

電子部品装着機の装着順序決定アルゴリズムの研究*

3D-04

水野徹平 品野勇治 中森真理雄†

東京農工大学 工学部 情報コミュニケーション工学科‡

1 はじめに

今日では、プリント基板の作成は、はんだ塗布、部品装着、加熱固定の 3 工程から成り、すべて自動化されているのが普通である。中でも最も複雑なのは部品装着である。高速部品装着機と呼ばれる機械では、装着速度は一部品あたり 0.1 秒以下まで高速化されており、ハードウェアによる装着速度の向上は困難である。そこで、その性能を十分に発揮させるためには、部品装着点への移動時間や部品供給部の移動時間を最小にする、部品の装着順序および、部品供給部の配置が重要である。

本稿では、基板の生産効率向上のため、最適な装着順序を決定する問題を、3次元空間上の巡回セールスマン問題 (TSP:Traveling Salesman Problem) として捉え、最適化を試みた。

2 高速部品装着機

基板への電子部品の装着は、部品運搬用のノズルを用い、基本的に

1. 部品供給部から部品ノズルへの吸着
2. ノズルから基板上の指定された位置に装着

という 2 つの動作によって行われる。高速部品装着機とは、ノズルを環状に配置し、回転させることによって、この 2 つの動作を同時に行う機械である (図 1)。

ノズルが部品を打ち付ける位置と、部品を吸い付ける位置は固定なので、それらにあわせて基板と部品供給部が移動する仕組みになっている。部品供給部には部品が部品種類ごとにわけて配置されている。一般に 1 枚の基板には同種の部品が複数装着される。そのため、部品供給部は基板の作成が完了するまでに、同じ供給位置にその基板で用いる部品数だけ複数回移動する。このとき、ノズルが次のノズルに切り替わる間に

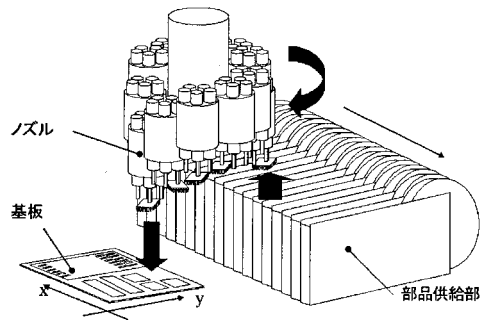


図 1: 高速部品装着機

基板の移動と、部品供給部の移動が完了していない場合、待ち時間が発生し、これがロスとなる。また、ノズルの回転速度は装着する部品の重量によって 8 段階に変化し、一度速度を下げると再加速はできない仕様となっている。

3 最適化アルゴリズム

3.1 全体の枠組み

基板作成時間に最も影響があるノズルの回転速度が、一度速度を下げると再加速できない仕様となっているので、軽い部品から先に装着した方が有利であると考えられる。そこで、アルゴリズムを以下の 3 段階で構成する。

1. 部品をノズルの回転速度が同じものごとに分割。
2. 分割されたグループごとに部品供給部に部品を配置し、それぞれについて最適な装着順序を決定。
3. グループを結合して全体の装着順序を決定。

本稿では、特に第 2 段階のみを対象とする。

3.2 第 2 段階の最適化

第 2 段階において、最適な装着順序とは全ての部品を装着するまでの基板の移動と、部品供給部の移動の総距離を最小にするものである。また、基板の総移動距離と部品供給部の総移動距離はトレードオフの関係にある。そのため、この 2 つを同時に最適化する必要

*A Study on Ordering Algorithm for Mounting Electronic Components Machine

†Teppei Mizuno, Yuuji Shinano and Mario Nakamori

‡Department of Computer, Information and Communication Sciences, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology

