

高精度・高スループット 2D - 3Dインスペクション技術マニュアル

平成20年度九州産業技術イノベーション創出共同体形成事業
研究開発環境支援事業
「高精度・高スループット2D-3Dインスペクション技術の開発」

< 執筆者一覧（敬称略） >

- | | |
|-------|---|
| 安部 英一 | 産業技術総合研究所 九州センター 九州産学官連携センター
産学官連携コーディネータ |
| 坂井 一文 | 産業技術総合研究所 九州センター 生産計測技術研究センター
光計測ソリューションチーム 招聘研究員 |
| 野中 一洋 | 産業技術総合研究所 九州センター 生産計測技術研究センター
光計測ソリューションチーム 研究チーム長 |
| 田中 清隆 | 産業技術総合研究所 九州センター 生産計測技術研究センター
光計測ソリューションチーム |
| 内野 正和 | 福岡県工業技術センター 機械電子研究所 機械技術課
強度解析チーム 専門研究員 |
| 重森 清史 | 熊本県産業技術センター ものづくり室
研究参事 |
| 久保 敦 | 鹿児島県工業技術センター 電子部
主任研究員 |
| 尾前 宏 | 鹿児島県工業技術センター 電子部
主任研究員 |
| 上菌 剛 | 鹿児島県工業技術センター 電子部
主任研究員 |

目 次

第 1 章	はじめに	頁
1.1	九州地域の経済規模と半導体産業の位置付け	1-1
1.2	日本らしい IC 製造のために	1-1
1.3	半導体後工程と外観検査	1-2
1.4	研究開発課題と本事業の目標	1-4
1.5	本マニュアルの概要	1-6
	参考文献	1-7
第 2 章	多焦点撮像装置による焦点深度の深い鮮明な撮像	
2.1	概 要	2-1
2.2	多焦点撮像装置の原理	2-2
2.3	多焦点撮像装置の使用方法	2-6
2.3.1	2 焦点撮像装置の例	2-6
2.3.2	3 焦点撮像装置の例	2-7
2.4	多焦点撮像装置の画像処理	2-8
2.5	実施例	2-9
	(1) IC リード部	2-9
	(2) ねじ	2-10
	(3) ワイヤボンド	2-11
	(4) プリント基板	2-12
2.6	仕 様	2-13
2.6.1	低倍率の場合	2-13
2.6.2	高倍率の場合	2-14
2.6.3	多焦点撮像ユニットの仕様	2-14
	補 足	2-15
	(1) 基本的な多焦点撮像装置の構成	2-15
	(2) 多焦点撮像装置の高さ測定への応用	2-16
	関連用語の解説	2-17
	参考文献	2-18
第 3 章	分光位相差検出法による高さ測定	
3.1	概 要	3-1
3.2	高さ測定の原理	3-2

3.3	高さ測定装置の使用方法	3-6
3.3.1	高さ測定のフローチャート	3-6
3.3.2	換算係数の求め方	3-7
3.3.3	対象物の測定手順	3-8
3.3.4	測定上の注意事項	3-9
3.4	実施例	3-10
3.4.1	分光位相差検出法による測定例	3-10
	(1) IC リード部	3-10
	(2) プリント基板の反りの測定	3-11
3.4.2	全高測定例	3-12
	(1) アセンブル後のプリント基板	3-12
	(2) 全高測定用の画像例	3-12
3.5	仕 様	3-13
補 足		3-14
	(1) フィルター付マスクについて	3-14
	(2) フィルターと照明光源	3-14
	関連用語の解説	3-15
	参考文献	3-15

第4章 非合焦関数解析法による高さ測定

4.1	概 要	4-1
4.2	高さ測定の原理	4-2
4.3	高さ測定の手順	4-4
4.4	実施例	4-5
4.5	仕 様	4-6
補 足		4-7
	関連用語の解説	4-8
	参考文献	4-8

第5章 低コントラスト欠陥検出

5.1	概 要	5-1
5.2	コントラスト欠陥検出手法の原理	5-2
5.2.1	現状の欠陥検出方法の問題点	5-2
5.2.2	本マニュアルで用いる検出手法の原理	5-3
5.2.3	スプライン関数の使用方法	5-4
5.2.4	欠陥候補部の補間	5-6

5.2.5	モチーフの定義と合成処理	5-6
5.2.6	補間候補の決定	5-8
5.2.7	矛盾する補間候補対の決定	5-8
5.2.8	遺伝的アルゴリズムの適応方法	5-9
5.2.9	染色体の定義	5-9
5.2.10	各データ点濃度の決定方法	5-9
5.2.11	適応度の定義	5-10
5.2.12	GAの適応度の定義	5-11
5.2.13	GAの進化方法と終了判定	5-11
5.2.14	判定	5-11
5.3	低コントラスト欠陥検出システムの使用法	5-12
5.3.1	パラメータの説明	5-12
5.3.2	操作について	5-13
5.3.3	画像入力部	5-14
5.4	実験例	5-15
5.4.1	実験条件	5-15
5.4.2	実験結果例	5-15
5.5	仕様	5-17
	関連用語の解説	5-18
	参考文献	5-19
第6章	スペックル干渉法を利用した3D変形分布計測	
6.1	概要	6-1
6.2	スペックル干渉法	6-2
6.2.1	スペックル干渉法の原理[1,2]	6-2
6.2.2	スペックル干渉法の数値化	6-4
6.3	スペックル干渉法を利用した面外変形分布計測装置の使用法	6-7
6.4	実施例	6-8
	ICチップを駆動させたときの面外変位分布計測結果(1)	6-8
	ICチップを駆動させたときの面外変位分布計測結果(2)	6-9
	ICチップを駆動させたときの面外変位分布計測結果(3)	6-10
	関連用語の解説	6-12
	参考文献	6-12
第7章	まとめ	7-1

第1章 はじめに

1.1 九州地域の経済規模と半導体産業の位置付け

九州地域は、総面積（44,453km²）および総人口（1,465万人）では全国の12%弱（2007年）、域内総生産（GDP）では48.1兆円（2005年度）で全国の9.3%を占める。このため、九州はわが国の1割経済と概括され〔1〕、GDPでは世界16位のオランダや17位のベルギーに相当する大経済圏を形成している。この内、九州地域の牽引産業と位置付けられる半導体産業については、IC生産量が全国の2割を占め（2007年）、生産数量：8,157百万個（全国比：21.4%）、生産金額：10,348億円（全国比：27.5%）に達している。半導体関連（IC、半導体素子、半導体製造装置）製品（2006年）については、出荷額：約2兆円（全国シェアは約21%）、事業所数：255社、従業員数：46,119人となっている。さらに、九州におけるIC1個当たりの生産金額は、2000年度をターニングポイントとして全国を上回って推移しており〔2〕、家庭用ゲーム機や自動車向けLSIなど、高付加価値製品生産が寄与している。

1.2 日本らしいIC製造のために

IC製造工程は、Siウエハ上に多数のIC(チップ)を作り込む「前工程」と、ウエハを1個1個のチップに切り分けた後、ICチップをパッケージに収納する以降の「後工程」の二つに大別される。この内、九州地域には、超LSIデバイス製造工場など、中堅・中小企業を中心にこの後工程を担当する多くの地域企業が展開している。

後工程には、組立工程、仕上げ工程、選別工程、バーイン工程、および検査工程などが含まれ、各工程において入念な検査を経て製品が完成される。年々進む半導体の微細化に伴って、ICパッケージに要求される検査の許容値が微小化しており、高精度で高速な検査技術に対する要求が高まっている。さらに、従来技術では対応できない新たな外観検査のニーズや人間の感覚に頼った官能検査を自動化・定量化できる技術開発が必要になっている。

海外企業との熾烈な競争環境の中で、日本らしい高品質で高信頼性の付加価値の高い半導体製品の生産力を確保することは、九州地域に期待される最重要課題のひとつである。このためには、新技術の開発・導入はもとより、その土台となる地域企業や研究機関の研究者・技術者の技術力の向上が不可欠である。これらの人材育成およびネットワーク化等を進め、地域企業の検査工程の負担軽減、高品質化、高精度化による市場競争力・国際競争力の強化が必要である。検査技術に関するこのような取り組みは、IC産業にとどまらず、電子機器産業や自動車産業における各種インスペクション技術への応用が可能である。

1.3 半導体後工程と外観検査

半導体後工程（組み立て工程）の製品検査においては、図 1.1 に示すように、製造過程の各ポイントで外観検査が行われ、最終検査では、図 1.2 および図 1.3 に示す様な QFP 型および BGA 型に代表される半導体パッケージの種々の外観検査が自動で行われている。そして、良品と判定された半導体パッケージはユーザの用途に応じて、様々なプリント基板に実装され、所定の機能を有する電子部材として使用されている。

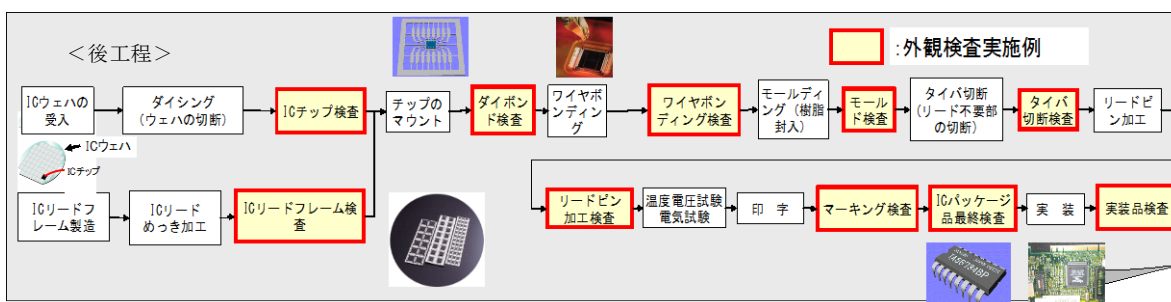


図 1.1 実装までの外観検査例

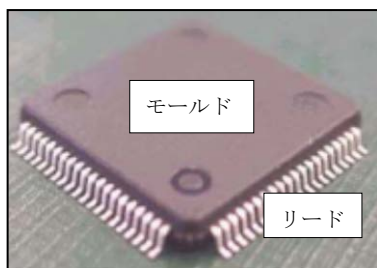


図 1.2 QFP 型パッケージ

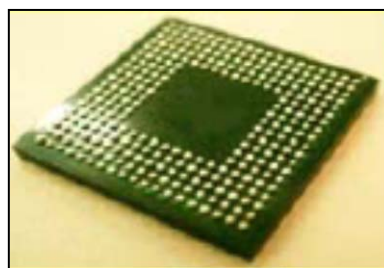


図 1.3 BGA 型パッケージ

このような半導体パッケージは、年々進む半導体の微細化に伴って、実装上、パッケージに要求される 2D-3D 諸元の許容値が微小化すると共に、新たな外観検査のニーズも上がってきている。そのため、様々な 2D-3D 検査項目をより高速で精度良く測定することを可能とする検査装置の高スループット化や、しみ、錆、傷、付着する異物などの認識精度の向上を一段と図り、これまでも増して不良品の発生を低減させることが求められている。

具体的には、検査の高スループット化については、図 1.1 の IC パッケージ品最終検査に於いて、現状、ラインセンサや変位センサ等で測定されている QFP 型パッケージ（図 1.2 参照）のリードの接地面からの浮き・接地角、パッケージの反り・接地面に対する傾き、パッケージ下面・上面の接地面からの高さ等の 3D 諸元を 2D 画像から検出する方法が希求されている。これらの課題は、BGA 型パッケージ（図 1.3 参照）にも共通しており、 bumps（白い小球群）の高さ分布、パッケージの反り等の 3D 諸元を 2D 画像から検出する方法に強いニーズがある。本方法は、現状、抜き取りで目視により行われているワイヤボンデ

ィング検査（図 1.1 を参照）－ ワイアループ高さ、ワイア間隔等の 3D 検査 － の全数自動検出に向けた課題でもある。

また、認識精度の向上については、現在、目視で行われている IC チップのマウント前の IC リードフレーム検査（図 1.1 及び図 1.4 を参照）における、しみ（メッキ漏れ、メッキ後残存薬物等）、錆、ゴミ、傷等の欠陥の自動検出の問題がある。

上記は、実装前の製品検査に関わるものであるが、プリント基板の実装（図 1.1 実装品検査を参照）を行っている中小企業では、検査装置付の高価なマウンタ（実装装置）を頻繁に更新することができずに、未だに人手による外観検査や既存の検査装置を用いているところもある。従来のカメラを用いた検査はプリント基板を真上から観察・計測する方法で行われているが、この方法では部品の有無、部品の位置、部品の向き等、実装ミスの一部しか検査できない。このため、プリント基板実装時における、半導体パッケージのリード浮き、部品浮き、クリームハンダ印刷時のパターン等の 3D 諸元を 2D 画像から検出する方法が求められている。

また、半導体パッケージは複数の熱膨張の異なる部材で構成された複合材料である。そのため、実装時や通電時（作動時）発熱による温度変化により、部材の熱膨張の違いに由来する動作不良や破損などの不具合が生じる場合がある。そこで電子部品の信頼性向上のために半導体製品の実装時や通電時（作動時）の高精度な 2D-3D 変形計測が求められている。実装時や通電時（作動時）の変形を把握することにより、動作不良や破損などの不具合が生じないパッケージの構造設計、材料選定が可能となる。



図 1.4 IC リードフレーム

1.4 研究開発課題と本事業の目標

上記のニーズに応えるためには、画像処理のみにより質の高い位置・濃淡・高さ情報を取得する方法、並びに高精度に変形分布を計測する手段を確立しなければならない。

認識精度の向上のためには、まず、焦点深度の深い鮮明な画像を撮ることが重要であり、次に、その画像から、しみ、傷等の欠陥や異物を認識するアルゴリズムを確立することが必要である。また、高スループット化のための2D画像に基づく3D検査においては、2D画像から高さ情報を読みとる手法の確立が求められる。さらに、半導体の実装時や通電時（作動時）の変形計測を行うためには、温度変化によって時間的に変化する2D・3Dの膨張・収縮現象を高精度に評価する手法が必要となる。

以上の理由により、半導体後工程（組み立て工程）の中でも現場からのニーズが特に強い、ICリードフレーム検査、ワイアボンディング検査、半導体パッケージ検査、およびプリント基板（実装品）検査を中心に、九州産業技術イノベーション創出共同体形成事業・研究開発環境支援事業「高精度・高スループット2D・3Dインスペクション技術の開発」を遂行する。本支援事業は、企業の技術課題への解決に資する試験・評価・分析方法を確立し、マニュアル化することを目的としている。本事業への参画機関としては、これらの技術課題に関連した各地域企業への対応実績および技術ポテンシャルを有する、産総研九州センター、福岡県工業技術センター、熊本県産業技術センターおよび鹿児島県工業技術センターの4機関で構成し、互いに密接に連携して事業に取り組む。具体的な研究課題、目標、および分担は以下の通りである。

i. 焦点深度の深い鮮明な撮像法の確立

既存撮像装置の最高3倍、焦点深度の深い鮮明な画像を取得可能な撮像法を確立する。

担当機関：産総研九州センター

ii. 2D画像に基づく3D情報取得法の確立

非合焦関数解析や分光位相差検出の光計測原理を用いて、平面画像から高さ情報を取得する手法を確立する。

・半導体パッケージの場合、測定視野が約20mm角のとき、測定精度 $\pm 10\mu\text{m}$ 、測定時間200ms/パッケージ、

・プリント基板（10cm角程）の場合、測定精度 $\pm 20\mu\text{m}$ 、測定時間数十秒～数分/基板、

・ワイアボンディングの場合、測定精度 $\pm 20\mu\text{m}$ 、測定時間数百ミリ秒/パッケージ、を目標とする。本手法を用いることにより、既存外観検査系の簡略化と検査時間の短縮により、検査装置の高スループット化を図る。

担当機関：産総研九州センター、鹿児島県工業技術センター

iii. 低コントラスト欠陥検出法の確立

上記、鮮明な画像に基づき、IC リードフレームに生じるしみ等に見られ、画像上、正常部との濃度差が少ない欠陥検出手法を確立する。スプライン関数を用いて、現在、目視で行っている IC リードフレームのしみ検査を 95%認識率で自動検出することを目標とする。

担当機関：熊本県産業技術センター

iv. 高精度 2D-3D 変形計測法の確立

レーザスペckル干渉法を用いて、測定物表面に沿った面内変形 (x,y 軸方向) と面外変形 (z 軸方向) を数十 nm の分解能で計測が可能な半導体パッケージの高精度動的変形計測手法を確立する。

担当機関：福岡県工業技術センター

こうして作成した本マニュアルは、関係企業や研究機関の技術者に対し、その使用を原則オープンにする。企業や研究機関の技術者等が自ら本技術マニュアルを修得することにより、技術力向上等の人材育成に資すると共に、関連企業にマニュアルの普及を進めて行くことにより、当該企業における生産性の向上や製品不具合対応力の向上に結びつけていく。また、このような普及活動を通じて、新たなニーズを掘り起こし、そのソリューション提供に取り組むことで本マニュアルのさらなる進化を図っていく。

1.5 本マニュアルの概要

本マニュアルは、上記の研究開発課題および事業目標に対応して、以下の7章から構成される。

第1章「はじめに」

第2章「多焦点撮像装置による焦点深度の深い鮮明な撮像」

第3章「分光位相差検出法による高さ測定」

第4章「非合焦関数解析による高さ測定」

第5章「低コントラスト欠陥検出」

第6章「スペックル干渉法を利用した3D変形分布計測」

第7章「まとめ」

第2章から第6章までの各章では、概要、原理、使用方法、実施例、仕様、補足、関連用語の解説、および参考文献の各項を記述することを共通様式とした。その中で、仕様については、それぞれの手法により“どれだけ測れるか”を簡潔に示したものである。

本支援事業「高精度・高スループット2D-3Dインスペクション技術の開発」は、平成20年度～21年度の2年間で計画されている。本マニュアルはその初年度分の取り組みの成果をまとめたものである。平成21年度は、20年度に開発し、マニュアル化した画像処理ソフト等について、検査項目ごとに生産現場に対応した実証試験を行い、半導体後工程におけるICパッケージの2D-3Dインスペクション技術の確立を図ると共に、マニュアルを完成させる。

参考文献

- [1] 九州経済調査協会、九州経済サマリー
<http://www.kerc.or.jp/data/download/gaikan/2009/summary.pdf>
- [2] 九州半導体イノベーション協議会、半導体関連データ
<http://www.siiq.jp/d01.html>

第2章 多焦点撮像装置による 焦点深度の深い鮮明な撮像

2.1 概 要

異なる焦点に合焦した画像を得るためには、ステージや撮像部（カメラ etc）を段階的に移動させて多数の画像を得た後、各画像にラプラシアンフィルター*などの処理を施して全ての面に合焦した画像を合成する方法が広く用いられている。この目的の装置としては、国内の多くの企業*）から提供されている。しかし、このような装置では高価で、かつ複雑な機構が用いられており、半導体プロセスのオンライン検査装置としてはほとんど使用されていない。現状では、研究や解析用ツールとしての用途に留まっている。

本マニュアルで紹介する多焦点撮像装置は、キューブ・ビームスプリッタ*と補色フィルター*を組み合わせた簡易な構成によって、3つ（または2つ）の異なる焦点面に同時に合焦した像を得る簡易・ローコストの撮像装置である。

この装置は、以下の特徴をもつため、半導体プロセスの後工程への応用が期待できる。

- ① 3つ（または2つ）の合焦位置を調整することにより、使用している対物レンズの焦点深度を擬似的に3倍（または2倍）に拡張できる。
- ② 合焦する3つ（または2つ）の像は、正確に同時刻（同時取り込み）に撮像されるものであり、高速に移動する物体の撮像では、像のずれが無い。
- ③ 離散した3つ（または2つ）の物体面に合焦できる。
- ④ 駆動部がない。（焦点位置調整のための駆動部はあるが、使用中は固定）
- ⑤ 電源が不要である。

注*）たとえば、キーエンス社

2.2 多焦点撮像装置の原理

図 2.1 に多焦点撮像装置の原理を示す。図 2.1(a) は、高さの異なる 3 つの被写体面に焦点を合わせた場合の結像面位置を 3 つの色で示した。レンズの結像関係の式より、赤・緑・青の 3 つの点に同時に合焦させることはできない。このため、一般の全焦点顕微鏡は、対物レンズや撮像装置、または物体を移動させて、多数の合焦像を得る方法を用いている。しかし、図 2.1(a) に示すように、何らかの方法によりレンズ主面から結像面までの距離を自由に変化させることができれば、高さの異なる 3 つの被写体面からの反射光を同一の結像面に合焦させることができる。

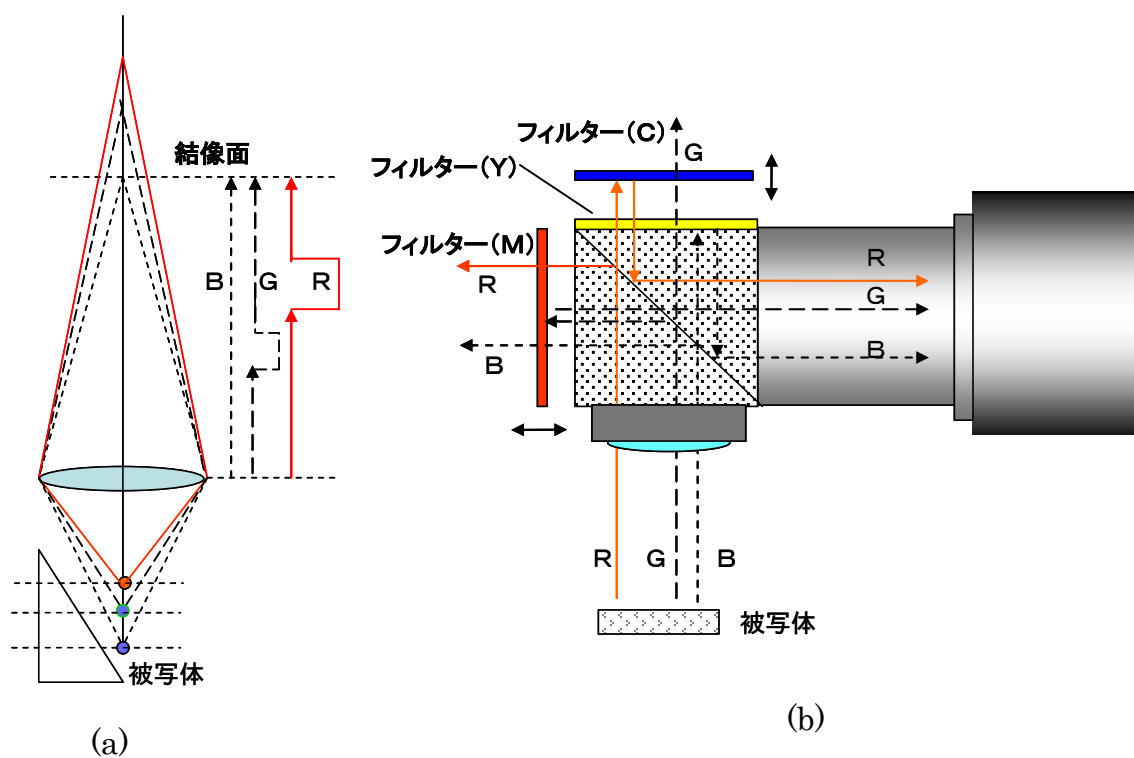


図 2.1 多焦点撮像装置の原理概要図

この光路長の変化を実現する方法としては種々考えられるが、その中でもっとも簡易で調整が容易な方法を図 2.1 (b)に示す(他の方法は、特許文献 特開 2007-295326 号を参照)。図 2.1(b)において被写体からの反射・散乱光は対物レンズを通してキューブ・ビームスプリッタに入り、透過光と反射光に分かれて進む。反射光はマゼンダ・フィルター (M) によって緑色の光の成分のみが反射され、ビームスプリッタを通過して CCD*面に結像される。マゼンダ・フィルター (M) は、その位置を左右方向に移動させることができるため、光路長を調整することができる。よって、対物レンズや CCD 面を移動させることなく、自由な位置に合焦させることができる。一方、キューブ・ビームスプリッタを透過した光は、イエロ・フィルター (Y) によって青色成分のみが反射され、緑色および赤色成分はそれぞれ透過する。イエロ・フィルター (Y) はビームスプリッタによって固定されているため、青色成分の光はレンズと CCD の位置によって固定された面に合焦する。イエロ・フィルター (Y) を透過した光はシアン・フィルター (C) によって赤色成分のみ反射される。シアン・フィルター (C) はマゼンダ・フィルター (M) と同様に移動可能なため、赤色成分の光路長は任意に調整可能である。反射された青色成分と赤色成分はビームスプリッタで反射されて CCD 面に結像される。このように 1つの固定フィルターと 2つの稼動調整の可能なフィルターを用いて、高さの異なる 3つの被写体面の任意の位置に合焦した画像を同時に撮像できる。

多焦点撮像装置では、3つの色成分について個々にその光路長を調整することによって CCD 面に同時に結像させることをひとつの特徴としている。このため撮像装置には、カラー CCD カメラを使う必要がある。CCD の RGB の画素を用いて、それぞれに合焦した画像を形成させている。よって、カラー CCD で得られる画像から、R、G、B 成分の画像を分離し、画像処理 (アフィン変換* : 倍率や平行移動・回転) した後に、画面合成する必要がある。この処理については「2.4 多焦点撮像装置の画像処理」で述べる。

また、3色について色毎に別々の画面を構成しているため、フィルターの分光特性が CCD の分光特性とほぼ一致している必要がある。図 2.2 にフィルターの分光特性を、図 2.3 に CCD の分光感度特性の例をそれぞれ示す。使用する CCD の分光感度特性に一致するフィルターの選択が、本装置のひとつのポイントと言える。

フィルターの分光透過特性 (図 2.2) および CCD の分光感度特性 (図 2.3) からわかるように、それぞれの赤色成分、緑色成分、および青色成分は互いに一部の波長域に重なりを持っている。例えば、図 2.3 に示すように CCD カメラの R、G、B の各画素子のもつ分光特性については、緑色成分は赤色成分および青色成分と一部の波長域に重なりを持つために、この緑色成分の一部の重なった波長域の光については R および B の各画素子で受光されることを示している。本装置では色によって焦点位置を区別しているため、色が混ざり合うと、焦点がボケた画像が得られることになる。この効果は一般の CCD やフィルターでは除くことができない。これを回避するためには、照明光に工夫が必要である。

