Time$ を下回れば， $Time \leftarrow NewTime^P$ とする．そして， $F_i \leftarrow F_i'$ ， $PA_i^{F_i} \leftarrow PA_i'^{F_i'}$ とし，部品配置と吸着動作が更新する．アルゴリズムは局所最適解に到達するまで，反復的に改善を試みる．

装着動作に対する局所探索法では 2opt 近傍を用いる．2opt 近傍は，経路上の 2 つの辺を入れ替える方法である．ただし，2 つの辺の入替えによって，選択された辺を持つタスクの，装着部品が変わる可能性がある．それにより，辺の入替え前の吸着動作と整合性がとれなくなってしまう恐れがある．したがって，部品配置における局所探索法と同様，2opt による装着動作の変更にもない吸着動作を求めなおす必要があり，ここでも前項で述べた貪欲法を用いる．機械 i における現状解の装着動作 MA_i の 2swap 近傍における解の集合

を $MN(PA_i^{F_i}, MA_i)$ とする．そして $MN(PA_i^{F_i}, MA_i)$ の中で，最も小さい生産時間を持つ近傍解を MA_i' ， $PA_i'^{F_i'}$ とし，そのときの生産時間 $Time(PA_i'^{F_i'}, MA_i')$ を $NewTime^M$ とする．もし， $NewTime^M$ が $Time$ を下回れば， $Time \leftarrow NewTime^M$ となる．そして， $PA_i^{F_i} \leftarrow PA_i'^{F_i'}$ ， $MA_i \leftarrow MA_i'$ となり，装着動作と吸着動作が更新される．アルゴリズムは局所最適解に到達するまで，反復的に改善を試みる．

機械 i に対して割り当てられた部品集合 C_i を入力とし，ConstAction(C_i) と局所探索法を組み合わせた関数を OneOpt(C_i) とする．本研究における， C_i を入力とした 1 機械最適化問題の解法である OneOpt(C_i) を図 15 に示す．

4. 部品の割当てアルゴリズム

本研究におけるラインバランシング問題の困難性は，各機械に対して部品を割り当てるフェイズにおいて，各機械の単機生産時間を計算することの難しさにある．したがって，アルゴリズムによって各機械に対して部品を割り当てる際に，単機生産時間とは別の，機械の仕事量を表す評価指標を設ける必要がある．今，機械 i に対して部品集合 C_i が割り当てられているときの，機械 i における単機生産時間の評価指標値を $Value(C_i)$ とする．各機械における単機生産時間の評価指標値のパランシングを目的とした問題は次のように記述することができる．

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

現場では，各機械の装着点数が均等になるように，各部品を各機械に対して割り当てることを考えているのが現状である．その後，各機械における生産時間を見たうえで，熟練者が各機械に対する装着部品の微調整を行う．部品の装着点数を評価指標値とした場合， $Value(C_i) = Q(C_i)$ と表現できる．

各機械への部品の割当てにはヒューリスティックな解法である貪欲法を用いる．各機械に対して， $\max_{i \in M} Value(C_i)$ の値が小さくなるように，各部品を反復して割り当てる．アルゴリズムの反復中において，各機械に対して未割当ての部品集合を N_{non} とする．部品 j を機械 I に対して割り当てたときの，機械 I の単機生産時間の評価指標値は $Value(C_I \cup \{j\})$ となる．部品 j を機械 I に対して割り当てたときにおける，ライン生産時間の評価指標値の最大値を $Newtime_{Ij}^{Line}$ とすると，

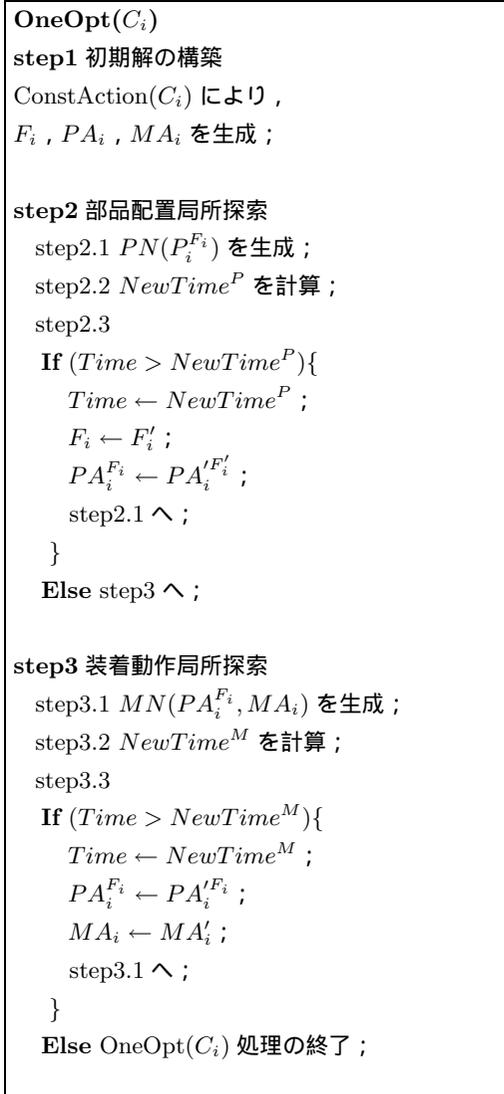


図 15 OneOpt(C_i) の流れ
Fig. 15 Flow of OneOpt(C_i).