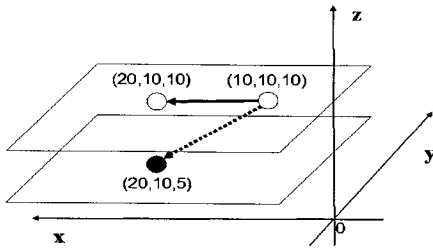


図 2: 3次元空間上の点

がある。

この装着順序の最適化問題を3次元空間上のTSPとして定式化した。TSPとは、頂点の数を n 、枝の数を m 、枝 e のコストを c_e 、頂点 i につながっている枝番号の集合を $\delta(i)$ 、頂点集合 S に含まれる頂点と、 S に含まれない頂点をつなぐ枝番号の集合を $\delta(S)$ 、枝 e を通る場合は値1、通らない場合は値0をとる変数 x_e を用いて以下のように定式化できる問題である[2]。

$$\text{目的関数} \quad \sum_{e=1}^m c_e x_e \rightarrow \text{最小化}$$

制約条件

$$\sum_{e \in \delta(i)} x_e = 2, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{e \in \delta(S)} x_e \geq 2, \quad \{1, 2, \dots, n\} \text{の空でないいかなる真部分集合 } S \text{ に対しても}$$

$$x_e \in \{0, 1\}, \quad e = 1, 2, \dots, m$$

TSPとして定式化するに当たって、部品供給部の移動が発生する異なる部品間の移動は、部品供給部の移動を伴わない同じ部品種類間の移動よりも、コストが大きくなるようにしたい。そこで、装着する部品の基板上の装着点を x, y 、その部品の供給部の位置を z とし、装着点を3次元空間上の点とした(図2)。2点間のコスト c は3次元空間における2点間の直線距離とする。

部品供給部の移動を z 座標としてコストに反映させることによって、部品供給部の移動距離を反映した基板の移動距離を最小化する。このとき、部品供給部の移動が基板作成時間に及ぼす影響が現時点ではわからないため、 z 座標には可変な重みを乗ずることにした。この重みは、テストデータを用いて、本アルゴリズムによる最適解と、それをもとにした実機による基板作成間との比較によって決める必要がある。

3.3 部品配置の決定について

部品ごとに z 座標を設定するために、部品供給部の配置を決定する必要がある。この最適化にも、2Opt法

などの手法が有効であると考えられるが、本研究では部品供給部の並びが固定されている場合を対象にし、2例について実験した。すなわち、部品数の多い部品種類の順に配置した例(TypeA)と、部品数の多い部品種類を供給部(z 軸)の中央から左右交互に配置し、部品数の少ない部品種類を両端に配置した例(TypeB)の2つについて実験をした。この2例を取り上げた理由は1枚の基板に装着する部品数の多い部品種類間では、多くの移動が発生すると予想されるためである。

3.4 TSPの最適化アルゴリズム

問題をTSPとして定式化したため、TSPの最適化アルゴリズムをそのまま使用することができる。TSPの最適化アルゴリズムは数多くあるが、現場の要求により実用的な計算時間で最適化することが求められるので、ヒューリスティックな手法を採用した。使用したのは簡易版のChained Lin-Kernighanアルゴリズムで、2Opt、3Optにより解の改善を行い、改善に成功したら真を返し、改善できなければ偽を返す関数 $improve2opt()$ 、 $improve3opt()$ と、ランダム4Optを行う関数 $Random4Opt()$ を用いると、以下のようなコードとなる。 t はランダム4Optの繰り返し回数を指定する定数である。

```
for(i=0; i<t; i++){
  do{
    while(improve2opt());
  }while(improve3opt());
  Random4opt();
}
```

このアルゴリズムによる解の精度をみるため実験を行った(表1)。実験に使用した問題は、2次元上に頂点を一様に分布させた、頂点数(N)が100、200、400、800のTSPで、それぞれ10問ずつおこなった。また、定数 t は20とした。

表1中の23R4Optは本アルゴリズムの解の目的関数値の平均値である。また、精度をみるための比較対照として、HeldとKarpによる下界値を求めた。この下界値は最適値の95%~99%の値を出すことが知られている[4]。この下界値に対する、本アルゴリズムによる解の目的関数値の比23R4Opt/HKは、ほぼ1.04倍程度であることがわかる。

