Vol.2013-MPS-92 No.3
2013/2/27

電子基板生産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(2) -ノズル・部品の割当てに制約がある独立実装方式の場合-

岡本大輔† 小西宏明† 太田秀典† 中森眞理雄†

電子基板の生産では，部品装着機と呼ばれる機械を複数台直列に連結した生産ラインにより，部品を基板へ自動的に装着する．ライン全体の生産能率が高くなるように各部品装着機へ部品を割当てる手法として，部品装着機の動作を考慮して部品割当てを行う手法が，これまでいくつか提案されている．しかしながら，これらの手法には適用できるラインの実装形式が限定的であったり，部品とノズルの制約に十分に対応できないといった問題がそれぞれあった．そこで本論文はこれまで提案された手法を組みあわせ，これらの問題点をすべて解決するヒューリスティックな解法を提案する．

A Heuristic Algorithm for the Line Balancing Problem in Printed Circuit Board Assembly(2) -The Separate Mounting Case with Constraints on Component-nozzle Assignment-

DAISUKE OKAMOTO† HIROAKI KONISHI†
HIDENORI OHTA† MARIO NAKAMORI†

In the production of printed circuit boards (PCB) components are mounted automatically by mounting machines arranged in series along a line. In order to achieve higher efficiency of the line, components have to be assigned to machines so that the mounting time of the machines are the same. Thus, we have to solve the line balancing problem. Several algorithms have been proposed for the problem, some of which really reflect the movement of mounting machines. Most of the proposed algorithms, however, are not applicable to the general type of PCB production; some are applicable only to a restricted type of line; some are not adaptive to the constraint of components and nozzles. In the present paper we propose a heuristic algorithm that combines existing algorithms and can solve the above problems.

1. はじめに

電子基板の生産工程は，大きく 3 つの工程（塗布，装着，熱処理）に分けられる．これらのうち生産時間においてボトルネックとなるのは一般的には装着工程である．この工程では，部品装着機と呼ばれる機械により基板に電子部品（以下，単に部品と呼ぶ）を自動的に装着する．基板の生産時間短縮を目的とし，複数の部品装着機を連結したラインや，個々の部品装着機を対象として，その運用や動作を最適化する研究が数多く行われてきた[1].

これまで，部品装着機としていくつかのタイプが開発されてきたが，近年では多機能型部品装着機と呼ばれるタイプが主流となっている．多機能機型部品装着機の 1 台の動作時間は，部品供給部上での部品の配置，部品の吸着動作，部品の装着動作等，様々な複雑な要因によって決まり，その動作最適化問題は NP 困難であることが知られている．

本論文では，複数の多機能機型部品装着機で構成された部品装着ラインについて論じる．部品装着ラインの性能はボトルネックとなる部品装着機が 1 枚の基板あたりに費やす時間によって決まる．このため，生産効率の良いラインを作成するためには，各部品装着機の負荷が均等になるように各部品装着機に仕事（部品の装着）を割当てるラインバランシング問題を考える必要がある．従来，この問題に対しては，装着する部品数を基にして各部品装着機の動作時間を見積り，この見積もりが均等になるように各部品装着機に部品を割り振り，その後に各部品装着機の動作を最適化するといった，階層的なアプローチを用いるのが普通であった[1, 2, 7]．しかしながら，前述したとおり，部品装着機の実際の動作時間は，装着する部品数だけではなく，様々な複雑な要因によって決まるので，見積りの生産時間と実際の生産時間との乖離が大きく，結果的に負荷を十分に均等化できていないラインになってしまうことが多かった．部品装着機の動作時間をより正確に見積るため，部品数だけではなく，部品供給部上での部品の配置，部品の吸着動作，部品の装着動作をある程度考慮して見積もりを行う手法も提案されたが[7]，部品数のみを用いる方法よりは正確な生産時間を見積もることが出来るものの，対象とする基板によっては依然として実際の生産時間と大きく乖離した見積もりになってしまうこともあった．

ところで近年は，1 つの製品に多種多様な基板が組み込まれる傾向や，製品の生産サイクルが短縮される流れが

†1 東京農工大学
Tokyo University of Agriculture and Technology

ⓒ2013 Information Processing Society of Japan

徐々に強まってきている．これに応じて基板の生産現場でも，1 つの生産ラインで多品種の基板をそれぞれ少数ずつ迅速に生産すること（多品種少量生産）が望まれるようになってきている．

従来の少品種多量の基板生産の場合は，生産する基板毎に部品供給部上での部品配置の変更を行った．しかしながら，部品の配置を何度も変更するには多大な作業時間が必要であるため，多品種少量の基板生産の場合には，部品供給部の部品配置を変更せずに複数種類の基板の生産を行ったほうが全体としての生産効率が良い場合が多い．このため，与えられた部品供給部上の部品配置に対して，各基板を生産するための最適なラインバランシングを行うことが求められるようになってきた．

戸崎らは，部品供給部上の部品配置が与えられた場合に，各部品装着機の動作を考慮しつつ部品の割当てを行う手法を提案し，この手法が従来の見積もりによる手法よりも短時間で良いラインバランシングを行えることを計算機実験によって確認した[2]．この手法は，各部品装着機への部品の割当てと同時に，各部品装着機の動作も最適化しているため，従来の階層的なアプローチとは異なり，総合的な最適化へ向けた効果的なアプローチであると言える．しかしながら，戸崎らの手法は多品種少数生産に適した実装方式のラインには適用することができないといった問題や，実際の基板生産ラインでみられる部品とノズルの制約に十分に対応できないといった問題があった．また，部品装着機のヘッド部位のモデルをやや単純化しすぎた面もあり，部品装着機の装着動作の最適化を十分に行えていない可能性もあった．