$$Value_1^{max} = \max_{i \in M \setminus \{I\}} Value(C_i)$$

$$Value_2^{max} = Value(C_I \cup \{j\})$$

$$Newtime_{Ij}^{Line} = \max(Value_1^{max}, Value_2^{max})$$

となる。

各機械への部品割当てのアルゴリズムは、機械に割り当てる部品およびその部品を割り当てる機械を反復的に選択し割り当てる。ラインバランシングを目的とした作業の機械割当て問題における古典的な手法として、作業に優先順位を設けて、その順番に従い優先度が高い作業から順番に機械に対して割り当てる手法がある。優先順位はさまざまなものが提案されており、その中の 1 つに、機械に割り当てる作業の処理時間が大きいものから機械に割り当てる優先順位が提案されている¹¹⁾。本研究における、評価指標値上でのラインバランシング問題に対するアルゴリズムは、単機生産時間ではなく評価指標値を用いて各部品を機械に割り当てる。したがって、本論文において用いるアルゴリズムは、機械に割り当てる部品の選択の際、機械全体の評価指標値である $\max_{i \in M} Value(C_i)$ に影響を与える部品から順に機械に対して割り当てる選択方法をとることとする。すなわち、部品を機械に対して割り当てたうえで、機械全体の評価指標値が大きくなる部品から順番に、その部品に対して装着動作を行う機械を決定する。しかし、各部品の機械全体の評価指標値 $\max_{i \in M} Value(C_i)$ に対する影響は、割り当てる機械によって変化する。したがって、 N_{non} におけるすべての部品に対して、最も機械全体の評価指標値が小さくなる割当て機械およびそのときの機械全体の評価指標値を計算する。まず、

$$Newtime_{I(j)j}^{Line} = \min_{i \in M} Newtime_{ij}^{Line}$$

としたうえで、上式を満たす機械を $I(j)$ とする。 $I(j)$ は、部品 j をある機械に対して割り当てる際に、最も機械全体の評価指標値が小さくなるような機械である。 $Newtime_{I(j)j}^{Line}$ を、部品 j が機械全体の評価指標値 $\max_{i \in M} Value(C_i)$ に与える影響ととらえたうえで、アルゴリズムは $Newtime_{I(j)j}^{Line}$ の値が最も大きくなる部品 J を選択する。すなわち、

$$Newtime_{I(J)J}^{Line} = \max_{j \in N_{non}} Newtime_{I(j)j}^{Line}$$

を満たす部品 J を選択し、その後、部品 J を機械 $I(J)$ に割り当てる。アルゴリズムは、この操作をすべての部品が機械に割り当てられるまで繰り返し行う。各機械への部品割当てアルゴリズム（以下 LineOpt と呼ぶ）を図 16 に記す。

```

LineOpt
step1 初期化
 $N_{non} \leftarrow N$ ;
step2 部品割当て
WHILE ( $N_{non} \neq \{\emptyset\}$ ){
  FOR( $j \in N_{non}$ ){
     $I(j) = \operatorname{argmin}_{i \in M} \operatorname{Newtime}_{ij}^{Line}$ 
  }
   $J = \operatorname{argmax}_{j \in N_{non}} \operatorname{Newtime}_{I(j)j}^{Line}$ 
   $C_{I(J)} \leftarrow C_{I(J)} \cup \{J\}$ ;
   $N_{non} \leftarrow N_{non} \setminus \{J\}$ ;
}
    
```

図 16 LineOpt の流れ
Fig. 16 Flow of LineOpt.

本論文では新たな評価指標を用いて、各機械に対して部品を割り当てること提案する。ここで、提案する新たな評価指標値を $Time^{est}(C_i)$ とする。 $Value(C_i) = Time^{est}(C_i)$ したうで、図 16 の LineOpt を用いて、各機械に対する部品割当てを解くことを提案する。

5. 提案評価指標

各機械における単機生産時間は、総吸着時間と総装着時間によって構成されている。本章では、総吸着時間と総装着時間に対する評価指標を提案する。

総吸着時間に対する評価指標値を $Ptime^{est}(C_i)$ (以降, 吸着指標値) とする。吸着時間は吸着回数と α の積で表すことができる。したがって総吸着回数に対する評価指標値を $Npick^{est}(C_i)$ (以降, 吸着回数指標値) とすると、

$$Ptime^{est}(C_i) = \alpha Npick^{est}(C_i)$$

と表すことができる。

総装着時間に対する評価指標値を $Mtime^{est}(C_i)$ (以降, 装着指標値) とする。装着時間は総装着移動距離と γ の積、および装着部品数と β の積の和で計算する。したがって、総装着移動距離に対する評価指標値を $Mmv^{est}(C_i)$ (以降, 装着移動指標値) とすると、

$$Mtime^{est}(C_i) = \gamma Mmv^{est}(C_i) + \beta Q(C_i)$$

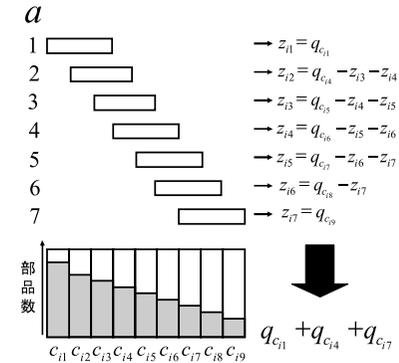


図 17 吸着回数指標値
Fig. 17 Estimate of the number of picking up.

