

|          |  |
|----------|--|
| 氏名（本籍）   | 寺本篤司（三重県）  |
| 学位の種類    | 博士（工学）   |
| 学位授与番号   | 乙第 60 号  |
| 学位授与日付   | 平成 20 年 3 月 25 日   |
| 専攻       | 電子情報システム工学専攻   |
| 学位論文題目   | X線イメージングによる電子機器の非破壊検査に関する研究<br>(Studies on non-destructive inspection for electrical products by means of X-ray imaging) |
| 学位論文審査委員 | (主査) 教授 田中嘉津夫<br>(副査) 教授 山本和彦 教授 斉藤文彦<br>教授 藤田廣志   |

## 論文内容の要旨

我々が日常で用いている携帯電話等の電子機器は軽薄短小化への要求が強く、それらを構成する基板や電子部品の小型化・軽量化や部品実装の高密度化が加速している。1990年代には、新しい高密度パッケージとしてエリアアレイパッケージが登場した。これは部品裏面に bumps とよばれる電極を 2 次元的に配し、基板との電氣的接続を行う。同パッケージの登場は部品実装の飛躍的な高密度化をもたらし、現在、様々な製品で採用されている。

ここで課題となるのが部品実装後の検査である。エリアアレイパッケージのはんだ接合部は部品裏面に隠れるため、接合状態を外部から確認できない。このような内部構造の検査には X 線検査が適しており、エリアアレイパッケージのはんだ付け検査に広く用いられている。しかし、現状の X 線検査は、X 線透視像を目視検査する方法が主流であり以下に挙げる課題がある。

- (1) X 線透視像は X 線の進行方向に含まれる物体の情報が重畳するため、検査対象であるはんだ以外の成分（配線、裏面実装部品）の影響を受け、検査精度が低下する。
- (2) X 線透視像は投影情報であるため、はんだ形状の 3 次元情報が欠落し、接合状態を正確に把握できない。
- (3) 目視検査は、検査員による検査レベルのバラツキが大きく、検査作業の負荷が高い。

そこで本論文では、X 線を用いた電子機器の非破壊検査に関して、特に、エリアアレイパッケージの bumps 検査に関して、上記課題を解決するための撮像方法や自動検査手法について検討を行った。

本論文は、7 つの章から構成されている。

1 章では、研究背景と解決すべき課題を示し、本論文の目的および論文構成について述べている。

2章ではエネルギーサブトラクション法によるはんだ成分の抽出手法について述べる。

X線透視によるエリアアレイパッケージのバンプ検査では、はんだ以外の成分が画像に重畳するため、不良検出能力が低下する。本章では、はんだ成分を抽出する手法として医療分野で用いられているエネルギーサブトラクション法に注目し、同手法の実装基板の検査への応用を試みる。検証では実装基板に同手法を適用し、複数の成分が重畳したX線透視像から銅配線などの不要成分を除去し、はんだ成分を抽出できるか評価した結果を示している。

3章では、X線透視像を用いた、高速バンプ自動検査システムの開発について述べる。

バンプ接合の信頼性を確保するためには、バンプ形成工程における検査が必要不可欠である。本章では、X線透視像からバンプ高さ・面積・体積などを算出し、規格値との照合により良否判定する、高速バンプ検査システムについて述べる。また、測定の主な誤差要因であるX線の過渡特性や対象物の位置決め誤差の補正手法を提案する。検証では、本システムの妥当性を確認する為、実機を用いて検査精度、検査時間等を評価した結果を示している。さらに、本手法をフィレットレス実装されたチップ部品の検査に適用した結果を示している。

4章では、はんだバンプに発生した微小ボイドの自動検出手法について述べる。

バンプ形成時にバンプ内部にボイド（気泡）が発生すると、製品の信頼性に悪影響を与える。本章では透視画像からボイドを自動的に検出する手法として、モデル差分法を提案する。ボイドの過剰検出を軽減するため、判別分析法を用いてボイドとノイズ成分を弁別する。検証では本手法の有効性を確認する為、シミュレーション画像と実機で撮影した画像を用いてボイド検出能力を評価した結果を示している。

5章では、実装基板の検査に適した高速傾斜型CTシステムの開発について述べる。

自動車向け等の高い信頼性を要求される製品のはんだ付け検査では、3次元形状に基づく高速な検査が求められている。本章で提案する実装基板に適した傾斜型高速CTシステムは、回転移動する検出器と固定配置されたX線発生器により基板の投影データを収集し、フィルタ補正逆投影処理にて3次元画像を得る。また、専用の再構成演算ユニットを開発し、リアルタイムで3次元画像を得る。検証では本システムの有効性を確認する為、種々のサンプルを解析した結果を示している。

