

画像処理に基づく工業部品の欠陥自動検査手法  
に関する研究

中村 良治

# 目次

<b>第1章</b>	<b>諸言</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景 . . . . .	1
1.2	関連研究 . . . . .	2
1.2.1	マスター画像を用いた欠陥検査手法 . . . . .	2
1.2.2	マスターレス欠陥検査手法 . . . . .	7
1.2.3	関連研究における課題 . . . . .	12
1.3	研究目的 . . . . .	12
<b>第2章</b>	<b>目視検査をモデルとした提案手法の着眼点</b>	<b>14</b>
2.1	固視微動をモデルとした検査手法 . . . . .	16
2.2	多方向からの観察することをモデルとした検査手法 . . . . .	16
2.3	検査に用いるパラメータの自動決定手法 . . . . .	20
<b>第3章</b>	<b>コーナー特徴の分散に基づく欠陥検出手法</b>	<b>23</b>
3.1	工業部品のエッジ領域に発生する欠陥 . . . . .	23
3.2	Harris corner detector . . . . .	23
3.3	良品／不良品におけるコーナー特徴の分散 . . . . .	25
3.4	実験 . . . . .	26
3.4.1	実験環境 . . . . .	26
3.4.2	実験と考察 . . . . .	31
3.4.3	総合評価 . . . . .	37
<b>第4章</b>	<b>照明環境を変更した複数枚画像に基づく欠陥検出手法</b>	<b>40</b>
4.1	工業部品の表面領域に発生する欠陥 . . . . .	40
4.2	事前実験：照度差ステレオに基づく法線情報を用いた欠陥検出 [50] . . . . .	41
4.2.1	照度差ステレオ法 . . . . .	42
4.2.2	制限付き二変数回帰を用いた照度差ステレオ法 . . . . .	42

4.2.3	工業部品への適用 . . . . .	47
4.2.4	総合評価 . . . . .	54
4.3	照明環境を変更した複数枚画像に基づく欠陥検出 . . . . .	54
4.3.1	法線のばらつきに基づく評価値 . . . . .	56
4.3.2	輝度のばらつきに基づく評価値 . . . . .	60
4.3.3	検査システム . . . . .	61
4.3.4	繰り返し推定による検査パラメータの自動決定手法 . . . . .	65
4.4	実験 . . . . .	67
4.4.1	実験環境 . . . . .	67
4.4.2	検査処理1「検査エリア毎, 正常/欠陥を判定」の結果 . . . . .	70
4.4.3	検査処理2「欠陥とみなされる箇所の特定」の結果 . . . . .	73
4.4.4	総合評価 . . . . .	80
<b>第5章 結言</b>		<b>84</b>

# 第1章 諸言

## 1.1 研究背景

工業製品は機能の向上や新製品の開発等，発展を続けている．そのため，工業製品に搭載される部品は多様化・精密化が求められ，また部品点数が増加している．それとともに，医療機器や自動車等は，動作不良が人命に直接関わるため，搭載される工業部品には欠陥が存在しないことが求められる．しかし現実には，欠陥部品の流出により人命に関わる事態発生や企業に大きな損害を与えるクレームが発生している．そのため，より欠陥が発生しにくい製造工程が求められるとともに，欠陥の流出を防止する検査工程が求められており，充実した検査工程を持つことは製品の品質を保証し客先の信頼の獲得につながる．また製造工程でのインライン検査では，不良の早期発見により歩留まり率が向上し，製造する側にとってもメリットとなる．しかし工業部品には複雑な部品形状，材料構成，表面加工の違いが存在し，また部品によっては生産工程の複雑さから多様な欠陥が発生するため，検査については，自動化がほとんど行われておらず，人による目視検査に頼っている状態である [1]．人による目視検査は，製造工程の自動化が進む中，生産性の低下という問題があるとともに個人個人の感覚の違いや集中力の差により，検出精度にばらつきが生じてしまう問題がある．また人的コストを考えると十分な検査が行われず (例えば抜き取り検査等)，欠陥の検出漏れが発生しているという実状である．人による目視検査の代替として，画像処理を用いた高精度で安定した検査の自動化が早期に求められている．画像処理を用いた検査に求められる点として，

1. 幅広い不良モードの検出 ⇒ 人による目視検査と同等の検出力
2. 自動化による処理速度向上 ⇒ 生産スピードに対応し全数を検査
3. 再現性 ⇒ 同じ精度での連続検査
4. 欠陥の定量化 ⇒ サイズ，色調，形状等の欠陥の要因を数値化し，標準化



が挙げられる。また，さらには照明・撮影機器類の発展に伴い [2]～[11]，人による目視検査では検出不可能な不良モード，サイズへの検出対応も期待されている。

半導体部品の一部を構成する IC リードフレームにおいても，機械加工や薬品加工により複雑な形状が施され，また部品表面に様々なめっき処理がなされるため，多種の不良モードが発生する。さらに近年では微細化，高品質化も進んでおり，高精度な検査工程が求められている。そのため画像処理技術を用いた欠陥検出の実現が期待されている [12] が，様々な検査への要求に対し，IC リードフレームに適用される従来の画像処理手法である画像のマッチングに基づく手法では，良品に存在する規格内のばらつきより小さい欠陥を検査対象とした場合，欠陥サイズと誤検出 (実際良品である製品を欠陥ありの不良品と判断してしまう) のバランスをとるための個別の調整が必要であり，誤検出の削減を考慮すると検出レベルが上げられないという問題がある。

それに対し，人が行う目視検査では，良品の個体差の影響を受けず微小な欠陥が検出可能である。そこで，本研究では目視検査の特徴について考察を行い，目視検査をモデルとした画像処理による自動欠陥検出手法を提案し，生産性を落とすことなく質の高い検査工程の実現を目指す。

## 1.2 関連研究

画像処理を用いた外観検査手法として，欠陥のない良品画像（以下，マスター画像と言う）と，検査対象とする画像（以下，検査画像と言う）との画像間演算を行うマッチングに基づく手法 [13] や，マスター画像を用いずに局所領域のみに注目し，その領域内での調和を乱すものが欠陥であるとした手法 [14]～[20] がある。他にも，表面領域の変形等の欠陥検出を実現する手法として，法線に注目した手法がある。具体的には，パターン照明の照射 [21]～[26] や，強度の異なる照明の照射 [27] により検査対象の 3次元形状を推定し，良品／欠陥判定を実現する手法が提案されている。本節ではこれらの関連研究について紹介する。

### 1.2.1 マスター画像を用いた欠陥検査手法

現在，画像処理を用いた工業部品の外観検査において，マスター画像とのマッチングに基づくシステム [13] が普及している。具体的には，事前に登録した欠陥のない

工業部品の画像，すなわち良品であるマスター画像と，検査対象とする画像とで位置決め後，画像間演算を行い良品に対し差異のある領域を閾値処理により検出し欠陥と見なす手法である。

この際，位置決め処理が不正確であると検査対象とする画像の全体的なシフトに影響を受け部品端面において誤検出が多発するため，正確な位置決めが必要となる。この位置決めにはテンプレートマッチングが広く用いられる。テンプレートマッチングでは，マスター画像上のある箇所を予めテンプレート画像として用意しておき，検査画像においてテンプレート画像をラスタスキャンし，画素どうしの比較を行い，類似度が最大となる点  $(d_x, d_y)$  を探索する。工業部品としてICリードフレームを例とした場合のテンプレートマッチングによる探索のイメージを図 1.1 に示す。

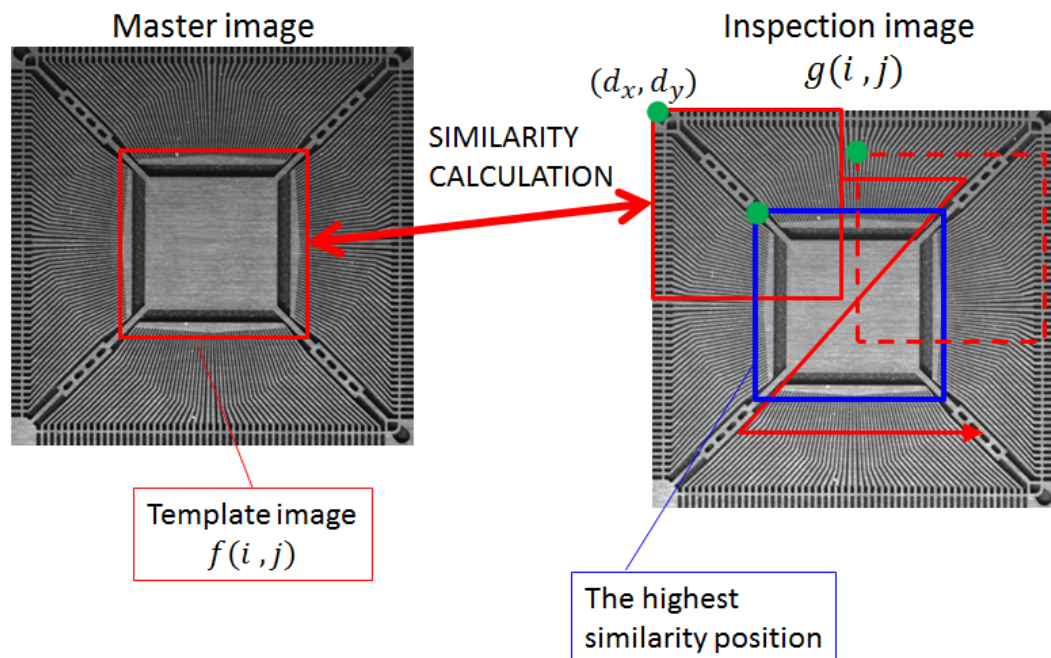


図 1.1 :テンプレートマッチングの探索イメージ

類似度の算出方法としては一般に，差の二乗和，差の絶対和，正規化相互相関，ゼロ平均正規化相互相関があり，各手法について説明する。

### 差の二乗和 : SSD(Sum of Squared Difference)

検査画像においてテンプレート画像をラスタスキャンした際、同じ位置の輝度差の二乗和により求められる。値が小さい程、類似度が高くなる。

$$S_{SSD}(d_x, d_y) = \sum \sum (g(d_x + i, d_y + j) - f(i, j))^2 \quad (1.1)$$

(テンプレート画像の位置  $(i, j)$  における輝度値を  $f(i, j)$ , 入力画像の輝度値を  $g(i, j)$ . 検査画像における位置を  $(d_x, d_y)$  とする.)

### 差の絶対値和 : SAD(Sum of Absolute Difference)

輝度値の差の絶対値の和により求められる。SSD に比べ乗算を含まないので計算負荷が小さいというメリットがある。

$$S_{SAD}(d_x, d_y) = \sum \sum |g(d_x + i, d_y + j) - f(i, j)| \quad (1.2)$$

### 正規化相互相関 : NCC(Normalized Cross-Correlation)

正規化相互相関は、画像を各画像の輝度値を要素として持つ高次ベクトルと見なし、マスター画像と検査画像から得られる2つのベクトルのなす角に注目する手法である。式(1.3)のように輝度値を正規化した上で類似度を計算する。

$$S_{NCC}(d_x, d_y) = \frac{\sum \sum \{g(d_x + i, d_y + j)f(i, j)\}}{\sqrt{\sum \sum (g(d_x + i, d_y + j))^2} \sqrt{\sum \sum (f(i, j))^2}} \quad (1.3)$$

SSD や SAD に比べ、ベクトル間距離ではなく角度を比較しているため、入力画像での領域  $h(i, j)$  の長さ (ゲイン) 変動を吸収できるが、計算負荷が大きくなる (図 1.2).