現在、照明光として低消費エネルギーの LED が多く使用されているため、ここでは白色

LED を使用した場合について述べる。白色 LED は 3 種類が販売されている。紫外 LED を発光させて蛍光膜を照射し、その発光によって白色光を得る方法、同様に青色 LED を用いて、白色光を得る方法がある。これらは可視域全体に広がる連続光であるため、上記問題を解決できない。一方、R、G、B の 3 つの LED を 1 つのパッケージに収めた白色光源が販売されている (図 2.5, 2.6)。これは、それぞれの LED の発光特性を重ね合わせた発光分布をもっており、図 2.6 のように RGB ごとに狭帯域の照射光を得ることができる。この LED を用いることによって、上記のフィルターによる重なりを低減できる。その他、連続スペクトルに、狭帯域フィルターを施す方法や、高価になるがフィルターを蛍光顕微鏡などで使われている狭帯域フィルターに変更するなどの手法が考えられる。

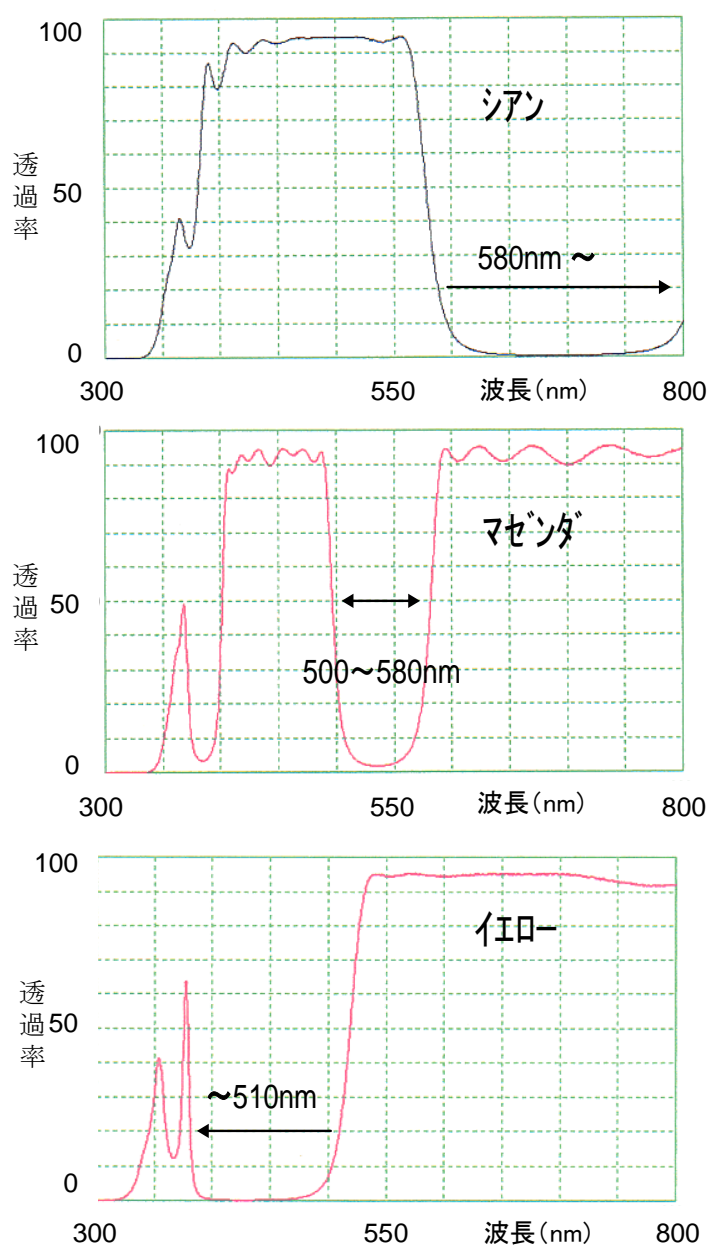


図 2.2 フィルターの分光透過特性

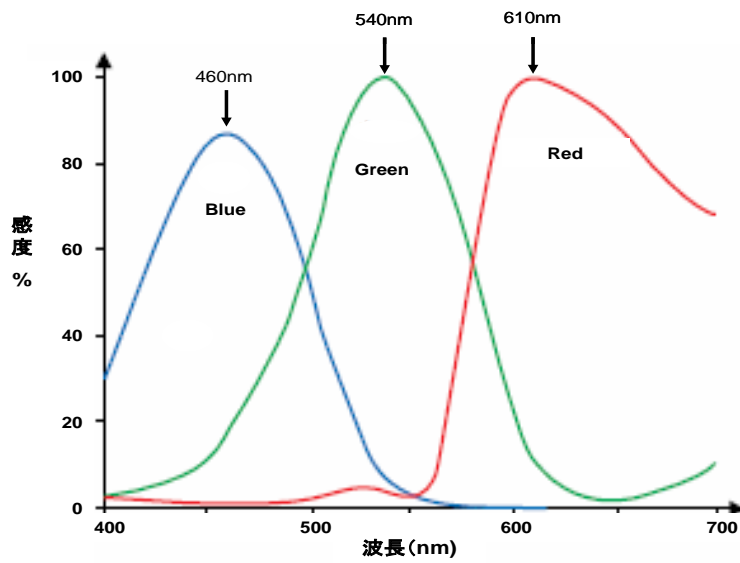


図 2.3 CCDの分光感度特性の例



図 2.4 単板式カラーCCD ベイヤ型素子配列の例

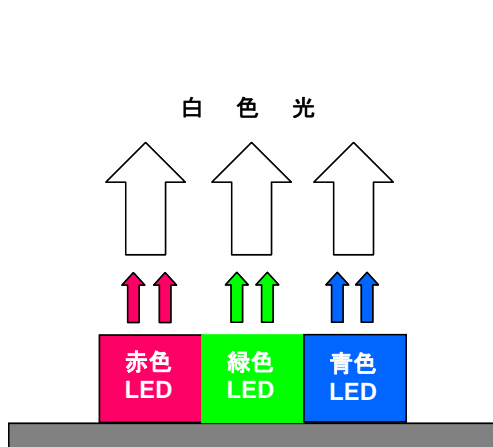


図 2.5 赤・緑・青色 LED による白色 LED

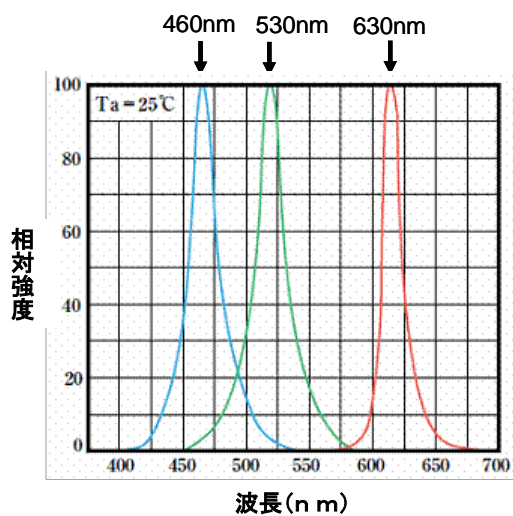


図 2.6 白色 LED による発光スペクトル

2.3 多焦点撮像装置の使用法

2.3.1 2焦点撮像装置の例

図 2.7 は高さの異なる 2ヶ所に同時に焦点が合った画像を得る装置の構成図である。

〔操作手順〕

- ① レンズの光軸に合わせ、被写体を適切な位置に置く。
- ② 被写体の P_0 の位置に赤成分の光で焦点が合うように装置と被写体の距離を調節する。
この時、モニターで赤成分の分解画像を見ながら行う
- ③ ねじを回しマゼンタ・フィルター(M)の位置を調節して P_0 の位置に緑成分の光で焦点が合うようにし、この位置を基準位置とする。この時、モニターで緑成分の分解画像を見ながら行う。
- ④ 続いてマゼンタ・フィルター(M)を被写体から離れる方に移動させ P_1 に焦点を合わせる。
(逆方向に移動させると P_2 に焦点が合う) この時、モニターで緑成分の分解画像を見ながら行う。
- ⑤ この状態で撮像を行うと P_0 の位置に焦点が合った赤成分画像と P_1 または P_2 に焦点が合った緑成分画像が同時に得られる。

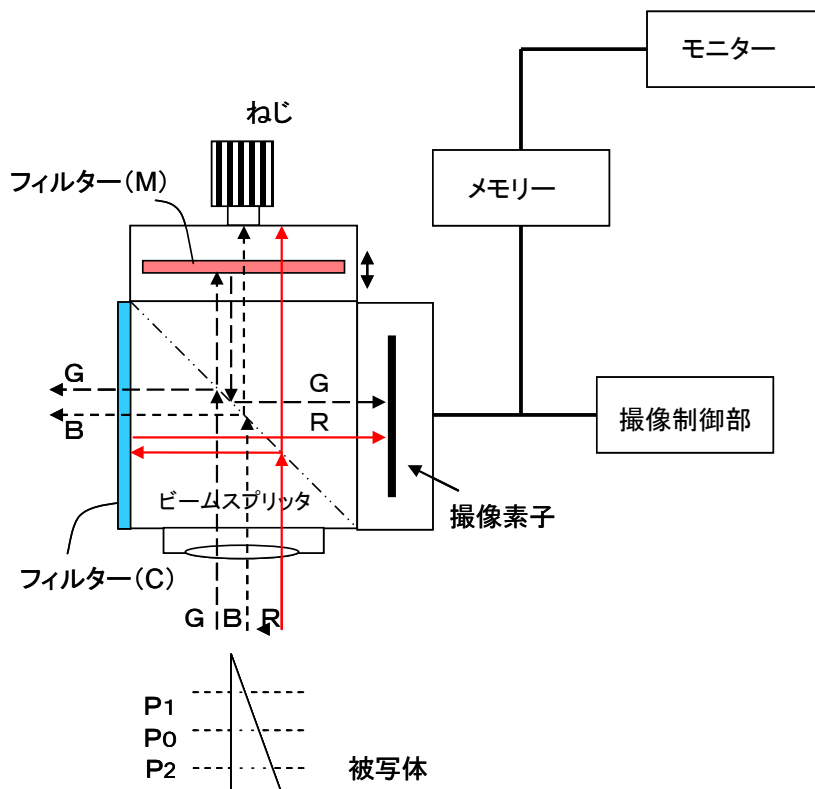


図 2.7 2焦点撮像装置の概要と合焦点の取得法

2.3.2 3焦点撮像装置の例

図2.8は高さの異なる3ヶ所に同時に焦点が合った画像を得る装置の構成図である。

〔操作手順〕

- ① レンズの光軸に合わせ、被写体を適切な位置に置く。
- ② 被写体の P_0 の位置に赤成分の光で焦点が合うように装置と被写体の距離を調節する。
この時、モニターで赤成分の分解画像を見ながら行う。
- ③ ねじAを回しマゼンタ・フィルター(M)の位置を調節して P_0 の位置に緑成分の光で焦点が合うようにし、この位置を基準位置とする。この時、モニターで緑成分の分解画像を見ながら行う。
- ④ 同様にねじBを回しイエロ・フィルター(Y)の位置を調節して P_0 の位置に青成分の光で焦点が合うようにし、この位置を基準位置とする。この時、モニターで青成分の分解画像を見ながら行う。
- ⑤ ねじAでマゼンタ・フィルター(M)の位置を調整し緑成分の光で P_1 に焦点を合わせる。
- ⑥ 同様にねじBでイエロ・フィルター(Y)の位置を調整し青成分の光で P_2 に焦点を合わせる。
- ⑦ この状態で撮像を行うと P_0 、 P_1 、 P_2 の3ヶ所に焦点が合った画像が同時に得られる。

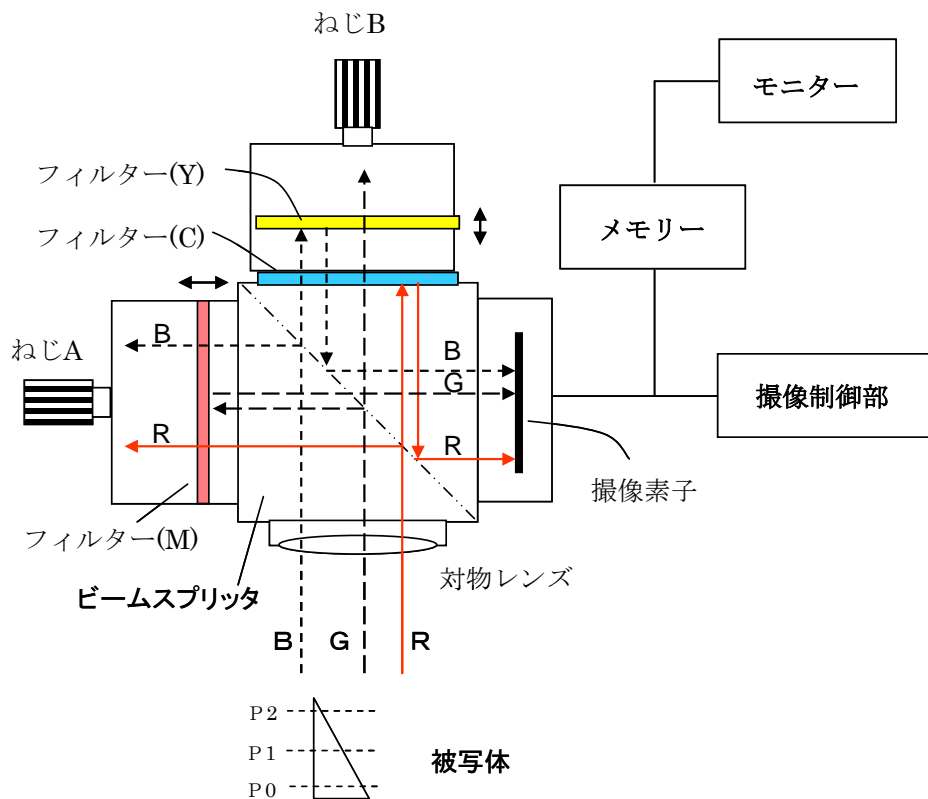


図 2.8 3焦点撮像装置の概要と合焦像の取得法

2.4 多焦点撮像装置の画像処理

多焦点撮像装置で得られる画像は、全焦点カメラと異なり 2 点または 3 点に合焦しているため、全焦点カメラとその合成法は多少異なるが、基本的な画像合成手順は同じである。図 2.9 に多焦点画像を得るフローを示す。カメラより画像を取得した後、各色画像に分離し 3 画像のうち 2 画像（例えば、青、緑画像）は、微分フィルターなどを通し、合焦領域を判断する。それぞれの合焦領域を加算し、残りの領域をもう一枚の画像（例えば赤画像）で埋めることによって合成画像が得られる。（多焦点撮像装置は、非合焦領域が含まれているため、全焦点カメラのように合焦領域のみを加え合わせた場合に、画像が抜ける領域が生ずる）また、各色画像は画像倍率が異なるため、必要に応じてアフィン変換を行う。

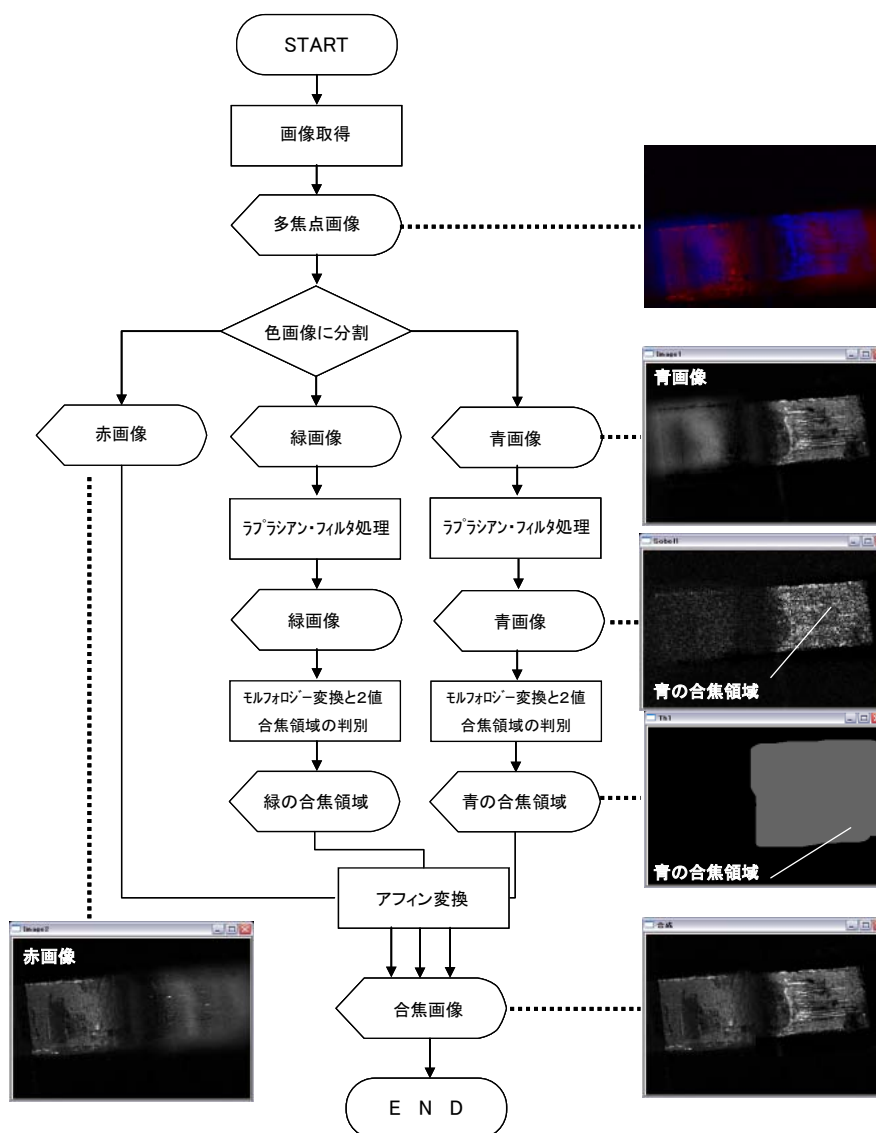


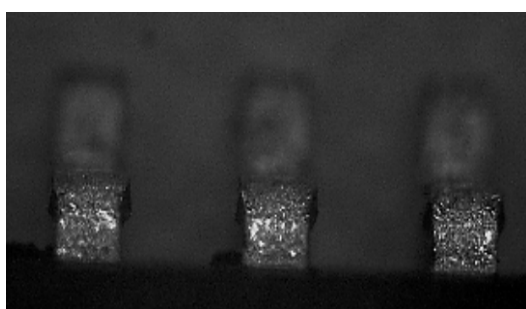
図 2.9 画像処理のフローチャート及び画像

2.5 実施例

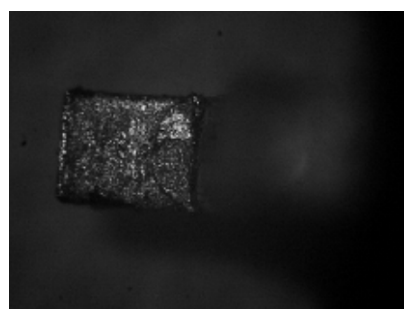
多焦点撮像装置によって得られた画像例（IC リード、ねじ、ワイヤボンド、プリント基板）を示す。

(1) IC リード部

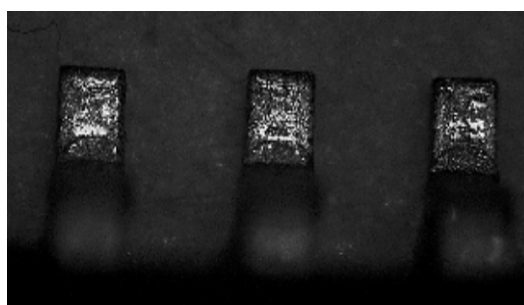
図 2.10 と図 2.11 は多焦点撮像装置で同時に取得した赤画像と青画像とを画像合成処理により合成した画像である。



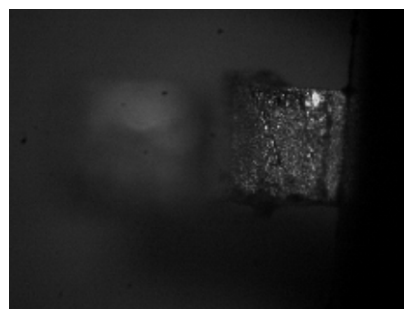
リード部の肩口に合焦した赤画像



リード部の先端に合焦した青画像



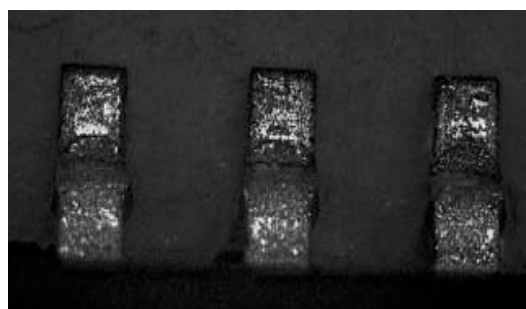
リード部の先端に合焦した青画像



リード部の肩口に合焦した赤画像

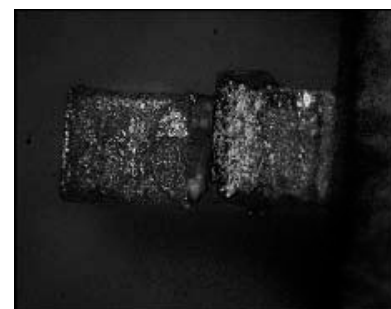
合成処理

合成処理



合成画像

図 2.10 IC リードの多焦点像 (1)



合成画像

図 2.11 IC リードの多焦点像 (2)

(2) ねじ

図 2.12 は、ねじの先端と頭部に合焦させた画像である。合焦位置の差は約 30mm である。但し、画像では見えないが、先端と頭部の間は焦点が合っていない。

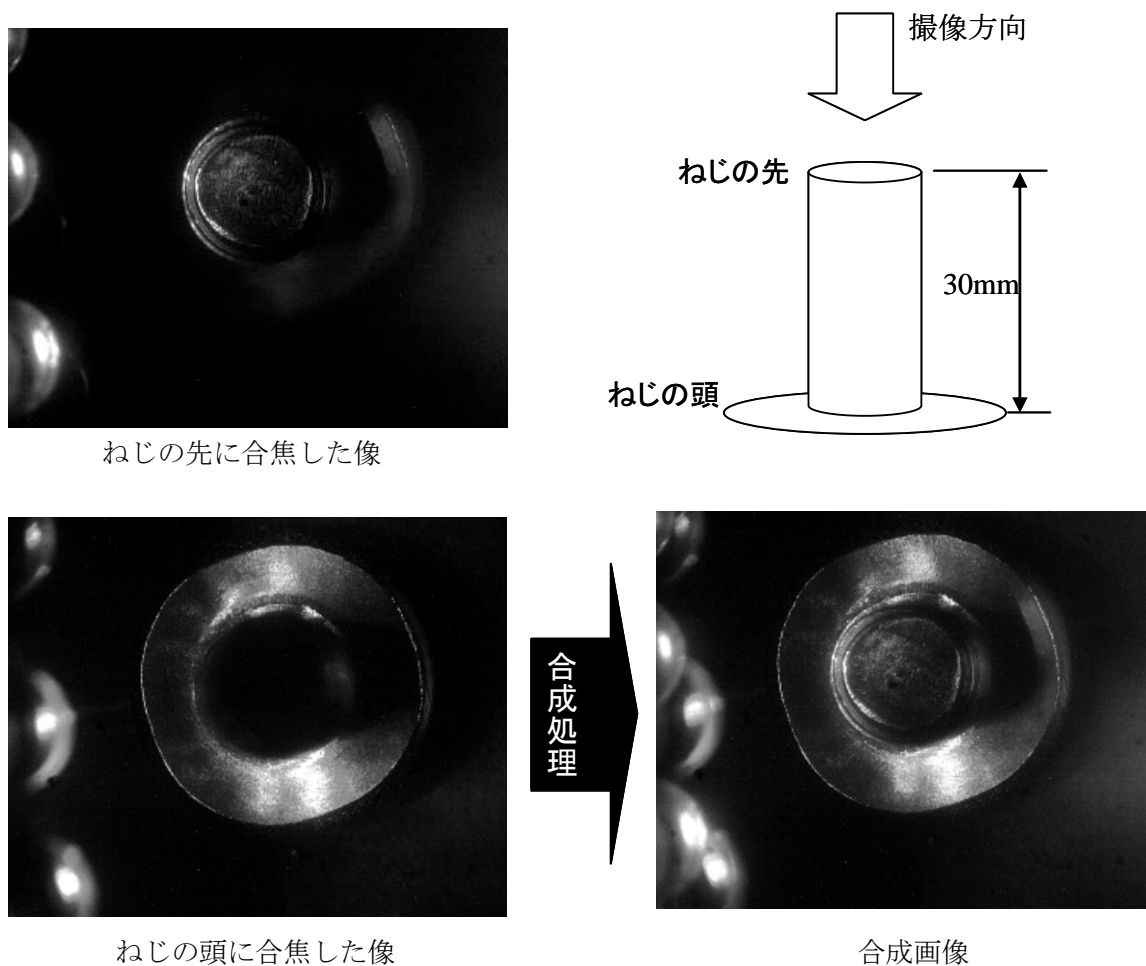


図 2.12 ねじの先端と頭部の多焦点像

(3) ワイヤボンド

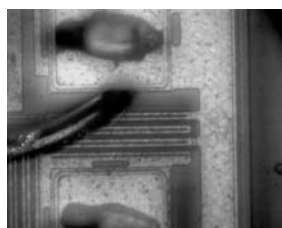
IC のワイヤボンド*部の 2 焦点像。(ワイヤは一部、切れて浮き上がっている) 右下の画像は、中間のワイヤを跳び越して、電極と上側のワイヤに焦点を合わせた 2 焦点像である。尚、これらの画像は多焦点装置で得られる未処理の画像であり、画像合成を行っていない。高倍率の場合、未処理でも短焦点画像より良好な画像が得られる。

【単焦点画像】

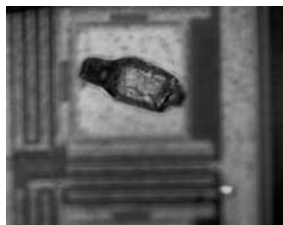
【2 焦点画像】



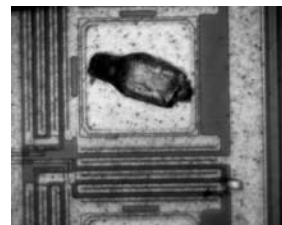
ワイヤに焦点が合ったもの



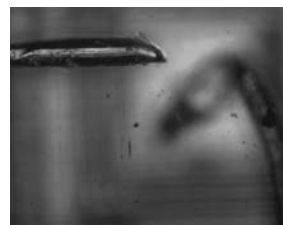
ワイヤと電極に焦点が合ったもの



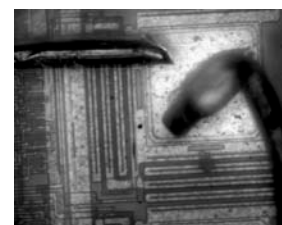
電極接合部に焦点があったもの



電極と接合部に焦点が合ったもの



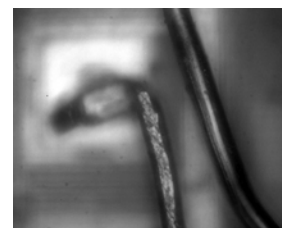
ワイヤに焦点が合ったもの



ワイヤと電極に焦点が合ったもの



上のワイヤに焦点が合ったもの



異なる2本のワイヤに焦点が合ったもの



上のワイヤと電極に焦点が合ったもの

図 2.13 IC のワイヤボンド部の多焦点像 (未合成処理画像)