4 高速部品装着機シミュレータ

本研究では、高速部品装着機の装着順序最適化問題をTSPとしてモデル化し、最適化を行った。しかし、TSPでの最適解が必ずしも実際の問題でも最適解であ

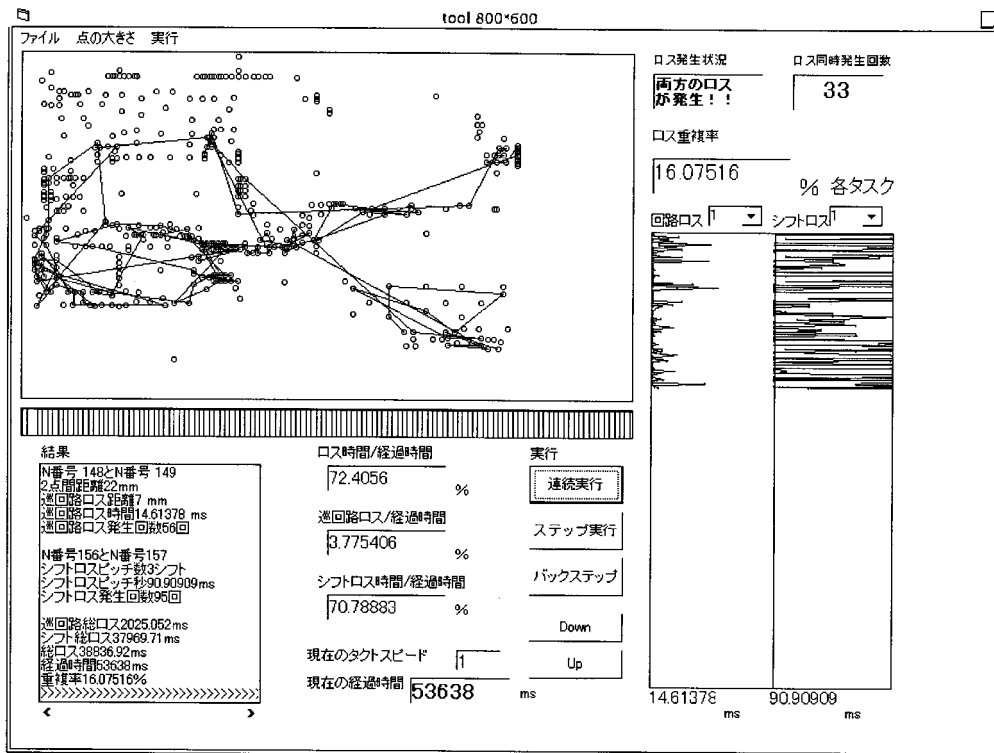


図 3: 高速部品装着機シミュレータ [1]

表 1: アルゴリズムの解の精度

N	100	200	400	800
HK	75660	105722	147787	206397
23R4Opt	78470	10972	115375	215247
23R4Opt/HK	1.037	1.037	1.040	1.042

HK: Held と Karp による下界値

23R4Opt: 本アルゴリズムによる解の目的関数値

るとは限らない。そこで、本稿のアルゴリズムの評価および 2 軸重みを決めるため、入内島 [1] の作成したシミュレータ (図 3) を使用した。これにより、実際の基板の作成時間を得ることができる。また、基板に部品が装着されていく様子をアニメーションでみることができる。さらに、このシミュレータには以下のような機能が実装されている。

1. 経過時間に対する基板の移動ロス時間 (巡回ロス), 部品供給部の移動ロス時間 (シフトロス), およびその両方の割合を数値で表示する。
2. 巡回ロスとシフトロスの発生状況をリアルタイムで表示し、そのロス時間を、折れ線グラフで表

示する。

3. 結果の詳細をファイルに書き出す。

これにより、解を多方面から評価、検証することができる。

5 実験

部品装着法における基板の扱い方には大きく分けて 2 種類がある。1 つは多面取りと呼ばれ、複数の小さな基板をまとめて 1 枚の大基板と見なすものであり、他は、1 面取りと呼ばれ、1 枚の基板を 1 枚として扱うものである。両者には以下のような特徴の違いがある。