### ゼロ平均正規化相互相関 : ZNCC(Zero-mean Normalized Cross-Correlation)

テンプレート画像  $f(i, j)$  と検査画像での領域  $h(i, j)$  をそれぞれの画像領域内の濃度分布と考え、統計量としての相互相関係数を類似度として利用する。NCC ではテンプレート画像と検査画像において輝度の平均値が異なる場合には類似度が 1 になら

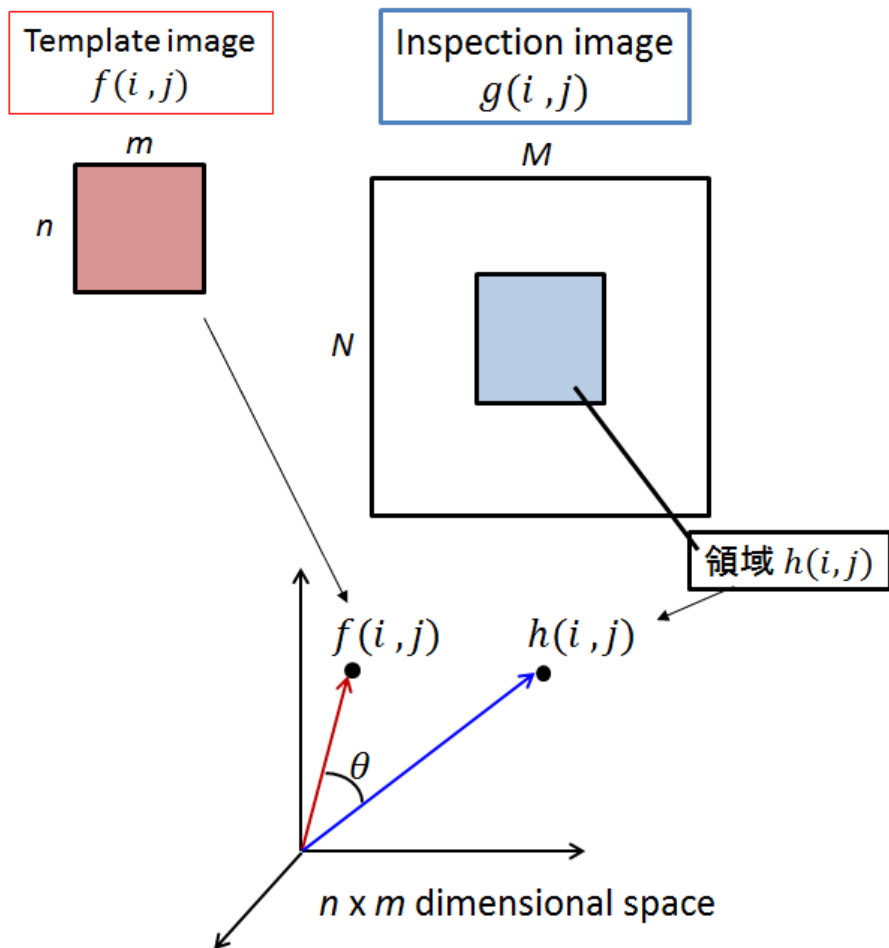


図 1.2 :正規化相互相関イメージ

なかったが、ZNCCでは領域内の輝度の平均値を引くため、2つの画像領域の平均値が異なっている場合でも変動を吸収できる。

$$S_{ZNCC}(d_x, d_y) = \frac{\sum \sum \{(g(d_x + i, d_y + j) - \mu_g)(f(i, j) - \mu_f)\}}{\sqrt{\sum \sum (g(d_x + i, d_y + j) - \mu_g)^2} \sqrt{\sum \sum (f(i, j) - \mu_f)^2}} \quad (1.4)$$

$\mu_f$ ,  $\mu_g$  はそれぞれの領域内の輝度の平均値である。各類似度算出手法のイメージを図1.3に示す。位置決め精度が求められるときは、明るさ変動に頑健なゼロ平均正規化相互相関を用い、処理速度が求められるときは差の絶対和を用いる。

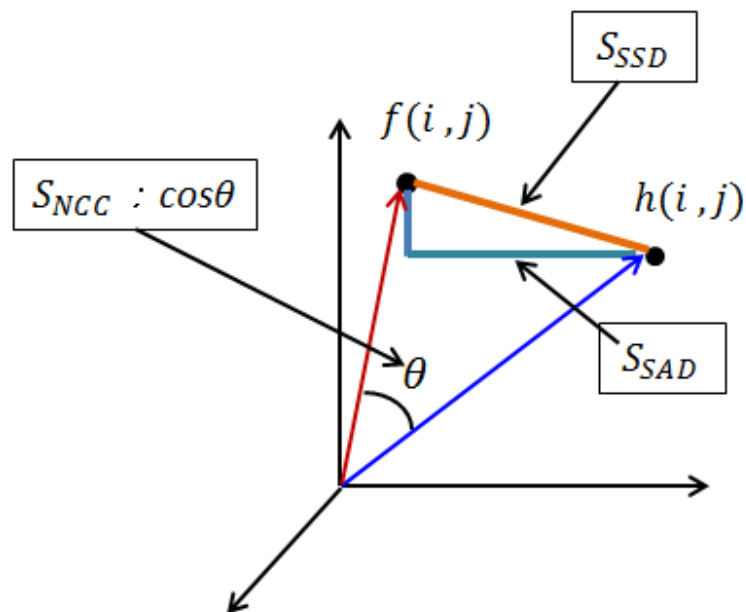


図 1.3 :類似度算出手法のイメージ

類似度算出後、テンプレート画像と検査画像の最大類似領域が合うよう検査画像をシフトさせ位置合わせを行い、その後マスター画像と検査画像との画像間演算を行う。マスター画像中の画素  $(i, j)$  における輝度値を  $m(i, j)$ 、検査画像における輝度値を  $g(i, j)$  とすると両者間の誤差  $h(i, j)$  は次のように定義できる。

$$h(i, j) \triangleq |m(i, j) - g(i, j)| \quad (1.5)$$

次に輝度差が  $R$ （異常とする輝度差として設定）以上である画素を特定する。

$$H(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } h(i, j) \geq R \\ 0, & \text{if } h(i, j) < R \end{cases} \quad (1.6)$$

$H(i, j)$  は異常判定された画素に 1，異常なしと判定された画素に 0 が入力されている。検査画像全体をラスタスキャンし，全画素に対し式 (1.5)，(1.6) を算出する。

算出された  $H(i, j)$  に対し，異常とした画素がどの程度集中して領域的に存在すれば欠陥と判定するかの閾値を用い欠陥検出が行われる。図 1.4 にマスター画像とのマッチングに基づく手法の簡易図を示す。閾値を微小な値で設定することで，小さな領域を検出できる。しかし，マスター画像とのマッチングに基づく手法では，許容された加工精度内におさまった工業部品の個体差への反応を防ぐため，閾値にある程度余裕を持たせて設定し運用する必要がある。良品との差異が許容された加工精度内の個体差より小さい欠陥を検出することは不可能である。このため形状の輪郭数画素はマスキング処理を行い，未検査エリアを設定する必要がある。しかし工業部品において形状の輪郭部は欠陥が発生しやすい場所であり，輪郭部を未検査エリアとすることは欠陥の流出を引き起こしてしまう。図 1.5 にマスター画像とのマッチングに基づく手法での誤検出例を，図 1.6 に実際に IC リードフレームにおいて輪郭部を誤検出した例を示す。

### 1.2.2 マスターレス欠陥検査手法

マスター画像とのマッチングに基づく手法では良品がもつ個体差による部分的なシフトには対応できないため，マスター画像を用いずに局所領域のみに注目し，その領域内での調和を乱すものが欠陥であるとの考えにて欠陥検出を実現しようとの試みがある [14]～[20]。他にも，平坦部の変形等の欠陥検出を実現する画像処理手法として，法線に注目した手法がある。具体的には，パターン照明の照射 [21]～[26] や，強度の異なる照明の照射 [27] により検査対象表面の 3 次元形状を推定し，欠陥検出を実現する手法が提案されている。これらの手法について紹介する。

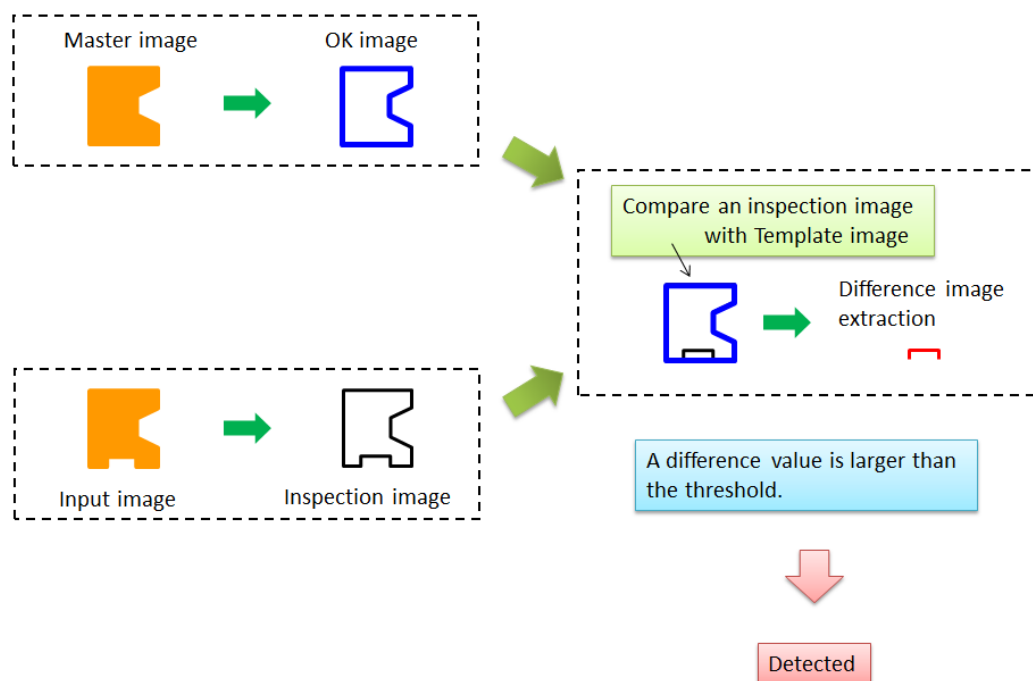


図 1.4 :マスター画像とのマッチングに基づく手法

#### 横山ら (2003)[20]

人の目視パターン検査作業が，従来のパターン検査装置のようにすべてのパターンを個別に観察しているのではなく，全体を概観し，異常箇所のみを詳細に検査している様子に注目し，作業者の検査作業にならった2ステップ検査手法を提案している．Step1で欠陥候補箇所を特定し，Step2で欠陥候補箇所のセルを拡大して撮像し，高精度に変形量を測定する．Step1の欠陥候補検出手法が課題となるが，規則性を持つパターンに対して，フーリエ変換を利用した空間フィルタ方式による欠陥検出手法を用いている．空間フィルタ方式により規則パターンを除去し，その差分としての欠陥を抽出する．しかし，部品中央部では規則パターンの除去が成功するものの，部品周辺部では製品形状自体の影響により規則パターンが十分除去できない．そのため製品形状を考慮した規則パターンの除去法として，周波数空間上で規則性を表すピークを中心とした円形領域を広くマスキングする．これだけでは欠陥信号が微弱化するため，後処理として逆変換後の画像を局所領域に分割し，領域毎の信号分散値を出力する処理を行い，コントラストの低い欠陥信号のSN比が大幅に改善できることを示している．結果として，従来のパターン検査装置のような位置決めを

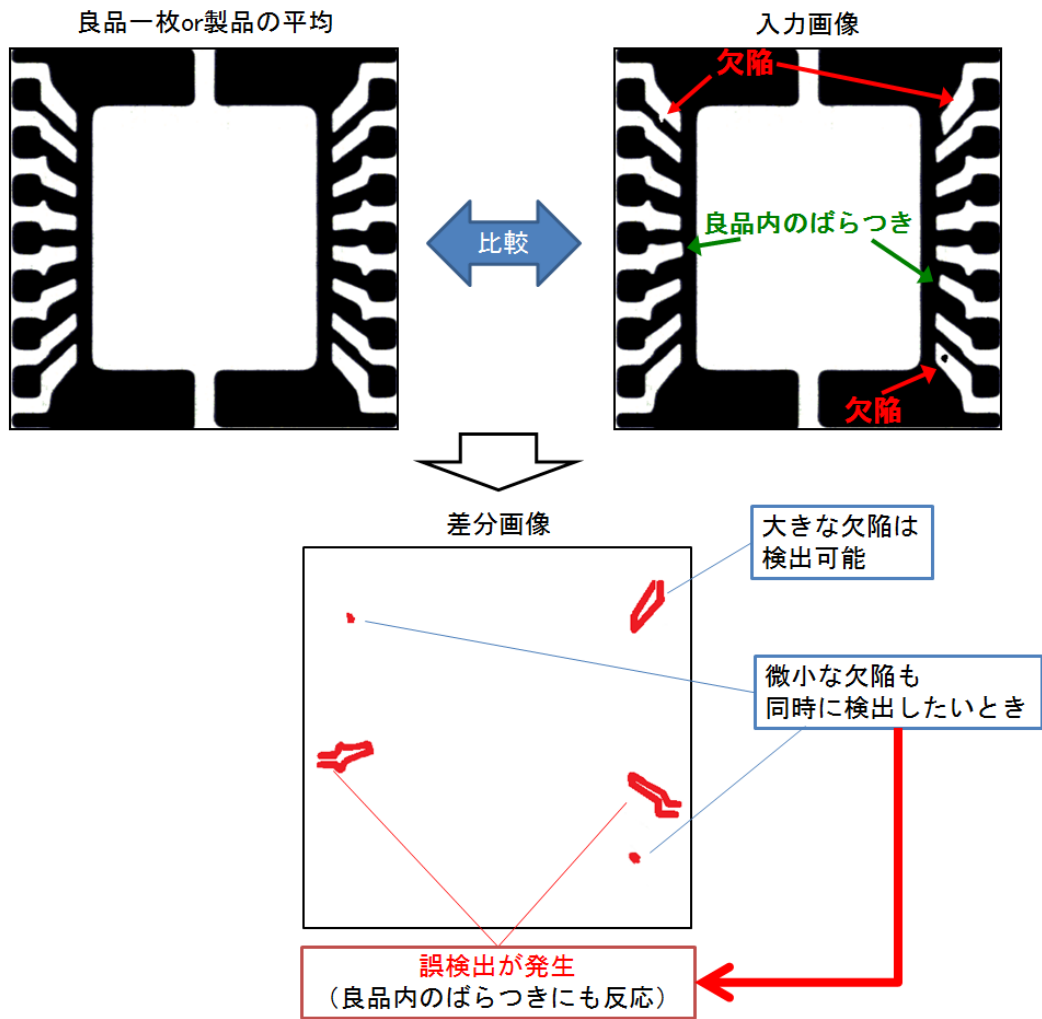
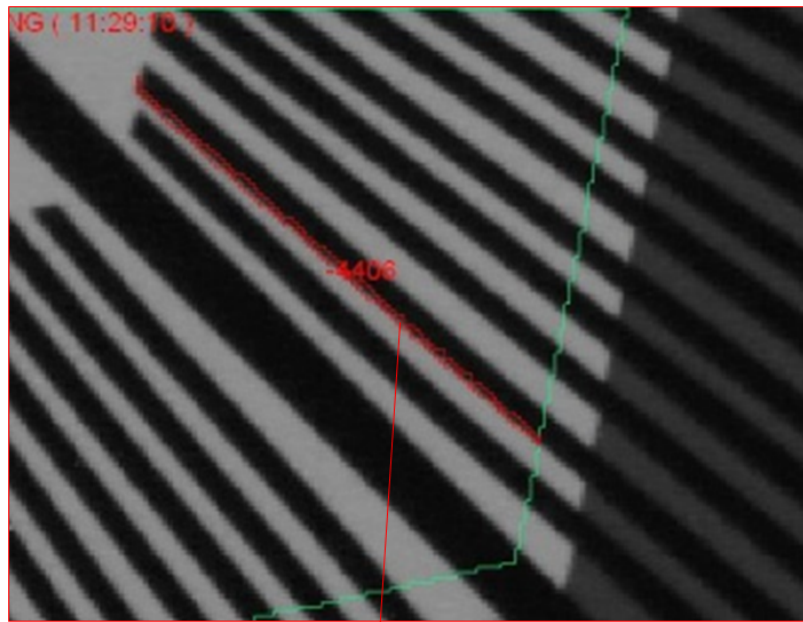