と表すことができる。

吸着回数や装着移動距離に影響を与える部品配置や吸着動作、装着動作はお互いに影響を与える。したがって、吸着指標値を計算するときは部品配置と吸着動作を、装着指標値を計算するときは装着動作を考慮する。それぞれを独立したものととらえて、指標値を計算することを考える。

5.1 吸着指標値

吸着指標値は、吸着回数指標値と α の積である。吸着回数指標値の計算は、部品配置および吸着動作を考慮する。ここで、1 機械最適化問題における部品配置の構築法を利用する。部品配置の構築法は、個数が多い部品を端のロットから順に配置する手法である。部品配置は、その構築法で得られた状態と仮定したうで、最小の吸着回数ですべての部品を吸着する動作を求めるとを考えると、1 機械最適化問題を解くことで、得られる吸着動作は総吸着時間だけでなく総装着時間も考慮している。吸着回数指標値を計算する場合、総吸着回数のみが低くなる吸着動作を求めるとを考えると、これを貪欲法で求めると、右端から順に部品を同時吸着する動作が得られる (図 17)。

機械 i において、この貪欲法で得られる吸着動作の、アーム位置 a での吸着回数を z_{ia} とする。また、機械 i のロット s に配置されている部品を c_{is} とする。図 17 の例において、部品数 $|C_i|$ を 9 とし、1 回のタスクで吸着可能な部品数 h は 3 とする。図 17 のように、部品配置 F_i は、装着点数が多い部品から左端のロットに配置してある状態である。この状態で、1 回の吸着動作で多くの部品を吸着できるような、貪欲的な吸着動作を考えると、右

端から順に吸着することが考えられる。まず、右端のアーム位置 7 で部品 c_{i7} から部品 c_{i9} までの 3 種類の部品を 1 回の吸着動作で同時吸着することを考える。そして、 c_{i9} の部品をすべて吸着し終えるまで、そのアーム位置で吸着動作を繰り返す。この位置では $q_{c_{i9}}$ 回の吸着動作が行われる。 $q_{c_{i9}}$ 回の吸着動作が行われたあと、アーム位置を左に 1 個ずらした箇所、部品 c_{i6} から部品 c_{i8} までの部品の同時吸着の動作を、 c_{i8} の部品をすべて吸着し終えるまで繰り返す。なお、このアーム位置で吸着される c_{i8} の部品は、アーム位置 7 においても吸着されている。したがって、このアーム位置での吸着回数は、 $q_{c_{i8}} - z_{i7}$ である。同様な動作を繰り返していき、最後にアーム位置 1 で部品 c_{i1} から部品 c_{i3} までの部品を吸着する。なお、最後のアーム位置 1 では、部品 c_{i1} の部品すべてを吸着するまで、そのアーム位置で同時吸着の動作を繰り返すため、吸着回数は $q_{c_{i1}}$ である。

図 17 で分かるように各アーム位置で発生する吸着回数は、そのアーム位置で吸着可能なスロットの中で最も右端に配置されている部品の装着点数と、そのスロットの位置から $h-1$ 個分の前のアーム位置で発生する吸着回数の差で表すことができる（アーム位置 1 と、左端から $h-1$ 個のアーム位置は除く）。たとえば、図 17 のアーム位置 2 では、吸着可能な部品は c_{i2}, c_{i3}, c_{i4} である。アーム位置 2 で吸着可能な部品の中で、最も右端に配置されている部品は c_{i4} である。アームの吸着可能数 h は 3 である。2 つ前のアーム位置である、アーム位置 3、アーム位置 4 それぞれの吸着回数は z_{i3}, z_{i4} である。したがって、アーム位置 2 で発生する吸着回数は $q_{c_{i4}} - z_{i3} - z_{i4}$ である。あるアーム位置で吸着可能な部品の中で右端に配置されている部品の個数をすべて吸着する際、その部品は、その隣のアーム位置で同時吸着されるため、そのアーム位置では実際にはその部品個数よりも少ない吸着回数で、吸着動作が行われる。図 17 の例では、吸着回数は

$$\sum_{a=1}^7 z_{ia} = q_{c_{i1}} + q_{c_{i4}} + q_{c_{i7}}$$

となる。

ここで、貪欲法で得られる吸着回数の値を一般的に考える。今、機械 i に部品集合 C_i が割り当てられていると仮定する。アームの吸着可能部品数は h とする。アーム位置 1、および右端のアーム位置から $h-1$ 個である $|C_i| - 2(h-1) + 1, |C_i| - 2(h-1) + 2, \dots, |C_i| - h + 1$ を除いたアーム位置 a において、 z_{ia} は次の式で定めることができる。