そこで，戸崎らの手法を拡張し，ヘッド部位のモデルを現実的なものに変更し，多品種少量生産により適した実装方式に対応可能な手法[4]，部品とノズルの組合せ制約がある場合にも対応可能な手法[6]がそれぞれ提案された．本論文は，これらの手法[4, 6]を組み合わせ，戸崎らの手法の問題点をすべて解決する部品装着機のラインバランシング手法を提案する．

なお，提案手法は先行研究[3, 4, 6]の手法をそれぞれ包含するものであり，機械割当てと各機械の動作最適化を階層的に分割せずに総合的に最適化する試みを総括するものと位置づける．

2. 部品装着ラインと部品装着機

本節では，本論文における多機能機型部品装着機（以下，単に部品装着機と記す）やそのラインの設定，ならびに部品装着ラインの動作についてそれぞれ述べる．

2.1 部品装着ラインと機械割当て

部品装着工程では，通常，部品装着機を複数台直列に連結して図 1 に示すような生産ラインを形成し，基板に部品を装着する．なお，図 1 のラインは 3 機械の場合の例であり，矢印は基板を運ぶコンベアの動く方向を示している．与えられたラインで効率良く基板を生産するため，ボトルネックとなる部品装着機の動作時間が短くなるよう複数の部品を各部品装着機に割当てること（**機械割当て**）が求められている．

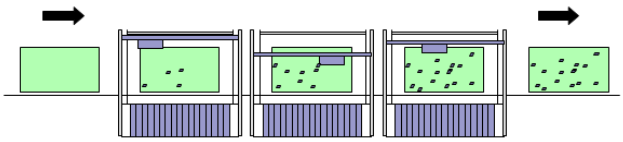


図 1. 部品装着ライン（独立実装方式）

2.1.1 部品装着ラインの実装方式

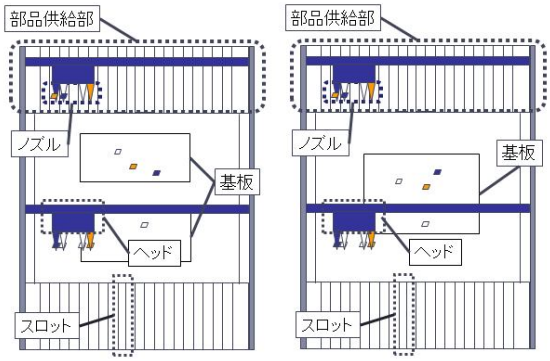
部品装着ラインには交互実装方式と独立実装方式と呼ばれる 2 つの実装方式がある．図 2(a)(b)にそれぞれの実装方式の簡略図を示す．

交互実装方式は，向かい合った 2 つのヘッドが中央の基板に交互に装着を行う方式であり，片方のヘッドが部品の装着動作を行っているとき，もう片方のヘッドは部品の吸着動作を行う．通常，吸着動作よりも装着動作の方により多くの時間が必要であるため，部品装着機の動作時間はほぼ装着動作だけで決まる．

一方，独立実装方式は，1 枚の基板に対して，1 つのヘッドで部品の装着を行う方式であり，2 つのヘッドはそれぞれ異なる基板を独立に受け持つ. 交互実装方式と異なり，独立実装方式では部品装着機の動作時間は部品の吸着動作時間と装着動作時間の和で決まる．

基板の生産において，交互実装方式は少品種多量生産の基板に，独立実装方式は多品種少量生産の基板にそれぞれ向いている実装方式である．近年の傾向として，多品種少量生産の基板が増えているため，実装方式の主流は交互実装方式から独立実装方式に移りつつある．

本論文の提案手法はいずれの実装方式にも応用可能なものであるが，以降では独立実装方式のみを扱う．以降，1 台の部品装着機とは, 独立実装方式における機械の片側（上半分または下半分）を指すことにする．



(a) 独立実装方式　　(b) 交互実装方式

図 2. 独立実装方式と交互実装方式

2.2 部品装着機とその動作

部品装着機の簡略図を図 3 に示す．部品装着機にはヘッドと呼ばれる可動部があり，ヘッドには部品の吸着，装着を行うためのノズルが複数本ついている．

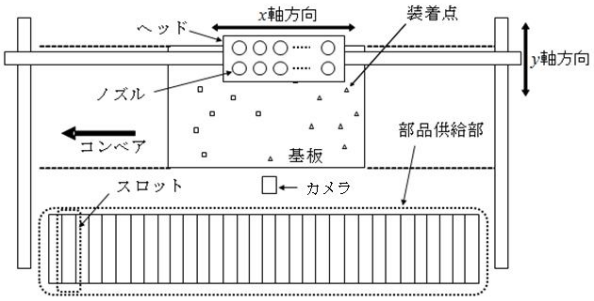


図 3. 部品装着機の簡略図

基板への部品の装着は，以下の基本的な動作の繰り返しにより行われる．一連の動作を**ターン**と呼ぶ：

1. ヘッドを部品供給部上に移動させ，必要な部品を供給するスロットからそれぞれノズルに吸着させる（**吸着動作**）；
2. そのターンで装着するすべての部品を吸着し終えたら，カメラが設置してあるところまでヘッドを移動させ，各部品が各ノズルに正しく吸着されているかどうかを確認する；
3. 吸着状態が正しいことが確認できたら，ヘッドを基板上に移動させ，吸着した部品を装着する地点を周り，それぞれの地点で部品を装着させる（**装着動作**）；
4. 吸着した部品をすべて装着し終えたら，再び部品供給部上に戻る．