図 1.5 :マスター画像とのマッチングに基づく手法の問題点





良品であるが欠陥ありと検出された部分

図 1.6 :IC リードフレームにおける誤検出例

行うことなく、欠陥候補位置を検出する手法を提案し、かつ検査に必要な画像処理時間を約 1/20 に低減可能となっている。

#### 青木ら (2012)[15]~[18]

人の検査メカニズムのモデル化と機械化に注目した手法である。人の視覚生理機構のひとつである周辺視と固視微動について考察を行い、それらを画像処理に実装し有効性を確認している。提案手法では、周辺視(網膜の非均一性)と固視微動(注視中における眼球の微振動)からアイデアを得、必ずしも明瞭ではない欠陥の発見において、人は「よく動く目」の機能と「領域全体を見る(見える)」機能を使用していると考えられる。周辺視では、網膜の非均一性により眼球の中心から周辺に行くに従って徐々に解像度が低くなる。この低解像度化によるメリットとして、パターン認識率の向上が古くから挙げられている [28]~[30]。この際に対象領域のサイズや背景テクスチャに応じたレベルでの低解像度化が重要であるが、人による目視検査では非均一な解像度をもつ眼球を、固視微動により瞬時に変化させ複数の画像を得てそれらを適切に統合することで欠陥に気付いていると考える。提案手法では周辺視を低

解像度化，固視微動を標本化間隔・位相の変化と捉えモデル化する．処理としては，様々な格子サイズで低解像度画像を生成し，その後2値化を行う．格子の位相も設定した格子の縦・横幅分まで順次変化させ同様の処理を行う．それぞれの格子状態で得られた2値画像を画素毎積算し，検査画像からこの積算画像の反転画像を差分することによって欠陥対象領域を浮かび上がらせる（傷の気付き処理）．この際検査画像中に「周囲とは異なる領域」は欠陥部以外にも，ワーク識別用の刻印，ラベル，組み付け部品等が存在するのが一般的であり，そうした場合良品の特徴を欠陥候補として検出してしまう可能性がある．この問題に対して，大多数の良品ワーク画群を用意し，各画像間においても気付き処理を実施することで，ワークの良品の特性を抑制し欠陥の候補部のみを検出する．

#### 杉野ら (2008)[24][25]

工業製品表面上の微細な凹凸欠陥の検査精度を高めるために，面型パターン照明を用いて欠陥の高さや凹凸度合い等の形状情報の取得を行う．面型パターン照明とは平坦な面型照明装置の表面に何らかのパターンを付加したものであり，検査面上にパターン照明を照射すると，その反射光は平坦な部分ではバイナリパターンの並びを崩さず撮像装置で結像する．しかし検査表面に微小な凹凸（欠陥）が存在する場合，その部分では平坦な部分とは異なる方向の光を反射するため，結果的に画像中の欠陥部に相当する位置でパターンの結像順に変化が現れる．この画像中のパターンの乱れが欠陥を表しており，通常の照明を用いるのに比べ強調された欠陥像が得られる．杉野らの手法ではパターンを変化させたとき，現れるその投影像の変化が欠陥の凹凸の度合いや傾斜，つまり形状を反映していると考えパターンの大きさを変動させ，得られる画像情報を用いて欠陥の形状を推定した．具体的には円形パターン照明の半径を変動させ，得られた欠陥像部分の差をとり欠陥像の増減部分を画像化し，撮像系の位置関係により欠陥斜面の近似直線の傾きを求める．実験では，形状の推定結果と実際の形状データを比較し，欠陥の裾野付近が適切に推定できていることが確認された．

#### 田中ら (1994)[27]

自動車の塗装面において，一般的に発生頻度の高い凹凸欠陥の検出および凹凸判別を可能とするため，放射強度傾斜面光源と近紫外線による鏡面反射光を用いている．

鏡面反射を利用した従来の照明方法には大きく分けて二つあり、一つは、正常面の鏡面反射光をカメラでとらえる配置にしたもの、もう一つは、凹凸欠陥部の鏡面反射光をカメラでとらえる配置にしたものである。両者とも、正常面と欠陥部の法線方向の違いを利用しており、いずれも適当な画像処理により欠陥部と正常面を区別することは可能であるが、凹／凸の判別は困難である。そこで、各部位の法線方向の違いに着目し、発光面の光の放射強度を徐々に強める（あるいは弱める）ことにより、各部位に異なる強度の光を鏡面反射させ独自の濃淡画像が得られるようにし問題を解決した。提案手法では、カメラで放射強度傾斜光の鏡面反射をとらえた画像の濃淡値の傾斜方向が、画像走査方向と一致するように放射強度傾斜発光面とカメラを配置する。このときの凹凸それぞれの欠陥を通る水平ラインの濃淡変化を画像水平微分により検出し、さらに検出した欠陥領域内の濃淡分布のパターンマッチングにより凹凸判別を行う。また塗装面における内部拡散反射の影響が小さい近紫外線領域の光源を用いている。

### 1.2.3 関連研究における課題

前項に挙げた各関連研究の課題について述べると、マスター画像とのマッチングに基づく手法では、許容された加工精度内におさまった工業部品の個体差に対応するため、閾値をある程度余裕を持たせて設定し運用する必要があるが、許容された個体差より小さい欠陥を検出することは困難である。また横山ら [20] の手法では、複雑な形状をした工業部品を検査対象とした場合適用が難しく、青木ら [15]～[18] の手法では、固視微動を画像処理で再現するため様々な標本化間隔、位相で低解像化を行い処理するため、計算コストが非常に大きいという課題がある。杉野ら [24][25]、田中ら [27] の手法では、微小欠陥を検出対象にした場合、解像度の高いパターンの照射が困難であるという課題がある。

## 1.3 研究目的

本研究では従来手法がもつ検出レベルと誤検出の課題に対し、人が行う目視検査は良品の個体差の影響を受けることなく多様な欠陥に対応可能であることから、目視検査をモデルとした欠陥検出手法の提案を行う。目視検査をモデル化するにあたり、目視検査の特徴である“検査領域を注視し欠陥を探す”という点と、“検査領域に対

し、視線（もしくは光源の位置）を変えながら欠陥を探す”という点に注目し画像処理による再現について検討を行う。“検査領域を注視し欠陥を探す”検査では、人はある領域を注視しているつもりでも常に起こっている細かな目の揺れである固視微動 [31][32] により観測点とその周囲の情報を取得、比較し違和感を感じる箇所を欠陥として検出していると仮定し、固視微動を再現した提案手法1：コーナー特徴の分散に基づく欠陥検出を提案する。この固視微動を再現した手法は、工業部品のエッジ領域に発生する欠陥の検出に有効であると考え、エッジ領域に発生する欠陥に対し適用する。次に“検査領域に対し視線（もしくは光源の位置）を変えながら欠陥を探す”検査では、検査対象物体に対し多方向から観察し、表面の法線方向に起因した反射光の変化・ばらつきを捉えることで表面上の凹凸を確認していると考えた。そこで本研究では物体に対する光源方向を変化させながら撮像を行い、入力画像上で観測される輝度のばらつきを算出することによって再現を目指す。この手法では工業部品の表面領域に発生する欠陥に有効であると考え、表面領域に対し多方向から観察する点をモデルとした提案手法2：照明環境を変更した複数枚画像に基づく欠陥検出を提案する。さらに、画像処理にて検査を行う際には検査に用いるパラメータで検出精度が大きく変化することが懸念される。実際の生産工程での使用を考えた場合、検査対象の工業部品や工程毎に調整が必要であり、実利用上の課題となる。そこで本研究では予め検査対象の工程で発生する欠陥サンプルを用い、繰り返し推定による検査パラメータの自動決定手法についても検討し、実利用時の負担低減を目指す。この際、検査パラメータの自動決定には大量のサンプルを用いた機械学習による手法も考えられるが、運用上各生産工程で大量のサンプルを用意することはコストが高く、生産される工業部品の入れ替えが頻繁に起こる生産工程では導入が困難となる。そこで本研究では、少ないサンプルからパラメータを自動決定する手法について検討を行う。また生産工程での実際の適用を考えた場合、検査時間の削減が必要でありこの点についても検討を行う。上記手法について検討を行い、実利用を考慮した画像処理による工業部品の自動欠陥検出手法の提案を行う。

本論文は5章からなる。2章では目視検査をモデル化するにあたり、目視検査について考察し画像処理で再現する際の着眼点について述べる。3章では固視微動を再現した“提案手法1：コーナー特徴の分散に基づく欠陥検出”について説明し、実験とその考察について示す。4章では、多方向から観察する点を再現した“提案手法2：照明環境を変更した複数枚画像に基づく欠陥検出”について説明し、実験とその考察について示す。最後に5章でまとめを行う。

## 第2章 目視検査をモデルとした提案手法の着眼点

本研究では、工業部品に発生する多様な欠陥を画像処理を用いて検出するため、良品の個体差の影響を受けず微小欠陥の検査が可能な目視検査をモデルとした欠陥検出手法の提案を行う。目視検査で工業部品の欠陥検出を行う際、特に良品とする部品との頻繁な比較を行うことなく欠陥箇所を特定している。これは工業部品は一般にその性質上、局所領域において均質な情報を持っており、情報が不均質な領域を見つけることで欠陥箇所を特定していると仮定できる。本研究において不均質な情報領域を欠陥領域と定義することで、工業部品に発生するあらゆる外観上の欠陥に対応可能であると考えられる。

目視検査を考えると、まず検査領域を注視し欠陥箇所を探している。このとき視覚生理機構である固視微動により観測点と周囲を比較し欠陥箇所を強調する処理を経て、欠陥検出をしていると仮定できる。固視微動とは人はある領域を注視している場合でも常に起こっている細かな目の揺れのことであり、注目領域とその周辺領域の情報を取得している。本研究では、固視微動を画像処理で再現するため、注目領域と近傍の複数画像から算出される主曲率に注目した（詳細 2.1 節）。この固視微動をモデルとした手法は、工業部品のエッジ領域に発生する欠陥の検出に有効であるため（図 2.1）、部品のエッジ領域を検査対象として、固視微動をモデルとした“コーナー特徴の分散に基づく欠陥検出手法”を提案する。次に目視で検査を行う際、工業部品に対して視線や光源の位置を変え多方向から観察を行っている。これは表面の法線方向に起因した反射光の変化・ばらつきを捉えていると考えられる。このような検査は、部品の表面領域に発生する欠陥の検出に有効であるため、表面領域に発生する欠陥に対して表面の法線方向に注目し、“照明環境を変更した複数枚画像に基づく欠陥検出手法”を提案する。また本研究では、提案手法の有効性の確認に IC リードフレーム（図 2.2）を実験材料として用い検証したが、局所領域における均質さを基とした本手法は、広く工業部品の欠陥検査に適用可能だと考える。