(4) プリント基板

図 2.14 及び図 2.15 はプリント基板の画像の多焦点像で、それぞれ 6 枚の画像を合成している。

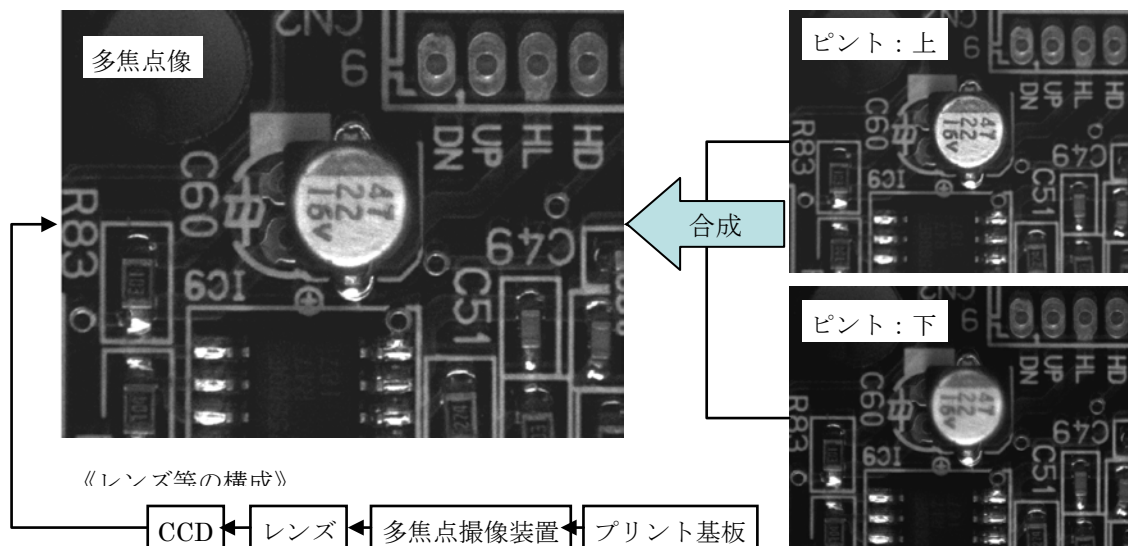


図2.14 プリント基板の多焦点像 (1)

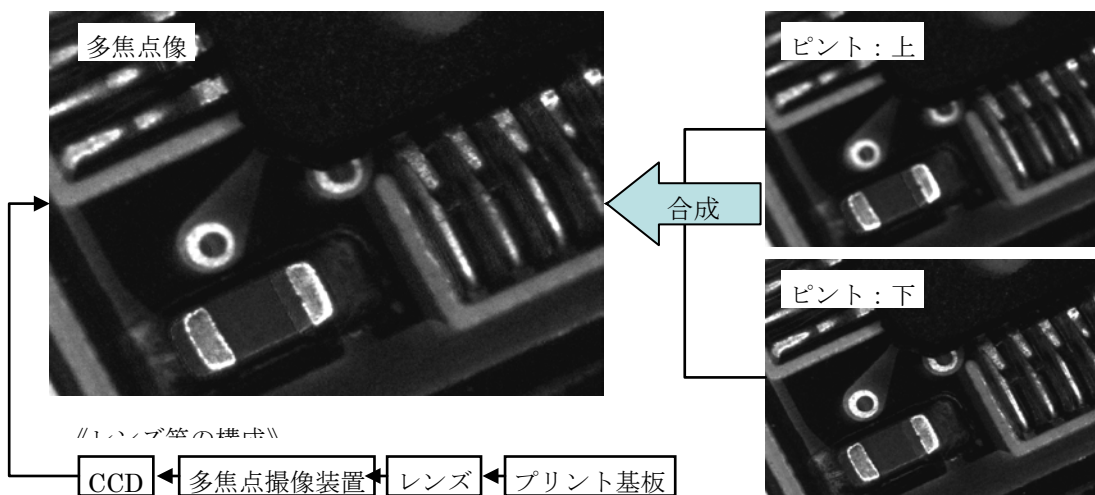


図2.15 プリント基板の多焦点像 (2)

2.6 仕様

製品化された多焦点撮像装置 (MFU) の写真を図 2.16 に示す。ここで述べる仕様は MODEL MFU2 に関するものである。



図 2.16 MODEL MFU 2

2.6.1 低倍率の場合

焦点深度 (DOF) を測定する光学系を図 2.17 に、各色画像で得られる DOF チャート像を図 2.18 に示す。赤画像 1, 2, 3 は、MFU2 ユニットのフィルター位置 (調整ネジ) を移動して得られた画像である。また、青、赤画像の焦点深度*とフィルター位置の移動による合焦位置の変化を図 2.19 に示す。

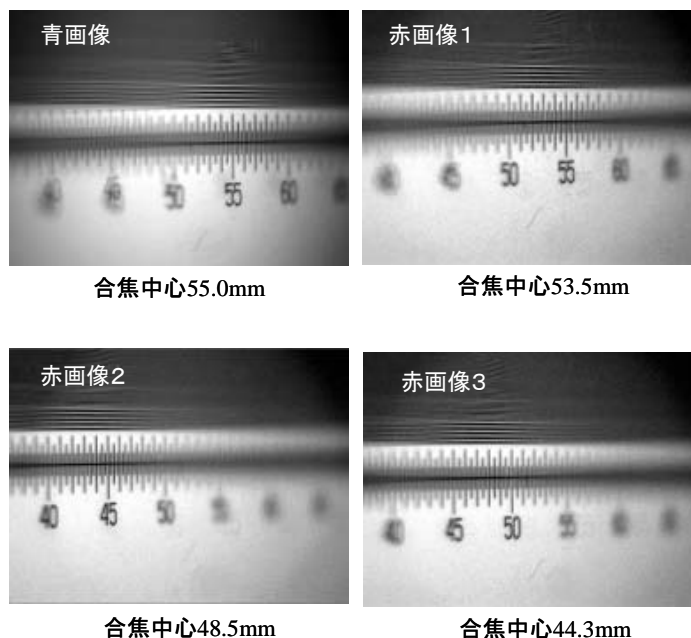
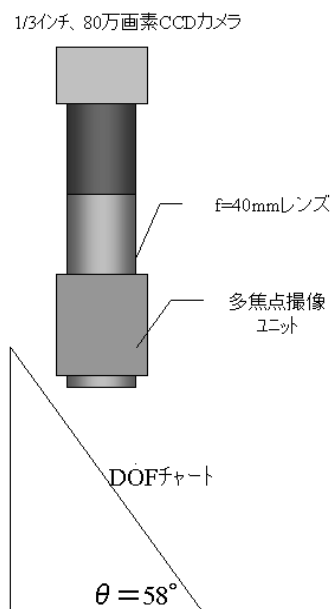


図 2.17 測定装置 (低倍率)

図 2.18 各位置の DOF チャート像

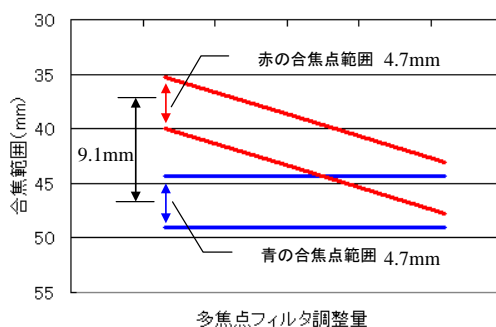


図 2.19 フィルター調製量と合焦範囲

2.6.2 高倍率の場合

顕微鏡用対物レンズを用いた場合の DOF 測定光学系を図 2.20 に、測定結果を図 2.21 に示す。

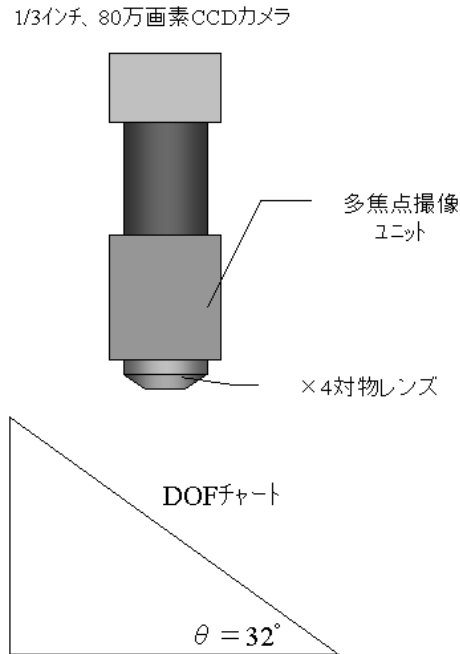


図 2.20 測定装置（高倍率の場合）

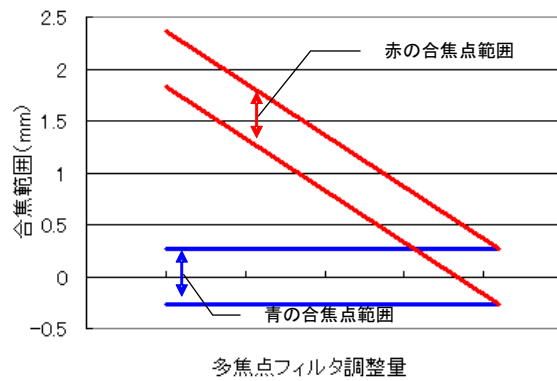


図 2.21 フィルター調整量と合焦範囲

2.6.3 多焦点撮像ユニットの仕様

【多焦点撮像ユニット (MODEL MFU2) の焦点深度仕様】

視野 (mm)	12.7	3.4
実倍率	0.37	1.4
焦点深度(mm)	5	0.5
焦点深度の最大移動量(mm)	9.1	2.1

※ 落射照明は被写体（試料）と MFU の間に入れる

補 足

(1) 基本的な多焦点撮像装置の構成

図 2.A1 はビームスプリッタ、ミラー、原色フィルター、光路長変更用素子*によって構成した多焦点撮像装置の例である。この場合、光路長を調整するために屈折率が 1 より大きい透明材料（例えばガラス）を所望の厚さにして各色光のパス上に挿入している。このため、光路長の変更はできないが、原色フィルターを用いて焦点位置を固定した用途に、簡易に構成できる。1つのパッケージに固定できるため、振動が多い場所での使用には有効である。

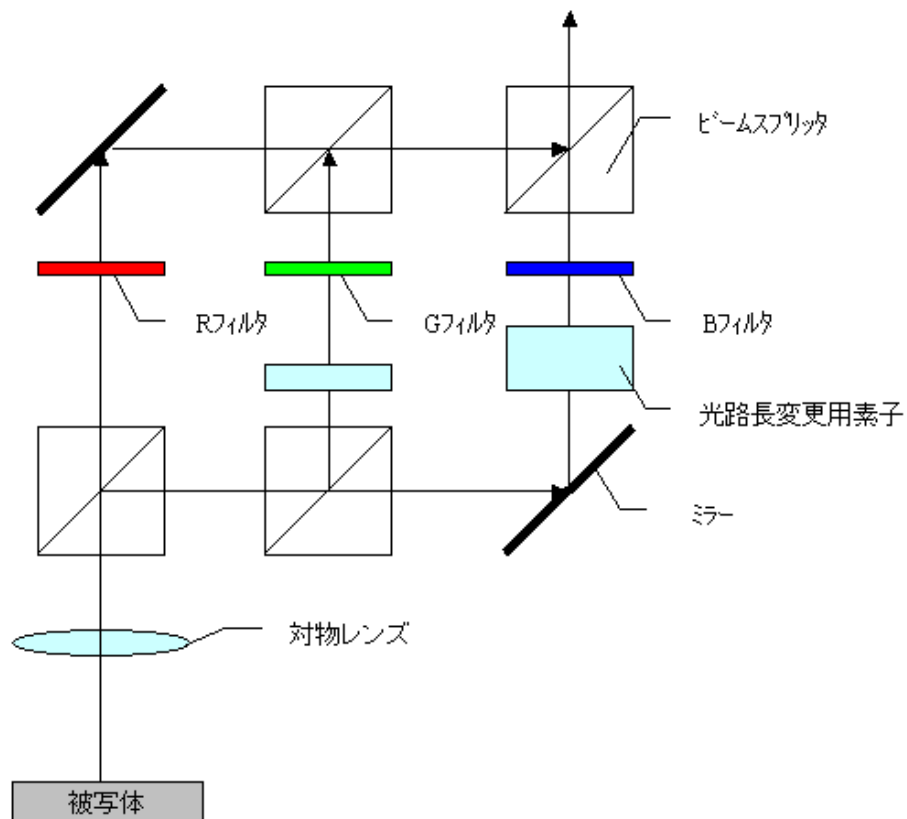


図 2.A1 光路長変更用素子を用いた多焦点撮像装置の構成例

(2) 多焦点撮像装置の高さ測定への応用

図 2.A2 は被写体の高さを測定する機能を備えた例である。
パルスモータでフィルターを移動させることにより光路長を調整する機能を備えていて、パルスモータの回転量から高さを測定するものである。尚、合焦位置を判断する画像処理などが必要である。

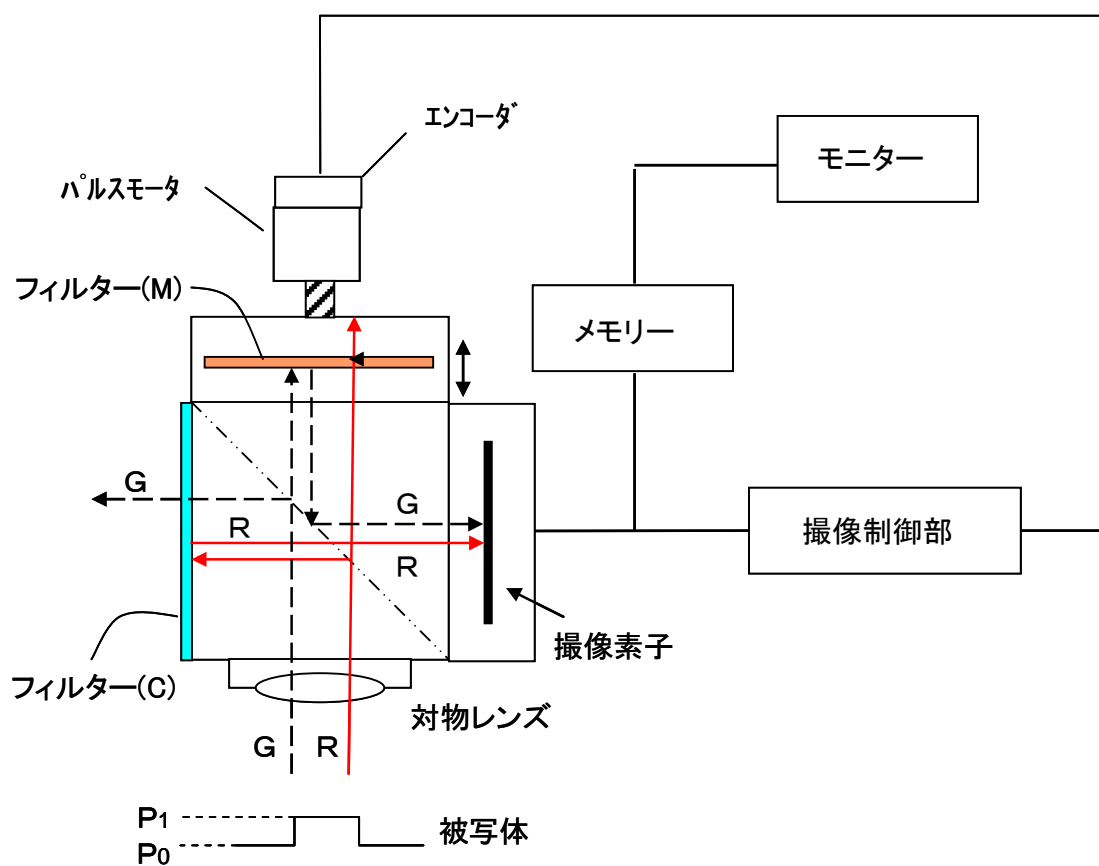


図 2.A2 多焦点撮像装置を用いた高さ測定法の概要図

関連用語の解説

ラプラシアンフィルター

鮮鋭化フィルターの一つで原画像の二次微分を求め、原画像からこの結果を差し引くことにより、エッジの部分の濃度の変化を強調し鮮明な画像を得ることができる。

ビームスプリッター

一つのビームを二つ、もしくはそれ以上の分離したビームに分割する光学器具。簡単なビームスプリッターは、異なった方向にビームの一部が変えられるようにある角度でビームに挿入した極めて薄いガラス部材から成っていて、更に複雑な形では、二つの直角プリズムをそれらの底面同士接合しているものがある。

補色フィルター

可視光のうち特定の波長域を通過させ特定の波長域を反射するフィルター。原色フィルターと補色フィルターがある。原色フィルターは光の三原色と呼ばれる赤 (R)、緑 (G)、青 (B) で構成されたものであり、補色フィルターは三原色の補色にあたるイエロー、マゼンタ、シアンを使っている。一般的には、原色フィルターの方が発色は良く再現性に優れるが、補色フィルターは感度が高く落ち着いた色合いになりやすい。

CCD

Charge Coupled Device (電荷結合素子) の略。光を電荷に変換する半導体の一種で、デジタルカメラの撮像素子に多く用いられる。RGB 画素の配置はある行を RG、RG、次の行を GB、GB としたベイヤ型素子配列をしたものが多く使用されている。

撮像素子

レンズから入ってきた光を電気信号に変換する電子部品のことである。撮像素子の代表的なものとしては、CCD イメージセンサーや CMOS イメージセンサーなどがある。

アフィン変換

幾何学的な線型変換と平行移動の組み合わせによる図形や形状の移動、変形方式。4×4 の行列演算で表現できる移動、回転、左右反転、拡大、縮小、シアアの座標変換。アフィン変換は元の図形で直線上に並ぶ点は変換後も直線上に並び、平行線は変換後も平行線であるなど、幾何学的性質が保たれる変換方式。

ワイヤボンド

半導体チップの電極端子とリードフレームのインナーリードとの間を直径 25 μ 程度の金線で接続すること。

焦点深度 (DOF/Depth of Focus)

被写体の点に焦点を合わせた時、ぼけを感じない範囲のこと。

光路長変更用光学素子

屈折率の大きい透明な板状部材からなり、厚さを d 、屈折率を n とすれば光路長は nd となり $d(n-1)$ だけ長くなる。光路長変更手段のひとつ。

参考文献

- [1] 坂井一文：“多焦点撮像装置”，産業技術総合研究所 特開 2007-295326
- [2] 坂井一文：“多焦点撮像装置”，産業技術総合研究所 特開 2008-059121
- [3] 坂井一文：“多焦点画像を撮像する方法及び多焦点撮像装置”，
産業技術総合研究所 特開 2008-059120

第 3 章 分光位相差検出法による高さ測定

3.1 概 要

半導体や電子部品の外観検査では、リードの有無、リードの曲がり、モールドの欠け、マークの有無などの 2 次元検査の他に、リードの浮きやコプラナリティなどの 3 次元検査が行われている。前者は、画像処理の発達によって多くの課題が解決されてきたが、3 次元検査では解決されていない課題が多く、特にインポケットでの高さ測定は、十分な性能が得られていない状況である。また、情報端末の薄型化によってプリント基板の反り、基板から部品上面までの高さ（全高測定）などの計測が要求されている。

IC パッケージのリードの接地面からの浮き、上面・下面の高さ、バンプ*の高さ、ワイヤループ*の高さなどの測定にはラインセンサ*、レーザ変位計*を用いた三角測量法、共焦点法、白色干渉法*などがある。このうち共焦点法や干渉法を用いた方法は高精度であるが、製造工程では実用的ではない。また、三角測量法（レーザー変位計など）はケースがレーザー・ビームの障害になるためインポケットでの検査はできない。

本マニュアルで紹介する高さ測定装置は、位相差検出法と色情報とを組み合わせた方法で、カラー CCD 撮像によって得られる異なる色の輝度位置の距離から対象物の高さ、または深さを測定するものである。

この装置は次のような特長を持ち、半導体プロセスの後工程への応用が期待できる。

- ① 一回の撮像で対象物の高さを測定できる。
- ② 検査に要する時間を短くしスループットを向上できる。
- ③ インポケット検査が可能である。
- ④ 検査装置の構成を簡単なものにできる。

3.2 高さ測定の原理

図 3.1 に分光位相差検出法による高さ測定の原理を示す。概略的にはナイフエッジ法*と三角測量法を組み合わせたものであり、位相差検出法と同じ光学的手段を利用して高さの測定を行うものである。

図 3.1 (a) はレンズの直後にフィルター付マスクを配置し、物体平面の像を基準像平面上に結像したものである。(レンズの焦点距離を f 、レンズから物体平面までの距離を a 、レンズから基準像平面までの距離を b とする) このような場合、対象物からの光はそれぞれのフィルターで透過され、基準像平面上に結像することになる。

一方、図 3.1 (b) はそれぞれフィルターを透過した光が基準像平面より Δb だけ離れた位置で合焦した図である。この場合、基準像平面 (CCD 位置) ではそれぞれのフィルターを透過した光は一つの画像にはならず、距離 d だけ離れた色画像が得られる。

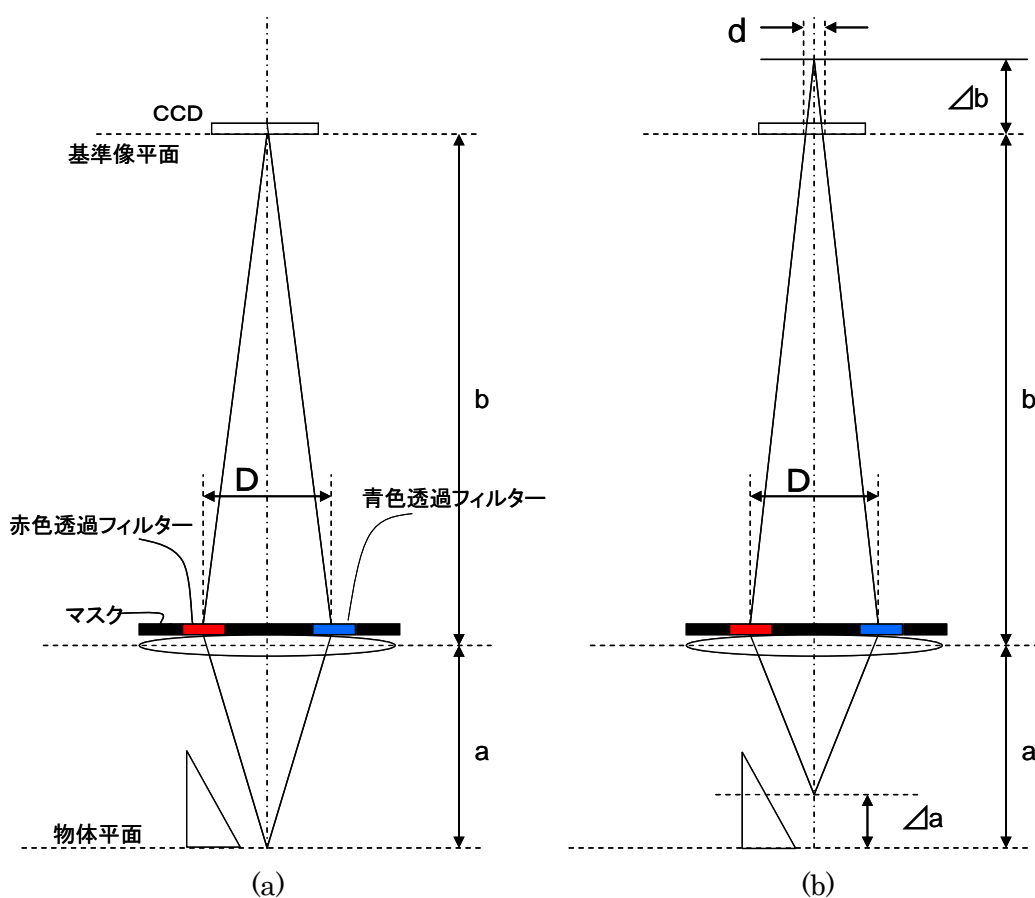


図 3.1 高さ測定の原理概要図

図 3.2 はフィルター付マスクの平面図である。マスク自体は遮光性の材料であり、図のように光軸に対し一対の窓を設けフィルターが装着されている。ここでは赤色透過フィルターと青色透過フィルターとし、中心間距離をDとする。

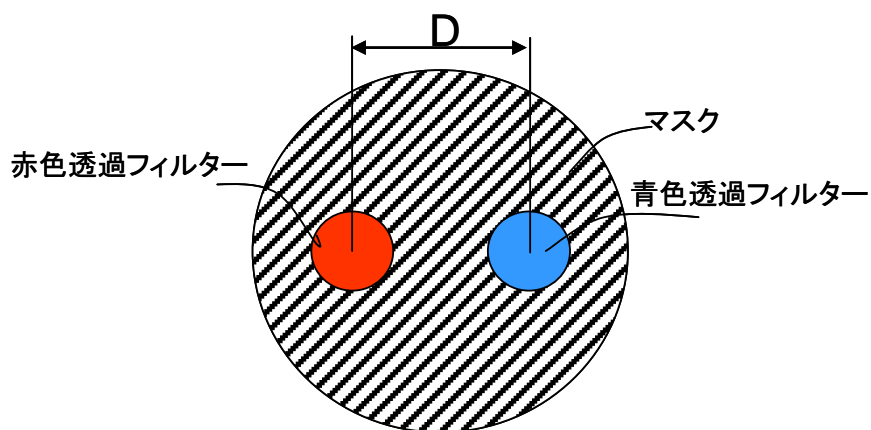


図 3.2 フィルター付マスクの平面図

図 3.1 (a) において、 a 、 b 、 f は結像関係にあるから

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (3.1)$$

となる。

同様に、図 3.1 (b) より

$$\frac{1}{a - \Delta a} + \frac{1}{b + \Delta b} = \frac{1}{f} \quad (3.2)$$

が成り立つ。変形して

$$\frac{1}{a \left(1 - \frac{\Delta a}{a} \right)} + \frac{1}{b \left(1 + \frac{\Delta b}{b} \right)} = \frac{1}{f} \quad (3.3)$$