1 台の部品装着機に割当てられたすべての部品の装着が完了するまで，一般には複数回のターンが行われる．

部品装着機の動作は，後述する**部品配置**，**ターン割当て**，**ノズル割当て**，**吸着順序**，**装着順序**によって決定される．

2.2.1 部品配置

基板に装着する部品は，その種類ごとに部品供給部上の各スロットに割当てられる．この割当てを**部品配置**と呼ぶことにする．部品配置の良し悪しは吸着の動作時間に影響を与えるため，大量に生産する基板については，その基板に適した部品配置を求めるべきである．しかしながら，部品配置の変更は非常に時間がかかるため，少量しか生産しない基板については，なるべく部品配置を変更せずに生産を行ったほうが，生産効率が良い．本論文では少量生産の基板について考慮するため，部品配置は既に与えられているものと仮定し，部品配置の変更は行わないことにする．

2.2.2 ターン割当て

前述した通り，1 台の部品装着機に割当てられたすべての部品の装着が完了するまで，一般には複数回のターンが行われる．後述する部品とノズルの組合せの制約を考慮し，各部品の装着をそれぞれ何ターン目に行うか決めることを**ターン割当て**と呼ぶことにする．

ターン毎に発生する部品供給部と基板間の往復移動の距離（一連の動作のうち，1 と 4 に該当）は吸着動作や装着動作中に発生するヘッドの移動距離と比較して無視できないほど長い．そのため，ターン数が最小化するようにターン割当てを行うことは，部品装着機の動作を短縮する上で非常に重要である．

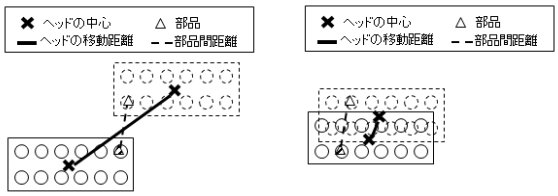
2.2.3 ノズル割当てと吸着動作，装着動作

ターン毎に，各部品をそれぞれどのノズルで吸着するかを決めることを**ノズル割当て**と呼ぶことにする．ただし，各ノズルで吸着可能な部品の大きさはそれぞれ決まっているため，どのノズルでどの部品も吸着可能というわけではない．本論文ではこの部品とノズルの組合せの制約を**ノズル割当て制約**と呼ぶことにする．本論文では大きさの順にソートした部品種類 $C_1, C_2, \ldots, C_m$ に対し，部品種類 C_i から部品種類 C_j までを吸着可能なノズルを $N_{i,j}$ と表記することにする．ここで m とはその基板に装着される部品の種類数である．

ノズル割当てと，部品を吸着する順序，部品を装着する順序によってヘッドの移動経路が決まり，吸着動作と装着動作が確定する．

ノズル間の距離は基板のサイズに対して無視できない大きさであるため，装着動作において，図 4(a)，(b)に示す例のように，ノズル割当てによって部品を装着する際のヘッドの移動距離が大きく異なる[5]．したがって，ノズル割当てを行う際には部品の装着順序も十分に考慮するべきである．

加えて，近年の部品装着機では，吸着動作を高速化するために，部品を吸着する予定のノズルとスロットの位置が合えば，複数種類の部品を同時に吸着することを可能にしているものが多い（**同時吸着**）．同時吸着を行うことで部品の吸着回数が減り，吸着動作の高速化につながるので，なるべく多くの同時吸着を行えるようにノズル割当てを行うべきである．図 5 は，部品供給部のスロット 5, 7 から供給される部品をそれぞれ B のノズルと D のノズルで同時吸着する例である．



（a）移動距離が長い場合　（b）移動距離が短い場合

図 4. ノズル割当てによるヘッド移動距離への影響

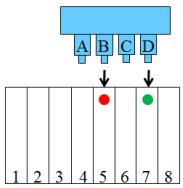


図 5. 同時吸着の例（ノズル B,C でスロット 5，7 の部品を同時吸着）

3. 問題設定

本論文では，ライン全体の動作時間が最小となるように部品の機械割当て及び各部品装着機の動作最適化を行うことを目的とする．ただし，ラインを構成する各部品装着機の構成や性能は, それぞれ同一のものとは限らない. また, 部品配置は予め与えられているものとする．

ライン全体の動作時間はボトルネックとなる部品装着機の動作時間によって決まる．すなわち，ラインにおいて最も動作時間の長い部品装着機の動作時間を最小化することが目的となる．

4. 提案アルゴリズム

既存手法[6]に対して，新たにヘッド上の各ノズルの相対位置関係をモデル化し，吸着動作を考慮することで，より現実の問題に近い部品装着機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を提案する．図 6 に提案アルゴリズムのフローチャートを示す. 提案アルゴリズムは, 従来手法[3, 6]と同様に，遺伝的アルゴリズムに局所探索法を組み込んだものである．各遺伝子は，機械割当て，ターン割当て，ノズル割当てを表現し，これらに基づいてそれぞれ吸着順序，装着順序を求めることで解が得られる．

4.1 機械割当て，ターン割当て，ノズル割当ての遺伝子表現

既存手法[3, 4]では，部品の種類とノズル割当て制約が存在しないものと仮定していた．この条件下では，ライン全体の必要最小の合計ターン数を容易に算出可能であるため, この必要最小の合計ターン数を各部品装着機に均等に割振ることで，各部品装着機のターン数を設定していた．しかしながら，ノズル割当て制約がある場合，このような方法で得られたターン数では吸着可能なノズルが存在しない部品が発生してしまうことが考えられる．無論，予め十分余裕を持たせてターン数を設定しておくことも可能であるが, 探索の過程で不要なターンが数多く発生し，探索の収束に多大な時間を要してしまう．