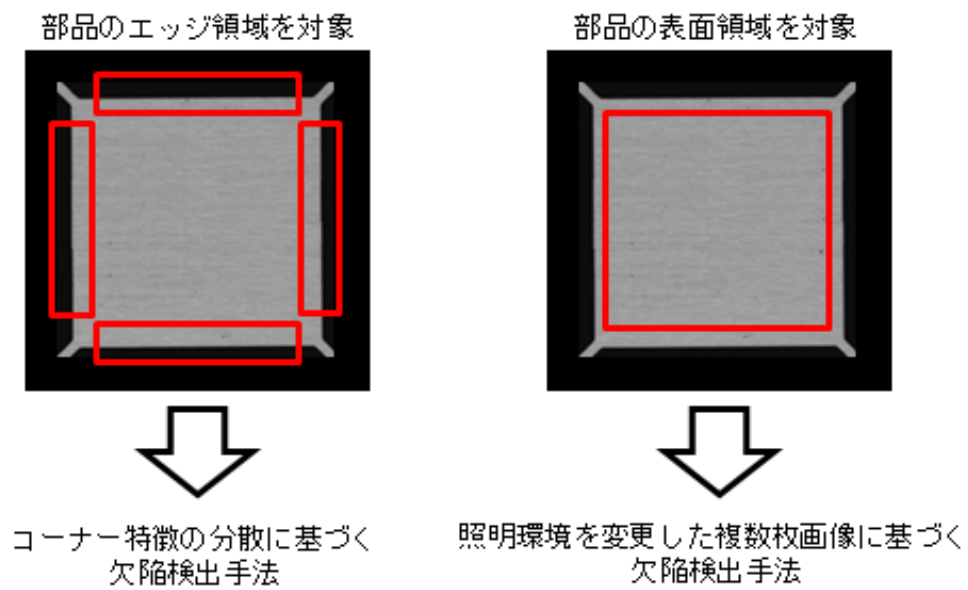


図 2.1 :提案手法の適用範囲

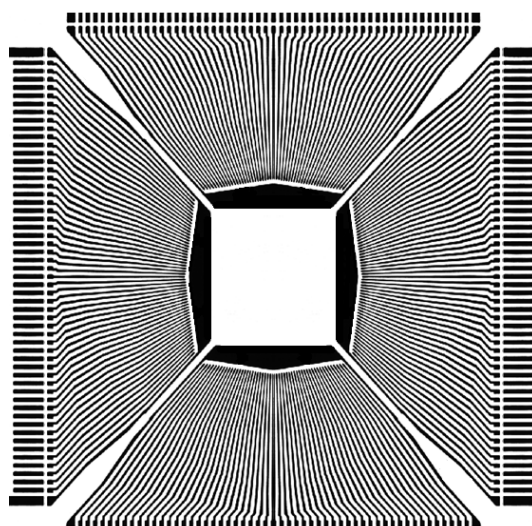


図 2.2 :IC リードフレーム全体図

## 2.1 固視微動をモデルとした検査手法

部品のエッジ領域に発生する欠陥の例を図 2.3 に示す。このような欠陥（B 部）は、正常部である A 部が輝度勾配方向が一方向であるのに対して、不均質さが見られる。このような欠陥を目視検査で検査するとき、固視微動によって周囲と比較し、局所的には直線性を示す工業部品のエッジ領域において、様々な輝度勾配方向を含む歪なエッジで構成される領域を欠陥として検出していると考えられる（図 2.4）。このような固視微動による視線移動を画像処理で実現するため領域内の主曲率を考える。主曲率とは注目領域において得られる輝度勾配方向分布の分散と相関の高い値である。図 2.5 のように、注目領域とその周辺（1 画素ずらした領域）との変化量を算出し、その算出した変化量において、最大値と最小値を主曲率  $\alpha$ 、 $\beta$  とすると、エッジの構造は主曲率  $\alpha$  と  $\beta$  の大きさによって確認でき、 $\alpha$  と  $\beta$  が共に大きい場合はコーナー、どちらかが大きい場合はエッジ、共に小さい場合はフラット、つまりエッジもコーナーも存在しないと言える（図 2.6）。目視検査において欠陥として反応する状況では、 $\alpha$  と  $\beta$  が大きくなっていると仮定でき、主曲率を算出することで人の目が反応しやすい箇所を検出可能であると言える。しかし注目領域が大きい場合を考えた場合、主曲率を正確に算出するには様々な位置と移動量を変えて変化量を算出する必要があり計算コストが大きくなる。文献 [15]～[18] に挙げた手法でも注目領域サイズや標本化間隔、位相を様々変えて画像を取得することで良品画像を必要とせず欠陥検出を行っている。本研究では少ない計算コストで固視微動による欠陥検出を再現するため、主曲率と同等の計算が高速にできる Harris corner detector[33] に注目した。Harris corner detector によりコーナー特徴量を算出し、得られたコーナー特徴量に閾値処理を行い欠陥を検出する手法（コーナー特徴の分散に基づく欠陥検出）を提案する（詳細は 3 章）。

## 2.2 多方向からの観察することをモデルとした検査手法

部品の表面領域に発生する欠陥を目視で検査するとき、緩やかな凹凸形状欠陥に対応するため、光源と視点の位置関係を変更しながら確認を行っている。これは、物体に対する光源方向を変化させることで、注目領域内での表面の法線方向を推定し、法線方向のばらつきに起因した反射光強度の分散が大きい箇所を欠陥として特定していると仮定できる。図 2.7 に凹凸形状の欠陥を示す。2次元画像を上にも、深さ情報

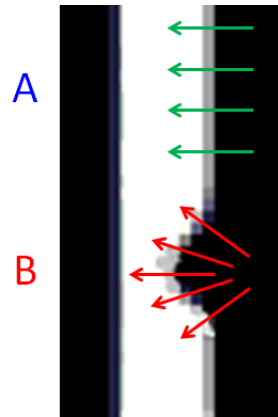


図 2.3 :エッジ領域に発生する欠陥

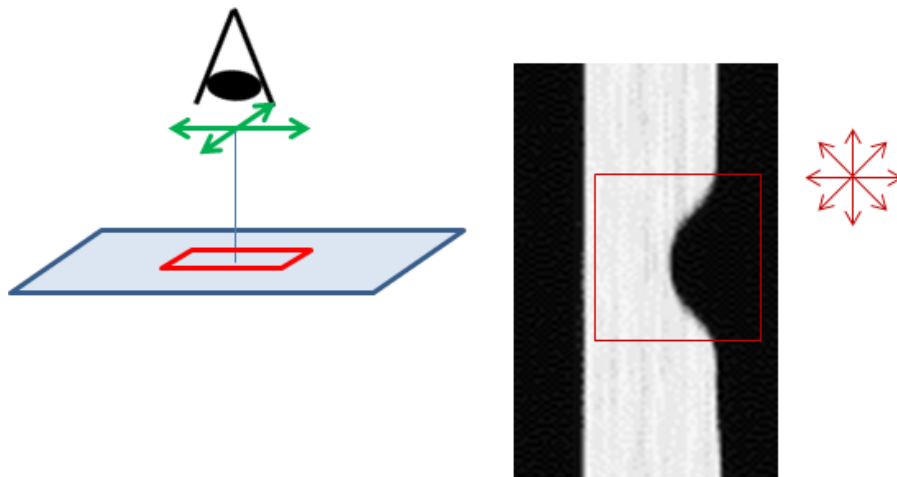
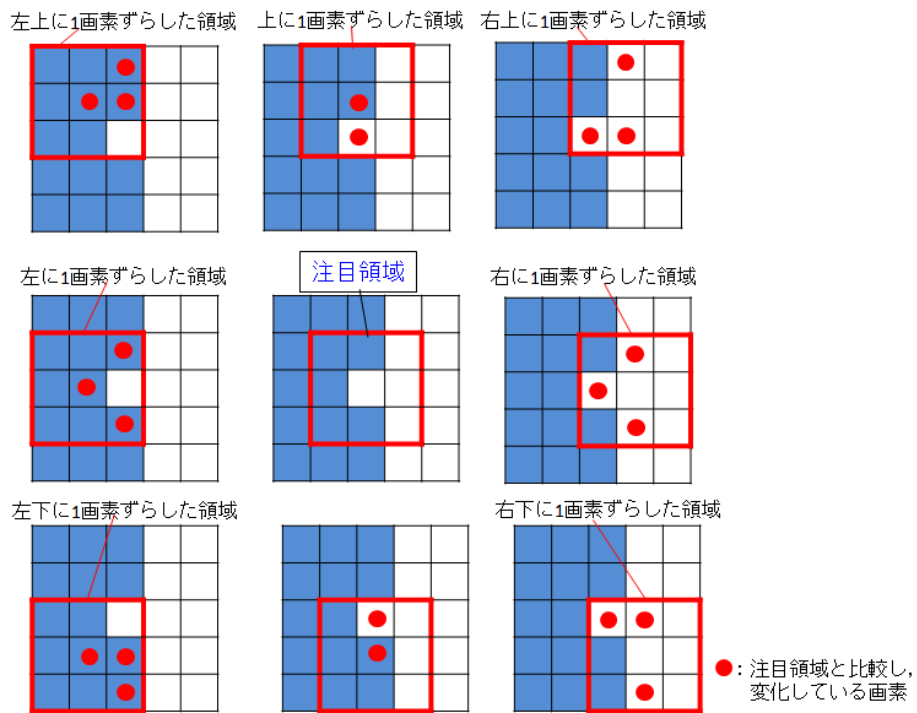


図 2.4 :固視微動による欠陥検査イメージ





変化量

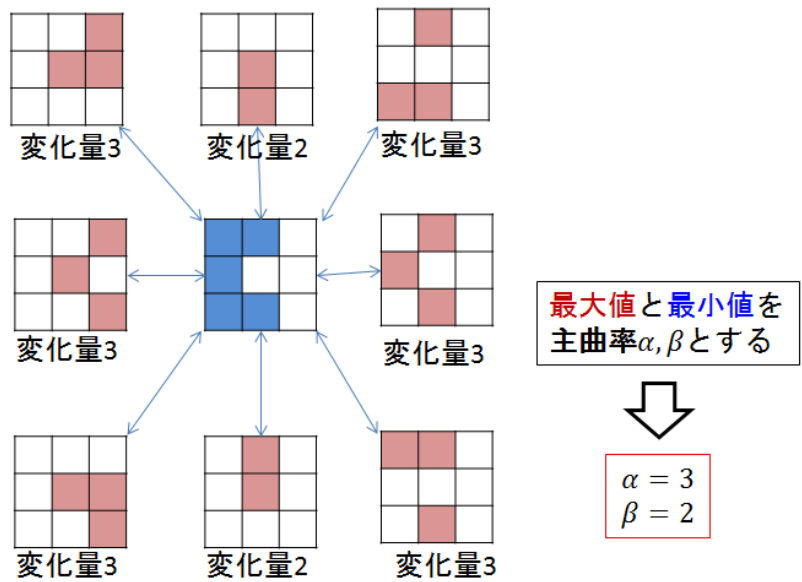


図 2.5 :主曲率

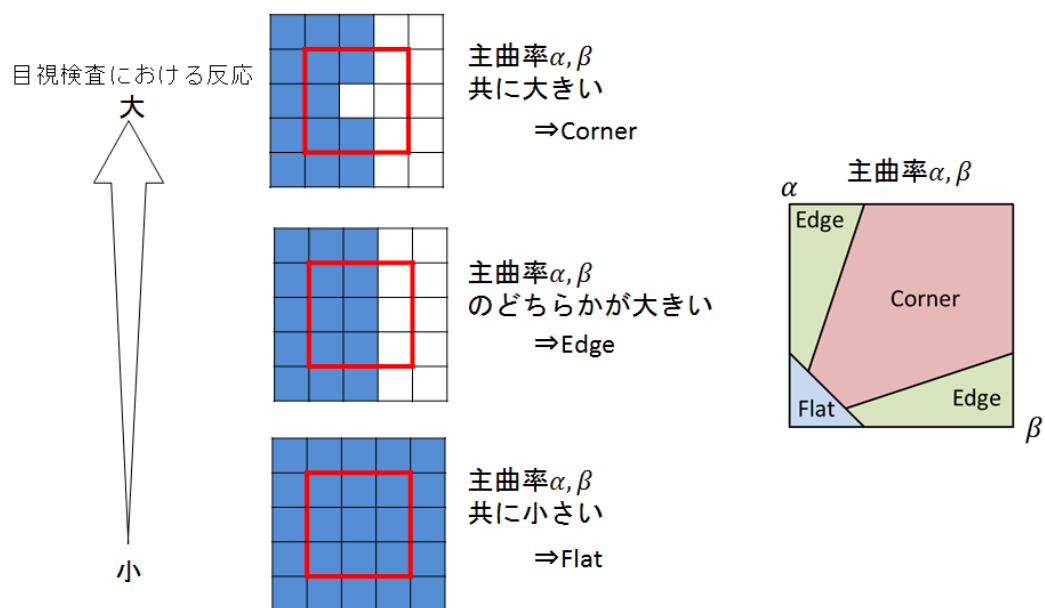


図 2.6 :主曲率による特徴分類

を下に示す。深さ情報では色が青に近づくにつれ深さが深くなっている。2次元画像において、B部では強いエッジが存在するため目視検査において真上からのみの観察でも異常として判定することは容易である。しかし、C部のような強いエッジが存在しない凹凸が単独で発生した場合、真上からのみの観察では正常であるA部と見分けるのは困難である。そのため、目視検査においては光源と視点の位置関係を変化させながら凹凸形状の確認を行っている(図2.8)。そこで本研究においても様々な光源方向から撮像される複数画像に対して法線情報を推定する照度差ステレオ法に着目した。事前実験として、照度差ステレオ法により法線を推定しモデルとする法線との比較による欠陥検出を試みたところ、急峻な法線の変化や大きな法線の変化をもつ部品の変形や打痕等の欠陥に対しては有効に機能したが微小な法線変化しかもたない傷やムラ等の欠陥に対しては検出が困難であった。本研究ではこの法線を推定する手法が急峻な法線の変化や大きな法線の変化をもつ欠陥に対して有効であったことからこの情報を利用しつつ、検出が不可能であった欠陥に対応するため、欠陥が持つエッジに対し垂直または平行に光をあてると欠陥箇所が強調される画像が得られると仮定し、様々な光源方向から撮像した画像に対し画像単体毎に輝度のばらつきに基づく評価値を算出し、併用して欠陥検出を行うこととした(照明環境を変更した複数枚画像に基づく欠陥検出)。これは、現状の目視検査におい