が得られる。 Δa と Δb は a 、 b に比較して非常に小さいとして近似すると

$$\frac{1}{a} + \frac{\Delta a}{a^2} + \frac{1}{b} - \frac{\Delta b}{b^2} \approx \frac{1}{f} \quad (3.4)$$

が得られる。よって式 (3.4) と式 (3.1) から

$$\Delta b \approx \frac{b^2}{a^2} \Delta a \quad (3.5)$$

の関係式が得られる。

図 3.1 (b) において、光が基準像平面を通過する時の距離 (CCD での距離) を d とすると、距離 d と幅 D をそれぞれ底辺とする三角形の相似関係と式 (3.5) から

$$d = \frac{\Delta b \cdot D}{b + \Delta b} \approx \frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2 \Delta a \cdot D}{b + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \Delta a} = \frac{b \Delta a \cdot D}{a^2 + b \Delta a} \approx \frac{b}{a^2} \Delta a \cdot D \quad (3.6)$$

が得られる。

ここで式 (3.6) により、距離 d は微小な高さ Δa に比例することが分かる。また、 d と Δa との比例関係を示す換算係数は a 、 b 、 D の値から求めることができるが、本マニュアルでは測定によって換算係数を求めている。その求める方法は「3.3 高さ測定装置の使用法」で詳しく述べる。

図 3.1 (b) において基準像平面上に距離 d だけずれた色の像が形成される。このような結像位置から、はずれた像は若干のボケが生じるが輝度確認ができればよく、およそ焦点深度の 3 倍程度までは測定できる。対象物としては、面が基準となる平面を有し、その中に凸部、凹部が存在するものであり、リード、ボール、バンプ等が該当する。

3.3 高さ測定装置の使用方法

3.3.1 高さ測定のフローチャート

図 3.4 に分光位相差検出法による高さ測定のフローを示す。測定の前処理として検量線を測定し、換算係数を求める必要がある。換算係数は式 (3.6) に示すように光学系（対物レンズ、フィルター、倍率など）によって決定されるため、光学系の変更を行った場合のみ必要となる。（換算係数は色画像間距離を高さに変換するために必要な係数である。詳細は 3.3.2 を参照のこと）画像取得後、フィルターに応じて色画像（図 3.4 では、青と赤）に分離し、測定する箇所の画像間距離（画素）を求め、換算係数を掛けて高さを算出する。

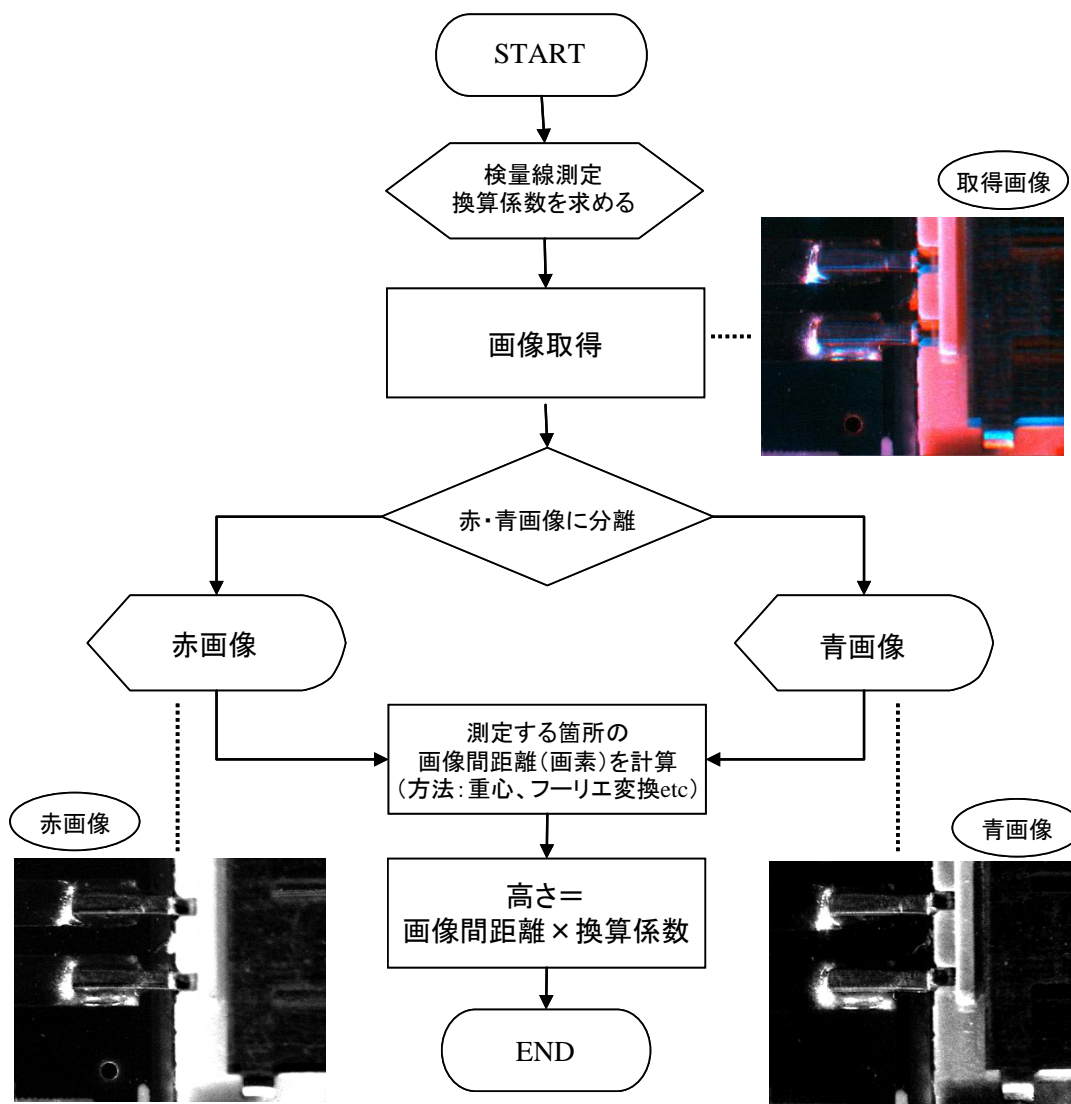


図 3.4 高さ測定のフローチャート

3.3.2 換算係数の求め方

図 3.5 は分光位相差検出法を用いた装置の構成例である。最初に、異なる色で分離した画像間距離 d と凸部の高さとの換算係数を求めるために下記操作を行う。

- ① 載置ステージ面に識別部（格子模様）^{*)1} を付ける。この時、対象物は載せない。
- ② ロックを解除し、ノブの調整により撮像装置を上下に移動させ、載置ステージ面に焦点を合わせる。終了後、ノブを再ロックする。
- ③ この状態を保持したまま、移動調節手段^{*)2} で載置ステージを上を移動させて載置ステージ面を撮像する。
- ④ 得られた画像を赤・青画像に分離し、格子の各点の距離 d を画像の座標位置から求める。
- ⑤ 載置ステージの移動距離を記録する。
- ⑥ ④、⑤を繰り返し実行し、画像間距離 d と載置ステージの距離との関係データを求める。
- ⑦ 取得したデータにより各点の検量線を求め換算係数を算出する。（図 3.6 にパルスステージの移動量と計測値（画面中央）の関係を示す）

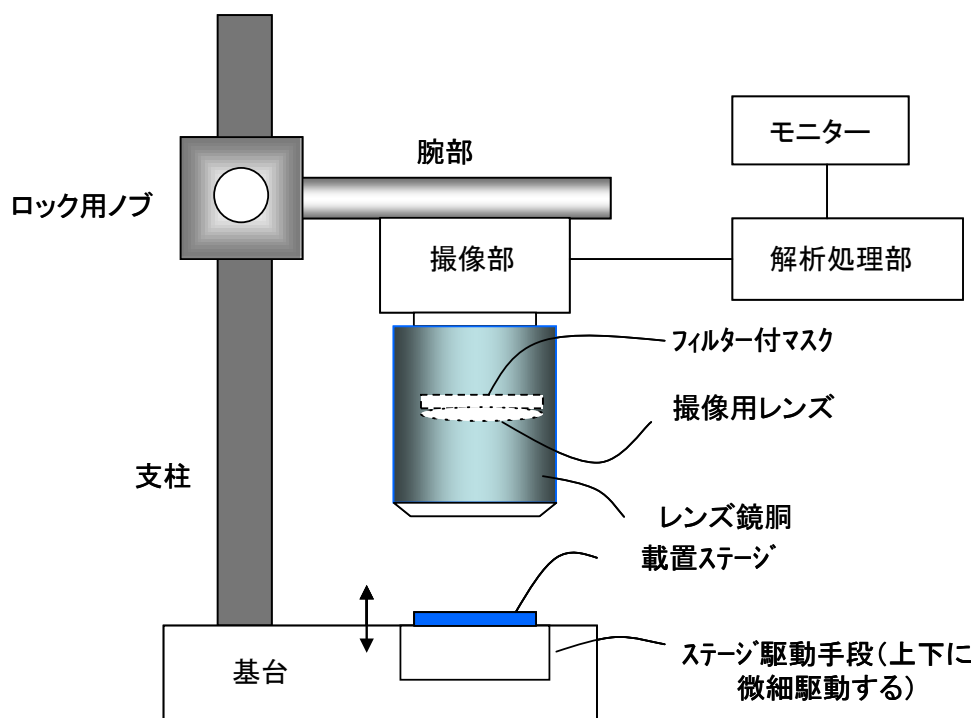


図 3.5 分光位相差検出法による高さ測定装置の構成図

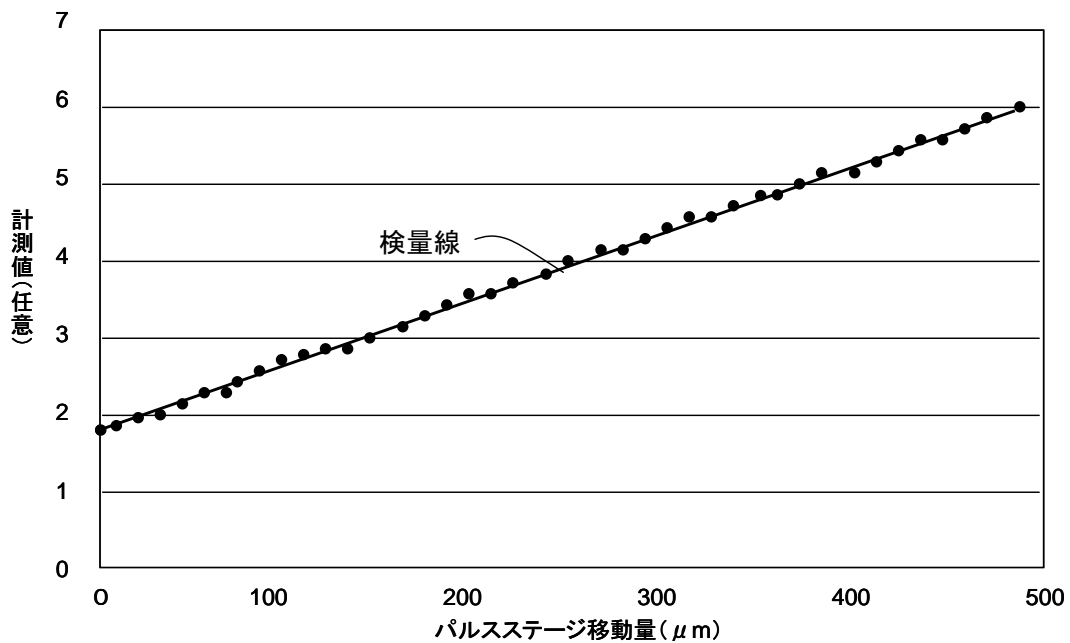


図 3.6 ステージ移動量と d の計測値

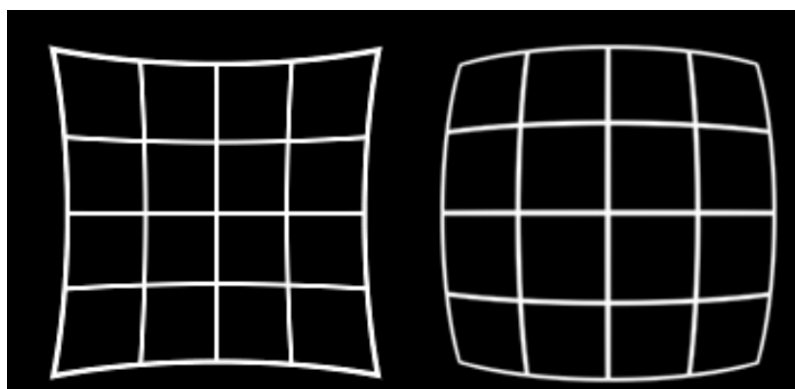
- *) 1 識別部（格子模様）ここで用いる識別部は異なる色のフィルターで分離した像が識別し易い色（例えば白色）のものとする。
- *) 2 移動調節手段載置ステージを上下に微細移動させる装置。ナノレベル（数十 nm～百 nm）の測定ではピエゾ効果*を利用したピエゾステージを用いる。ミクロンレベル（数十 μ m～数百 μ m）の測定ではパルスモータによるパルスステージを用いる。

3.3.3 対象物の測定手順

- ① 図 3.5.において、対象物を載置ステージ上に置く。
- ② ノブで撮像装置を調節し、対象物の基準表面に焦点を合わせる。
- ③ 撮像装置により対象物を撮像する。
- ④ 測定箇所の色画像間隔を画像解析により求める。
- ⑤ 画像間距離と換算係数とから測定箇所の高さを求める。

3.3.4 測定上の注意事項

光学系はそれぞれ特有の収差が含まれている。分光位相差検出法を使う場合は、特に歪曲収差が大きく影響する。正方格子を撮像した場合、図 3.7 のような画像が得られる。図 3.7 (a) を糸巻型歪曲、図 3.7 (b) を樽型歪曲という。



(a) 糸巻型歪曲

(b) 樽型歪曲

図 3.7 正方格子を撮像した場合の歪曲収差

このような光学系で分光位相差検出法の測定を行った場合、図 3.8 のように曲線上に測定点が並ぶ。このため歪曲を予め測定し補正する必要がある。

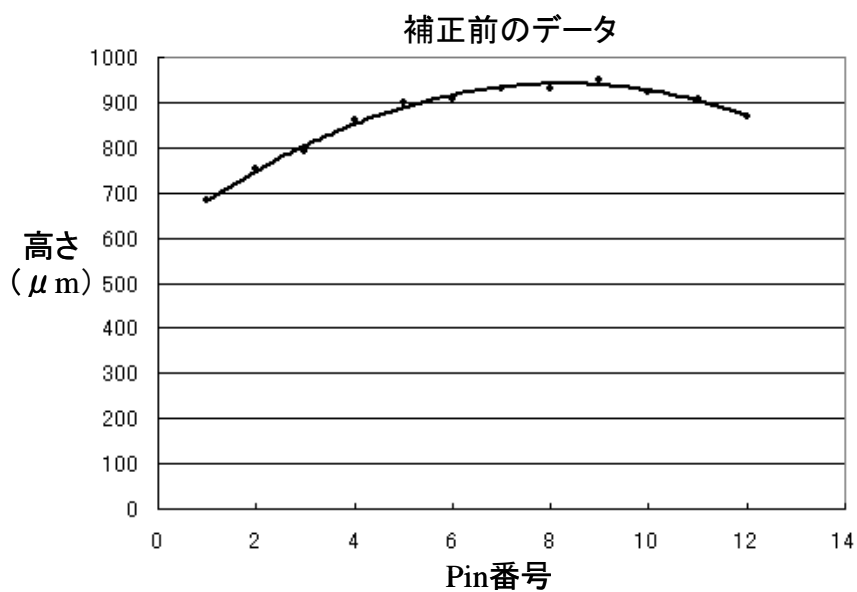


図 3.8 歪曲収差の影響を受けた測定値

3.4 実施例

3.4.1 分光位相差検出法による測定例

(1) IC リード部

図 3.9 は赤と緑のフィルターを用いた撮像画像と先端の高さを測定したデータである。

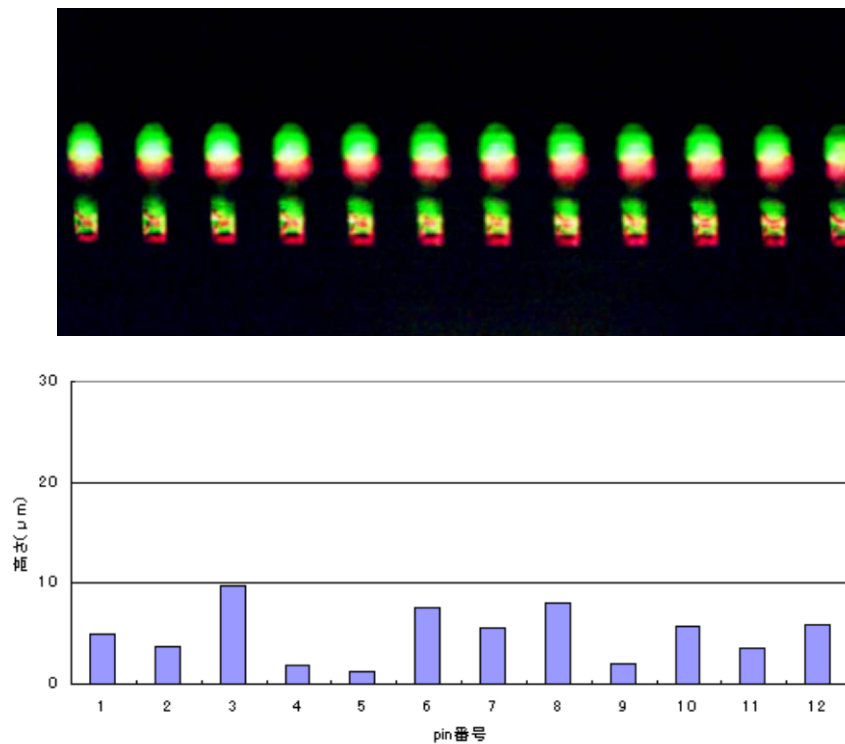


図 3.9 IC リード部の分光位相差検出法の画像と高さ測定データ

(2) プリント基板の反りの測定

プリント基板には、部品実装後に切り離しができるようスリットやVカットが施されているが、部品実装時の加熱等により変形が生じている。画像計測を行う際は、この変形の影響が少なくなるよう治具で固定しているが、変形を完全に抑えることができない。そこで、前述の高さ測定装置を用いて、この変形の一部を観察した。

基板上のシルク印刷（白色）を識別部とし、載置ステージの移動調節手段には、パルスステージ（シグマ光機製 TSDM）を用いた例を図 3.10 に示す。

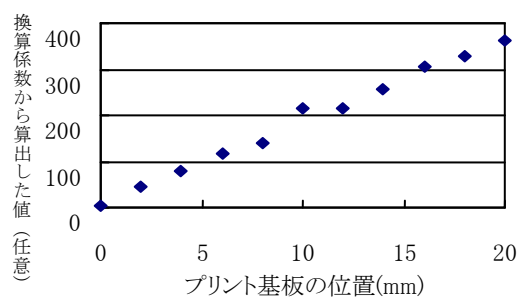
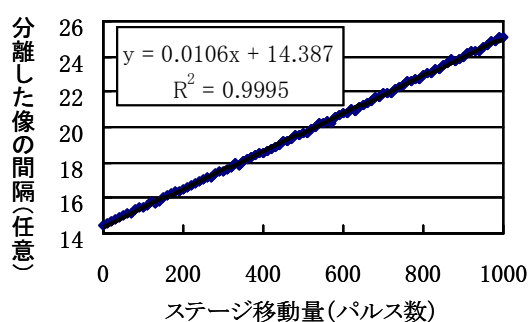
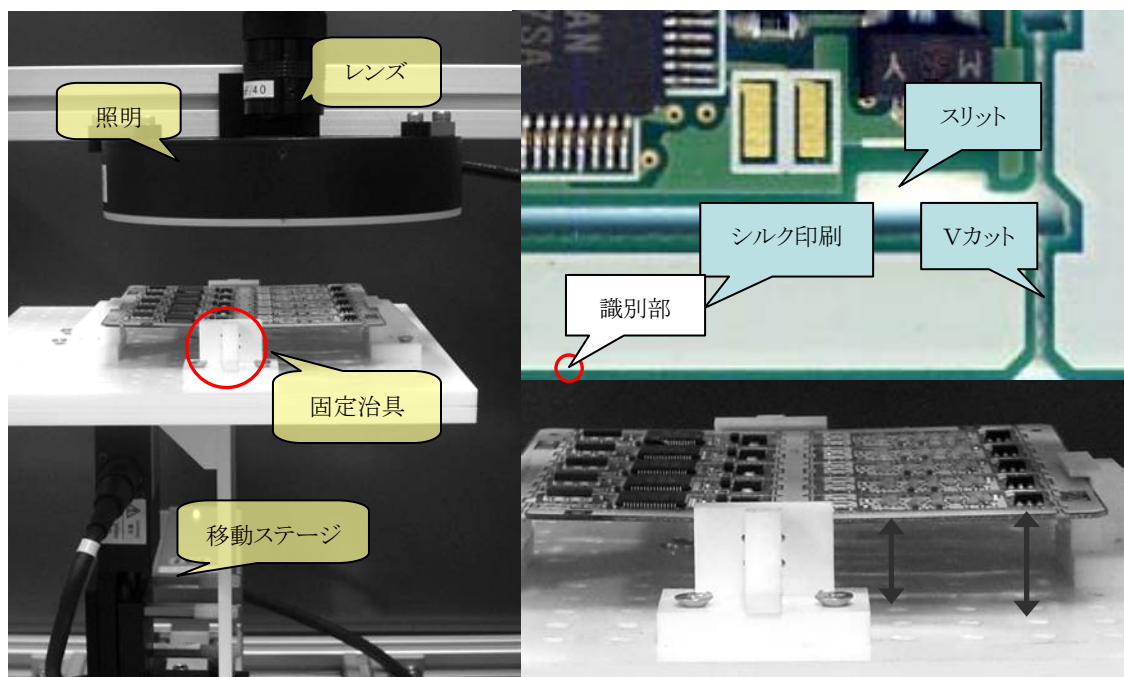
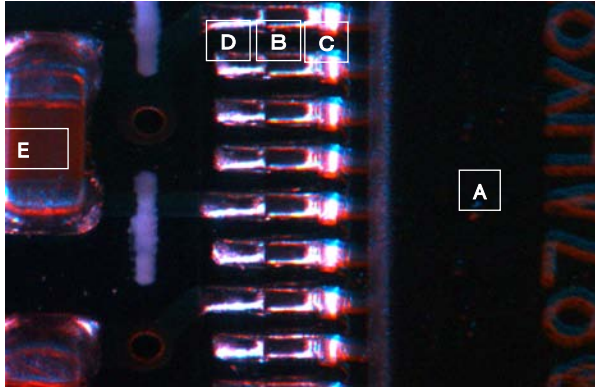


図 3.10 分光位相差検出法による基板の反りの測定例

3.4.2 全高測定例

(1) アセンブル後のプリント基板

図 3.11 は部品実装後のプリント基板上部品の高さを測定した例である。シルク印刷に合焦（基準高さ）し、各部分の赤と青との距離を求め、高さを算出した。

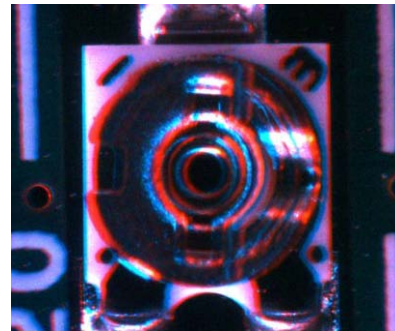


測定箇所	高さ (μm)
IC パッケージ(A)	1100
リード先端(B)	226
リード根元(C)	677
半田エッジ(D)	141
CHIP 部品(E)	809

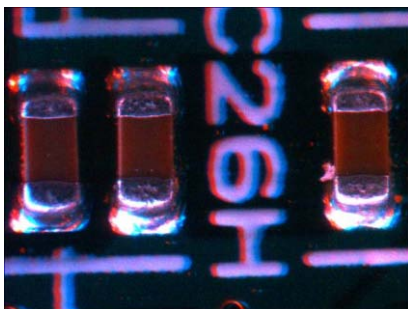
図 3.11 プリント基板上部品の高さ測定

(2) 全高測定用の画像例

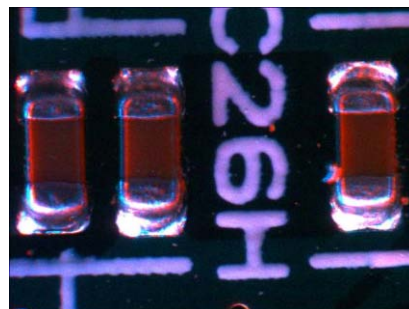
図 3.12 にプリント基板上の部品の高さ測定用画像を示す。各位置の色画像の差から部品の各部の高さが計算できる。図 3.12 (b) と (c) は同じ箇所では合焦位置を変えて撮影した画像である。このように基準面は任意に設定することができる。



(a) 基板に合焦した画像（可変抵抗）



(b) 部品上面に合焦した画像



(c) 基板に合焦した画像

図 3.12 プリント基板上部品の高さ測定用画像例

3.5 仕様

測定する高さは、式 (3.6) を変形すると

$$d \approx \frac{b}{a^2} \Delta a \cdot D = M \frac{\Delta a}{a} D \quad (\because M = \frac{b}{a}) \quad (3.7)$$

$$\therefore \Delta a \approx \frac{d \cdot a}{M \cdot D} \quad (3.8)$$

で与えられる。よって測定可能な高さは倍率 M やフィルタの間隔 D などによって決まる。例えば $d=2.15 \mu\text{m}$ (画素サイズの $1/2$) , $M=2$, $D=10\text{mm}$, $a=50\text{mm}$ とすれば、約 $5 \mu\text{m}$ の高さ測定が可能である。このように、式 (3.8) によって最小測定高さや精度が決まる。