$$z_{ia} = q_{c_{i(a+h-1)}} - z_{i(a+1)} - \dots - z_{i(a+h-1)}$$

また、アーム位置 a が $|C_i| - 2(h-1) + 1, |C_i| - 2(h-1) + 2, \dots, |C_i| - h + 1$ にお

いては、

$$z_{ia} = q_{c_{i(a+h-1)}} - z_{i(a+1)} - \dots - z_{i(|C_i|-h+1)}$$

と定まる。アーム位置 1 においては、 $z_{i1} = q_{c_{i1}}$ である。上記の式を用いて、アーム位置 1 を除いた各アーム位置における吸着回数は次のようになる。

$$z_{i2} = q_{c_{i(1+h)}} - z_{i3} - z_{i4} - \dots - z_{i(1+h)}$$

$$z_{i3} = q_{c_{i(2+h)}} - z_{i4} - z_{i5} - \dots - z_{i(2+h)}$$

$$z_{i4} = q_{c_{i(3+h)}} - z_{i5} - z_{i6} - \dots - z_{i(3+h)}$$

⋮

⋮

⋮

$$z_{i(|C_i|-h)} = q_{c_{i(|C_i|-1)}} - z_{i(|C_i|-h+1)}$$

$$z_{i(|C_i|-h+1)} = q_{c_{i(|C_i|-1)}}$$

ここで、全アーム位置の吸着回数の合計である $\sum_{a \in A_i} z_{ia}$ の値を考える。 z_{i2} は、 $q_{c_{i(1+h)}}$ の項と、 z_{i3} から $z_{i(1+h)}$ までの項の差で表される。したがって z_{i2} から $z_{i(1+h)}$ までの h 個の項の和は、 z_{i2} における、 z_{i3} から $z_{i(1+h)}$ の項を消去できるため、

$$\sum_{a=2}^{1+h} z_{ia} = q_{c_{i(1+h)}}$$

と計算することができる。また、同様に $z_{i(2+h)}$ から $z_{i(1+2h)}$ までの h 個の項の和は、

$$\sum_{a=2+h}^{1+2h} z_{ia} = q_{c_{i(1+2h)}}$$

となる。これらを繰り返していくと、 z_{ia} の h 個ごとのグループで計算できることが分かる。このグループ数を $GP(C_i)$ とすると、

$$|C_i| = h \times GP(C_i) + r$$

となり、最後に $r (\leq h)$ 個の余りが出たとする。この余りである、 $z_{i(|C_i|-h+2-r)}$ から $z_{i(|C_i|-h+1)}$ までの r 個の項の和は

$$\sum_{a=|C_i|-h+2-r}^{|C_i|-h+1} z_{ia} = q_{c_{i(|C_i|+1-r)}}$$

と計算することができる。

これらのことから，機械 i において，全アーム位置における吸着回数の合計は，次のように表せる．

$$\begin{aligned} \sum_{a \in A} z_{ia} &= q_{c_{i1}} + q_{c_{i(1+h)}} + q_{c_{i(1+2h)}} \\ &\quad + q_{c_{i(1+3h)}} + q_{c_{i(1+4h)}} \\ &\quad \vdots \\ &\quad \vdots \\ &\quad + q_{c_{i(1+h \times GP(C_i))}} + q_{c_{i(|C_i|+1-r)}} \\ &= \sum_{g=0}^{GP(C_i)} q_{c_{i(1+gh)}} + q_{c_{i(|C_i|+1-r)}} \end{aligned}$$

この値が，貪欲法で得られる吸着動作の吸着回数である．したがって，吸着回数指標値を計算する際，吸着動作を貪欲法で求めなくても，上記の計算で吸着回数指標値を計算することができる．

さらに，吸着回数指標値に，最悪の吸着回数も考慮する．部品集合 C_i が割り当てられている機械 i において，最悪の吸着回数は $Q(C_i)$ である．この最悪の吸着回数 $Q(C_i)$ は，複数部品の同時吸着がまったく発生しなかったときの値である．これらのことをふまえて，吸着回数指標値を次のように定義する．

$$Npick^{est}(C_i) = \left(\sum_{g=1}^{GP(C_i)} q_{c_{i(1+gh)}} + q_{c_{i(|C_i|+1-r)}} + Q(C_i) \right) / 2$$

5.2 装着指標値

装着移動指標値の計算は，基板上における装着動作を考える．機械 i に対して，入力として与えられている割当て部品集合 C_i における装着点の装着動作を求めることは，LineOpt における計算時間に影響を与えてしまうことにつながる．装着動作は，次の 3 種類に動作が分けられる．

- 認識カメラから装着点への移動
- 装着点間の移動
- 装着点から認識カメラへの移動

さらに認識カメラと装着点間の移動は，タスク数だけ発生する．

- ：割当部品種類の装着点
- ：その他の機械の装着点

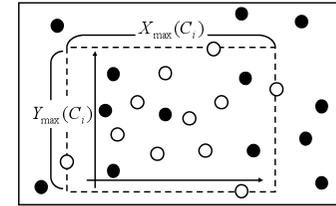


図 18 装着時間指標値

Fig. 18 Estimate of the mount time.