そこで，提案手法では，既存手法[6]と同様に遺伝子型として各部品装着機のターン数を固定せず，交叉のときなど必要に応じて柔軟に遺伝子型を変化させられるように解を表現する．

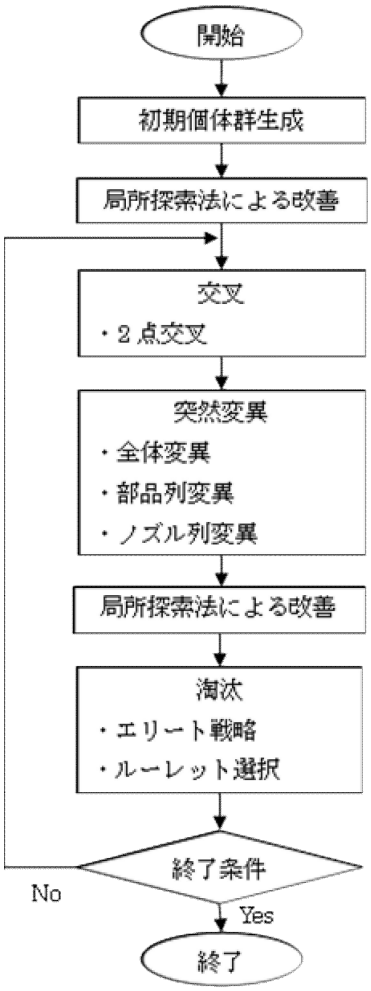


図 6. 提案アルゴリズムのフローチャート

4.1.1 遺伝子とその表現形式

遺伝子は，各機械のターン数と図 7 に示したような部品の順列によって表現される．なお，部品種類が C_i である各部品にはそれぞれ $c_{i,1}, \ldots, c_{i,n(i)}$ と名前がつけられているものとする．ここで $n(i)$ とは，1 枚の基板に装着される部品種類 C_i の部品数である．部品の順列を先頭から各部品装着機のノズル数とターン数の積ごとに区切ると，部品の機械割当てに対応し，それを更に各部品装着機のヘッドのノズル数毎で区切ると，部品のターン割当てに対応する．また，各ターン割当ての中の部品の並び順によってノズル割当てを表現する．例えば，部品装着機の各ノズルに図 8, 9 のようにノズル番号をつけたとする．このとき，図 7 の遺伝子における部品装着機 1 の 1 ターン目では，部品 $c_{1,1}$ はノズル番号①のノズルで，部品 $c_{1,2}$ はノズル番号②のノズルで，部品 $c_{2,1}$ はノズル番号③のノズルでそれぞれ吸着されることを表している．ここで各ノズルと部品はノズル割当て制約を満たす必要があることに注意せよ. なお, 記号 $E_1, E_2, \ldots$ はノズルに何も部品を吸着しないことを表している．

以降で説明する交差や突然変異の操作によって，新しい

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
①	②	③	①	②	③	④	⑤	⑥	④	⑤	⑥
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{2,1}$	$c_{1,3}$	$c_{1,4}$	$c_{2,2}$	$c_{2,3}$	E_1	$c_{3,1}$	E_2	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$

図 7. 提案手法で用いる遺伝子型（部品装着機 1,2 のターン数はそれぞれ 2 であるものとする）

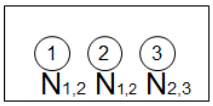


図 8. 部品装着機 1 における各ノズルの位置とノズル種類

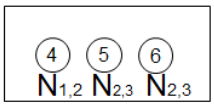


図 9. 部品装着機 2 における各ノズルの位置とノズル種類

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{2,1}$	$c_{1,3}$	$c_{1,4}$	$c_{2,2}$	$c_{2,3}$	E_1	$c_{3,1}$	E_2	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$

図 10. 図 8，9 から図 7 のノズル番号をノズル種類に置き換えた表記

個体を生成する際には，各ノズルの位置は考慮しなくても問題はないが，その種類については十分に考慮しないとノズル割当て制約を満たさない個体が生成されてしまう．そこで，以降では分かりやすさのために，図 10 のようにノズル番号ではなくそのノズル番号に対応するノズル種類を表記することにする．

4.1.2 個体の評価値

各個体の評価値は，遺伝子が対応する機械割当て，ターン割当て，ノズル割当てから，吸着動作と装着動作をそれぞれ求めることで算出する．

◆吸着動作の決定

遺伝子によりノズル割当てが与えられると，部品供給部上で各部品を装着する際のヘッド位置が定まる．各部品の吸着時のヘッド位置が左ないし右の部品から順番に吸着することで，最短のヘッド移動距離で部品を吸着することができる．なお，いくつかの部品装着時のヘッド位置がそれぞれ重なる場合があるが，その場合にはそれらの部品を同時吸着することができる．[4]

◆装着動作の決定

遺伝子から各部品を装着する際のヘッド位置は容易に算出できるため，ヘッドの移動距離が最短となる装着順序を求める問題は，1 種の巡回セールスマン問題（traveling salesman problem, TSP）とみなすことができる．TSP の解法にはさまざまなものがあるが，本提案手法のなかで用いる分には初期解の構築法としてよく用いられる NN 法（Nearest Neighbor 法）で十分であることが予備実験により分かっている．NN 法は貪欲法（greedy method）の代表的な手法であり，現在の地点から最も近い地点へ移動する操作を，訪れていない点がなくなるまで繰り返すことで解を生成する方法である．