表 3.1 に対象物を自動ステージに載せて、高さを変化させた時のステージ高さと測定結果の差の分散を以下の表に示す。

表 3.1 視野の違いによる高さ測定値の標準偏差の例

視野	5mm	230 μm
σ	5.5 μm	6.1nm

- ・ 測定時間 100ms 以下
- ・ 画素 1240×1024
- ・ メモリ 2GB
- ・ CPU Pentium1.5GHz

補 足

(1) フィルター付マスクについて

フィルターを取り付ける窓の形状は円形として説明したが、図 3.A1 のように矩形でもよく、同じ形、同じ大きさであれば他の形状でも有効である。また、窓部の間隔は長い方が分離した像の間隔が大きくなる点では効果的であるが、光強度が弱くなってしまふ。従って、間隔は対物レンズ径の半分程度が最適である。

なお、複数枚のレンズからなるレンズ系の場合、1枚のフィルター付マスクは主面の間に配置する。

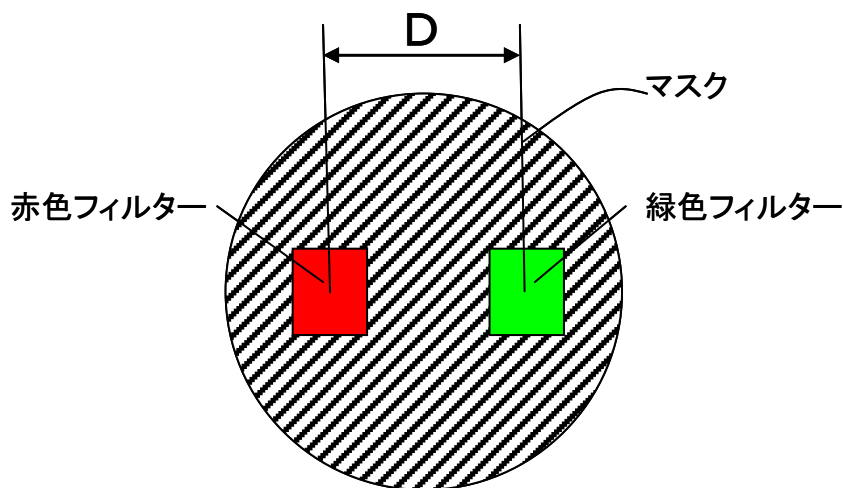


図 3.A1 フィルター窓部の矩形の例

(2) フィルターと照明光源

カラーCCD は、3つの波長帯域に分離できる分光感度特性 (RGB) を持っている。フィルターはこの帯域に合致したものを用意する。さらに、照明用光源はこの帯域に十分な強度を有するものを使用する。また、色収差を考慮してフィルターの組み合わせは赤と緑または緑と青がよい。

関連用語の解説

バンブ

BGA 型パッケージなどにある白小球で IC チップとプリント基板とを接続するための微小なコネクタ。

ワイヤループ

IC チップの電極とリードフレームのインナーリードとを結んだ時の金線の形状。

ラインセンサ

主に CCD イメージセンサ素子、レンズ、ドライバーコントロール回路によって構成される。対象物の映像をレンズによって素子面に結像させ、光の量と位置から対象物の長さ等の諸元を測る。

レーザ変位計

三角測量を応用した方式で、発光素子と光位置検出素子の組み合わせで構成されている。測定対象物に照射された半導体レーザ光は対象物から拡散反射され、受光レンズを通して光位置検出素子上にスポットを結ぶ。対象物が移動する毎に移動するスポット位置を検出することで対象物までの変位量を知ることができる。

白色干渉法

白色光源による干渉縞は、物体の参照面光路長差が 0 の場所のみ、白色の縞が観察される。参照鏡の位置を光軸に沿って移動させ、この白色縞ができる位置を求めることにより、物体の形状が測定できる。この手法を白色干渉法と呼ぶ。

ナイフエッジ法

ピント合わせの方法のひとつ。ごく薄いナイフの刃をレンズの焦点位置に置いて焦点像を遮断しその際の焦点像の変化によって焦点位置を判断する方法。

ピエゾ効果

ある結晶に電圧を加えると電圧に比例してひずみが生じることを逆圧電効果と呼ばれる。このような電圧効果・ピエゾ効果を生じる圧電性物質には、水晶、ロッシェル塩、チタン酸バリウム、ジルコンチタン酸鉛などがある

参考文献

- [1] 坂井一文：“分光位相差検出法による高さ測定”，産業技術総合研究所 特願 2008-203460

第4章 非合焦関数解析法による高さ測定

4.1 概 要

半導体や電子部品の外観検査では、部品の上側から観察される画像を用いてリード検査、モールド検査、マーク検査などの 2 次元検査が行われている。他方、リードの浮きなどは高さ情報が必要になるため、側面観察やレーザ変位計などが用いられている。工程の効率化や品質保証の観点から、2 次元検査と 3 次元検査をインポケットの状態で検査されることが望ましいが、同時に検査できる装置はない。

検査に使われる撮像素子は、CCD や C-MOS が主流であるが、近年の撮像素子の発達によって画素サイズが小さくなり数百万画素の撮像素子が使われるようになって、これまで分離できなかった合焦点からのズレ（非合焦）の情報が得られるようになった。

本マニュアルは、従来の 2 次元検査の画像を解析し、焦点位置からのズレに対応

した画像の広がり度合いを数値化し、微小な高さを測定する方法について解説する。

この装置は次のような特長を持つため、半導体プロセスの後工程への応用が期待できる。

- ① 被検査体の 2 次元検査用画像の強度分布からリードの高さを測定する。
- ② 一回の撮像により多数のリードの高さを測定することができる。
- ③ 既存の撮影手段と画像解析ソフトウェアに高さを求める演算の解析ソフトを追加するだけの簡単な形態である。

4.2 高さ測定の原理.

全ての結像光学系では、レンズの開口に伴う空間周波数の制限によって、1点からの光は結像面では空間的な広がりをもっている。図 4.1 は 1 点(δ 関数*)からの光がレンズを通り合焦点位置における光の強度分布を示すものである。この広がりとは点応答関数(PSF)と呼ばれ、広がり幅は光の波長 λ に比例し、レンズの開口数 NA^* に反比例する。

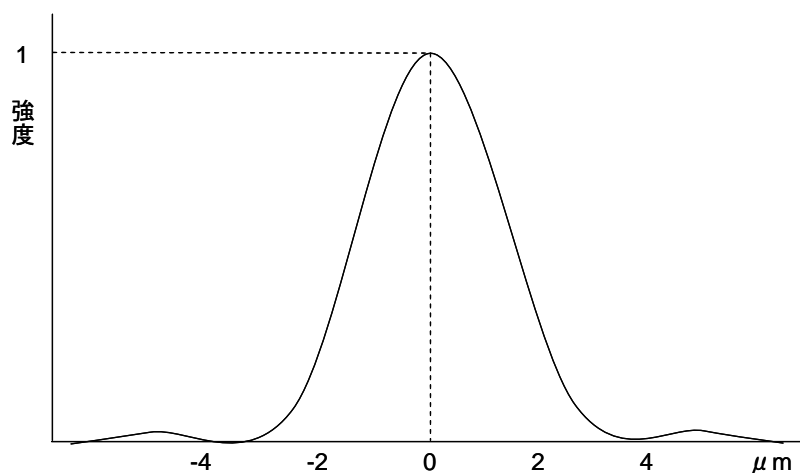


図 4.1 合焦点位置における光の強度分布

また像の広がりとは結像面(合焦点位置)からの距離に応じて変化します。図 4.2 はガウスビームがレンズにより収束する際の焦点位置近傍のガウスビームの広がり示している。ここで z は焦点からの距離、 ω_0 は焦点位置におけるビームの広がり半径を表わす。

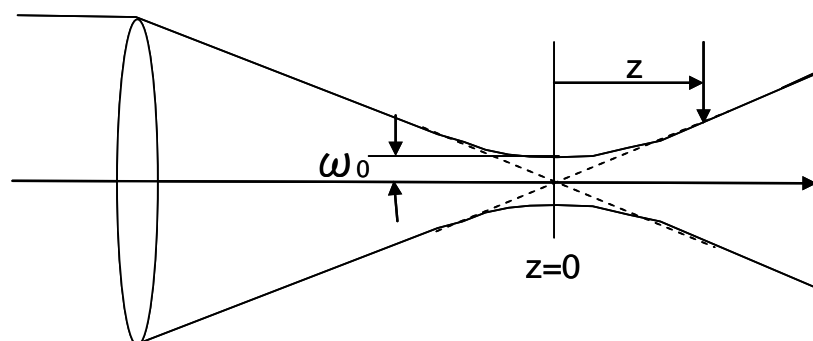


図 4.2 焦点位置近傍のビームの広がり

図 4.3 は IC のリード先端部分を撮影した画像における強度分布を示す。焦点位置($z = 0$)ではエッジからの光は実線のような強度分布を示すのに対し、焦点位置から前後にずれた場合は破線のように強度が低下すると同時に強度分布の広がりが大きくなる。

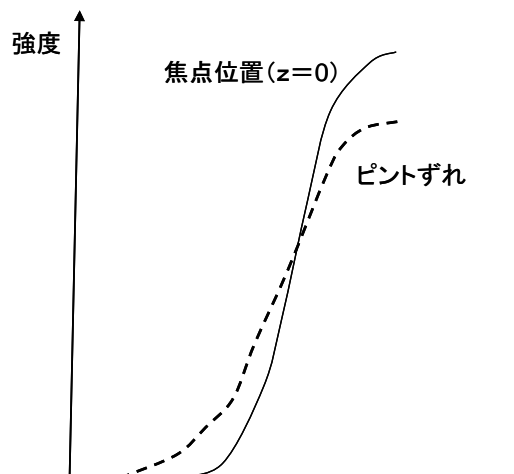


図 4.3 リード先端の強度分布

これらの合焦位置からの「ずれ」による反射強度分布の関数の変化を解析し、高さを求める方法が、非合焦関数解析法である。

4.3 高さ測定の手順

非合焦関数解析法による高さ測定の手順を図 4.4 に示す。インポケットの IC はケース内で様々な方向を向いているため、まず、像の中心を画面の中心位置に移動後、回転操作（アフィン変換）を行う。基準ピン（図 4.4 では 1 と 12pin 及び 13 と 24pin）の先端位置で引いた直線を基準に各ピンの先端の強度分布を求め、演算によって各ピンの高さを計算する。

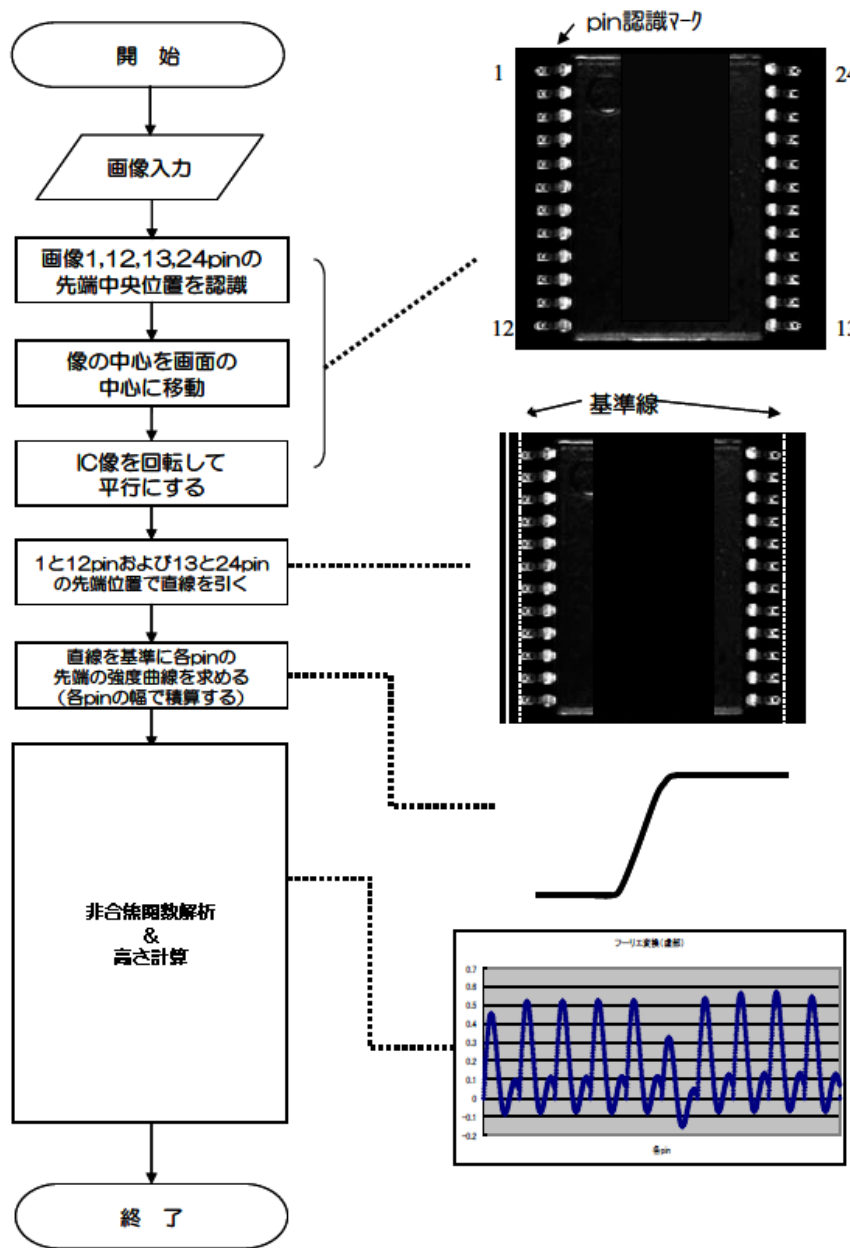


図 4.4 高さ測定手順のフローチャート

4.4 実施例

図 4.5 に非合焦関数解析法によって IC リード (24pin) のコプラナリティ*を測定した例を示す。

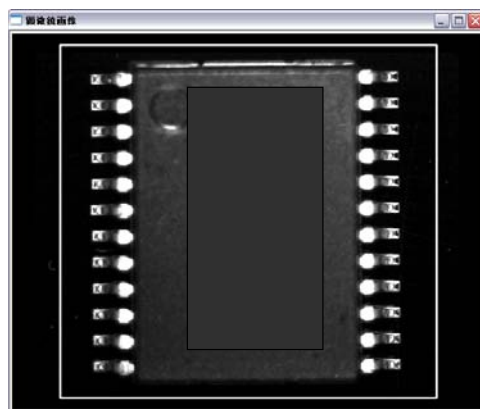


図 4.5 上から撮影した IC 画像

図 4.6 は開発したソフトウェアの画面で、その結果を図 4.7 に示す。評価のため 6 ピンを故意に変形させている。



図 4.6 測定するソフトウェア

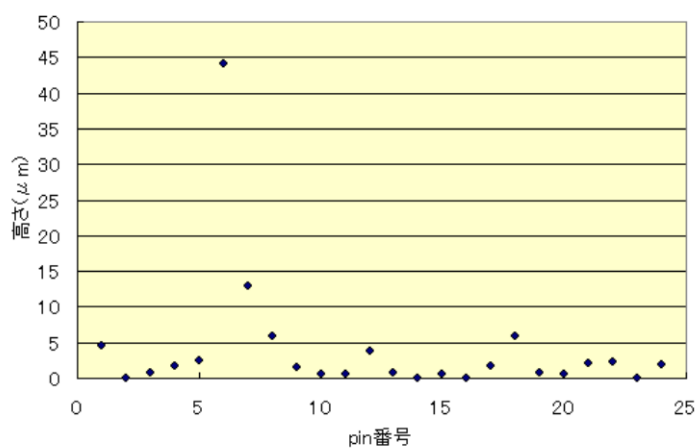


図 4.7 IC の各ピンの高さ

4.5 仕様

図 4.8 は試料ステージを 0 (基準点) から 100 μm まで移動 (5 μm 間隔) しながら、非合焦関数解析法によってリード高さを測定する装置の概要を、図 4.9 にはその結果を示す。

図 4.9 より自動ステージの高さと測定値の標準偏差は 3.5 μm であった。

(注) 図 4.9 の直線はそれぞれのピンの高さを測定したものであるが、グラフ上で重なるのを防ぐため便宜上、切片の位置をずらしている。

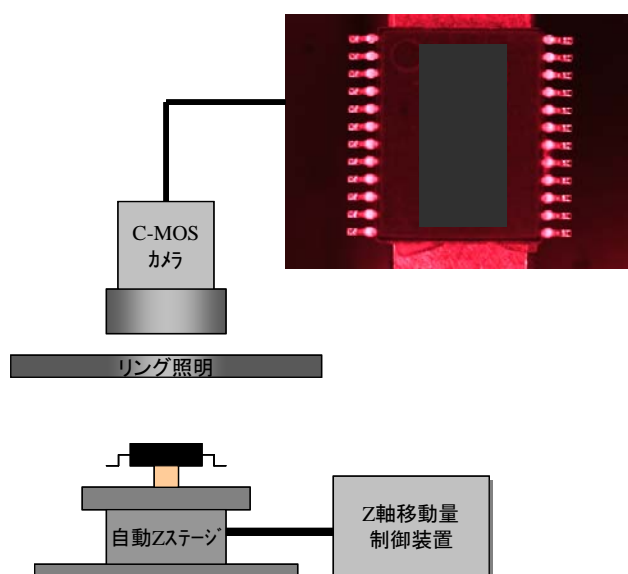


図 4.8 ステージを使った測定装置

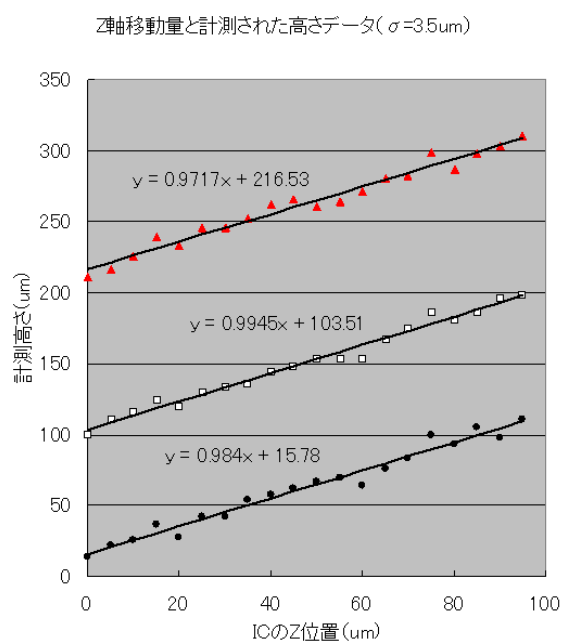


図 4.9 ステージの位置と測定の高さ

【非合焦関数解析法による高さ測定仕様】

視野 (mm)	10mm X 10mm
測定値の標準偏差 (δ)	3.5 μm

- 測定時間 300ms以下 (Pin位置認識、画像回転、平行移動の処理時間を含む)
- 画素 1240×1024
- メモリ 2GB
- CPU Pentium1.5GHz

補 足

MTF (Modulation Transfer Function)

MTF は主にレンズの結像性能を評価するものである。どのようにボケていくか、あるいは空間周波数によりどの程度ボケるのかを表す関数で横軸に細かさを表す空間周波数、縦軸に明るさの再現性を表すコントラストを定量化したものである。

MTF を求めるには PSF(点応答関数)をフーリエ変換する方法があり空間周波数とコントラストとの関係が連続で求められる。図 4.A1 は理想的な点光源(δ 関数)をフーリエ変換したものである。この時、コントラスト応答は破線 A のように全空間周波数領域で一定の値を示しているのに対し、図 4.A2 のように PSF をフーリエ変換した MTF は実線 B のように空間周波数が高くなるにつれコントラスト応答が弱くなっている。レンズを通し結像した像が焦点においてもボケるのは高い空間周波数領域の情報が失われていることを表している。さらにボケの強い PSF では破線 C のように低い空間周波数からすでにコントラスト応答が弱くなっている。

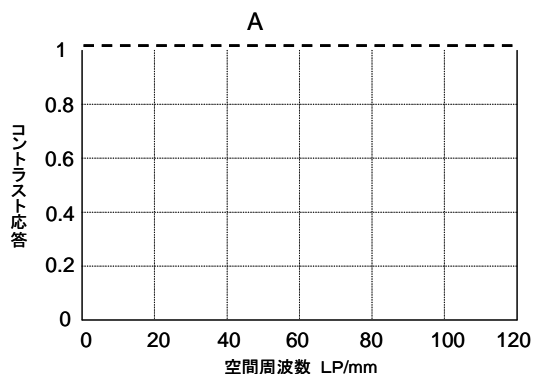


図 4.A1 点光源 (δ 関数) のフーリエ変換

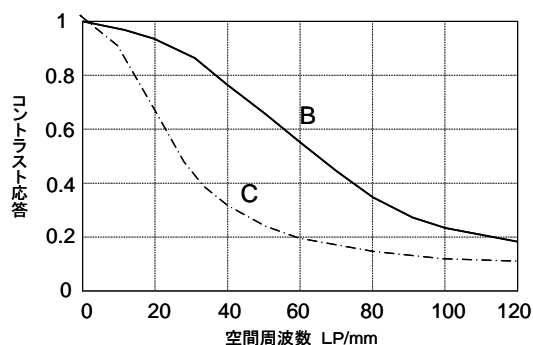


図 4.A2 PSF のフーリエ変換

関連用語の解説

共焦点法

被写体を撮像するにあたり、レンズの位置を上下に動かし焦点が合った画像を複数枚撮影する。それらを画像処理することにより、物体表面すべてに焦点が合った画像を得る方法。

標準偏差

データの分布の広がり具合を表す。n個のデータがあるとき、Xを相加平均とする

と標準偏差 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - X)^2}{n}}$ 但し、 $X = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$ で表される。

δ (デルタ)関数

$x \neq 0$ の時、 $\delta(x)=0$ かつ $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x)dx = 1$ で定義される関数。

開口数 (NA)

解像度を定める指数のこと。物体から対物レンズに入射する光線の光軸に対する最大角度を θ 、物体とレンズの間の媒質の屈折率をnとすると $NA = n \sin \theta$ で表される。NAが大きくなると解像度の値が小さくなり細かなものが見えやすくなる。

空間周波数

空間的な周期を持つ構造の性質で、単位長に含まれる構造の繰り返しの多さを表す。画像処理ではミリメートルあたりの線数をさす。

コントラスト応答

信号の最大値と最小値の差をコントラストといい、入力信号のコントラストに対する出力信号のコントラストの比をコントラスト応答という。

インコヒーレント

波の持つ性質で、干渉のし易さを表し干渉縞が鮮明に出る状態をコヒーレントと言うのに対し、二つの波の振幅、位相が不規則に変化し干渉縞を作らない状態を言う。

コプラナリティ

取付け面に対する部品の各端子や電極の最下面の均一性を表し、平坦度ともいう。

参考文献

[1] 坂井一文：“非合焦関数解析による高さ測定”，産業技術総合研究所 特願2007-323120

[2] MTFによる光学機器の性能評価#3 MTFとPSF，

<<http://d.hatena.ne.jp/aquila2664/20081109#1226242651>>, (accessed 2009-11-09)

第5章 低コントラスト欠陥検出

5.1 概 要

外観検査において、異物、打痕及び変形等の正常部に対する特徴量が明瞭な欠陥に関しては、自動化が進んでいるが、しみ等に見られる正常部に対する特徴量が不明瞭な欠陥については、官能検査も含め様々な分野で、その自動検出方法が問題となっている〔1〕、〔2〕。このことは、IC リードフレームにおいても同様であり、寸法検査や異物等の正常部に対する濃度差が明瞭な欠陥検査については、その自動化が行われているが、しみや光沢むら等の正常部に対する濃度差が不明瞭な欠陥(以下、低コントラスト欠陥)については、自動化が進んでいない。

本マニュアルでは、IC リードフレーム等で問題となっている低コントラスト欠陥に対して有効な検出システムの使い方について説明する。本マニュアルで示すシステムは、今まで検出が困難であった下記のような欠陥に対しても有効である。

- (a) 正常部との濃度差が 20 階調程度以下の欠陥。(ただし、フルスケール 256 階調の場合である。)
- (b) 形状や大きさが一定しない。
- (c) 欠陥部の濃度に関する傾向が一定しない。(正常部と比べ、濃度階調が高い欠陥と低い欠陥の両方が存在する。)
- (d) 正常品のばらつきが大きい。

5.2 コントラスト欠陥検出手法の原理

5.2.1 現状の欠陥検出手法の問題点

通常、欠陥検出に用いられる手法として、検査画像と良品とされる参照画像間の濃度差による比較検査法〔3〕が用いられる。これは、良品を代表する標準サンプルと対応点毎に濃度に関する差の絶対値を計算し、あるしきい値以上の箇所を欠陥とする方法である(以下、濃度差分法)。この手法は、処理がシンプルであり、その結果処理時間も短いため、一般に用いられているが、一つの良品サンプルとの比較では検出精度にばらつきが生じるため、検査対象毎に最適なしきい値を決定する手法〔4〕〔5〕や複数の良品サンプルから統計的にしきい値を決定する手法が提案されている〔6〕〔7〕〔8〕。しかし、ICリードフレームにおける低コントラスト欠陥では、製品自体の表面状態のばらつきや照明等の画像入力環境の変化により、統計的に求められた良品の濃度分布と欠陥部の濃度分布が重なってしまうため、これらの手法の適応は困難である。一方、低コントラスト欠陥検出方法として、欠陥モデルを用いた方法〔9〕が提案されているが、ICリードフレームにおける低コントラスト欠陥は、良品部と欠陥部の濃度差が、良品の濃度にばらつきに対し、明瞭な差を期待できない場合、検出が困難となる。

図 5.1 は、欠陥部が異物などの高コントラスト欠陥の場合の例を示しているが、良品の濃度のばらつきがある場合、良品の誤検出を考慮したしきい値を設定することにより検出することが可能である。これに対して、低コントラスト欠陥の場合は、欠陥部と正常部との濃度差が小さいため、良品サンプルを元にした通常濃度差分検出方法では、検出が困難となる。