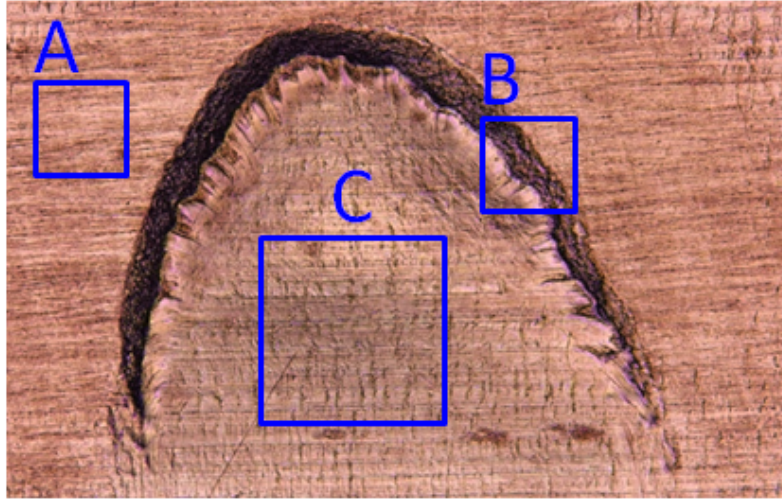
ては、様々な方向から光を当てた後、最も違和感のあるテクスチャを投影する方向に固定して注意深く表面を観察する検査段階を模したものである。

また、法線の推定においても詳細な法線情報の取得は計算コストが大きいため、様々な光源方向から撮像した画像に対し、法線のぼらつきに起因した反射光強度の分散を算出し用いる手法を提案する（詳細は4章）。

## 2.3 検査に用いるパラメータの自動決定手法

前節の照明環境を変更した複数枚画像に基づく欠陥検出手法では、法線のぼらつきに基づく評価値と輝度のぼらつきに基づく評価値を併用し用いることとしたが、2つの手法を併用するとパラメータが様々な存在する。また用いるパラメータ値によって検出精度が大きく変化するため、検査対象の工業部品毎に調整が必要となり決定が困難となる。本研究では、検査に用いるパラメータの自動決定手法についても提案を行う。この自動決定手法では、検査対象の工程で発生する欠陥サンプルを用いた繰り返し推定によりパラメータを決定する。ここで、大量のサンプルを用いた機械学習による手法も考えられるが、運用上、各生産工程で大量のサンプルを用意することはコストが高く、生産される工業部品の入れ替えが頻繁に起こる生産工程では導入が困難となる。そこで本研究では、少ないサンプルからパラメータを自動決定する手法の提案を行う。

2D image



3D image(depth image)

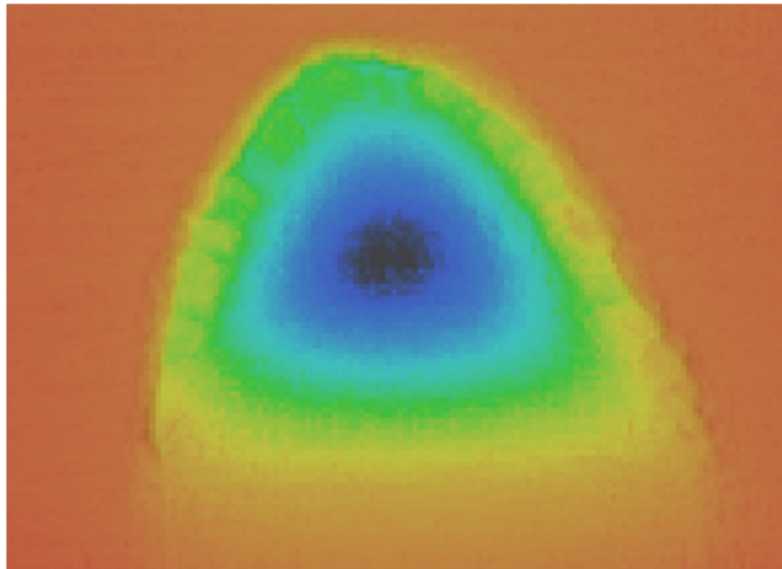


図 2.7 :凹凸形状の欠陥例

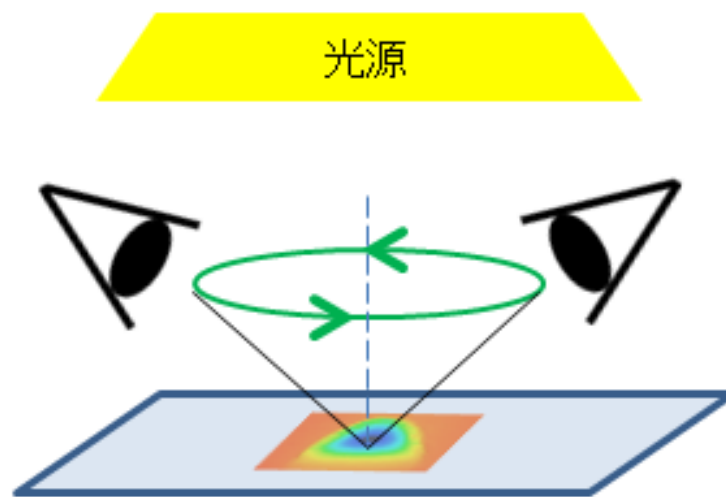


図 2.8 :凹凸形状の欠陥検出イメージ

# 第3章 コーナー特徴の分散に基づく欠陥検出手法

## 3.1 工業部品のエッジ領域に発生する欠陥

前章では人の視覚生理機構である固視微動による検査を画像処理で実現するため、主曲率に注目し主曲率を用いた欠陥検出の可能性について述べた。しかし主曲率の計算には高い計算コストが伴う。本章では少ない計算コストで固視微動を再現することを目的とし、主曲率と同等の計算が高速に行える Harris corner detector を用い、得られたコーナー特徴量の大小により、許容された加工精度内におさまった工業部品の個体差に左右されない微小欠陥検出手法を提案する。図 3.1 に IC リードフレームのエッジ領域に発生する欠陥例を示す。部品の正常部では、輝度勾配方向が一方方向なのに対し、欠陥部では輝度勾配方向が複数方向存在する。この輝度勾配方向分布の違いによるコーナー特徴量の大小を Harris corner detector により算出し、工業部品のエッジ領域に発生する欠陥検出を行う。

## 3.2 Harris corner detector

コーナーとは、方向の異なる 2 つ以上の際立ったエッジが存在する点と定義できる。このコーナーを検出するためのアルゴリズムの 1 つが Harris corner detector である [33]。Harris corner detector は、画像の輝度値を用いて特徴を抽出する。グレースケール画像中の画素  $(x, y)$  における輝度値を  $I(x, y)$  で表すとする。いま、画像内のある領域  $(u, v)$  と、この領域  $(u, v)$  からわずかに  $(x, y)$  だけ離れた領域を考える。この 2 つの領域内で同じ位置にあたる画素の輝度値に関して、差分の 2 乗に重み付けをして総和を取った値  $M$  は、次のように書ける。

$$M(x, y) = \sum_u \sum_v G(u, v) (I(u+x, v+y) - I(u, v))^2 \quad (3.1)$$

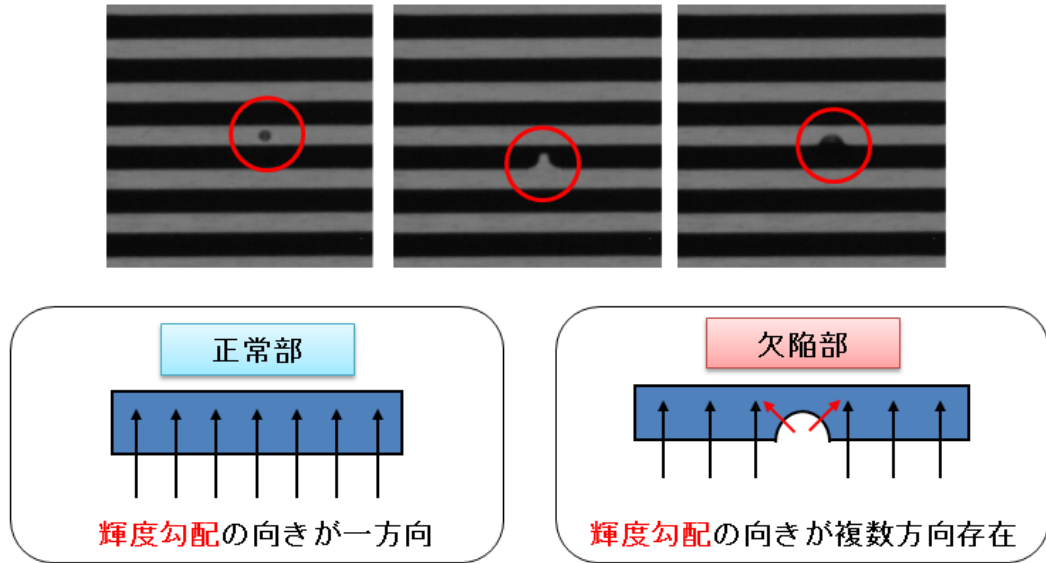


図 3.1 :IC リードフレームに発生する欠陥例

この  $M$  はテイラー展開で近似でき、次のように書き直せる。

$$M(x, y) \approx \sum_u \sum_v G(u, v) \left( x \frac{\partial I}{\partial x} + y \frac{\partial I}{\partial y} + O(x^2 + y^2) \right)^2 \quad (3.2)$$

$x$  および  $y$  が十分小さいときの  $M$  は、次の式で与えられる。

$$M(x, y) \approx \sum_u \sum_v G(u, v) \left( x \frac{\partial I}{\partial x} + y \frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 \quad (3.3)$$

これを行列式で書くと以下のように表現できる。

$$M(x, y) \approx \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix} A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$A = \sum_u \sum_v G(u, v) \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 & \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} \\ \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} & \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

また、重み  $G$  は主に平滑化を目的とし、例えば、以下の式で表される標準偏差  $\sigma$  のガウス関数を用いる。

$$G(u, v) = \exp\left(-\frac{(u^2 + v^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (3.6)$$

コーナーはベクトル  $(x \ y)$  のすべての方向での  $M$  の変化量により特徴付けられる。  $A$  の固有値  $\lambda$  を分析することにより、この特徴付けは次のように表現できる (図 3.2)。

1.  $\lambda_1 \approx 0$  かつ  $\lambda_2 \approx 0$  であれば、ピクセル  $(x, y)$  は特徴点を持たない。
2.  $\lambda_1 \approx 0$  かつ  $\lambda_2$  が正のある程度大きい値であればエッジが存在する。
3.  $\lambda_1, \lambda_2$  どちらも正の大きな値であれば、コーナーが存在する。

固有値の正確な計算は計算量が多いため、代わりに敏感に調整できる  $k$  を用いて Harris corner detector, 関数  $R$  は次のように定義される。

$$R = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2 = \text{Det}M - k\text{Tr}(M)^2 \quad (3.7)$$

$k$  は調整パラメータである。

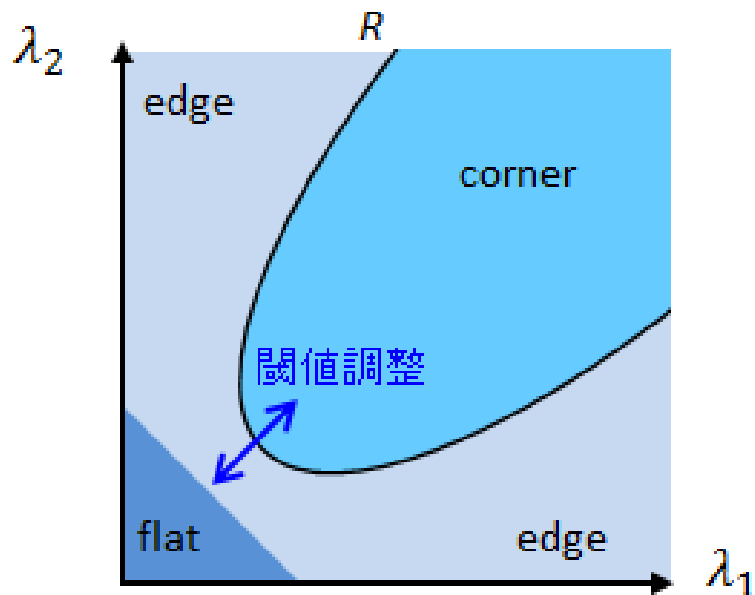


図 3.2 :Harris corner detector と閾値

### 3.3 良品／不良品におけるコーナー特徴の分散

工業部品には部品デザイン上のコーナーも存在する (IC リードフレームにおける例: 図 3.3)。そのためコーナー特徴量を算出した場合、部品デザイン上のコーナー部分に



対しても反応してしまうことが懸念される。そこで本研究では、注目領域サイズを複数種準備しそれぞれに特徴量を計算することにより、部品デザイン上のコーナーが存在する場合は、すべての領域サイズで同様の特徴量が算出されることを確認した。それに対し欠陥箇所においては、複数の注目領域サイズ間で反応が変化することも確認した。以上の特性を活かし、部品デザイン上のコーナーが存在している場合でも注目領域サイズを変動し、算出された特徴量の分散を計測し閾値処理することで欠陥とデザイン上のコーナーを分離する（以後、マスキング処理という）。