6章では、傾斜型CTシステムを用いたはんだ接合の自動検査手法について述べる。

前章で述べた傾斜型CTシステムは高い信頼性が求められる製品の検査に用いられている。しかし、現在は目視検査が行われており、検査基準のばらつきや検査員の負担の観点から検査の自動化が望まれている。本章では、傾斜型CTシステムを用いてエリアアレイパッケージのはんだ接合部を自動検査する手法を提案する。本手法ではバンプ形状を反映する5つの特徴量算出し、線形判別分析法やニューラルネットワークにより良否判定する。検証では、実機で撮影した画像に本手法を適用し、本手法の有効性を確認している。

最後に、7章ではこれまでの結果を総括すると共に、今後の課題について述べている。

以上のように、本論文ではX線を用いた非破壊検査に関して、撮影方法ならびに各種検査アルゴリズムを検討し、シミュレーションや実機を用いた評価により、有効性を確認している。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、X線を用いた電子機器の非破壊検査に関して、特に、エリアアレイパッケージのバンパ検査に関して、撮像方法や自動検査手法について検討を行ったものである。本論文の成果とその評価は以下のとおりである。

(1) エネルギーサブトラクション法を BGA 実装基板に適用し、はんだ成分を抽出した結果を示している。同処理は、エネルギー分布の異なる2種類のX線で同一箇所を撮像し、画像補正とコントラスト補正を施した後に2枚の画像で差分処理を行う。本手法の有効性を確かめるため、実験用ファントムと実際のBGA実装基板に対して本手法を適用し、はんだ成分が良好に抽出されていることを確認している。

(2) X線を用いてはんだバンパを高速に自動検査する手法について検討している。X線検査システムではX線発生量のゆらぎや基板の反りなどが検査精度に影響を与える。本研究ではそれらの影響を軽減するため、X線量補正モニタと画像処理による補正処理を組み合わせ、安定なバンパ計測を可能としている。検証の結果、繰返し測定精度は測定値に対して1%以下、検査速度は36000バンパ/分となり、オンラインでの全数検査に必要な能力が得られていることを確認している。また、本手法をフィレットレスチップ部品の検査に応用し、検査に有効な情報が得られていることを確認している。

(3) はんだバンパ中に発生したボイドをX線透視によって自動検出する手法について述べている。X線透視像からボイドを検出する方法として、モデル差分法を新たに開発している。また、ボイドと検出された物体の中には、ノイズによる過剰検出が生じる。これを軽減するため、多変量解析の1手法である判別分析を用いてノイズ成分を除外する手法を提案している。

(4) BGA 実装基板等のはんだ付け非破壊検査に適した高速傾斜型 CT システムについて述べている。本システムでは放射角の広い開放型X線発生器と回転移動するフラットパネルディテクタにて様々な方向からの投影像を収集し、三次元FBP演算によって三次元画像を得ている。また、三次元FBP演算を高速化するため、再構成演算ユニットを新たに開発し、投影像の収集完了と同時に三次元画像を得ることを確認している。検証では、BGA 実装基板や熱衝撃を与えたサンプルなどを用いて評価を行い、実装基板の非破壊検査を行う上で有効な情報が得られていることを確認している。

(5) 傾斜型 CT により撮影した BGA はんだ接合部を自動検査する手法について述べている。本手法はまず三次元画像から検査対象であるバンパを抽出し、そこから複数の特徴量を算出している。さらにこれらのデータを統計的手法である LDA と、非線形識別処理に優れた ANN を用いて良否判定している。実サンプルを用いた検証の結果、両者ともに判別正解率が 99.7%と

なり，ほぼ完全に良否を識別できることを示している。

以上のように，本論文ではX線を用いた非破壊検査に関して，撮影方法ならびに各種検査アルゴリズムを検討し，シミュレーションや実サンプルを用いた評価により，その有効性を確認している。また，提案した手法の多くは，すでに実用化されその効果が確認されており，工学的価値が高い。したがって，本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

## 最終試験結果の要旨

提出された学位論文を熟読し，その内容が独創的かつ実用的であり（すでに勤務先の企業で商用化にも成功している），また，工学の分野においても高い価値を有すると判断した。また，本学位論文の内容に関連する論文も含めると計15編完成させており（国際学会のProceedings等を含む），さらに，1999年のエレクトロニクス実装学会学術講演大会の研究奨励賞を受賞している。

公聴会後に学位論文に関する口頭試問を行ったが，論文提出者はそれらの試問に的確に回答し，工学的な知識だけでなく，産業界の製造検査技術全般に関する幅広い知識を有することを確認した。

これらを総合的に判断して，最終試験を合格と判定した。