4.1.3 個体の適応度

各個体の評価値はそれぞれボトルネックとなる部品装着機の動作時間なので，評価値に基づいて交叉における親の選択や個体の淘汰を行うと，ボトルネックとなる部品装着機以外の部品装着機については考慮されないことになる．しかしながら，ボトルネックとなった部品装着機以外の部品装着機に対応する部分の遺伝子も，交叉や突然変異で生成される個体の評価値に大きく影響を及ぼすのは明らかである．そこで，提案手法では各個体の評価値とは別に，すべての部品装着機の動作時間を考慮した適応度を算出することにする．各個体の適応度はその時点で発見されている最良解の評価値 b を，ボトルネックとなる部品装着機の評価値 e と，すべての部品装着機の評価値の和 S を足した値で割って 2 乗でスケーリングした値とする．式(1)に適応度 f の算出式を示す．

$$f = \left(\frac{b}{e+S} \right)^2 \qquad (1)$$

4.2 初期個体群生成

提案アルゴリズムでは，以下の手順に従い，事前に定めた個体数分の初期解を生成する：

(1) すべての部品装着機のターン数を 0 とする；

(2) ノズルに割当てられていない部品をランダムに 1 つ選ぶ；

(3) 選ばれた部品を割り当てるノズルとターンをランダムに選択する．ただし，ノズルはその部品を吸着可能であり，部品が割当てられていないターンが存在するものに限る．条件を満たすノズルが存在しない場合は，その部品を装着可能なノズルを持つ部品装着機の中で，最もターン数の少ない部品装着機のターン数を 1 つ増やし，そのターンのノズルを選択する；

(4) ノズルに割当てられていない部品があれば(2)へ戻る．

4.3 局所探索法による改善

各個体の遺伝子において，部品の順列から任意の 2 つの部品を選択して交換を行う近傍（2-swap 近傍）を用いた局所探索法により，機械割当て，ターン割当て，ノズル割当てをあわせて改善する．ただし，ノズル割当て制約に違反する近傍への遷移は禁止することにする．近傍の評価は，近傍ごとに個体の評価値を算出することで行う．なお，こ

の改善法は，既存手法[4]と同様のものである．

4.4 交叉

適応度に比例した確率でランダムに選択された 2 つの親個体から 2 点交叉を用いて各ターンにおける部品の割当てを交換し，子個体を生成する．選択された 2 つの親個体は部品装着機のターン数がそれぞれ異なる場合は，その遺伝子型が異なるが，それぞれの部品装着機においてターン数が少ない方の個体の遺伝子に何も装着しないターンを一時的に追加することで，遺伝子型が同じになるようにする．

この交叉の方法で生成された子個体の遺伝子には，複数のノズルに割当てられる部品や，どのノズルにも割当てられない部品が生じることがある．この場合，生成された遺伝子が表現する解は非許容解となってしまうため，複数のノズルに割当てられている部品は，割当てられているノズルの内のどれか 1 つのノズルをランダムに選び，このノズルのみに割当てられるように修正する．そして，どのノズルにも割当てられていない部品に対しては，4.2 節に示した初期解生成方法の手順(2)以降の操作と同様の操作を行うことで再割当てを行う．以上の操作の後，生成された子個体に何も装着しないターンがあった場合は，そのターンを削除する．

例えば，図 11 (a),(b)に示す 2 つの親個体 1, 2 の遺伝子を用いて子個体を生成する場合には，最初に，ターン数を揃えるため親個体 1 には部品装着機 2 へ 1 ターン，親個体 2 には部品装着機 1 へ 1 ターン，それぞれ何も装着しないターンを追加する必要がある．図 11 (c), (d)に，親個体 1, 2 の遺伝子にそれぞれ何も装着しないターンを加えた遺伝子を示す．2 点交叉の点としてターン 2 とターン 3 の間，ターン 3 とターン 4 の間の 2 点が選ばれたときに生成される遺伝子を図 11(e)に示す．このとき，部品 $c_{1,3}$, $c_{2,1}$, $c_{2,2}$, $c_{2,3}$ が重複し，部品 $c_{1,1}$ がどのノズルにも割当てられていないため，この遺伝子が表す解は非許容解となる．そこでターン 1 の部品 $c_{1,3}$，ターン 2 の部品 $c_{2,2}$, $c_{2,3}$，ターン 4 の部品 $c_{2,1}$ を，それぞれ割当てから外し，また部品 $c_{1,1}$ を装着可能で部品を装着しないノズルであるターン 2 の $N_{1,2}$ に部品 $c_{1,1}$ を割当てる．以上の操作により得られた個体の遺伝子を図 11(f)に示す．

4.5 突然変異

提案アルゴリズムでは遺伝的アルゴリズムの突然変異として，全体変異，部品列変異，ノズル列変異の 3 種類を用いた突然変異個体をそれぞれ生成する．突然変異を行う個体は，親世代の個体からランダムに選択される．

4.5.1 全体変異

全体変異では，選ばれた個体の遺伝子の部品の順列からランダムに互いに独立な部分列を 2 つ選び，交換を行う．この操作では部品がノズル割当て制約を満さないノズルと組み合わされることがあるが，その場合はノズル割当て制約を満たさない部品を，4.2 節の初期解生成方法の手順(2)以降の操作と同様の操作で再割当てする．