総タスク数は，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つねに h 個である装着動作であれば，最小のタスク数ですべての部品を装着し終える．ある機械 i における最小のタスク数を L_i^{min} とすると， L_i^{min} の値は次のようになる．

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

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．したがって，各タスクでの認識カメラと装着点間の移動距離は，装着点座標の平均座標点と認識カメラとの距離とする．装着点座標の平均座標点と認識カメラとの距離を $d_0^*(C_i)$ とする．認識カメラと装着点間の移動は，タスク数だけ発生する．

次に，装着点間の移動距離を考える．まず，割り当てられた部品集合 C_i の装着点の中で， 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．この 4 点の装着点を四角形でくくることを考える（図 18）．その 4 点の装着点において，下端と上端の装着点間の y 軸距離を $Y_{max}(C_i)$ とする．また，左端と右端の装着点間の x 軸距離を $X_{max}(C_i)$ とする．認識カメラに戻る動作を省いたならば，この得られた四角形の内部をアームは移動する．このときの移動量を $X_{max}(C_i)$ および $Y_{max}(C_i)$ とし，装着点間の移動距離を $X_{max}(C_i) + Y_{max}(C_i)$ と定義する．この値が小さいと，それは割り当てられた部品集合 C_i の装着点が狭い範囲で点在することになり，実際の装着移動距離も小さくなる傾向になる．

これらのことから，装着移動指標値 $Mmv^{est}(C_i)$ を次のように定義する．

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

5.3 提案評価指標のまとめ

吸着回数指標値および装着移動指標値を前節で定義した．これらのことから，アルゴリズム Δ LineOpt で用いる $Value(C_i)$ の提案指標を次のように定義する．

$$Value(C_i) = Time^{est}(C_i)$$

$$Time^{est}(C_i) = Ptime^{est}(C_i) + Mtime^{est}(C_i)$$

$$Ptime^{est}(C_i) = \alpha Npick^{est}(C_i)$$

$$Npick^{est}(C_i) = \left(\sum_{g=0}^{GP(C_i)} q_{c_i(1+gh)} + q_{c_i(|C_i|+1-r)} + Q(C_i) \right) / 2$$

$$Mtime^{est}(C_i) = \gamma Mmv^{est}(C_i) + \beta Q(C_i)$$

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

6. 実験

6.1 評価実験

本節では、提案評価指標の性能を調査するために行った評価実験について述べる。評価実験では、実在する5種類の基板データを用いた。表1に、各基板データの部品数、総装着点数および基板サイズを記す。なお、基板 No.1 と基板 No.4 は同一な基板種類であるが、基板 No.1 が表面に対して装着する基板に対して、基板 No.4 は裏面に装着する基板である。したがって、両基板の装着点座標は、y 軸に線対称な関係にある。

機械台数は4台から8台に設定した。各基板種類に対して、4台から8台で生産する状況を想定した。したがって、データ数は計25問である。部品装着機において、1タスクにおける吸着部品の上限数は10とした。また、1回の平均吸着時間、平均装着時間、および単位座標のアームの平均移動時間は、実際の機械の性能から計算したものをを用いた。機械動作に関する各パラメータは以下のとおりである。

- $\alpha : 1.5$
- $\beta : 0.5$
- $\gamma : 0.01$
- $h : 10$

なお、基板上の座標において、x 軸の正の方向は左方向、y 軸の正の方向は上方向としたうえで、原点は基板右下とする。それらをふまえたうえで、認識カメラの位置は、原点からの x 軸距離が150、原点からの y 軸距離が-200の位置とした。

実験では、 $Value(C_i) = Time^{est}(C_i)$ として、LineOpt および OneOpt により、ライン生産時間を計算する。比較対象は、装着点数を指標とした $Value(C_i) = Q(C_i)$ を用いた、LineOpt および OneOpt により得られるライン生産時間とする(図19)。なお、実験には

表 1 使用基板データ

Table 1 Real PCB data for experiment.

| 基板 No. | 部品数 | 総装着点数 | 基板サイズ |
|--------|-----|-------|-----------------|
| 1 | 53 | 460 | 117.80 × 166.50 |
| 2 | 250 | 1,094 | 375.00 × 201.00 |
| 3 | 187 | 1,015 | 304.80 × 243.84 |
| 4 | 53 | 460 | 117.80 × 116.50 |
| 5 | 136 | 1,764 | 200.00 × 93.60 |

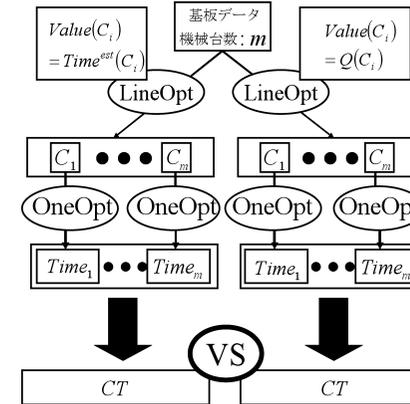


図 19 指標の比較実験

Fig. 19 Compare of estimations.