## 3.4 実験

### 3.4.1 実験環境

実験を行うにあたり、ICリードフレームを撮像するカメラの条件として、ICリードフレームの一般的な大きさである幅80mmを視野サイズとし、検出対象の欠陥サイズを $30\mu\text{m}$ とすることから1画素 $10\mu\text{m}$ 程度となるように、モノクロ7400画素のラインカメラを使用した。対象とする欠陥に色調の差はないためカラーカメラの必要はないと判断した。照明はLEDライン照明の赤色面発光のものを使用した。図3.4はカメラと照明の取り付け位置を示す。本章での提案手法が欠陥のエッジの輝度勾配方向分布で判断を行うため、欠陥のエッジが安定して撮像できることと、ICリードフレームの材料表面の模様に応答しないことが求められるため、照明の光量を上げICリードフレーム表面でカメラで捉えられる輝度が最大値となるように設定を行った(図3.5)。また入力された検査画像に対し標準偏差 $\sigma = 4$ のガウス関数により平滑化を行った。

#### 実験に用いたサンプル

今回使用した欠陥サンプルを図3.6~3.8に示す。欠陥は、ピット(円状の欠陥)、バリ(端面に発生する凸状の欠陥)、カケ(端面に発生する凹状の欠陥)の3種類である。表3.1~3.3のように、3種類の欠陥に、それぞれに13段階のサイズを用意し、13段階を1セットとして、図3.9のようにICリードフレーム上に8セットずつ配置した。

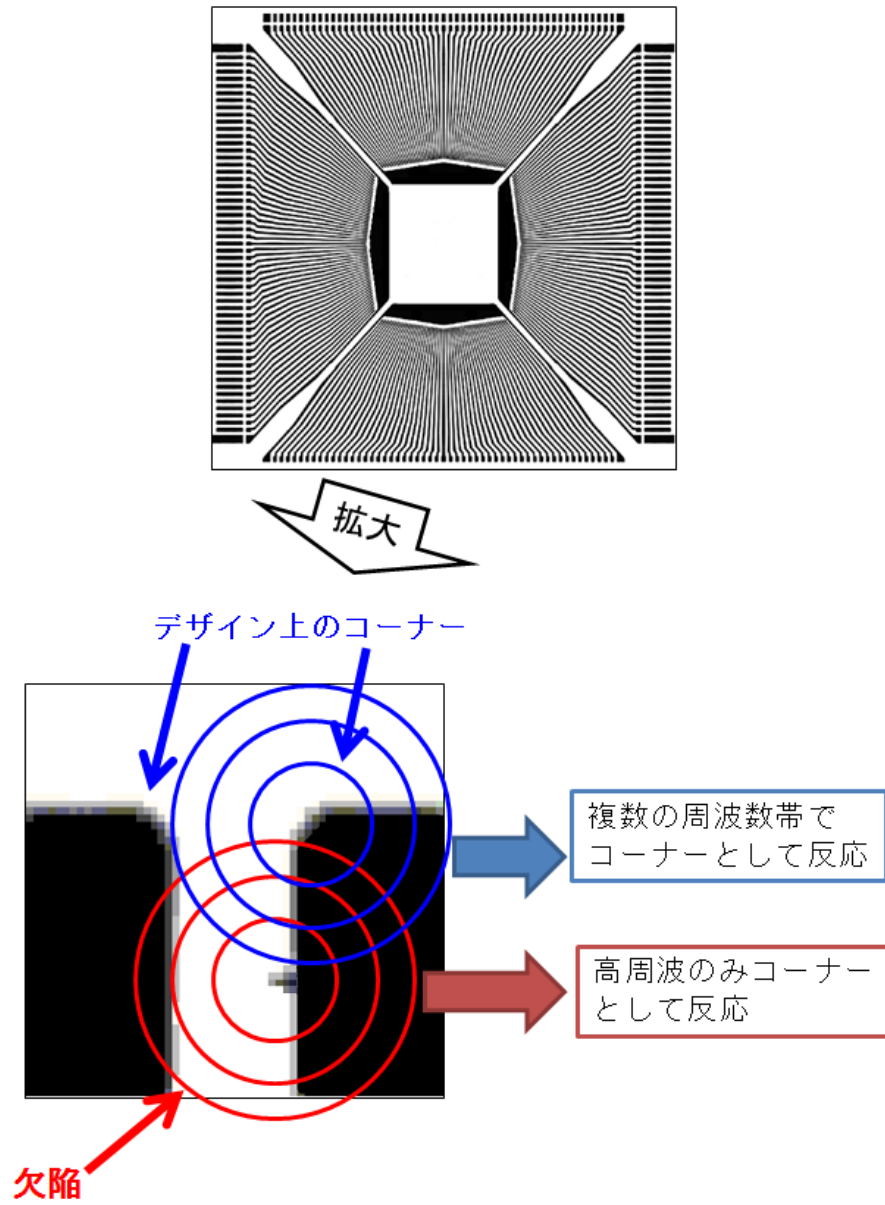


図 3.3 :IC リードフレームにおけるデザイン上のコーナー

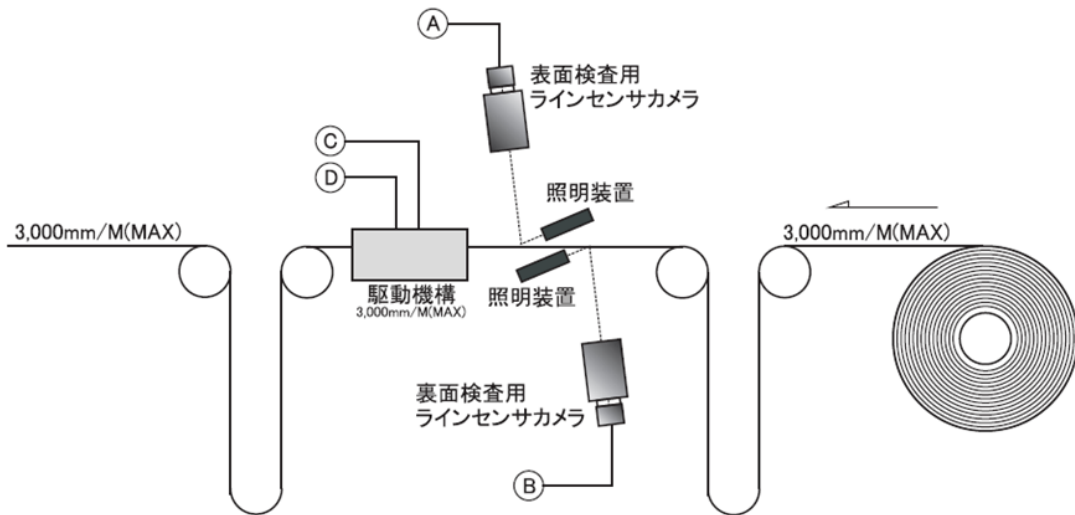


図 3.4 : 撮像環境

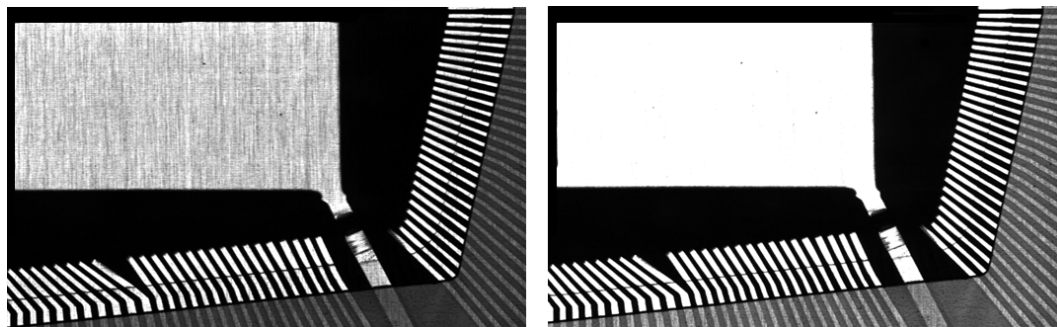


図 3.5 : 照明の照度による観測画像の輝度差

ピット  
(円状の欠陥)

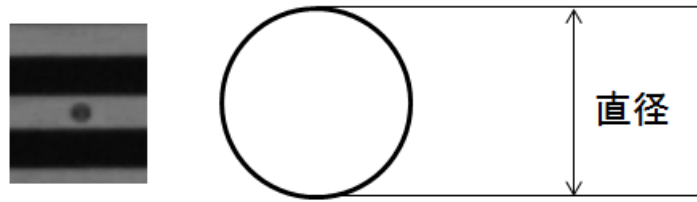


図 3.6 :ピット (円状の欠陥)

表 3.1 :ピットの数値データ (表中の数値は単位 [ $\mu\text{m}$ ])

サイズ	最大	最小	平均
1	121	116	119
2	114	110	112
3	108	102	105
4	100	96	97
5	93	88	90
6	84	80	82
7	76	72	74
8	67	63	65
9	58	54	56
10	48	45	46
11	39	36	37
12	30	21	27
13	—	—	—

バリ  
(端面に発生する凸状の欠陥)

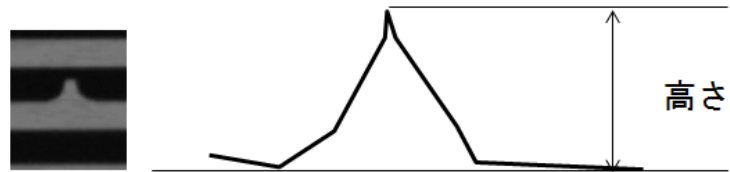


図 3.7 :バリ (端面に発生する凸状の欠陥)

表 3.2 :バリの数値データ (表中の数値は単位 [ $\mu\text{m}$ ])

サイズ	最大	最小	平均
1	110	91	98
2	89	74	80
3	78	65	70
4	64	54	58
5	52	44	47
6	41	34	38
7	33	27	30
8	26	20	22
9	19	15	16
10	14	9	12
11	10	7	8
12	7	4	6
13	6	3	4

**カケ**  
(端面に発生する凹状の欠陥)

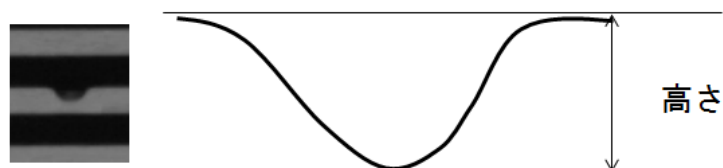


図 3.8 :カケ (端面に発生する凹状の欠陥)

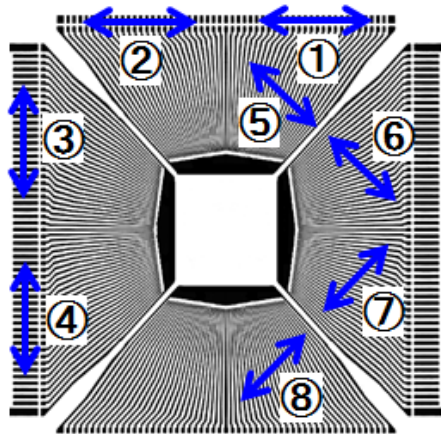
表 3.3 :カケの数値データ (表中の数値は単位 [ $\mu\text{m}$ ])

サイズ	最大	最小	平均
1	89	76	83
2	75	66	72
3	68	59	64
4	61	50	56
5	50	41	46
6	43	35	39
7	42	25	32
8	31	20	26
9	27	16	22
10	23	12	18
11	18	8	13
12	15	3	8
13	8	2	4

### 3.4.2 実験と考察

入力画像に対し、Harris corner detectorでコーナー特徴量を算出し、算出されたコーナー特徴量に対し、閾値処理を行い特性の検証を行った。まずマスキング処理であるが、本来は前節で述べたように様々な領域サイズを用いコーナー特徴量を算出し分散を求めるのだが、検出対象の欠陥が $30\mu\text{m}$ 程度であるのに対し、デザイン上のコーナーは十分に大きく、今回は大きな領域で設定した閾値以上のコーナー特徴量

ピット、カケのエリア配置



バリのエリア配置

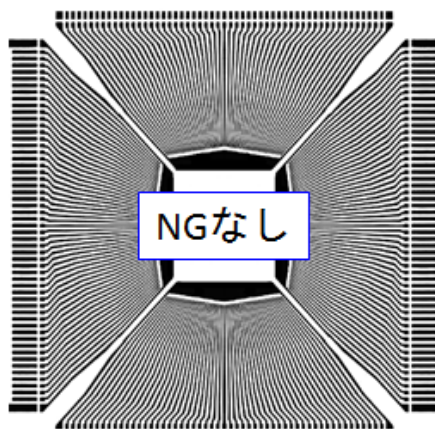
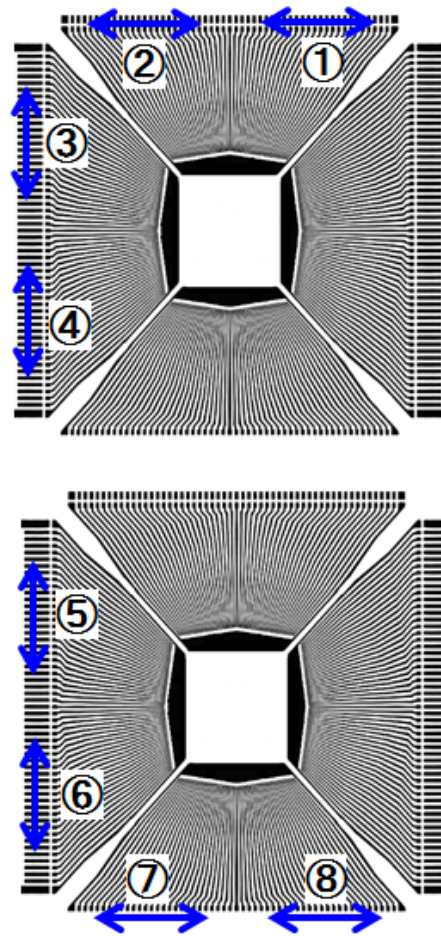