部品装着機 1						部品装着機 2		
ターン 1			ターン 2			ターン 3		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{3,1}$	$c_{2,1}$	$c_{2,2}$	$c_{2,3}$	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{1,3}$

(a) 親個体 1 の遺伝子

部品装着機 1			部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$
$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{1,1}$	$c_{2,3}$	$c_{3,1}$	$c_{2,1}$

(b) 親個体 2 の遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{3,1}$	$c_{2,1}$	$c_{2,2}$	$c_{2,3}$	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{1,3}$	E_1	E_2	E_3

(c) (a)の遺伝子に何も装着しないターンを追加した遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$
$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	E_1	E_2	E_3	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{1,1}$	$c_{2,3}$	$c_{3,1}$	$c_{2,1}$

(d) (b)の遺伝子に何も装着しないターンを追加した遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$
$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	$c_{2,1}$	$c_{2,2}$	$c_{2,3}$	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{1,3}$	$c_{2,3}$	$c_{3,1}$	$c_{2,1}$

(e) (c), (d)の 2 個体から 2 点交叉により生成された遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$
$c_{1,2}$	E_1	$c_{2,2}$	$c_{2,1}$	$c_{1,1}$	E_2	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$	$c_{1,3}$	$c_{2,3}$	$c_{3,1}$	E_3

(f) (e)の遺伝子に対して再割当てを行って得られる遺伝子

図 11. 提案手法で用いた 2 点交叉の様子

以上の操作の後，生成された遺伝子に何も装着しないターンがあった場合は，そのターンを削除する．

例えば，図 12(a) に示す個体の遺伝子の部品の順列から部分列として $\{c_{1,2}, E_1, c_{1,3}\}$ と $\{c_{3,1}, c_{3,2}, E_3\}$ が選ばれた場合，これらの部分列を交換して得られる遺伝子を図 12(b)に示

す．この遺伝子が表す解は，部品 $c_{3,1}$, $c_{1,2}$ がそれぞれ吸着不能なノズルに割当てられているため非許容解である．そこでそれぞれ部品 $c_{3,1}$, $c_{1,2}$ を割当てから外し，部品 $c_{3,1}$ をターン 3 のノズル $N_{2,3}$ に，部品 $c_{1,2}$ をターン 1 のノズル $N_{1,2}$ に，それぞれ再割当てを行うことで得られる遺伝子を図 12(c)に示す．

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{2,1}$	$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	E_1	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	E_2	$c_{2,3}$	$c_{3,1}$	$c_{3,2}$	E_3	$c_{3,3}$

(a)　元となる遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{2,1}$	$c_{1,1}$	$c_{3,1}$	$c_{3,2}$	E_3	$c_{2,2}$	E_2	$c_{2,3}$	$c_{1,2}$	E_1	$c_{1,3}$	$c_{3,3}$

(b)　(a)の遺伝子の部品の順列の 2 つの部分列を交換して得られる遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$
$c_{2,1}$	$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{3,2}$	E_3	$c_{2,2}$	$c_{3,1}$	$c_{2,3}$	E_2	E_1	$c_{1,3}$	$c_{3,3}$

(c)　(b)の遺伝子に対して再割当てを行って得られる遺伝子

図 12. 提案手法で用いた全体変異の様子

4.5.2 部品列変異

部品列変異では，選ばれた個体の遺伝子の部品の順列からいずれかの部品種類だけを抜き出し，新たに部品の順列を作成する．そして，この順列の中からランダムに選んだ 2 つの部分列を交換し，これを元の遺伝子へ戻す．なお，抜き出した列はすべて同一の部品種類であるため，ノズルと組合さる部品が変わっても，ノズル割当て制約は満たされていることに注意されたい．

例えば，図 13(a) に示す個体の遺伝子から部品種類 C_1 に関する部品列変異を行う場合，部品種類 C_1 である部品を抜き出して得られる部品の順列を図 13(b)に示す．ここで部分列として $\{c_{1,2}\}$ と $\{c_{1,4}\}$ が選ばれ，交換された順列を図 13(c)に示す．この順列を元の個体の遺伝子に戻すことで得られる遺伝子を図 13(d)に示す．

4.5.3 ノズル列変異

ノズル列変異では，選ばれた個体からノズル種類を 1 つ選び，そのノズル種類と組合わされた部品のみを抜き出し，新たに部品の順列を作成する．そして，この順列の中からランダムに選んだ 2 つの部分列を交換し，元の順列に戻す．抜き出した部品の順列のノズル種類は同一のものであるた

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{2,1}$	$c_{1,3}$	$c_{1,4}$	$c_{2,2}$	$c_{2,3}$	E_1	$c_{3,1}$	E_2	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$

(a)　元の個体の遺伝子

$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	$c_{1,4}$

(b)　(a)の遺伝子から部品種類 C_1 だけを抜き出して得られる部品の順列

$c_{1,1}$	$c_{1,4}$	$c_{1,3}$	$c_{1,2}$

(c)　(b)の順列の 2 つの部分列を交換して得られる順列

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{1,4}$	$c_{2,1}$	$c_{1,3}$	$c_{1,2}$	$c_{2,2}$	$c_{2,3}$	E_1	$c_{3,1}$	E_2	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$

(d)　(c)の順列を(a)の遺伝子に戻して得られる遺伝子

図 13. 部品列変異の様子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{2,1}$	$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	E_1	$c_{2,3}$	E_2	$c_{2,2}$	$c_{3,1}$	E_3	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$

(a)　元の個体の遺伝子

$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	$c_{1,3}$	$c_{2,3}$	E_2	E_3