多面取り 部品の装着点が均一に分布。1 枚の大基板に装着する部品数が部品種類ごとにほぼ同じ場合が多い。

1 面取り 部品の装着点が偏って分布。1 枚の基板に装着する部品数が部品種類ごとに大きく違う場合が多い。

1 面取りと多面取りでは適切な重みの値が異なる可能性がある。そこで、その両方のタイプについて重み

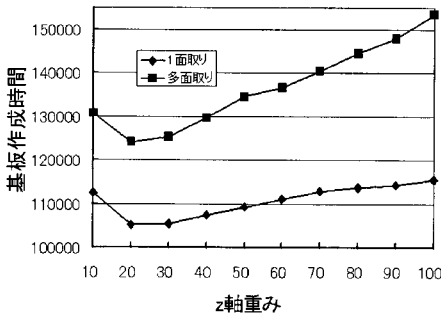


図 4: 実験結果 1 部品総数 800 部品種類数 100

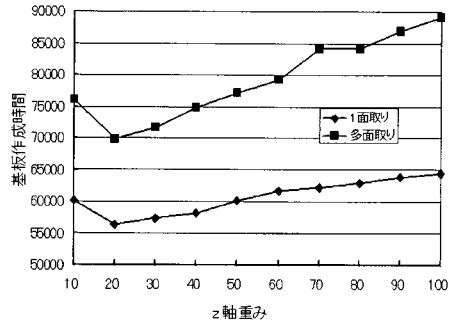


図 6: 実験結果 3 部品総数 400 部品種類数 100

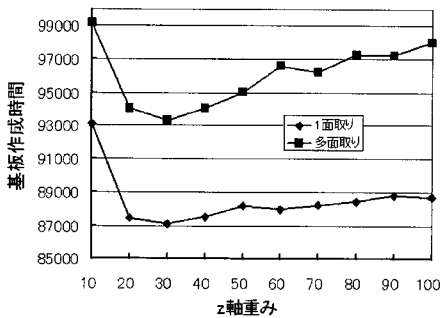


図 5: 実験結果 2 部品総数 800 部品種類数 10

を変えながら実験した (図 4, 図 5, 図 6)。基板サイズは $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ (x 軸 0-300, y 軸 0-300) とし, (部品総数, 部品種類数) は, (400,100), (800,100), (800,10) の 3 つで行い, ノズルの回転速度はすべて同一である。また, 多面取りについては, 部品の装着点を基板上に一律に分布させ, 部品種類ごとに部品数も均一に設定した。一方, 1 面取りは, 部品装着点を基板上の中央を平均とした正規分布とし, 部品種類ごとの部品数も偏った数を設定した。基板作成時間は高速部品装着機シミュレータを使用して計測した。

実験結果では, 部品総数に対する部品種類数の多い (部品供給部の密度が高い) 基板で重み 20, 少ない基板で重み 30 が最もよい解を出した。また, 最適な z 軸の重みは装着点の分布や基板上の装着点の密度にはよらない。

次に, 1 面取りについて, 部品供給部の配置の違いによる差を見るために実験を行った (表 2)。すべての基板で若干ながら TypeB がよい解を出した。これは, 部品供給部の配置を最適化することによって, さらなる改善が可能なることを示している。

表 2: 部品供給部の配置の違い

(総数, 種類数)	(400, 100)	(800, 100)	(800, 10)
TypeA	57239	105445	87848
TypeB	56436	105093	87459

6 おわりに

現実の問題を単純化した問題としてモデル化をおこなった。実験結果より, 適切な z 軸に対する重みづけは, 基板の特徴によらず良好な最適化が行える。よって高速部品装着機に今後, 仕様の変更などがあっても, パラメータを変えるだけで対応できる可能性が高い。

高速部品装着機の最適化に関する今後の課題としては, 部品供給部の配置の最適化と, 適切な重みを, 高速機の仕様や基板の種類から, 解析的に求めることがある。

参考文献

- [1] 入内島一成: アルゴリズム評価のための高速電子部品装着機のシミュレータの作成, 東京農工大学工学部卒業論文, 1999
- [2] 山本芳嗣, 久保幹夫: 巡回セールスマン問題への招待, 朝倉書店, 1997
- [3] David S.Johnson, Lyle A.McGeoch, The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization, *Local Search in Combinatorial Optimization*, pp.215-310, 1997
- [4] Gerhard Reinelt, The Traveling Salesman - Computational Solutions for TSP Applications, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.840, Springer-Verlag, 1994