図 3.9 :欠陥サンプルの配置

を持つ領域を部品デザイン上のコーナーとしてマスクング処理を行った。IC リードフレームに対してマスクング処理を実施した画像例を図 3.10 の上段に示す。赤で示された箇所がマスクングエリアである。次に  $9 \times 9$  画素の領域サイズでコーナー特徴量を算出し設定した閾値以上の箇所を欠陥とした。図 3.10 の中段に  $9 \times 9$  画素の領域サイズで反応した箇所を緑で示し、その領域からマスクングエリアとした領域を除去した結果を図 3.10 の下段に示す。デザイン上にコーナーに反応することなく、欠陥箇所のみで反応していることが確認された。

欠陥検出実験で確認する点は、検出サイズが  $30\mu\text{m}$  未満となるサイズまでの検出率とその際の誤検出数であり、良品の規格内のばらつき以下の欠陥がどの程度検出できるか検証した。閾値は図 3.2 のように Harris corner detector にてコーナーとして抽出した値を実際に NG とするかの判別に使用する。閾値が大きいくほど NG 判定の領域は小さくなり検出レベルが低くなる。閾値による検証を行った結果を図 3.11 に示す。

#### 閾値設定 1 微小欠陥受入 (閾値 $1.0 \times 10^{10}$ )

まず用意した全ての欠陥を検出することを目的とし閾値設定を行った。このときの検出率はピット 97%、バリ 100%、カケ 100%であった。検証 1 としてピットで検出不可であったものを図 3.12 に示す。この検出不可であったものの画像を確認すると、撮像画像上で欠陥のサイズが 1 ピクセルしかなく欠陥サイズに対しカメラ解像度が不足しており本撮像環境では検出が不可能と判断した。また、このときの誤検出数は 36 箇所であった。

#### 閾値設定 2 誤受け入れ低減 1(閾値 $2.5 \times 10^{10}$ )

閾値設定 1 にて検出不可であった欠陥がカメラの解像度不足が原因であったため、誤検出低減を目的とした閾値設定を行い検証した。このとき検出率は、ピット 97%、バリ 98%、カケ 98%であった。カケ、バリにも検出が不可能となったものが発生した。検証 2 として、カケ、バリで検出不可となったものを図 3.13 に示す。画像を確認すると検出不可となった要因として、欠陥の深さ (X 方向) に比べ縦方向 (Y 方向) が長く直線的になっており、欠陥がコーナーとして反応せず、エッジの一部としたと考えられる。ピットについては検出率は落ちなかった。誤検出数は閾値設定 1 の 36 箇所比 17 箇所となり半減させることができた。



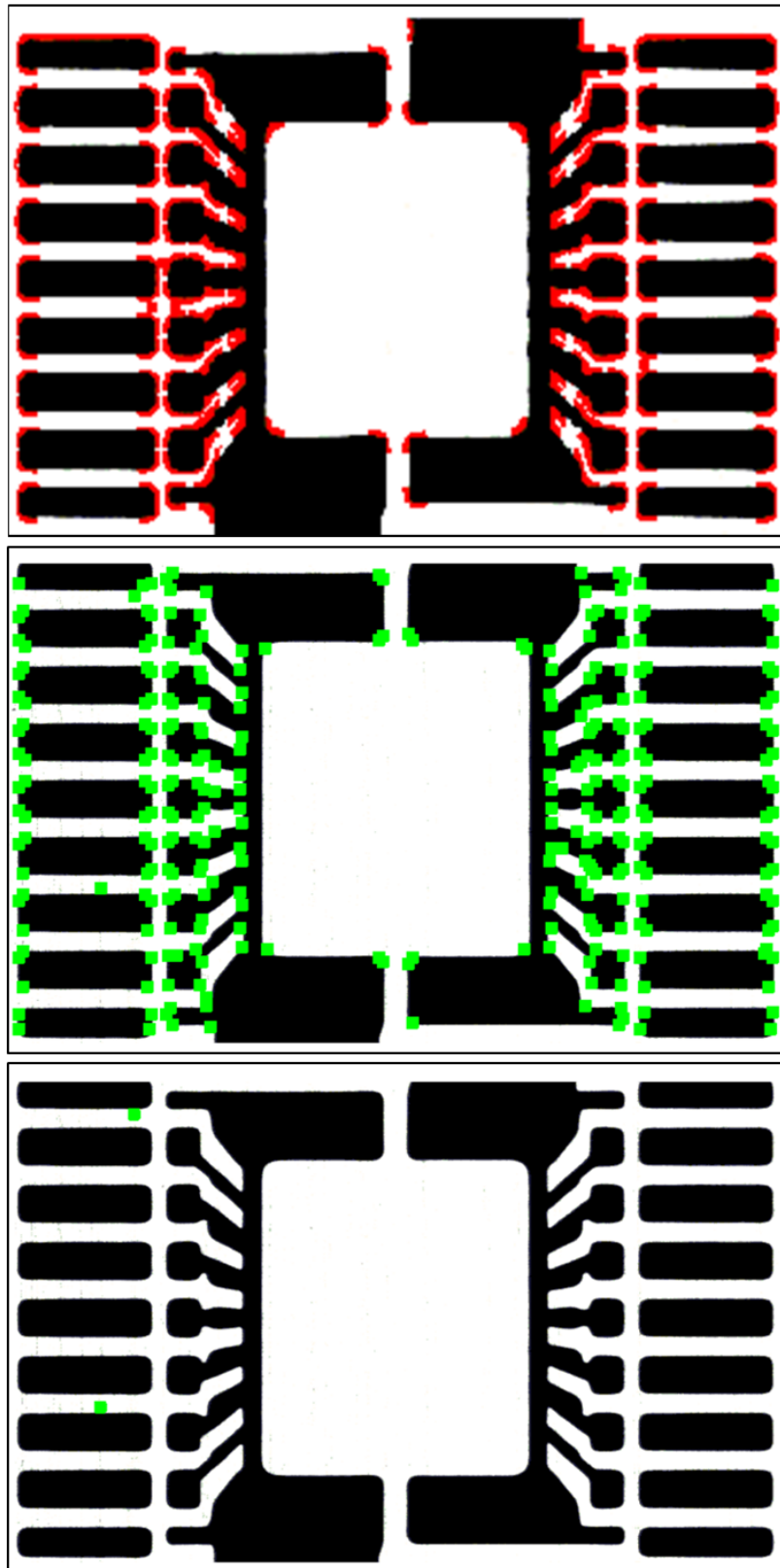


図 3.10 : マスキングエリアと検出結果

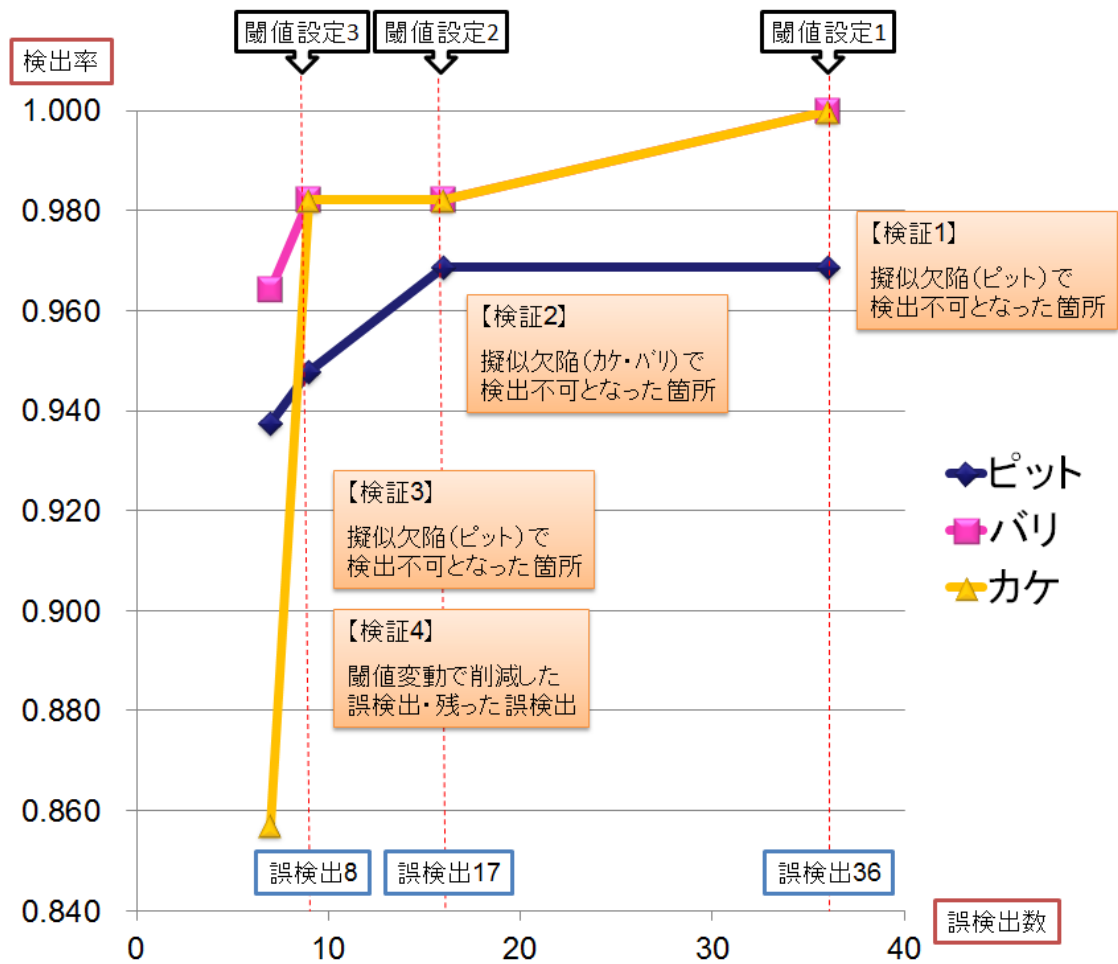


図 3.11 : 閾値変動による検出率と誤検出数

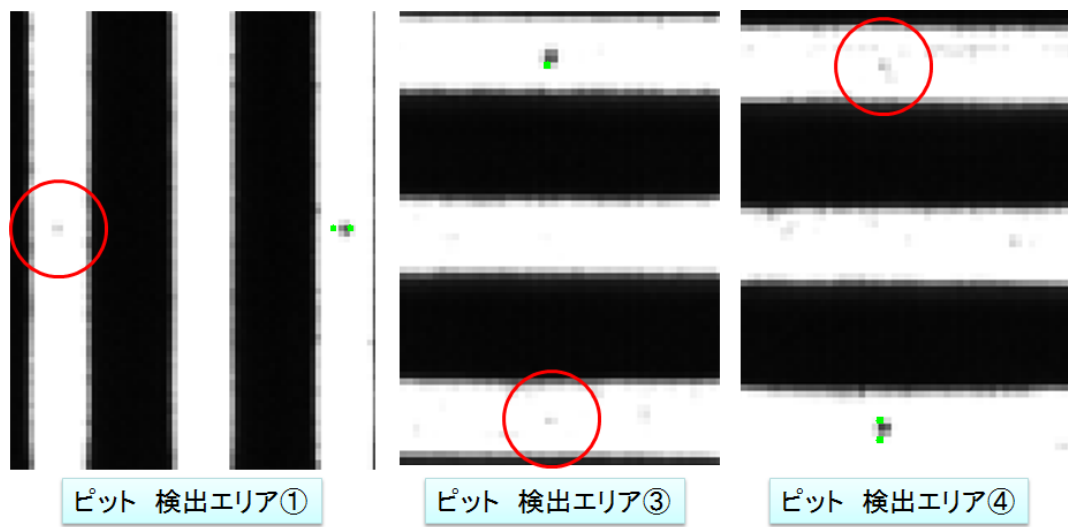


図 3.12 :検証 1 検出不可であった画像

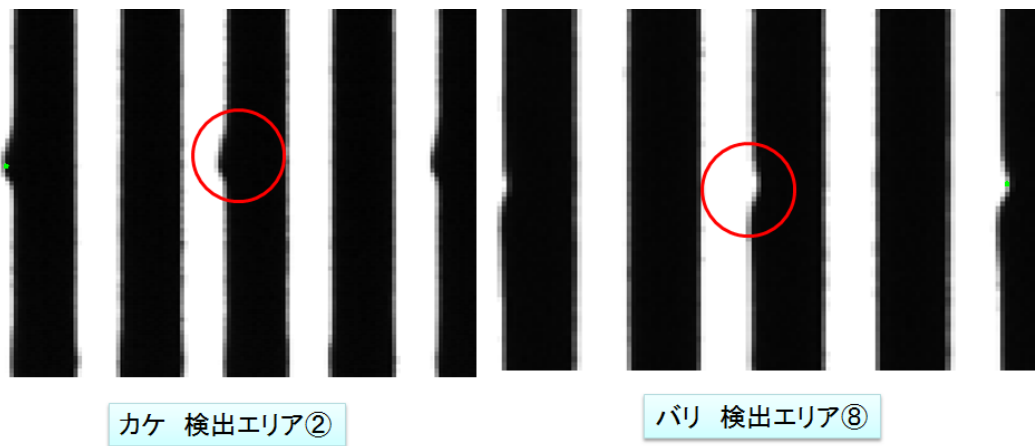


図 3.13 :検証 2 検出不可であった画像

### 閾値設定 3 誤受け入れ低減 2(閾値 $5.0 \times 10^{10}$ )

さらに誤検出低減を目的とし閾値を設定した結果、検出率はピット 95%、バリ 98%、カケ 98%であった。バリ、カケについては閾値設定 2 と比べて検出率が落ちなかったのに対し、ピットは 2%落ちた。検証 3 としてこのとき検出不可となったものを図 3.14 に示す。画像を確認すると他の欠陥に比べ周囲との輝度差が小さかったもの、取得した画像で欠陥の暗い箇所が 1 ピクセルしかないものが十分なコーナー特徴量を得られず検出不可となったと考えられる。また誤検出数は閾値設定 2 に比べ半減し 8 箇所となった。検証 4 として削減した誤検出と、残った誤検出の画像を図 3.15 に示す。削減した誤検出の画像を確認すると、輝度変動の小さいドラムの送り汚れやジャギー、ノイズの誤検出が削減されていた。残った誤検出の画像を確認すると、汚れ等が確認され欠陥とみなしてよい箇所が多数であったことから、誤検出に関してはほぼなくなったと判断した。