(b)　(a)の遺伝子からノズル $N_{1,2}$ に割当てられた部品だけを抜き出して得られる順列

$c_{1,1}$	$c_{1,2}$	E_2	E_3	$c_{1,3}$	$c_{2,3}$

(c)　(b)の順列の 2 つの部分列を交換して得られる順列

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{2,1}$	$c_{1,2}$	E_2	E_1	E_3	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	$c_{3,1}$	$c_{2,3}$	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$

(d)　(c)の順列を(a)の遺伝子に戻して得られる遺伝子

部品装着機 1						部品装着機 2					
ターン 1			ターン 2			ターン 3			ターン 4		
$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$	$N_{1,2}$	$N_{2,3}$	$N_{2,3}$
$c_{1,1}$	$c_{2,1}$	$c_{1,2}$	E_2	E_1	E_3	$c_{1,3}$	$c_{2,2}$	$c_{3,1}$	$c_{2,3}$	$c_{3,2}$	$c_{3,3}$

(e)　(d)の遺伝子から何も装着しないターンを削除して得られる遺伝子

図 14. ノズル列変異の様子

め，部分列の交換後もノズル割当て制約は満たされていることに注意されたい．これらの操作の後，何も装着しないターンが生成されたときは，そのターンを削除する．

例えば，図 14(a) に示す親個体の遺伝子からノズル $N_{1,2}$ に関するノズル列変異を行う場合を考える．ノズル $N_{1,2}$ に割当てられた部品の順列を図 14(b)に示す. ここで部分列として $\{c_{1,3}, c_{2,3}\}$ と $\{E_2, E_3\}$ が選ばれ，交換された順列を図 14(c)に示す．この順列を元の個体の遺伝子に戻すことで得られる遺伝子を図 14(d)に示す. この遺伝子のターン 2 は何も装着しないターンであるため削除することで得られる遺伝子を図 14(e)に示す.

4.6 淘汰

既存手法[3]と同様に，次世代に残す個体はエリート戦略と，適応度に比例した重み付けによるルーレット選択により，それぞれ決定する．

5. 計算機実験

提案手法の有効性を評価するために計算機実験を行った. 実験に用いた部品装着機の各パラメータは現実の部品装着機を参考にしてそれぞれ設定した．各部品装着機の基板と部品供給部, カメラの位置関係は図 15 に示すとおりである. 各部品装着機のノズル本数は 16 であり，図 16 のようにヘッド上に配置されていることにする．部品供給部のスロット数を 30，スロット間の距離を 10mm とし，1 部品種類あたりただ 1 つのスロットを使用する部品配置をランダムに作成した．実験に用いた基板のサイズ，基板上に装着する部品数, 部品種類数, ラインを構成する部品装着機の台数, ノズルの種類数，1 部品あたりの装着可能な部品装着機の台数，1 部品あたりの吸着可能なノズル数をそれぞれ表 1 に示す．なお，基板上で各部品を装着する座標はランダムに設定した．

簡単のため，部品装着機の動作時間の内訳はヘッドの移動時間，部品の吸着時間，装着時間のみで構成されていることにする．また，各ヘッドの動作時間はヘッドの移動距離に比例するものと仮定する．ただしヘッドは x 方向と y 方向のそれぞれ独立した 2 つのモータによって移動するため，ヘッドの移動距離はチェビシェフ距離で定義されることにする．さらに，部品の種類によらず部品の吸着や装着に掛かる時間はそれぞれ一定であることにし，吸着回数や装着回数によってのみ吸着時間，装着時間が決定されることにする．以上から，各部品装着機の動作時間 H は式(2)によって与えられる．

$$H = \alpha \times D + \beta \times Npick + \gamma \times Nmount \qquad (2)$$

ここで，D とはヘッドの移動距離であり，$Npick, Nmount$ とはそれぞれ吸着回数，装着回数である．α，β，γ の値は部品装着機の性能によって変わり，それぞれヘッドの単位距離あたりの移動にかかる時間，1 個の部品の吸着にかかる時間，1 個の部品装着にかかる時間を表す．本論文では実際の部品装着機を参考に，どの部品装着機についても，α=0.001[s/mm]，β=0.1[s/回]，γ=0.1[s/回]と設定した．

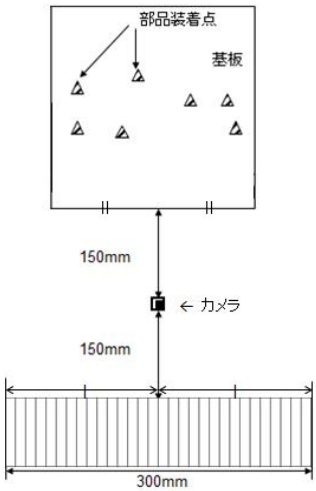


図 15. 基板と部品供給部，カメラの位置関係

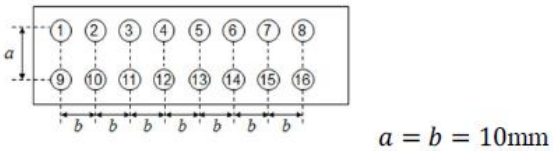


図 16. ヘッド上のノズルの配置

表 1. 実験に用いたインスタンス

#	基板サイズ（幅×幅）[mm^2]	部品数	部品種類数	台数	ノズル種類数	1 部品あたりの装着可能な台数	1 部品あたりの吸着可能ノズル数
1	200×200	128	20	4	2	4.000	17.500
2	200×200	128	20	4	2	2.992	47.875
3	200×200	256	20	4	2	3.848	57.156
4	200×200	256	20	4	2	2.668	34.688
5	200×200	256	20	4	4	1.125	18.000