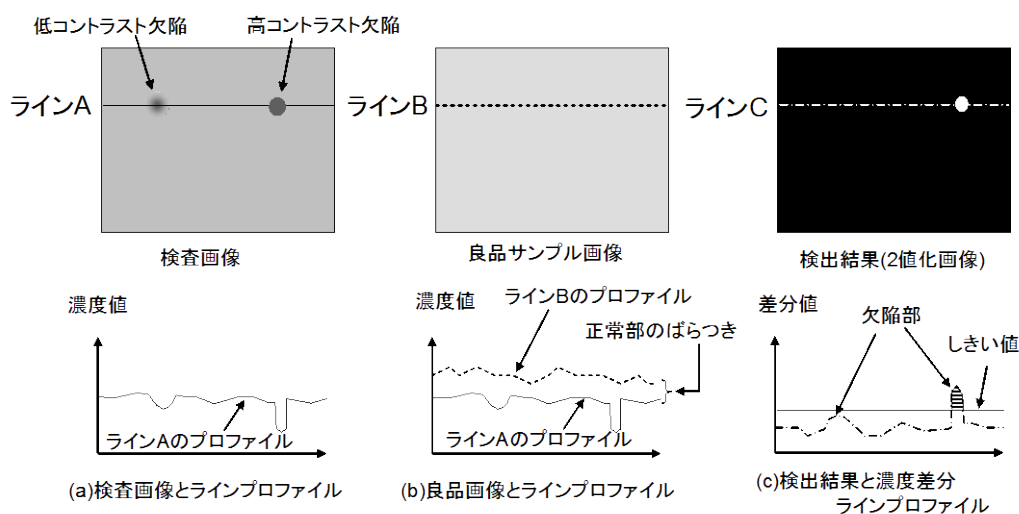


図5.1 現状の問題点

5.2.2 本マニュアルで用いる検出手法の原理

本マニュアルにおける欠陥検出方法では、欠陥部の大局的な濃度変化に注目し、スプライン関数*〔10〕〔11〕の補間機能を用いて、検査対象ごとに擬似的な良品画像を生成し、その疑似良品画像と検査対象画像との濃度差分により欠陥検出を行う。また、疑似良品生成の際に、ラインプロファイル*上の濃度変化の大きさから判定した欠陥候補部の補間を行うが、本マニュアルで検出ターゲットとする低コントラスト欠陥は、異物等の欠陥と異なり、正常部と比較し明瞭な濃度差が無く、また、明度の高い欠陥と明度の低い欠陥が存在するため、正常部と比較し明るい箇所と暗い箇所のどちらを欠陥と見なして補間するか、もしくは、その欠陥候補部を補間すべきかについては、局所的な情報だけでは判定できない。そのため、本マニュアルで示す手法では、遺伝的アルゴリズム(以下、GA)*〔12〕を用いて、疑似良品構成面の全体的な滑らかさを考慮し、補間すべき箇所を判定している。

以上の処理により、図5.2において、検査画像から得られるラインプロファイルに、濃度変化の大きな箇所を正常部のデータを基に補間することにより、疑似良品画像を生成する(図5.2参照)。

このようにして構成した疑似良品画像は、少なくとも良品エリアに関しては、検査対象画像との濃度差を低く抑えることができるため、検出判定のためのしきい値を低く抑えることができる。これにより、正常部との濃度差が小さい低コントラスト欠陥検出が可能となる。

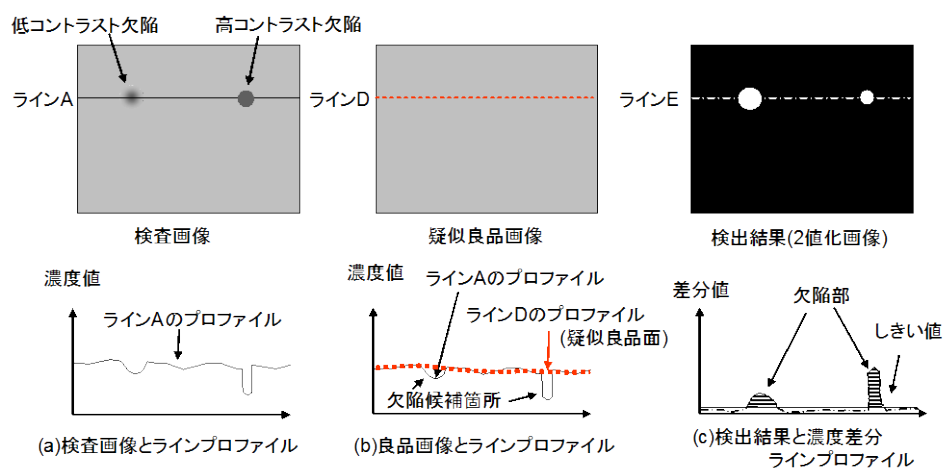


図5.2 提案手法の概要

5.2.3 スプライン関数の使用方法

以下に、スプライン関数を用いた疑似良品画像作成方法について述べる。本マニュアルにおいては、スプライン関数としてリーゼンフェルトスプライン* [11] を用いている。

スプライン関数の適応に際し、まず、検査対象となるエリアに、図5.3に示すようにスプライン曲面を構成するためのサンプリング点(図5.3の黒丸。以下、データ点)を一定間隔に配置する。そして、y座標を固定したデータ点列から得られるスプライン曲線をt曲線とし、x座標を固定したデータ点列から得られたスプライン曲線をs曲線とする。ここで、今回採用したリーゼンフェルトスプラインでは、その端点部分は多重節点とし、固定点のように振る舞うため、検査領域の外周にダミーのデータ点(図5.3の白丸)を付加している。そして、ダミーのデータ点を合わせたデータ点の個数をx方向にI個、y方向にJ個とする。なお、付加したデータ点の濃度は、検査領域内の最近傍のデータ点と同じとし、データ点間の間隔も検査領域内のものと同じとする。

ここで、横方向i番目、縦方向j番目に位置するデータ点をサンプリングされた実数座標 $(x_{i,j}, y_{i,j})$ 及び濃度 $(z_{i,j})$ を要素とするベクトル $P_{i,j}$ として、(5.1)式で表す。これにより、検査対象領域の濃度曲面は、(5.2)式に示すB-スプライン*の積により求められる。なお、(5.2)式において、K及びLは、各々t曲線及びs曲線の階数*と呼ばれる値である。本システムでは、 $K=L=4$ としている。

$$P_{i,j} \triangleq [x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j}] \quad (5.1)$$

$$(i = 0, \dots, I-1; j = 0, \dots, J-1)$$

$$\begin{aligned} x(t,s) &= \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} x_{i,j} B_{i,K}(t) B_{j,L}(s) \\ y(t,s) &= \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} y_{i,j} B_{i,K}(t) B_{j,L}(s) \\ z(t,s) &= \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} z_{i,j} B_{i,K}(t) B_{j,L}(s) \end{aligned} \quad (5.2)$$

ただし、 $(0 \leq t \leq I-1)$ および $(0 \leq s \leq J-1)$ である。

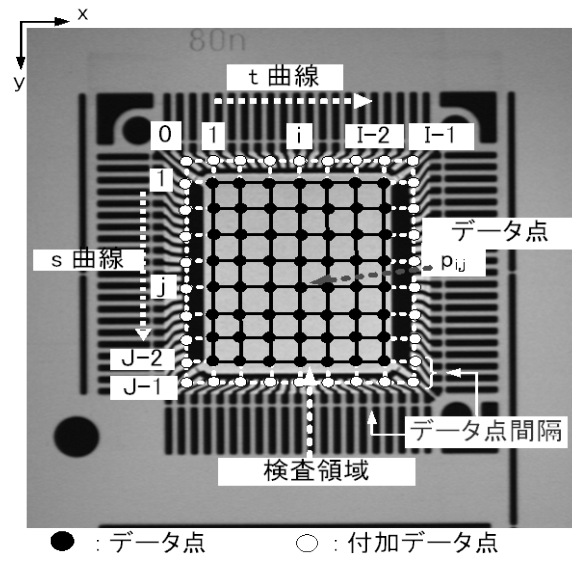


図5.3 s 曲線と t 曲線

5.2.4 欠陥候補部の補間

ここで、5.2.3で示したs曲線及びt曲線における欠陥候補部の補間方法を示す。図5.4(a)は、s曲線もしくはt曲線上に観察される画像濃度ラインプロファイルの例を示している。通常画像濃度ラインプロファイルは、通常、高周波成分のノイズを含んでいる。5.2.4として、このスプライン曲線上において、その振幅が後述する評価値(Q_v)により、大きい箇所を欠陥候補として、正常部から推定した濃度で補間を行い、疑似良品面を生成する(図5.4(c))。このようにして、作成された疑似良品面は、正常部では、正常面の濃度データの平均値となり、欠陥部のみ、画像濃度面と差異が生じるので、しきい値を小さくしても欠陥部のみ抽出することができる。

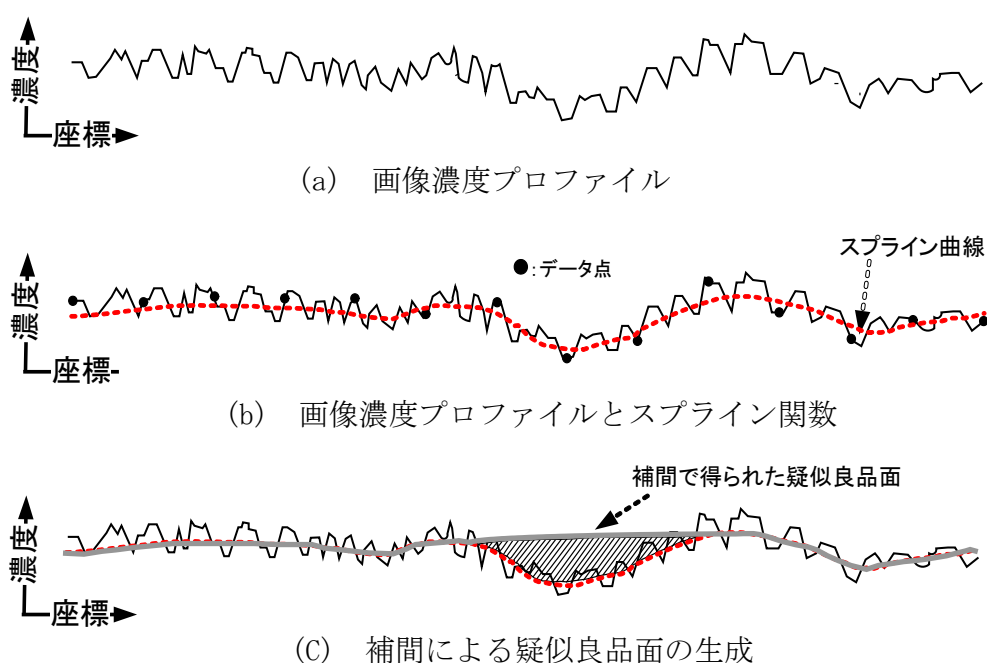


図5.4 低コントラスト欠陥検出原理

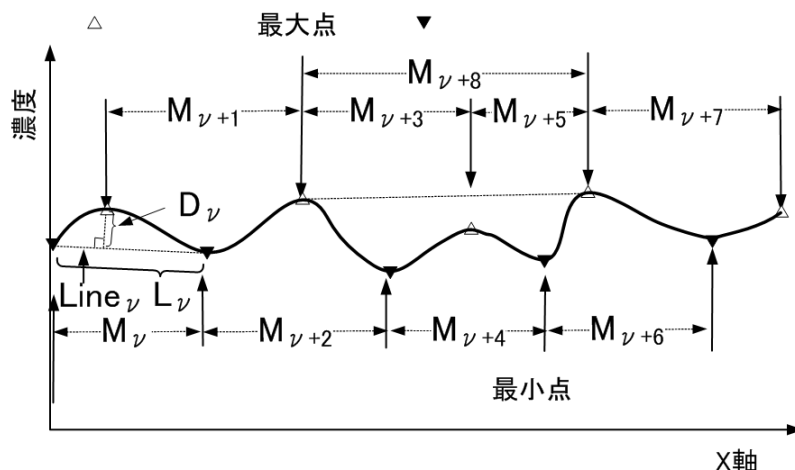
5.2.5 モチーフの定義と合成処理

ここで、欠陥候補部の抽出方法の詳細を述べる。まず、照明等の撮影環境の影響を除去するため、各t曲線及びs曲線毎にシェーディング補正*を行う。そして、シェーディング補正したスプライン曲線において、図5.5(a)に示すように、一対の極小点間に極大点が一対存在する場合もしくは一対の極大点間に極小点が一対存在する場合を調べ、これらをモチーフ(Motif)と呼ぶことにする(注：図5.5はt曲線を例に示している。)。そして、その両端部をモチーフの底点呼び、底点間に挟まれた極大点もしくは極小点をモチーフの頂点と呼ぶことにする。また、凸状のモチーフを山部、また、凹状のモチーフを谷部と呼ぶことに

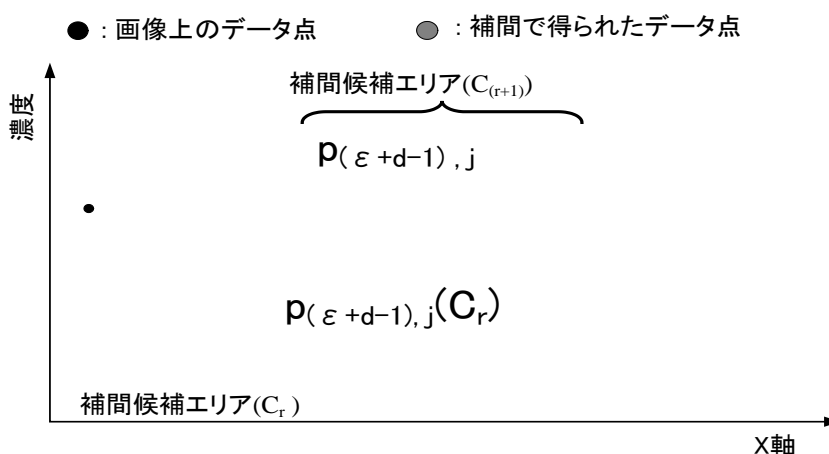
する。なお、 t 曲線に位置する検査領域の両端に位置する $x_{1,j}$ および $x_{I-2,j}$ については、近傍の極点が極小の場合は極大点とし、また、極大の場合は極小点として取り扱うこととする。 s 曲線についても同様に処理する。そして、検出されたモチーフを検出された順に M_ν ($\nu = 0, 1, \dots$)として、ラベルをつける。

次に、一つのスプライン曲線において、連続する谷部もしくは山部において、それらを含む大きな谷部もしくは山部が存在する場合は、小さなモチーフを合成し、新たな谷部もしくは山部として追加する。例えば、図5.5(a)の谷部 $M_{\nu+3}$ と $M_{\nu+5}$ の合成により $M_{\nu+8}$ が谷部として追加される。

以上の処理を各スプライン曲線における全ての連続する谷部と山部について行い、初めに検出されたモチーフと合成により追加されたモチーフの合計を U 個とする。



(a) 欠陥候補モチーフの検出



(b) 補間候補エリアの補間

図 5.5 モチーフの検出とその統合

5.2.6 補間候補の決定

5.2.5で検出されたモチーフについて、以下の判定基準により補間候補にすべきか否か決定する。まず、5.2.5で検出されたモチーフ M_ν ($0 \leq \nu < U$)について、底点間の距離(L_ν)をモチーフの幅とし、モチーフの頂点から底点間を結ぶ直線($Line_\nu$)に降ろした垂線の長さ(D_ν)をモチーフの深さとする(図5.5(a))。

次に、(5.3)式で示される Q_ν の値(これをモチーフ評価値と呼ぶこととする。)を調べ、あらかじめ設定したしきい値(Q_{th})以上のものを補間候補エリア C_r (ただし、 $0 \leq r < R-1$; $R \leq U$)とする。 R は、 $Q_\nu \geq Q_{th}$ のモチーフの個数である。%

$$Q_\nu = \frac{D_\nu}{L_\nu} \quad (5.3)$$

($0 \leq \nu < U$ ただし、 検出モチーフ数)

L_ν : モチーフ M_ν の幅

D_ν : モチーフ M_ν の深さ

ここで、図5.5(b)に示すように補間候補エリア C_r が得られた場合、その底点間に位置するデータ点($p_{\epsilon, j} \sim p_{(\epsilon+d-1), j}$) ($1 \leq \epsilon \leq I-2$)について、それ以外のデータ点($p_{0, j} \sim p_{(\epsilon-1), j}$ および $p_{(\epsilon+d), j} \sim p_{(I-1), j}$)を元に C_r エリアの補間を行い、新たなデータ点 $p_{\epsilon, j}(C_r) \sim p_{(\epsilon+d-1), j}(C_r)$ を計算する。このようにして補間により求められたデータ点を $p_{i, j}(C_r)$ とし、その濃度を $z_{i, j}(C_r)$ とする。

なお、ここで求めた濃度 $z_{\epsilon, j}(C_r) \sim z_{(\epsilon+d-1), j}(C_r)$ は、濃度面が滑らかとなる最適な組み合わせの選定時(5.2.8~5.2.13参照)に、補間候補エリア C_r が選定された場合のデータ点 $p_{\epsilon, j} \sim p_{(\epsilon+d-1), j}$ の濃度データとして用いる。

5.2.7 矛盾する補間候補対の決定

5.2.6で、得られた補間候補エリアにおいて、図5.5(b)における C_r と $C_{(r+1)}$ あるいは $C_{(r+1)}$ と $C_{(r+2)}$ のように連続する山部と谷部あるいは谷部と山部が補間候補として選定された場合、これらの欠陥候補は、データ点の一部を共有しているため、同時に両者を補間部として選択することは矛盾する。そのため、このように他の欠陥候補とデータ点を共有する欠陥候補の組み合わせを「矛盾補間候補対」と呼ぶことにし、 $(r_0(\omega), r_1(\omega))$ (ただし、 $0 \leq \omega < \Omega$)として記録する。ここで、 Ω は矛盾補間候補対の総数である。

5.2.8 遺伝的アルゴリズムの適応方法

5.2.6において選定された補間候補エリアは、tあるいはs曲線で判定されており、局所的な判定である。そのため、5.2.6で選定された補間候補エリアが疑似標準画像を構成する上で、補間すべきであるか否か、また、5.2.7で述べた矛盾補間候補対が存在する場合、どちらの補間候補を採用すべきかの判定は、大局的な判定を行う必要がある。そこで、本マニュアルで示す手法においては、GA（遺伝的アルゴリズム）を用いて、全体の滑らかさ等を考慮することにより、疑似標準画像を構成するために最適な補間エリアの組み合わせを選択する。なお、補間候補エリアが検出されなかった場合は、欠陥は存在しないものと判定する。

5.2.9 染色体の定義

本手法では、染色体として5.2.6で選定された補間候補エリア C_r に対応するR個を設定する(図5.6)各個体の染色体は、対応する補間候補エリアに対応しており、1または0のいずれかの値をとる。そして、r番目の遺伝子の値を $\phi(r)$ とし、 $\phi(r)=1$ のとき、補間候補エリア C_r に含まれる補間されたデータ点の濃度値 $z_{i,j}(C_r)$ ($i = \varepsilon, \dots, \varepsilon + d - 1$) (図5.5(b)参照)を採用し、(5.2)式により疑似的な良品画像を計算する際のデータ点として用いることとする。

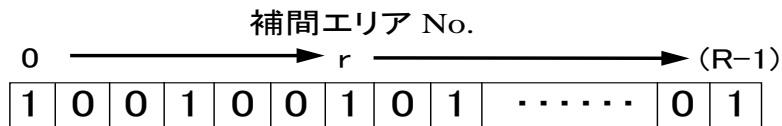


図 5.6 染色体の定義

5.2.10 各データ点濃度の決定方法

データ点 $p_{i,j}$ は、s曲線もしくはt曲線における補間候補により、複数の補間候補エリアに含まれる可能性がある。

ここで、データ点 $p_{i,j}$ に対して、 $H_{i,j}$ 個の補間候補エリアから濃度の推定があるとし、それらの補間候補エリアを $C_{r(h)}$ ($0 \leq h < H_{i,j}$) で表すこととする。このときの、データ点 $p_{i,j}$ の画像濃度 $z'_{i,j}$ を以下のように決定する。まず、 $C_{r(h)}$ の遺伝子状態が全て0のときは、サンプリングにより求められた画像濃度 $z_{i,j}$ とし((5.4)式)、それ以外の場合は、遺伝子状態が1となっている $C_{r(h)}$ から推定される濃度の平均として表す((5.5)式)。

$$z'_{i,j} = z_{i,j} \tag{5.4}$$

その他の場合、

$$z'_{i,j} = \frac{\sum_{h=0}^{H_{i,j}-1} z_{i,j}(C_{r(h)})\phi(r(h))}{\sum_{h=0}^{H_{i,j}-1} \phi(r(h))} \tag{5.5}$$

5.2.11 適応度の定義

GAを用いて、各個体の環境への適応度を以下の式により定義する。

$$F = \frac{1}{1 + G_1 F_1 + G_2 F_2 + G_3 F_3} \quad (5.6)$$

ここで、 F_1 、 F_2 および F_3 は、次に示すペナルティであり、 G_1 、 G_2 および G_3 は、各適応度の重み付けを決める係数である。

〈適応度〉

F_1 : 補間候補エリアの中で、矛盾補間候補対が同時に補間対象となることに対するペナルティ。

F_2 : 選定されたデータ点により構成されるスプライン面の滑らかさが正常部の条件から外れることに対するペナルティ。

F_3 : 隣接データ点間の濃度差が正常部の範囲から外れることに対するペナルティ。

以下に、その詳細を述べる。

F_1 については、(5.7)式により、5.2.7で述べた矛盾補間候補対の内、どちらか片方の遺伝子のみ1以外のときはペナルティを与えるようにする。

$$F_1 = \frac{\sum_{\omega=0}^{\Omega-1} \left((1 - \phi(r_0(\omega))) \oplus \phi(r_1(\omega)) \right)}{\Omega} \quad (5.7)$$

ここで、 $r_0(\omega)$ と $r_1(\omega)$ は、矛盾補間候補対であり、 Ω は矛盾補間候補対の総数である。また、記号 \oplus は排他的論理和*である。

F_2 については、先ず、GAで選択された補間候補エリアの組み合わせに基づき、5.2.10で示した方法により、全ての補間候補エリアに含まれるデータ点の濃度を計算する。次に、各欠陥候補エリア(C_r) (ただし、 $0 \leq r < R$)について、(5.3)式で示したモチーフ評価値 Q_r を調べ、5.2.6で述べたしきい値 Q_{th} 以上の場合、(5.8)式によりペナルティを与えるようにする。

$$F_2 = \frac{\sum_{r=0}^R V_Q(r)}{R} \quad (5.8)$$

ただし、

$$V_Q(r) = \begin{cases} 1 & Q_r \geq Q_{th} \text{のとき} \\ 0 & \text{それ以外の場合} \end{cases}$$

F_3 については、検査領域内のデータ点 $p_{i,j}$ ($1 \leq i \leq I-2; 1 \leq j \leq J-2$)のうち、いずれかの補間候補エリアに含まれるデータ点の個数を N_c とし、それらのデータ点を $p_{i(c),j(c)}$ ($c=0, \dots, N_c$)で表す。そして、 $p_{i(c),j(c)}$ について、その4近傍のデータ点との濃度差を調べ、その値が5.3.1で述べるしきい値 Z_{th} 以上であったとき、(5.9)式によりペナルティを与えるようにする。

$$F_3 = \frac{\sum_{c=0}^{N_c-1} \left(\sum_{i=i(c)-1}^{i(c)+1} \Gamma_{i,j(c)} + \sum_{j=j(c)-1}^{j(c)+1} \Gamma_{i(c),j} \right)}{4N_c} \quad (5.9)$$

ただし、 $i \neq i(c)$ かつ $j \neq j(c)$

$$\Gamma_{i,j(c)} = \begin{cases} 1 & |z'_{i(c),j(c)} - z'_{i,j(c)}| \geq z_{th} \text{ のとき} \\ 0 & \text{それ以外のとき} \end{cases}$$

$$\Gamma_{i(c),j} = \begin{cases} 1 & |z'_{i(c),j(c)} - z'_{i(c),j}| \geq z_{th} \text{ のとき} \\ 0 & \text{それ以外のとき} \end{cases}$$

5.2.12 GAの適応度の定義

GAにおける次世代の個体の生成方法として、各個体の適合度に比例して確率的に個体を選ぶルーレット戦略* [12] を用いた。また、優秀な個体を次世代に存続させるエリート保存戦略* [12] を併用した。

まず、世代毎の個体の中で適合度Fの高い順からS%の個体を優秀個体として、次世代にそのまま生存させる。そして、(100-S/100)%の個体については、ルーレット戦略で選択した個体により交叉と突然変異*を行い、次世代の個体を決定するものとする。

5.2.13 GAの進化方法と終了判定

交叉は、二つの個体間で染色体を組み替えることによって新しい個体を生成するものであるが、本論文においては2点交叉*を用いた。即ち、ルーレット戦略で選択された親個体A、Bについて、ランダムに選択した染色体上の2点間の遺伝子を親個体A、B間で入れ替えて、新たな2つの子供個体を生成する。そして、これらの子供個体を次世代の個体とする。また、交叉によりできた子供個体について、 Θ %の確率で突然変異を発生させている。突然変異を行う個体については、ランダムに遺伝子を1個選択し、そのビットを反転させている。以上の処理を所定の個体数が揃うまで繰り返し、次世代の個体を決定する。

上記の方法によりGA処理を行い、各世代において最大適応度をもつ個体の適合度を記録する。そして、その値が指定の世代数の間変化しない場合(デフォルト値: 15世代)、もしくは最大適合度が設定したしきい値(デフォルト値:0.9)以上となったとき、GAの処理を終了し、最大適合度を有する個体の組み合わせを、疑似良品面を構成するための補間を実行する補間エリアの組み合わせとする。

5.2.14 判 定

5.2.13で得られた補間エリアの組み合わせに基づき、(5.2)式により疑似良品面を構成し検査対象画像と濃度差分を行う。そして、設定したしきい値(I_{th})以上の箇所を欠陥部としている。

5.3 低コントラスト欠陥検出システムの使用方法

5.3.1 パラメータの説明

本検出システムを利用する場合は、以下のパラメータを設定する必要がある。

<検査対象に関するパラメータ>

(a) Q_{th} : 補間候補決定のためのしきい値。5.2.6で述べたモチーフの評価値 Q_v がこの値以上の時、補間候補対象となる。(デフォルト値: 0.1)

<スプライン関数に関するパラメータ>

(a) データ点間隔: 5.2.3で述べたスプライン関数を構成するためのデータ点間の間隔を設定する。データ点間隔を小さくすると、微細な濃度変化の検出が可能となるが、処理時間がかかる。また、データ点間隔を広くすると、画像濃度が全体的に平均化されてしまい、欠陥部の濃度変化をうまく捉えることができない。本システムでは、デフォルトで10画素間隔としている。

<遺伝的アルゴリズムに関するパラメータ>

(a) G_1 : F_1 に対する重み付け。(デフォルト値: 0.5)

注) F_1 : 補間候補エリアの中で、矛盾補間候補対が同時に補間対象となることに対するペナルティ。

(b) G_2 : F_2 に対する重み付け。(デフォルト値: 0.3)

注) F_2 : 選定されたデータ点により構成されるスプライン面の滑らかさが正常部の条件から外れることに対するペナルティ。

(c) G_3 : F_3 に対する重み付け。(デフォルト値: 0.2)