Intel Celeron(R) (2.53 GHz), メモリ 512 MB 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。

6.2 考察

表2に結果を記す。表2において、左端はデータを示し(基板 No.)-(機械台数)を表す。また $Time$ はライン生産時間を表す。

基板 No.3 を除いた他の基板種類において、提案指標を用いた最適化で得られるライン生産時間は、装着点数を指標とした最適化で得られるライン生産時間よりも改善される傾向になった。基板 No.3 は、187 種類の部品が存在する。その中で最も装着点数が多い部品の装着点数は258個であり、そして次に多い装着点数が63個の基板データである。この258個の装着点を持つ部品を割り当てた機械がボトルネックとなっている。データ 3-1 の結果で

表 2 比較実験結果
Table 2 Experimental result.

| | 装着点数割当て | | 提案評価指標 | |
|-----|----------|----------|----------|----------|
| | Time | 計算時間 (s) | Time | 計算時間 (s) |
| 1-4 | 304.40 | 1.55 | 285.69 | 1.47 |
| 1-5 | 248.79 | 0.88 | 238.97 | 0.91 |
| 1-6 | 219.73 | 0.63 | 198.57 | 0.61 |
| 1-7 | 207.53 | 0.55 | 180.99 | 0.44 |
| 1-8 | 189.06 | 0.34 | 180.76 | 0.34 |
| 2-4 | 920.14 | 73.81 | 903.18 | 70.41 |
| 2-5 | 758.29 | 35.39 | 697.43 | 36.77 |
| 2-6 | 667.90 | 15.08 | 666.06 | 17.17 |
| 2-7 | 666.06 | 10.09 | 666.06 | 10.20 |
| 2-8 | 666.06 | 7.25 | 666.06 | 7.21 |
| 3-4 | 963.95 | 28.52 | 963.95 | 26.80 |
| 3-5 | 963.95 | 18.64 | 963.95 | 18.64 |
| 3-6 | 963.95 | 15.92 | 963.95 | 16.78 |
| 3-7 | 963.95 | 14.43 | 963.95 | 14.54 |
| 3-8 | 963.95 | 13.66 | 963.95 | 14.39 |
| 4-4 | 320.42 | 2.01 | 321.16 | 2.53 |
| 4-5 | 296.16 | 1.48 | 288.22 | 1.55 |
| 4-6 | 283.88 | 0.93 | 268.68 | 1.11 |
| 4-7 | 239.91 | 0.67 | 235.39 | 0.54 |
| 4-8 | 220.55 | 0.43 | 206.46 | 0.41 |
| 5-4 | 1,270.85 | 386.55 | 1,276.01 | 390.53 |
| 5-5 | 999.04 | 222.55 | 1,051.65 | 227.52 |
| 5-6 | 876.46 | 133.72 | 849.75 | 139.89 |
| 5-7 | 767.33 | 87.13 | 753.08 | 93.06 |
| 5-8 | 710.87 | 59.59 | 650.10 | 61.92 |

表 3 各基板における改善率
Table 3 Improvement rate.

| 基板 No. | 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 |

7.38%であった。基板種類 No.1 は機械台数にかかわらず安定した改善率が見られたが、基板種類 No.5 においては、改善の度合いがばらついた。これは、吸着回数指標値と実際の吸着回数に差があったことに原因がある。

データ 5-5 の、ある機械における吸着指標値が 568 に対し、その機械の実際の吸着時間が 408 であった。また、別の機械においては、吸着指標値 500 に対し、その機械の実際の吸着時間が 462 であった。このように、吸着指標値が低い機械が実際には、高い吸着時間になってしまった。基板 No.5 ではその傾向が強く、かつ機械台数が少ないほど、その影響を受けやすい。これは、基板 No.5 の装着点座標のばらつき方に原因がある。基板 No.5 において、装着数が多い部品は、その部品が持つ部品の各装着点が、基板上の近い位置に互いに集中している。実際に OneOpt のセービング法で装着を結ぶときに、それらは同じタスク内に装着するものとしてアームの移動経路が生成されてしまう。つまり、あるタスク内で同じ部品を複数装着する結果になる。1 タスク内で 1 つの部品を複数装着することは、結果として同じ部品を複数吸着することになる。あるタスクにおいて、1 つの部品に対して 1 回の吸着が必要であり、同時吸着で 1 つの部品を複数吸着することはできない。

特に、図 20 の部品割当ての場合、吸着回数指標値と、実際の吸着回数に差が出てしまう。図 20 の場合、それぞれの装着点数が 4 個ずつの、割り当てられた部品 A, B, C, D それぞれの基板上の装着座標点が固まっている。そして、各部品間における基板上の装着座標点の距離が大きく離れている。このような部品が割り当てられた場合、1 機械最適化によって得られる部品配置、および装着動作は図 20 のようになる。前述のとおり、各タスクで装着する部品はすべて同じ部品になるため、各タスクではまったく同時吸着が行われない吸着動作になる。そのため、図 20 の例では、吸着回数指標値である $N_{pick}^{est}(C_i)$ の値は、貪欲法で得られる吸着回数 4 回と、最悪の吸着回数 16 回の平均で 10 回になる。しかし、実際の吸着回数が最悪の吸着回数である 16 回になり、吸着回数指標値と大きな差が出る結果になる。基板 No.5 では、上記の傾向から実際の単機生産時間と評価指標値の差が発生し、最

