

## 論文の要旨

題目 プリント基板の電気検査における数理計画法に基づくシステム最適化

(System optimization based on mathematical programming for  
electrical inspection of printed circuit boards)

氏名 呉 宏偉

近年の急速な電子機器の小型化によって、プリント基板の配線ピッチは数十 $\mu\text{m}$ と非常に狭くなっている。このような基板配線の狭ピッチ化に伴い、プローブ治具を基板の検査ノードに正確に合わせるために、検査の前に（プローブ治具に取り付けられた）カメラにより基板の正確な位置を測る操作（アライメントという）が必要不可欠となっている。また、配線パターンの電気検査の前にアライメント撮像を行う新しい検査システムが標準化されつつあり、現場では、複数個（約4~200個）の基板を平面上に並べて、各基板がもつ検査ノードにプローブ治具と呼ばれる検査器具を順に合わせて電流を流して一つずつ検査している。

これまで、プリント基板検査においては、検査機器のハードウェアの開発・発展に主に焦点があてられ、治具の取付位置補正や検査順序に対する最適化のための数理モデルと解法については、十分に研究が進んでいなかった。しかし、ICTの発展とグローバル化に伴い、プリント基板の生産性向上が求められる中、プリント基板検査の効率化のためのシステム最適化技術の発展が急務となっている。

本研究では、プリント基板の検査システムにおいて、特にプローブ治具の取付位置補正作業の効率化とプリント基板の検査順序の最適化に焦点をあて、数理計画に基づくモデル化と解法の提案を行う。前者の治具の取付位置補正に関しては、治具の位置ずれを最小化する問題が多目的計画問題及びミニマックス問題として定式化できることを示すと同時に、検査システムとの対話を通して、オペレータが許容できるズレになるまで位置補正を繰り返すという対話型手法を提案する。また、より高速かつ高精度な近似最適解を求めるために、生物規範型メタ解法の提案を行う。次に、後者の検査経路の最適化に関しては、カメラによるアライメント撮像を考慮した最短検査経路を求める問題が、先行順序制約付き巡回セールスマン問題として定式化でき、小規模問題に対しては、数理計画ソルバーを用いて厳密解を求解可能であることを示す。また、実規模問題に対して、実用時間内に良質の近似最適解を導出するためのメタ解法を提案し、実問題に基づくベンチマーク問題を使った数値実験を通して、提案手法の有用性を検証する。

本論文は、以下のように構成される。

第1章では、本論文で取り扱うプリント基板の電気検査に対する最適化手法の現状と研究に関連する背景と目的について述べる。

第2章では、プリント基板検査のシステム最適化に関連する数理モデルと解法について、線形計画法、非線形計画法、整数計画法、多目的計画法と生物規範型メタ解法の概要を説明する。

第3章では、プリント基板の検査治具の取付位置補正に対して、提案する数理計画モデルと解法について述べる。従来の位置補正においては、現場のオペレータが人間としての判断と経験によって作業を行っていたために非常に長い作業時間を要していた。そこで、治具の位置ずれを補正するために、オペレータが選択した少数個のピンの打痕と対応するコンタクトパッドの中心とのズレから適切な補正量を求める方法を提案し、適切な補正量を求める問題が多目的計画問題及

びミニマックス問題として定式化できることを示す．次に，検査システムとの対話を通して，オペレータが許容できるズレになるまで位置補正を繰り返すという対話型手法を提案する．また，より高速かつ高精度な近似最適解を求めるために，複数の生物規範型メタ解法の提案を行う．

第4章では，プリント基板の検査経路の最適化のために開発した新しい数理モデルと解法について述べる．従来のプリント基板検査においては，検査順序や検査経路の最適化が行われていなかった．まず，カメラによるアライメント撮像を考慮した最短検査経路を求める問題が，先行順序制約付き巡回セールスマン問題の中でも特に集荷配送巡回セールスマン問題として定式化が可能であり，かつ小規模問題に対しては，数理計画ソルバーを用いて厳密解を求解可能であることを示す．また，実規模問題に対して，実用時間内に良質の近似最適解を導出するためのメタ解法を提案し，実問題に基づくベンチマーク問題を使った数値実験を通して，提案手法の有用性を検証する．

第5章では，取り扱ったプリント基板の電気検査における最適化に関する研究の総括を行う．最後に今後の研究課題について考察する．