注) F_3 : 隣接データ点間の濃度差が正常部の範囲から外れることに対するペナルティ。

(d) Z_{th} : F_3 に関するしきい値。近傍との濃度差がこれ以上の場合、ペナルティが与えられる。

(デフォルト値: 10階調)

(e) GA終了しきい値: (5.6)式の評価値(F)がこの値以上となった場合、GA処理を中止し、そのとき最大適合度を有する個体のパターンを、疑似良品面構成のための補間の組み合わせとする。(デフォルト値: 0.9)

(f) GA終了世代数: ここで、指定する世代数において、最大適合度の値が変化しない場合、GA処理を終了する。(デフォルト値: 15世代)

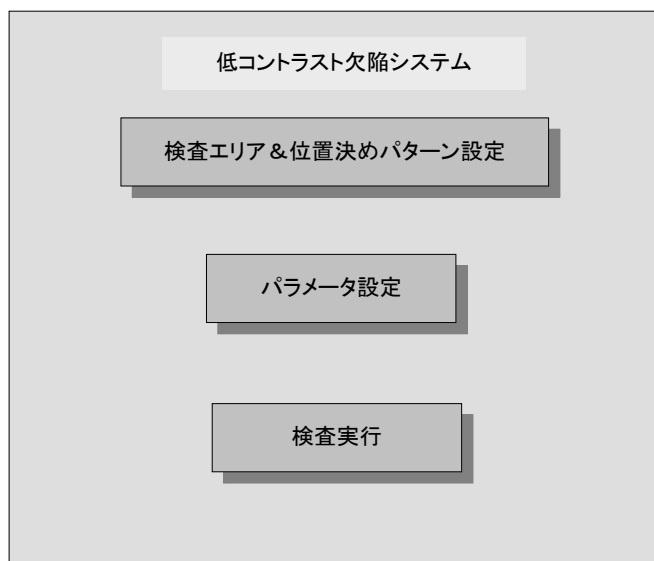
<判定に関するパラメータ>

(a) I_{th} : 補間候補決定のためのしきい値。5.2.6で述べたモチーフの評価値 Q_v がこの値以上の時、補間候補対象となる。(デフォルト値: 6階調)

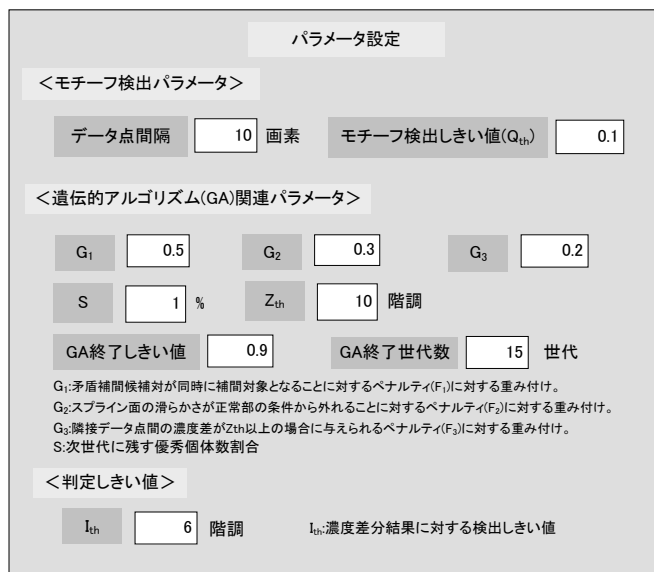
5.3.2 操作について

図5.7(a)に示す画面により、欠陥検査を実施する。

- (a) 「検査エリア&位置決めパターン設定」ボタンにより、マウスを用いて、欠陥検出範囲と位置決めパターンを決定する。
- (b) 「パラメータ設定」ボタンにより、図5.7(b)のパラメータ設定画面が表示されるので、5.3.1で示したパラメータを設定する。
- (c) 「検査実行」ボタンにより、検査を実行する。現状はオフライン検査であり、事前に取り込んだ画像ファイルを読み込んで、検査を実行している。



(a) 操作画面



(b) パラメータ設定画面

図5.7 表示画面

5.3.3 画像入力部

画像入力部を示す。画像入力部はカメラ、照明装置からなり、検査画像の入力を行う。照明は、ドーム照明、リング照明があり(図5.8)、それ以外にも疑似落射照明等の照明も可能であり、欠陥状況に応じて、使い分ける。

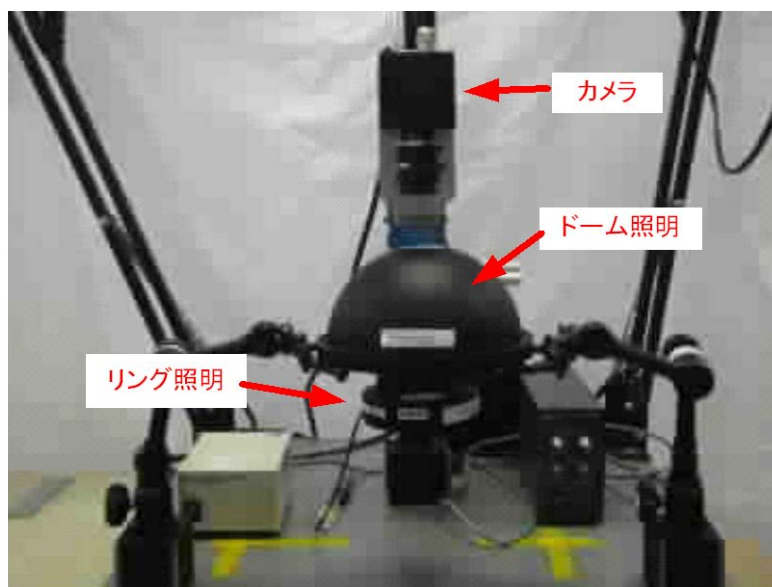


図 5.8 画像入力部

5.4 実験例

ICリードフレーム部のパッド部分を検査対象として、検査員により、良品と判定されたサンプル72個及び欠陥と判定されたサンプル20個について、提案手法と矢口らによる平滑スプライン関数を用いた欠陥検出方法〔13〕〔14〕（以下、平滑スプライン法）および背景別統計的しきい値法〔6〕による手法を比較した。検査範囲(図5.3参照)は、幅130画素及び縦150画素(実エリア：8mm×9.2mm)である。また、欠陥については、正常部との最大濃度差に応じ、(a)20階調未満の場合、(b)20階調以上40階調未満、及び(c)40階調以上の3種類に分けて性能評価を行った。

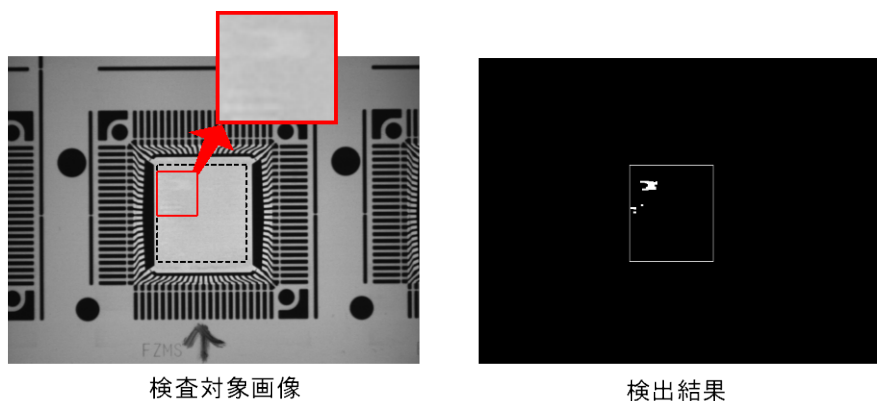
5.4.1 実験条件

検査画像は、解像度640×480画像のモノクロ画像を用いている。前処理として、3×3の平滑化フィルタ処理〔15〕によるノイズ除去を行い、正規化相関法〔3〕によるパターンマッチングにより、位置合わせを行った。また、各手法とも設定したしきい値以上の箇所を欠陥として検出するが、検出誤差等を考慮し半径直径2画素(約100 μ m)以下のものは削除することとした。なお、使用したコンピュータのCPUクロック数は、2.16GHzである。なお、5.3.1に示したパラメータについては、デフォルト値を用いた。

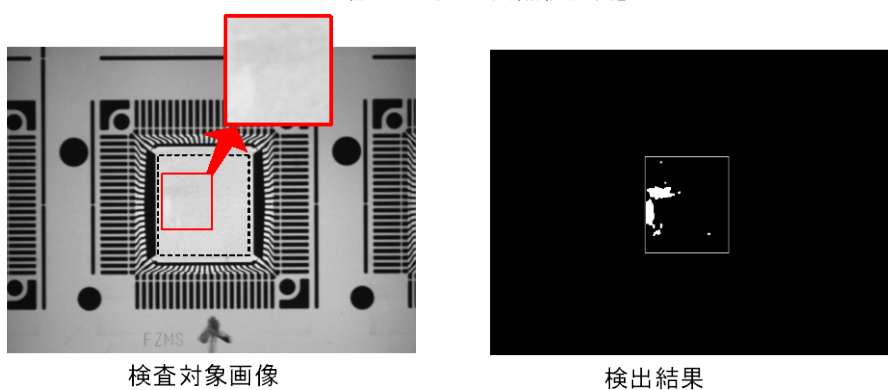
5.4.2 実験結果例

図5.9に本マニュアルに示す検出方法で検出実験を行った結果を示す。図5.9(a)、(b)共に、低コントラスト欠陥部を検出している。

また、比較のために、参考文献〔13〕〔14〕の平滑化スプラインを用いた方法と文献〔6〕の背景別統計的しきい値を用いた欠陥検出例を表5.1に示す。本マニュアルで示す検出手法は、良品の誤検出はあるものの、全体的な検出精度は最も良い結果が得られている。ただし、平均処理時間に250msec.を要しているため、使用に当たっては、認識率と処理時間を考慮する必要がある。



(a)低コントラスト欠陥検出例_1



(b)低コントラスト欠陥検出例_2

図 5.9 低コントラスト欠陥検出例

表 5.1 欠陥検出比較実験

検査 サンプル	正常部との濃 度差:ID (階調)	サンプル数	正解判定率		
			本マニユア ルの手法	平滑化スプ ライン法	背景別統 計的しきい 値法
欠陥サンプル	ID<20	8個	75%	37.50%	0%
	20≤ID<40	10個	100%	100%	50%
	40≤ID	2個	100%	100%	100%
良品サンプル		72個	93.10%	66.70%	100%
良品サンプル		92個	92.40%	68.50%	85.90%
平均処理時間			251msec.	240msec.	31msec.

5.5 仕様

(a) カメラ：東芝テリー製 CS3960DCL

撮像素子：2/3型インターライン方式CCD*

有効画素数：1392(H) x 1040(V) 正方格子配列

走査方式：プログレッシブスキャン*

映像出力：カメラリンク*出力準拠 データ 12/10/8bit切換

レンズマウント：Cマウント

(b) ドーム照明：CCS製 HPD-150-SW(白色光)

電源：24V/20W

(c) リング照明：CCS製 LDR2-90BL(青色)

電源：24V/15W

(d) 画像処理ライブラリ：Matrox製 MIL9.0

(e) 低コントラスト欠陥検出率：92%以上

注) 5.4.2で示した実験結果による。

(f) 平均欠陥検出時間：250msec.

注) 130画素×150画素において、CPUクロック数2.16GHzのパソコン使用時の時間。

関連用語の解説

スプライン関数

「スプライン」という言葉は、製図のとき滑らかな曲線を描く道具(自在定規)を意味している。スプライン関数で曲線を当てはめることは雲形定規や自在定規によって曲線を描くかわりに数式的に行っていることに当たる [10]。スプライン関数は、サンプリングされたデータ点から、計算により曲線や曲面を当てはめるものである。

ラインプロファイル

画像上に設定された直線上における濃度変化を示したもの。

遺伝的アルゴリズム(GA)

生物進化(選択淘汰・突然変異)の原理に着想を得たアルゴリズムであり、確率的探索・学習・最適化の一手法と考えることができる [12]。GA を用いることにより、高速に最適化を行うことができる。

リーゼンフェルトスプライン

通常のスプライン曲線は、与えられたデータ点を補間するものであるが、リーゼンフェルトスプラインでは、データ点を制御点として働くスプラインであり、他のスプラインと異なり、連立方程式を解く必要がないという特徴がある。

B-スプライン

種々のスプライン関数を構成するうえで、基礎(basis)となるスプラインであり、スプライン関数は一般的に B-スプライン関数の重ね合わせとして表すことができる。

階 数

スプライン関数の滑らかさの指標となるものであり、この値が大きくなるとスプライン曲線及び曲面は滑らかさを増す。

ローパスフィルタ

信号に含まれる各周波成分のうち、低周波成分のみを通過させるフィルタのことである。

シェーディング補正

画像入力を行う際に、照明状態、撮像素子の特性等の影響などによって入力画像に生じた濃度レベルのむら(シェーディング)を補正すること。

排他的論理和

論理演算の一つであり、共に真、共に偽のときに、偽を返す。その真と偽が異なるときに、真を返す。

ルーレット戦略

GAにおいて、次世代の個体を決定するための元となる親を選ぶ方式であり、各個体の適応度に応じた確率により、次世代の個体を作るための親(2 個体)を選択する。適応度に応じた個体が、選択されやすくなる。

エリート保存戦略

GAにおいて、次世代の個体を決定する方法のひとつであり、適応度の高い個体をそのまま次世代に残す方法である。

突然変異

GAにおいて、染色体上のある遺伝子座の値を他の対立状態の値に置き換えることにより、新しい個体を生成するものである。

2点交叉

GAにおいて、染色体上の2点で挟まれた範囲を個体間で交換することにより、新しい個体を生成するものである。

インターライン方式 CCD

受光部で光電変換した信号電荷を一斉に垂直レジスタに移したあと、垂直転送 CCD に移し、その後、水平転送 CCD から1ラインずつ読み出す CCD です。

CCD

CCD (Charge Coupled Device) は、光として入射された画像信号を電気信号に変換する機能を有した素子のことで、入射された光を光電変換により電荷に変換し、その電荷を外部に転送します。

プログレッシブスキャン

ノンインターレーススキャンとも呼ばれ、インターレーススキャンが一本置きに画像走査を行うのに対して、この方式は上から順次走査を行います。

カメラリンク

カメラと画像信号取り込み部とのインターフェース規格の一つです。

参考文献

- [1] 秦清台：“見えにくい欠陥・評価しにくい欠陥・人の感覚に依存する欠陥の外観検査”，電気学会産業システム情報化研究会資料，(2006)，pp. 23-26.
- [2] 中野宏毅，森由美：“マルチウェーブレットを用いた低コントラスト欠陥の定量評価手法 液晶ディスプレイのムラの抽出・定量化手法”，View2004 ビジョン技術の実利用ワークショップ，横浜(2004)，pp. 44-47.
- [3] (社)精密工学会画像応用技術専門委員会編：“画像処理応用システム”，東京電機大学出版社(2000)，p. 98，pp. 208-209.
- [4] 前田俊二，窪田仁志，牧平坦：“LSIウェーハパターン自動外観検査における最適しきい値の自動生成”，信学論誌D-II J79 No. 2 (1996-2)，pp. 191-201.
- [5] 前田俊二，遠藤文昭，牧平坦，窪田仁志：“比較検査における数値解析手法を用いたしきい値設定支援”，信学論誌D-II J81 No. 1 (1996-2)，pp. 27-36.

- [6] 浜松玲, 渋谷久恵, 西山英利, 大島良正, 前田俊二, 野口稔:” 背景別統計的しきい値法を用いた半導体ウェハ検査技術”, View2004 ビジョン技術の実利用ワークショップ, 横浜(2004), pp. 1-5.
- [7] 沼田宗敏, 輿水大和:” 階層化パラメータを用いた学習型大局的欠陥検査”, 動画像処理実利用化ワークショップ2008, (2008), pp. 222-227.
- [8] 岩田健司, 佐藤雄隆, 尾崎竜史, 坂上勝彦:” 逐次更新型統計的リーチ特徴によるロバスト背景差分”, View2008ビジョン技術の実利用ワークショップ, 横浜(2008), pp. 294-299.
- [9] 石井明, 越智保雄, 阿久津正幸:” 欠陥モデルによる内部溶接欠陥の自動認識”, 日本機械学会論文集 (A編), 60巻578号 (194-10), No. 94-0335, (1994), pp. 272-277.
- [10] 桜井明:” スプライン関数入門”, 東京電機大学出版局(1981).
- [11] 桜井明, 菅野敬祐, 吉村和美, 高山文雄:” Cによるスプライン関数”, 東京電機大学出版局(1993).
- [12] 北野宏明:” 遺伝的アルゴリズム”, 産業図書(1993), p. 138, p. 13, pp. 136-137,
- [13] 小野豊土, 矢口博之, 市野学:” 液晶パネルの自動検査システムの基礎的研究”, 電子情報通信学会情報・システムソサイエティ大会, (1997), p 171.
- [14] 渡部典生, 市野学, 矢口博之:” むら検査方法および装置”, 公開番号:特開平11-66311 (1999).
- [15] 高木幹雄, 下田陽久:” 新編 画像解析ハンドブック”, 東京大学出版会(2004), pp. 1899-1900.

第6章 スペックル干渉法を利用した 3D変形分布計測

6.1 概 要

半導体パッケージは複数の熱膨張の異なる部材で構成された複合材料である。そのため、実装時や通電時（作動時）発熱による温度変化により、部材の熱膨張の違いに由来する動作不良や破損などの不具合が生じる場合がある。そこで電子部品の信頼性向上のために半導体製品の実装時や通電時（作動時）の高精度な2D-3D変形計測が求められている。実装時や通電時（作動時）の変形を把握することにより、動作不良や破損などの不具合が生じないパッケージの構造設計、材料選定が可能となる。この章では3次元の変位分布計測が可能なスペックル干渉法について紹介し、駆動させた時のICパッケージ変形挙動計測例を紹介する。

レーザ干渉を利用した計測法はレーザの波長程度の計測分解能を持つ高精度な計測手法である。よく知られているマイケルソン型*やフィゾー型*の干渉計では平坦な面を持つ参照面との比較により形状分布（高さ）を計測する面外方向の計測法である。また、モアレ干渉法は、測定物表面に回折格子を貼り付け、表面が変形することで回折格子が歪み、歪んだ様子が干渉縞として得られる手法で、面内方向の変形分布を計測する手法である。一方、今回用いるスペックル干渉法は、面外と面内の両方の変形分布計測が可能な手法である。スペックル干渉法はレーザ光が粗面などによって散乱・反射することで生じるスペックルパターンを利用した計測手法で、実構造物のような粗面を持つ測定物の計測法として非常に適している。測定領域は理論的には顕微鏡領域から数 m^2 程度の広範囲までの変位分布計測が可能である。計測分解能はレーザ干渉の位相解析を行うことで数 nm ～数 $10nm$ となり、非常に高精度な計測法である。

6.2 スペックル干渉法

6.2.1 スペックル干渉法の原理[1,2]

本研究で利用したスペックル干渉法の原理について説明する。レーザ光を粗面に照射した場合、レーザのコヒーレンシ（可干渉性）によってランダムな位相の光が重ね合い、図 6.1 に示すように干渉し、ぎらぎらと輝く斑点模様が観察される。この干渉パターンはスペックルパターンと呼ばれる。

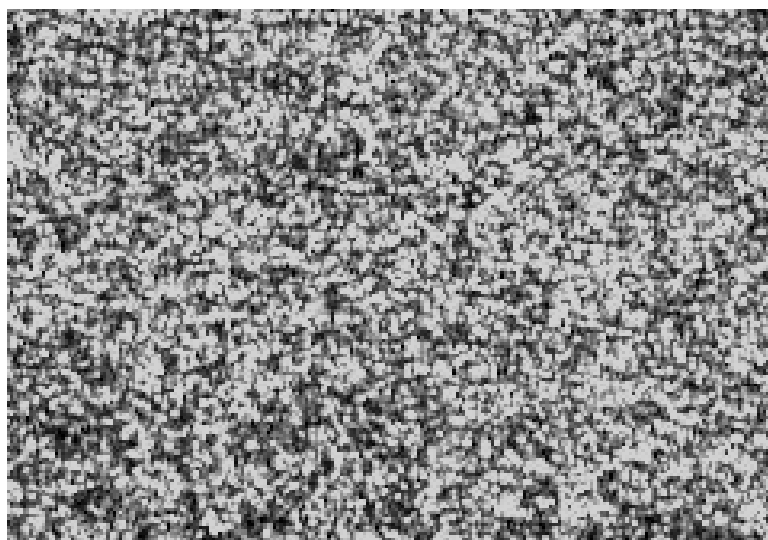


図 6.1 スペックルパターン

スペックル干渉法は、2つ以上の光路を通ったレーザ光を重ね合わせた時に生じるスペックルパターンを利用して変位を求める方法で、図 6.2 に面外変位分布を計測する光学系の一例を示す。この光学系は1つのレーザ光をハーフミラーにより2方向に分け、測定物と参照物の表面で散乱・反射させる。両方の表面で散乱・反射したレーザ光を測定面（CCDカメラ）上で結像させてスペックルパターンを得る。ここで測定面が面外方向に w だけ変形したとすると、変形前後で二つの光路を通る光の位相差 $\Delta\theta$ は次式で表される。

$$\Delta\theta = \frac{4\pi w}{\lambda} \quad (6.1)$$

ここで、 λ はレーザの波長である。また、測定物と参照物からの反射光が CCD カメラセンサの1画素上に到達する光の振幅をそれぞれ a_1 , a_2 とし、両者の位相、並びに位相差をそれぞれ ϕ_1 , ϕ_2 , $\phi = \phi_1 - \phi_2$ とするとこの点の変形前の強度は次式で表される。

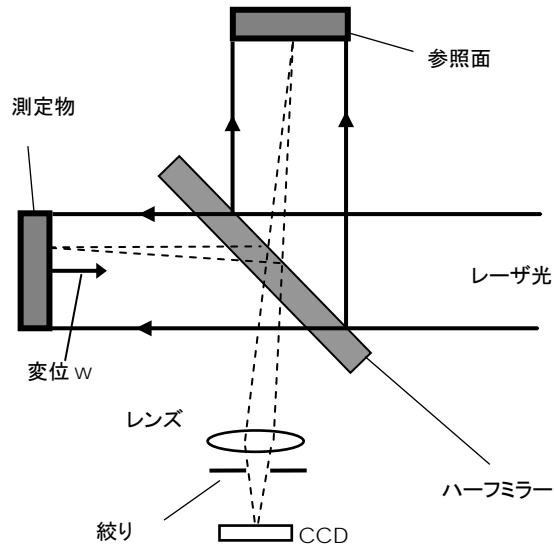


図 6.2 スペックル干渉法による面外変位計測用の光学系の模式図

$$\begin{aligned}
 I_{before} &= \left| a_1 \exp(i\phi_1) + a_2 \exp(i\phi_2) \right|^2 \\
 &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \phi
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

変形後の強度 I_{after} は変形による位相差 $\Delta \theta$ を用いると

$$I_{after} = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\phi + \Delta\theta)
 \tag{6.3}$$

となる。

次に変形前 I_{before} と後 I_{after} のスペックルパターンとの差の絶対値を取ると

$$\begin{aligned}
 |I_{before} - I_{after}| &= |2a_1a_2 [\cos(\phi) - \cos(\phi + \Delta\theta)]| \\
 &= 4|a_1a_2| \left| \sin\left(\phi + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \right| \left| \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \right|
 \end{aligned}
 \tag{6.4}$$

となり、この式より $|\sin(\phi + \Delta\theta/2)|$ は 0 から 1 までランダムな値をとり、 $|\sin(\Delta\theta/2)|$ は 0 から 1 まで規則的に変化することが分かる。変形による位相差 $\Delta\theta$ が π の奇数倍 $(2n+1)\pi$ の場合は、 $|\sin(\Delta\theta/2)| = 1$ となり強度が最も大きくなり、偶数倍 $2\pi n$ の場合は、 $|\sin(\Delta\theta/2)| = 0$ となり強度がゼロとなる。そのため表面に沿った変形分布が連続的に変化している場合、明暗の干渉縞として変形分布が形成される。この干渉縞 1 本当たりの変位量は $\Delta\theta = 2\pi$ とし、式 (6.1) よりレーザの波長の半分となる。この原理を利用し、縞分布よりレーザ照射方向の面外変位分布を求めることができる。

一方、面内変位に関しては図 6.3 に示す光学系のように測定面の法線に対して対称な 2 方向からレーザ光を照射し、法線方向から観察するとレーザの照射方向、即ち x 軸方向の面内変位分布を求めることができる。測定面が面内方向に u だけ変形したとすると変形前

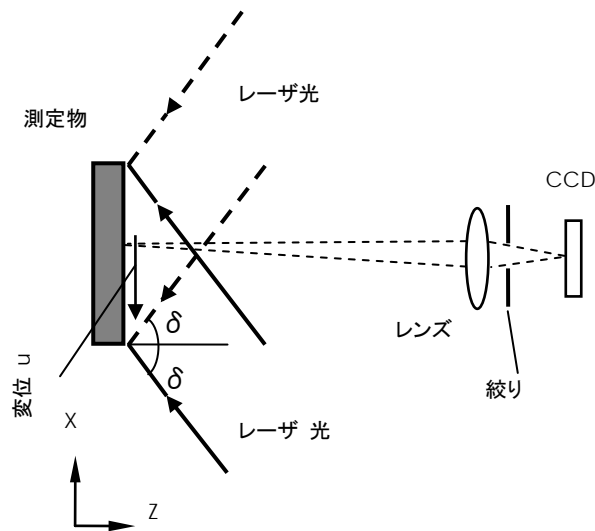


図 6.3 スペックル干渉法による面内変位計測用の光学系の模式図

後で二つの光路を通る光の位相差 $\Delta \theta$ は次式で表される。

$$\Delta \theta = \frac{4\pi u}{\lambda} \sin \delta \quad (6.5)$$

ここで、 λ はレーザーの波長で、 δ は照射光が測定面の法線となす角である。面内変位により生じた干渉縞は縞 1 本当りの変位量は $\Delta \theta = 2\pi$ とし、式 (6.5) より求められ、縞分布よりレーザー照射方向の面内変位分布が得られる。

6.2.2 スペック干渉法の数値化

スペックル干渉法で得られる干渉縞一本当たりの変形量は数 100nm 程度であるが、干渉縞を数値化することで更に高精度なナノレベルでの計測が可能となる。数値化の方法として広く使われている方法に位相シフト法がある[1]。この方法は面外変位の場合は参照用のレーザー光、面内変位（2光束法）の場合は片方のレーザー光の位相を変化させたものを3枚以上取り込み、演算し、数学的に位相を求める方法である。この方法では3枚以上の画像を取り込むため基本的に静的（もしくは準静的）な条件での計測に限られているが、高精度な位相解析が可能である。しかしながら実現象（熱膨張やクリープ現象*、応力緩和*など）は時々刻々と変化しているため動的な変形挙動計測が重要である。次に、動的変形挙動計測法を紹介する。