は、この部品を 1 つだけ割り当てている機械が、他の部品を持つ各機械よりも圧倒的に単機生産時間が発生している。したがって、機械台数を増やしてもライン生産時間が変わらないという結果になった。データ 2-4, 2-5 も同様なことが起きたため、機械台数を増やしてもライン生産時間が変わらないという結果になった。

しかし、機械台数における平均の改善率は、基板 No.3 を除いた全基板種類において、改善の傾向が見られた (表 3)。また、機械台数が多いほど、改善される傾向が見られた。これは、機械台数が多いほど、1 台あたりの装着部品数が少なくなるため、提案評価指標値の、実際の単機生産時間に対するばらつき度が小さくなるのが原因である。最も改善されたデータは、1-4 であり、12.7%の改善が得られた。データ 1-1 から 1-5 の平均改善率は、

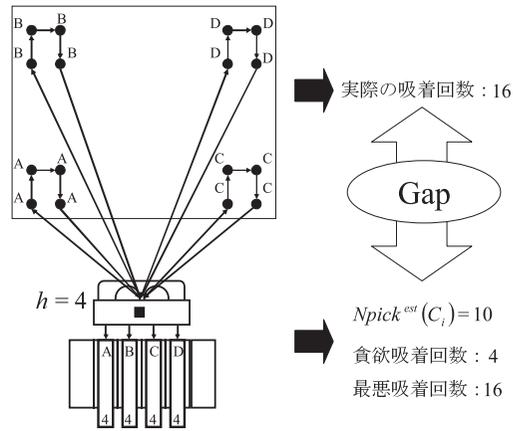


図 20 装着動作からの吸着回数の例

Fig. 20 Example of the number of pick up from the mount action.

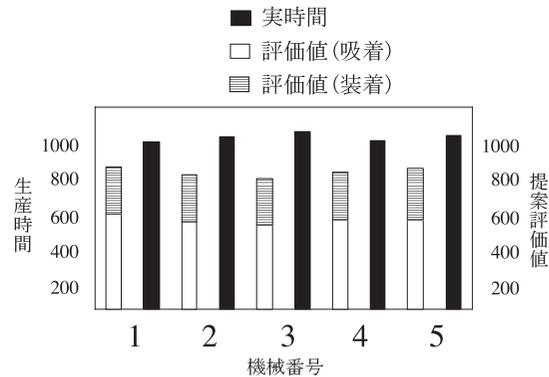


図 21 データ 5-5 における結果

Fig. 21 Result of data 5-5.

最終的なライン生産時間に影響が出ている。装着点数を評価指標値とした手法から最も悪かったデータ 5-5 における、各機械における単機生産時間と評価指標値の傾向を図 21 に示す。

前述のような実際の吸着回数と吸着評価指標値の差の発生から、図 21 の結果が得られている。評価指標値を基準にした場合、最もボトルネックとなっている機械が 1 である。し

表 4 LineOpt における各基板の平均計算時間
Table 4 Computational time in LineOpt.

| 基板 No. | 装着点数割当て (s) | 提案評価指標 (s) |
|--------|-------------|------------|
| 1 | 0.01 | 0.02 |
| 2 | 0.06 | 0.08 |
| 3 | 0.04 | 0.06 |
| 4 | 0.02 | 0.04 |
| 5 | 0.04 | 0.06 |

かし、実際のライン生産時間において機械 1 は最も単機生産時間が小さい機械となっている。逆に、単機生産時間を基準にした場合、最もボトルネックとなっている機械が 3 である。しかし、評価指標値においては機械が 3 は最も評価指標値が小さい機械である。このように、基板データの特徴から生じる評価指標値と単機生産時間の差から図 21 の結果が出てしまう。基板データにおける装着点の分布に大きく依存することから、これらをふまえた評価指標の改善が今後の課題といえる。

装着指標値に関しては、吸着指標値のような傾向は見られなかった。これは、装着指標値の機械に対する部品割当てに対する影響が小さいことが原因と考えられる。各機械間の装着指標値のばらつき度合いが、吸着時間における評価指標値と比べて小さいためである。図 21 のグラフでも分かるように、装着指標値のばらつきは全体の評価指標値と比べて小さく、吸着指標値の影響が全体の評価指標値に影響を与えていることが分かる。全体的には他の基板データにおいて改善の傾向にあり、本論文で提案する評価指標の有用性が得られた。