ⓒ2013 Information Processing Society of Japan

表 2. 提案手法と各手法の計算時間 2 時間における解の比較結果[s]

	提案手法	既存 LS 法		拡張 GA 法		拡張 LS 法	
#	評価値	評価値	評価値 gap[%]	評価値	評価値 gap[%]	評価値	評価値 gap[%]
1	6.875	6.367	7.979	6.278	9.509	6.849	0.380
2	7.172	6.536	9.731	6.541	9.647	8.330	-13.902
3	13.892	12.920	7.523	12.646	9.853	13.742	1.092
4	14.298	12.189	17.302	12.434	14.991	15.060	-5.060
5	15.919	12.894	23.461	12.550	26.845	17.446	-8.753

実験環境は CPU が Intel Core i7-2600 3.40GHz，メモリが 2.00GB であり，言語は C++を用いた．提案アルゴリズムの各パラメータは予備実験により適切に設定し，計算時間はある程度実用に耐えうる時間を目安として 2 時間とした．

比較対象には既存手法[4], 既存手法[4]を拡張した遺伝的アルゴリズム法，提案手法の遺伝子表現を利用した局所探索法の，3 つの手法を用いた．既存手法[4]を拡張した遺伝的アルゴリズム法には提案手法から部品列変異とノズル列変異を除いたものを，提案手法の遺伝子表現を利用した局所探索法の近傍には 4.3 節のものを，それぞれ用いた．既存手法[4]と, 既存手法[4]を拡張した遺伝的アルゴリズム法は，各インスタンスについてノズル部品割当て制約を削除した問題として解いていることに注意されたい．

表 2 に各インスタンスについて，それぞれの手法で得られた解の評価値と提案手法との評価値 gap を示す．なお，既存 LS 法は既存手法[4]，拡張 GA 法は既存手法[4]を拡張した遺伝的アルゴリズム法，拡張 LS 法は提案手法の遺伝子表現を利用した局所探索法を，それぞれ表している．

提案手法の遺伝子表現を利用した局所探索法と提案手法の評価値 gap に着目すると，インスタンス 1, 3 のようにあまり差が見られない場合もあるが，平均で約 5%，最大で約 14%の改善が見られた．このことからノズル割当て制約がある場合には特に遺伝的アルゴリズムによる探索が有効であると言える．

また，提案手法と既存手法を拡張した遺伝的アルゴリズム法を比較すると，平均で約 14%，最大で 27%の解の悪化が見られた．しかしながら，これだけだと解の悪化がアルゴリズムの性能差によるものか，あるいはノズル割当て制約の有無によるものかわからないため，提案手法と既存手法[4]を拡張した遺伝的アルゴリズム法で最も評価値 gap の大きかったインスタンス 5 について，ノズル割当て制約を削除した問題として提案手法で解いたところ，得られた解の評価値は 12.472[s]であった．これは既存手法[4]を拡張した遺伝的アルゴリズム法で得られた解と比べ約 0.622%の改善であり，他の手法と比較しても良い解であった． このことから，表 1 で見られた解の悪化はノズル割当て制約によるものであり，提案手法はノズル割当て制約を考慮しているにも関わらず，既存手法[4]を拡張した遺伝的アルゴリズム法の性能と同程度であると考えられる．

6. まとめ

本論文では，部品配置が予め与えられている独立実装方式の部品装着ラインのラインバランシング問題に対して，従来手法を統合，改良したヒューリスティックな解法を提案した．提案手法はノズル割当て制約を考慮した上で，機械割当てとあわせて，ラインを構成する各部品装着機の動作の最適化が可能であり，従来手法ならびに従来手法を拡張した手法と比較して，同等の探索効率を持つことが，計算機実験により確かめられた．

今後の課題として，複数種類の基板を生成する前にそれらの基板を作成するのに最適な部品配置を求めること等が挙げられる．

参考文献

1) Mari Ayob, Graham Kendall, “A survey of surface mount device placement machine optimization: Machine classification,” European Journal of Operational Research 186 (2008), 893.914
2) Osman Kulak, Ihsan Onur Yilmaz. Hans-Otto Gunther, A GA-based solution approach for balancing printed circuit board assembly lines. OR Spectrum (2008) 30:469.491
3) Hiroshige Tozaki, Hidenori Ohta, and Mario Nakamori, “A Heuristic Line Balancing Algorithm Accounting for Component Mounting Order,” Proc. PDPTA 2011 (held in Las Vegas, Nevada, USA, July 11, 2011), 807-812.
4) Hiroaki Konishi, Hidenori Ohta, and Mario Nakamori, “Modeling the Component Pickup and Placement Sequencing Problem with Nozzle Assignment in a Chip Mounting Machine,” Proc. PDPTA 2012 (held in Las Vegas, Nevada, USA, July 16, 2012), 724-729
5) 山本圭輔，太田秀典，中森眞理雄，“部品装着機におけるノズル割当を考慮した装着順序問題に対するヒューリスティックな解法”，情報処理学会研究報告， 2011-MPS-82(5), 1-6, (2011)
6) 岡本大輔，太田秀典，中森眞理雄，“電子基板生産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-ノズル・部品の割当てに制約がある場合-”，情報処理学会研究報告, 2012-MPS-90(10), 1-7, (2012)
7) 山田剛史，中森眞理雄,“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”，情報処理学会論文誌，数理モデル化と応用, Vol. 1, No.1, pp.102-121 , 2008.