動的な計測法はスペックルパターン画像中の1画素の強度変化に着目し、強度変化を時系列に評価し変形を求める。本計測法では時系列評価法で変形方向を同定するために一方向変位キャリアを利用した位相解析法を用いる[2,3]。面外変位計測で参照面を一方向に、一定速度 u で移動させながらスペックルパターンを計測した場合、1画素の時系列強度変

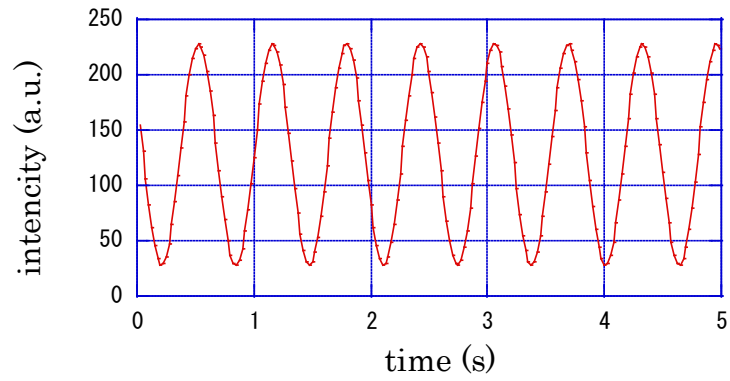


図 6.4 参照面が速度($u=1000\text{nm/s}$)で移動している時の 1 画素の時系列周期変化

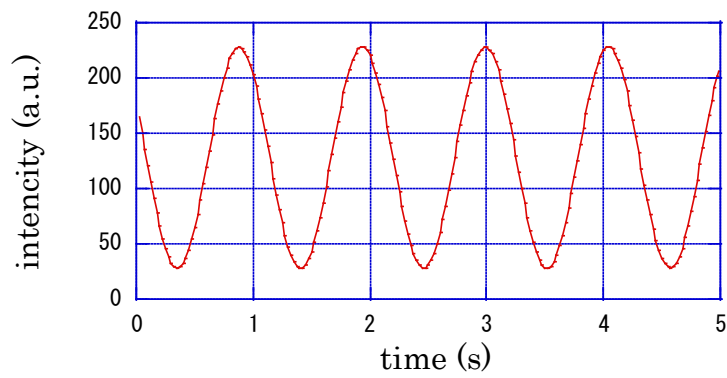


図 6.5 参照面が速度($u=1000\text{nm/s}$)で移動し、測定物が速度($v=400\text{nm/s}$)で移動している時の 1 画素の時系列周期変化

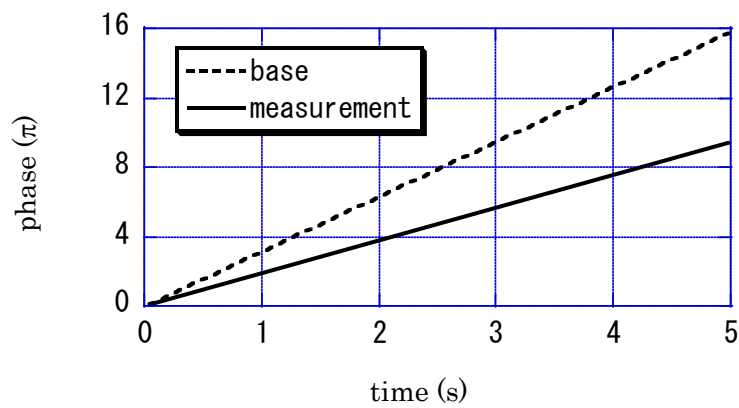


図 6.6 図 6.4 (base) と 6.5 (measurement) の位相接続結果

化は図 6.4 のような一定周期の強度変化（基準変位）となる。一方、測定物の変形（一定速度で変形が生じていると仮定）が付加されると変形方向に応じて図 6.5 に示すように図 6.4 の周期が変化する。図 6.4, 5 の周期変化を位相に変換し、位相接続した結果を図 6.6 に示す。破線は基準変位で、実線は変形が付加されたものである。両者とも変形条件が一定のため一定の傾きで位相が時間とともに増加している。ここで両者の差の絶対値（単位： π ）に定数（この場合は $\lambda/4$ ）を掛けたものが変形量となり、測定物、参照面ともにカメラに近づく向きを正とすると、基準変位キャリアのグラフより下側にある場合は、参照面の変形方向と測定物の変形方向は同じで、基準変位キャリアのグラフより上側にある場合は逆方向の変形となる。例えば、基準変位キャリアがカメラに近づいている場合、図 6.6 の場合では測定物はカメラの方向に向かって変形していることになる。

6.3 スペックル干渉法を利用した面外変形分布計測装置の使用法

計測準備

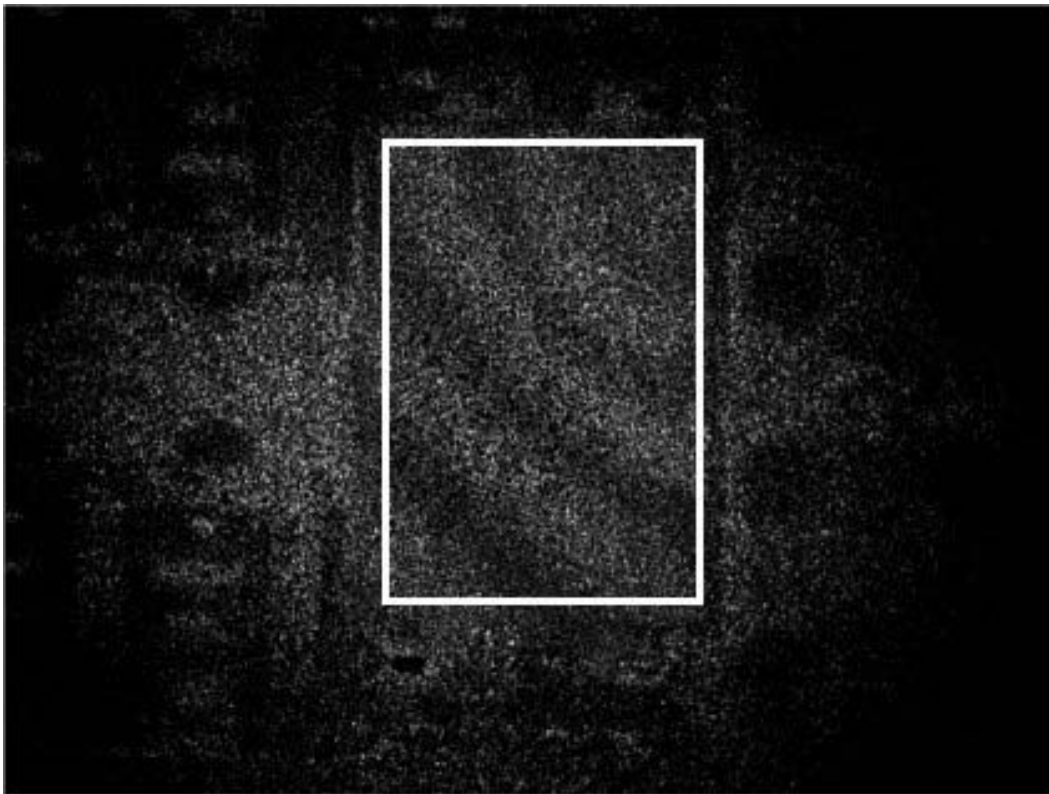
- ①装置を起動させて、画像をモニターに表示させる。
- ②モニターを見ながら測定対象物と装置の位置やレンズを調整し、最適な大きさに測定物を映し出す。
- ③レーザを起動させ、レーザの出力とレンズの絞りを調整しながら最適なスペックルパターンを発生させる。この際、スペックルパターンの輝度値がカメラの階調値の中に入るようにする。(白すぎたり、黒すぎたりしない)
- ④微動ステージを動作させ、モニター上のスペックルパターンが明暗を繰り返す様子を観察し、再度明るさの調整を行う。
- ⑤スペックル干渉縞が得られていることを確認するために、微動ステージを動作させながら5秒ほど画像を取り込む。解析ソフトを立ち上げ、干渉縞作成ボタンで画像を読み込み、スペックル干渉縞を作成し、コントラストの良い干渉縞が得られているか確認する。もし、干渉縞のコントラストが不十分な場合は、再度③～⑤を繰り返す。

本計測

- ⑥IC の駆動時の変形挙動を計測する場合は、最初に微動ステージを動作させた後、画像の取り込みを行い、続いてICを通電させる。
- ⑦取り込みを終了し、ICの通電を止め、微動ステージを止める。
- ⑧解析ソフトで画像を取り込み。この際、2のN乗の数だけ画像を取り込む。(例えば256, 512, 1024枚)
- ⑨画像中で解析を行う位置を決めて、解析を行う。
- ⑩解析結果はBMPとCSV形式のファイルとし出力される。

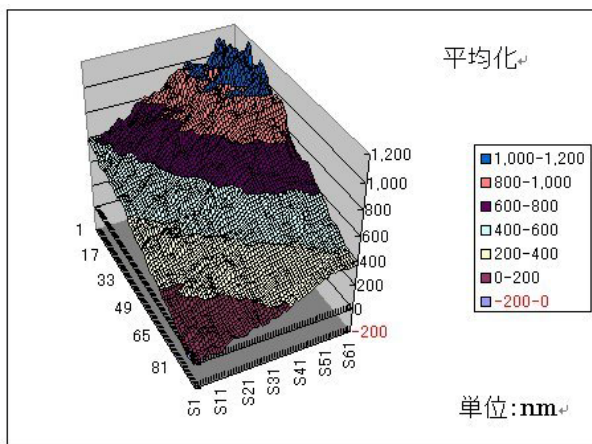
6.4 実施例

ICチップを駆動させて5秒後の面外変位分布計測結果（1）

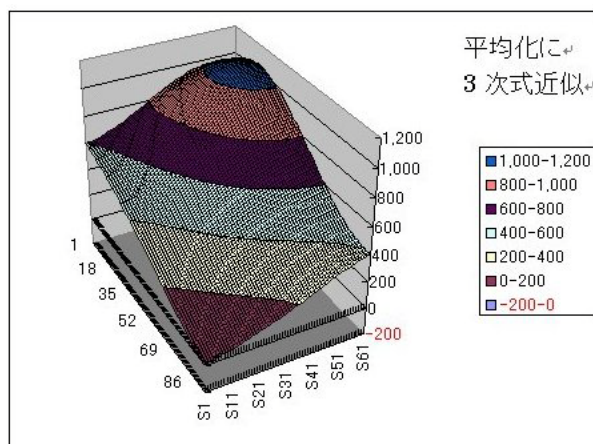


スペックル干渉縞

白枠部の解析結果（解析点：61x91）

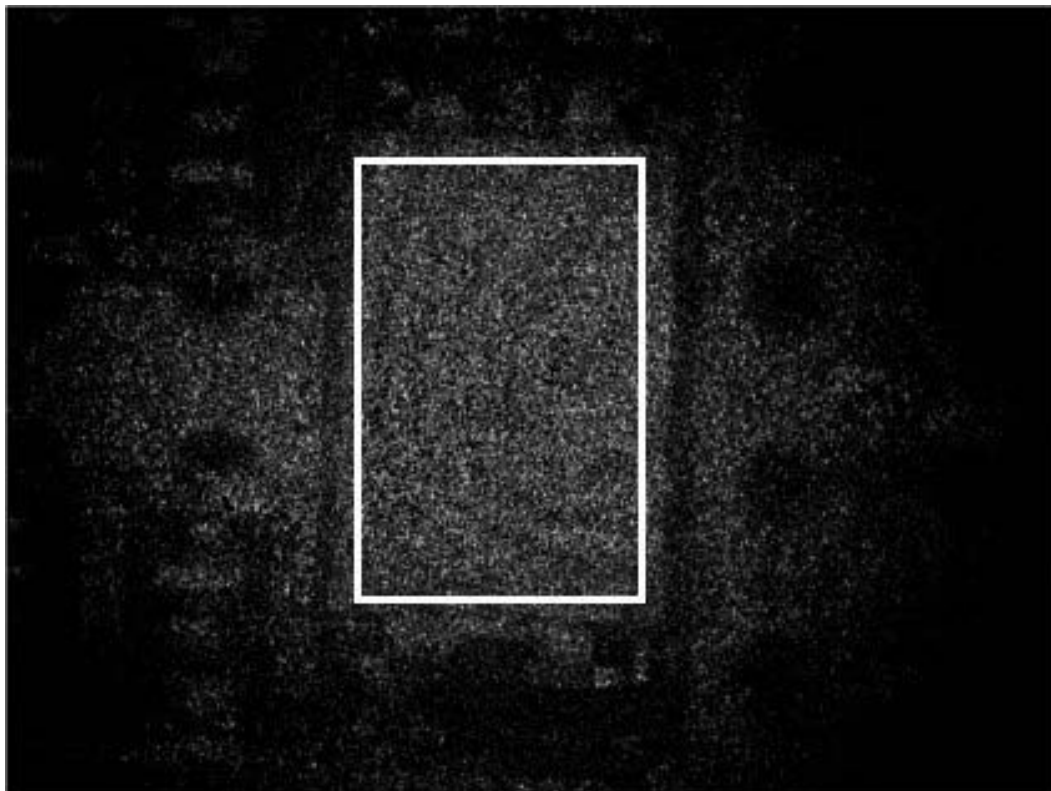


解析結果（3x3 平均化処理）



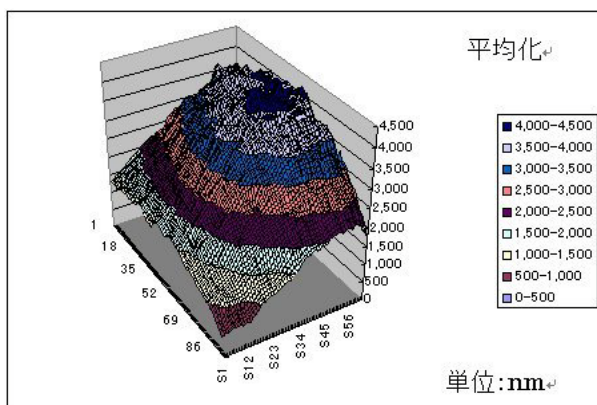
解析結果（3x3 平均化処理、3次曲面式近似）

ICチップを駆動させて5秒後の面外変位分布計測結果（2）

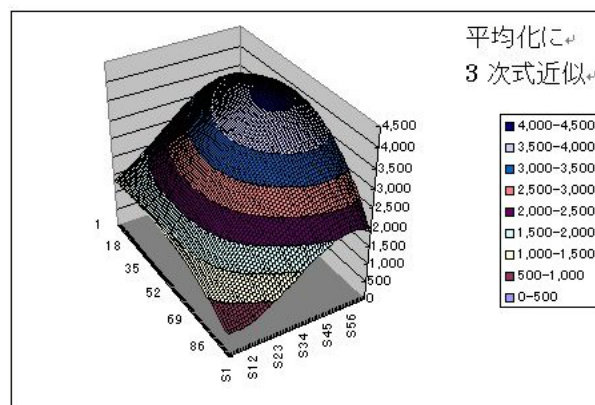


スペックル干渉縞

白枠部の解析結果（解析点：61x91）

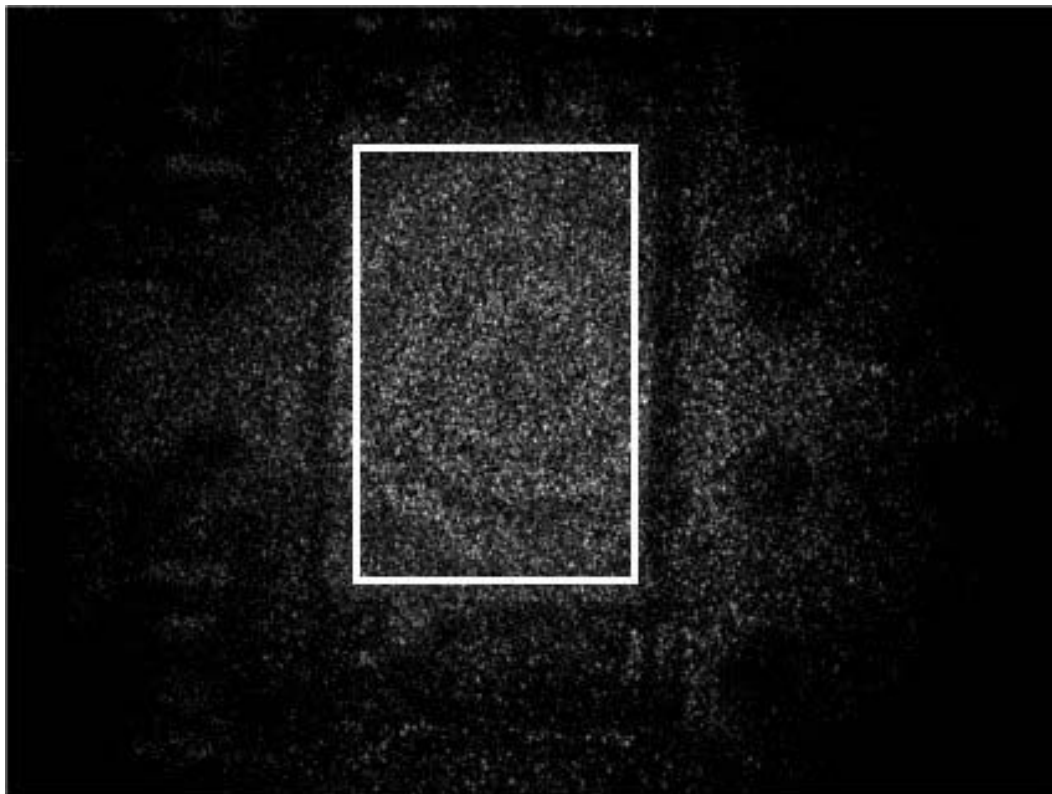


解析結果（3x3 平均化処理）



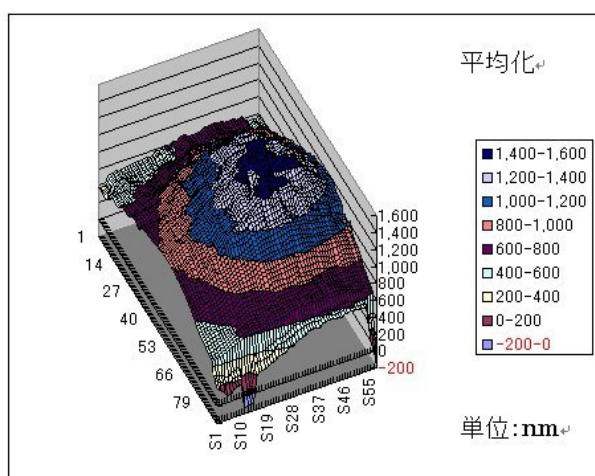
解析結果（3x3 平均化処理、3次曲面式近似）

ICチップを駆動させて5秒後の面外変位分布計測結果（3）

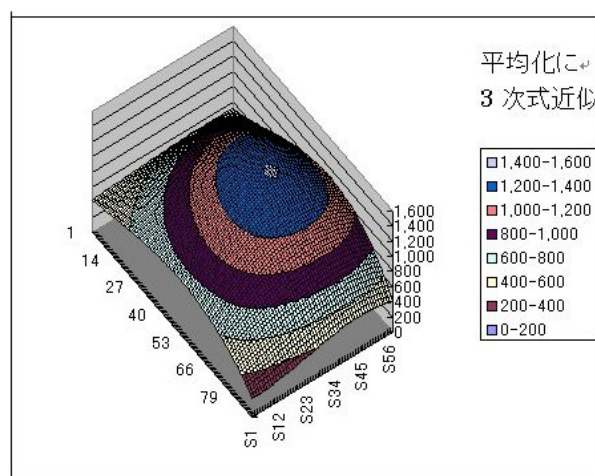


スペックル干渉縞

白枠部の解析結果（解析点：61x91）



解析結果（3x3 平均化处理）



解析結果（3x3 平均化处理、3次曲面式近似）

6.4 仕様 (スペック票)

装置の外観図並びにコントローラの写真を図に示す。



図 6.7 計測ヘッドの写真



図 6.8 コントローラの写真

装置の主な仕様

- ・使用するレーザーの波長：780nm
- ・干渉縞 1 本あたりの変位量：390nm
- ・空間分解能：640x480pixels
- ・画像取り込み速度：30fps
- ・測定範囲：50x50mm
- ・連続計測時間：10 分以上 (HDD の容量に依存)

関連用語の解説

マイケルソン型

アメリカの物理学者マイケルソンによって考案された二光線干渉計で、光速度の測定に用いられたことで有名である。

<http://100.yahoo.co.jp/detail/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3%E5%B9%B2%E6%B8%89%E8%A8%88/>

フィゾー型

フィゾー型干渉計は、測定物表面の極めて近い位置に基準平面（極めて平行度の高い平面板）を配置し、レーザ光を測定物に照射し、基準平面と測定物表面からの反射光を干渉させ、測定物表面の面精度を非接触で測定する方法のこと。

クリープ現象

クリープとは、一定の温度、一定の応力を受ける材料が、ある時間を過ぎた後に生じる変形のこと。

<http://www.instron.jp/wa/resourcecenter/glossaryterm.aspx?ID=28>

応力緩和

一定温度で長時間にわたり一定のひずみを呈している材料において応力が減少すること。

<http://www.instron.jp/wa/resourcecenter/glossaryterm.aspx?ID=150>

3 X 3 平均化

画像の縦横 3 列 3 行の輝度値を使用して平均値を求める処理のこと。

3 次曲面式近似

$f(x,y)=Ax^3+By^3+Cx^2y+Dxy^2+Ex^2+Fy^2+Gxy+Hx+Iy+J$ の 3 次曲面式を利用して近似処理のこと。

参考文献

- [1] Pramod, K. R., Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques, John Wiley & Sons, Ltd Press, Chichester (2001).
- [2] 井口学他、実験力学ハンドブック、朝倉書店、p.185-188 (2008) .
- [3] Uchino, M., Development of Dynamic Deformation Measurement Method Using Electronic Speckle Pattern Interferometry, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2007, OS12-1-3(CD), (2007).

第7章 ま と め

九州地域の牽引産業と位置付けられている半導体産業の内、多くの中堅・中小企業の展開する半導体後工程の検査技術を対象とし、九州産業技術イノベーション創出共同体形成事業・研究開発環境支援事業「高精度・高スループット 2D-3D インスペクション技術の開発」（平成 20 年度～21 年度）に取り組んだ。本事業は、現場からのニーズが特に強い、IC リードフレーム検査、ワイヤボンディング検査、半導体パッケージ検査、およびプリント基板(実装品)検査を中心に、企業の技術課題解決に資する試験・評価・分析方法を確立し、マニュアル化することを目的としている。本事業にはこれらの技術課題に関連した各地域企業への対応実績および技術ポテンシャルを有する、産総研九州センター、福岡県工業技術センター、熊本県産業技術センターおよび鹿児島県工業技術センターの 4 研究機関が参画した。

平成 20 年度は画像処理のみにより精度の高い位置、濃淡、高さ情報を取得するための技術である「焦点深度の深い鮮明な撮像法」、「低コントラスト欠陥検出法」、「2D 画像に基づく 3D 情報取得法」、および「高精度 2D - 3D 変形測定法」のマニュアル化に取り組んだ。上記 4 研究機関の共同体研究開発事業として各課題を分担し、5 回にわたる検討会を開催し、各研究機関相互の連携・調整を図りつつ、本事業を推進し、次の成果を得た。

「焦点深度の深い鮮明な撮像法」では、半導体パッケージ及びプリント基板を対象として、多焦点撮像光学系の構築、照明系の構築、画像合成ソフトの開発を行い 2 焦点及び 3 焦点撮像法、照明系、画像合成ソフトに関するマニュアルを作成した。

「低コントラスト欠陥検出法」では、IC リードフレームにおけるしみ等の欠陥特徴の解析と欠陥検出ソフトの開発を行い、低コントラスト欠陥検出ソフトに関するマニュアルを作成した。

「2D 画像に基づく 3D 情報の取得法」では、非合焦関数解析法について、画像解析ソフトの開発とこれを用いた QFP 型パッケージのリード浮き、パッケージ下面・上面の接地面からの高さ、傾き等の検出性能評価、およびプリント基板を対象としたリード浮きの検査性能評価を実施し、これらの諸元を検出する技術マニュアルを作成した。さらに、分光位相差検出法については、画像解析ソフトの開発を行い、高さ測定の画像解析ソフトについてマニュアルを同様に作成した。

「2D - 3D 変形測定法」では、スペックル干渉法を利用した動的 3 次元変形計測法による半導体パッケージの面外変形計測の実証試験を行い、マニュアルを作成した。

平成 21 年度にはそれぞれの課題について生産現場に対応した実証試験を行い、各検査技術の確立を図ると共に、マニュアルを統合・完成させる。半導体パッケージ、プリント基板およびワイヤボンディングについて、画像処理のみによる様々な 2D-3D 検査項目を高速で精度良く測定し、かつ IC リードフレームのしみ、傷、付着する異物などの認識精度が高く、不良品の発生を大きく低減させることが可能な「高精度・高スループット 2D-3D インスペクション技術」を確立する。

平成 21 年 3 月

【問い合わせ先一覧】

【第2章、第3章、第4章、その他全体的内容】

独立行政法人 産業技術総合研究所 九州センター

〒841-0052 佐賀県鳥栖市宿町 807-1

TEL. 0942-81-3592 FAX. 0942-81-4089

<http://unit.aist.go.jp/collab-pro/ci/wholesgk/index.html>

【第2章、第3章、第4章各章の対象物がプリント基板】

鹿児島県工業技術センター

〒899-5105 鹿児島県霧島市隼人町小田 1445-1

TEL. 0995-43-5111 FAX. 0995-64-2111

<http://www.kagoshima-it.go.jp/>

【第5章 低コントラスト欠陥検出】

熊本県産業技術センター ものづくり室 重森

〒862-0901 熊本県熊本市東町 3-11-38

TEL. 096-368-2101 FAX. 096-365-5704

<http://www.kmt-iri.go.jp/>

【第6章 スペックル干渉法を利用した3D変形分計測】

福岡県工業技術センター 機械電子研究所

〒807-0831 福岡県北九州市八幡西区則松 3-6-1

TEL. 093-691-0260 FAX. 093-691-0252

<http://www.fitc.pref.fukuoka.jp/center/meri/meri.htm>