計算時間においては、比較対象である装着点数を指標値とした手法とほぼ同じぐらいの計算時間に抑えることができた。全体の計算時間を見ても提案評価指標を用いた手法は、現実に用いることが可能な計算時間である。なお、計算時間の中で、LineOpt のフェイズが占める割合は非常に短い。各基板データにおける平均計算時間を表 4 に示す。表 4 中の平均計算時間は、各基板データにおける機械台数ごとの計算時間の平均である。表 2 中の計算時間との差から、OneOpt のフェイズにおいて計算時間が大幅にかかることが分かる。この中で、特に装着動作を求めるセービング法に時間がかかっている。機械台数を増やすと、計算時間が短くなる傾向にあるのも、これに起因している。機械台数が増えるにつれて、1 台あたりの装着点数が大幅に減少するため、1 台あたりのセービング法にかかる時間は減少する。ある 1 台の機械における装着点数を n とすると、その機械におけるセービング法のステップ数は $n(n-1)$ である。機械を 2 台に増やし、各機械の装着点数が概算で半分になるとすると、2 台の機械におけるセービング法のステップ数は $2 \times (n/2)(n/2-1)$ となり、

結果として全体の計算時間は減少する。

7. 結 論

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。実験の結果から実用的な時間で、現場で用いられている装着点数を指標としたアルゴリズムよりも、精度の高い解を得ることができた。しかし、基板データに依存してしまうため、基板データを考慮した方法を考える必要がある。

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あげられる。また、他の生産時間やコストが計算できない大規模な問題に対して、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あげられる。

参 考 文 献

- 1) Ahmadi, R.H. and Mamer, J.W.: Routing Heuristics for Automated Pick and Place Machines, *European Journal of Operational Research*, Vol.117, pp.533–552 (1999).
- 2) 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).
- 3) Burke, E.K., Cowling, P.I. and Keuthen, R.: Effective Heuristic and Metaheuristic Approaches to Optimize Component Placement in Printed Circuit Board Assembly, *Evolutionary Computation 2000 Proceedings of the 2000 Congress*, pp.301–308 (2000).
- 4) Burke, E.K., Cowling, P.I. and Keuthen, R.: The Printed Circuit Board Assembly Problem: Heuristic Approaches for Multi-Headed Placement Machinery, *Proc. International Conference on Artificial Intelligence IC-AI'2001*, pp.1456–1462 (2001).
- 5) Chvatal, V.: A Greedy Heuristic for the Set Covering Problem, *Mathematics of Operations Research*, Vol.4, pp.233–235 (1979).
- 6) Clarke, G. and Wright, J.W.: Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, *Operations Research*, Vol.12, pp.568–581 (1964).
- 7) Hackman, S.T., Magazine, M.J. and Wee, T.S.: Fast, Effective Algorithms for Simple Assembly Line Balancing Problems, *Operations Research*, Vol.37, pp.916–924 (1989).
- 8) Ji, P., Sze, M.T. and Lee, W.B.: A genetic algorithm of determining cycle time for printed circuit board assembly lines, *European Journal of Operational Research*,

Vol.128, pp.175–184 (2001).

- 9) Kodek, D.M. and Krisper, M.: Optimal algorithm for minimizing production cycle time of a printed circuit board assembly line, *International Journal of Production Research*, Vol.42, pp.5031–5048 (2004).
- 10) 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).
- 11) Moodie, C.L. and Young, H.H.: A Heuristic Method of Assembly Line Balancing for Assumptions of Constant or Variable Work Element Times, *Journal of Industrial Engineering*, Vol.16, pp.23–29 (1965).
- 12) Sun, D.S., Lee, T.E. and Kim, K.H.: Component Allocation and Feeder Arrangement for a Dual-Gantry Multi-Head Surface Mounting Placement Tool, *International Journal of Production Economics*, Vol.95, pp.245–264 (2005).
- 13) Wilhelm, W.E., Arambula, I. and Choudhry, N.N.D.: Optimizing Picking Operations on Dual-Head Placement Machines, *IEEE Trans. Automation Science and Engineering*, Vol.3, No.1, pp.1–15 (2006).
- 14) Yamada, T., Miyashiro, R. and Nakamori, M.: An Algorithm of Feeder Arrangement and Pick up Sequencing of Component Placement Machine on Printed Circuit Board, *Proc. International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications*, pp.403–409 (2005).
- 15) 土屋 亨, 山下 淳, 金子 透, 金子康弘, 村松啓且: パーツ同時吸着優先によるチップマウント吸着動作のMLS法を用いた最適化, 2007年度精密工学会春季学術講演会第14回学生会員卒業研究発表講演会講演論文集, pp.91–92 (2007).

(平成 19 年 11 月 22 日受付)

(平成 20 年 1 月 11 日再受付)

(平成 20 年 2 月 19 日採録)



山田 剛史 (学生会員)

昭和 56 年生・平成 17 年東京農工大学大学院工学府 (後期課程) 電子情報工学専攻学生。プリント基板生産に関わる最適化の研究に従事。



中森眞理雄（正会員）

昭和 52 年東京大学大学院工学研究科計数工学専攻博士課程修了。工学博士。同年東京農工大学工学部講師。現在，同大学教授。アルゴリズム，データ構造，数理計画法，情報処理教育カリキュラムの研究に従事。情報処理学会 MPS 研主査（平成 7～10 年）・CE 研主査（平成 18 年～）・情報処理教育検討委員会幹事（平成 3～6 年）。日本オペレーションズ・リサーチ学会理事（平成 9～10 年，17 年～）・フェロー。