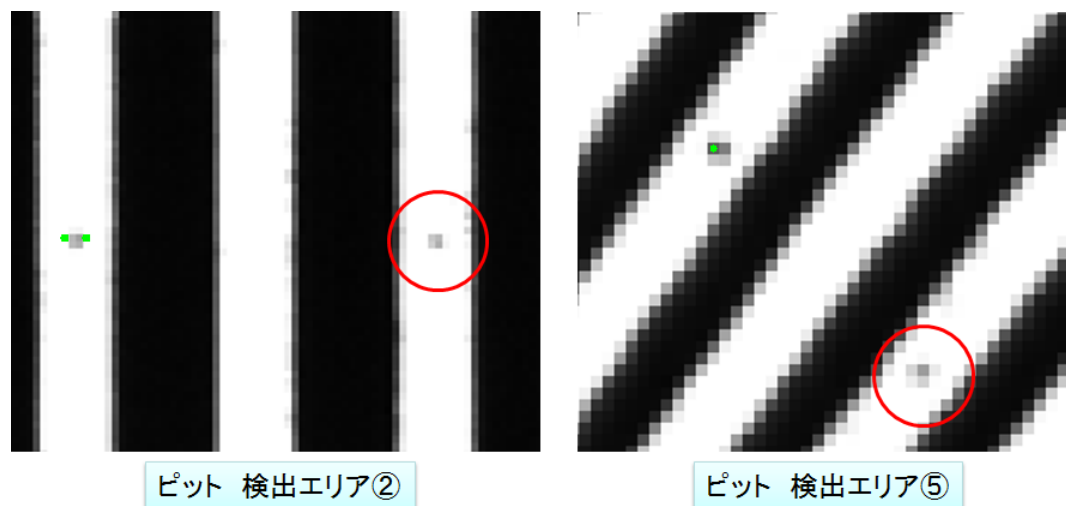


図 3.14 :検証 3 検出不可であった画像

### 3.4.3 総合評価

検証 1 より、検出不可であった欠陥がカメラ解像度不足が原因であったことから、閾値設定 1 より上げる必要はない。閾値設定 2 では、コーナー特徴検出に基づく欠陥検出の不利な点を確認したが、現状でも十分な検出能力であり改善すれば実用的な

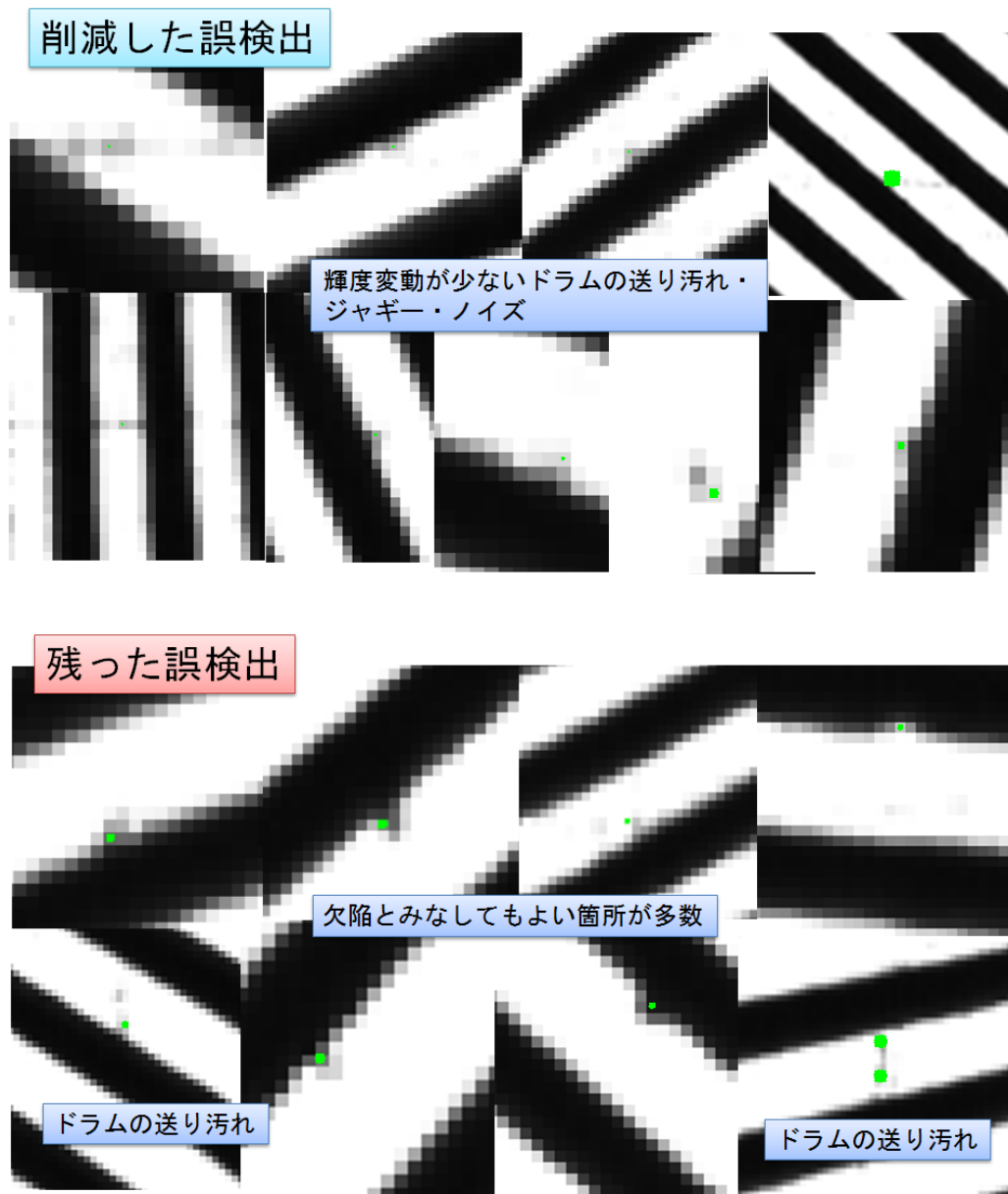


図 3.15 : 検証 4 削減した誤検出・残った誤検出

手法であることが確認できた。閾値設定3では、検証用ICリードフレームにおいて30 $\mu$ mの欠陥を検出率95%、12フレーム中誤検出8箇所(内、数箇所は疑似欠陥以外の欠陥と判断)にて実現可能であることを確認した。課題として、マスキングエリアに発生する欠陥に対応する必要がある。

本章では固視微動による欠陥検出を少ない計算コストで画像処理により再現するため、Harris corner detectorにより得られたコーナー特徴量を利用することで、工業部品のエッジ領域に発生する微小欠陥(良品の規格内のばらつきより小さい欠陥)に対して有効性を確認した。また工業部品にはデザイン上のコーナーも存在するが、コーナー特徴量を算出する際の領域サイズを変更し、それぞれの領域サイズで得られたコーナー特徴量を利用することで、欠陥とデザイン上のコーナーを分離可能であることを確認した。

# 第4章 照明環境を変更した複数枚画像に基づく欠陥検出手法

## 4.1 工業部品の表面領域に発生する欠陥

本章では目視検査において検査対象の物体に対し視線（もしくは光源の位置）を変更しながら検査を行う点を画像処理により再現する手法について提案する。このような手法は工業部品の表面領域に発生する凹凸形状の欠陥に対して有効である。これは工業部品の正常部が局所領域で見ると平面であるのに対し、図4.1に示すような欠陥は、表面の法線方向に傾きが存在し（欠陥部での表面法線方向の傾きのイメージを図4.1の下図に示す）、このような欠陥を目視で検査する際は、光源と視点の位置関係を変更しながら確認を行うことで、物体に対する光源方向を変化させ、注目領域内での部品表面の法線方向を推定し、周囲とは異なる法線方向をもつ箇所を欠陥として特定していると仮定できる。そこで本研究では部品の表面領域に発生する欠陥に対し、法線方向を把握することで画像処理による欠陥検出を行う手法を提案する。

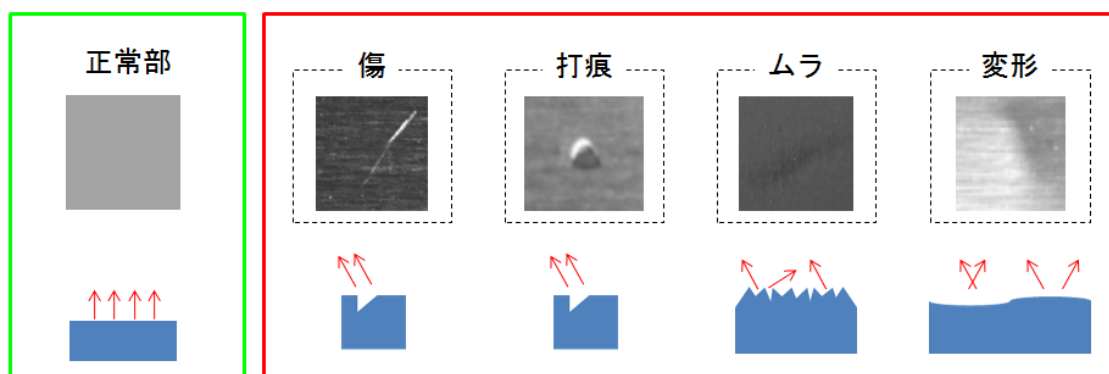


図 4.1 :欠陥と法線方向

## 4.2 事前実験：照度差ステレオに基づく法線情報を用いた欠陥検出 [50]

表面の法線情報を求める手法の一つとして、照度差ステレオ法 [34] がある。照度差ステレオ法とは、観測方向と物体とを固定し様々な照明条件において入力された画像を用い、物体表面の法線方向を推定する手法である。Woodham は Lambert モデルを仮定し、照明方向と観測方向が既知であるという条件のもと法線方向を推定した。他の研究では、照明方向が未知である未校正照度差ステレオ法 [35] についても注目された。この手法では観測画像のランクを用い特異値分解により法線を計算するが、特異値分解の不定性より物体の形状を一意に決定できなかった。この不定性は Generalized Bas-Relief ambiguity と呼ばれ、反射特性に関する仮定により不定性を取り除く研究が盛んに行われている。一方、反射モデルへの拡張では、Lambert モデルでない物体へ応用 [36] や、反射モデルの仮定を行わず非線形である双方向反射率分布関数 (BRDF) で物体を表現する手法 [37] など様々な研究が行われた。しかし、反射モデルに着目したこれらの手法は複雑な反射特性や、非線形な関数を用いるために数学的な安定性が保証されていなかった。そこで Chandraker らは、等方向性 BRDF であれば、物体表面の法線は単調な反射特性により求められることを示し [38]、単調な反射関数を用いることで数学的安定性を保証したが、Chandraker らの手法は一般的に推定が困難である BRDF の凸部の数と優位方向 [39] が既知である必要があり、実際の推定を行う際には破綻しやすかった。Ikehata, Aizawa の提案した手法 (CVR: Constrained Bivariate Regression) [40] では、制限付き二変数回帰問題に定式化することで、推定が困難である凸部の数と優位方向を正確に計算することなく、数学的な安定性を維持したまま物体表面の法線の推定が可能となった。CVR では回帰関数の近似に Bernstein 多項式 [41] を用いている。Bernstein 多項式はパラメータとして多項式の次数  $N$  がある。 $N$  を高次元にするほど、自由度の高い関数により近似ができ、推定精度の向上が期待できる。しかし、 $N$  は高次元になるにつれ、計算コストが大きくなる。文献 [50] では、Ikehata, Aizawa の提案した CVR を用いて工業部品の法線を推定し、工業部品の欠陥検出へ適用している。このとき、検査時間の短縮が求められるため、法線の推定精度を考慮しつつ計算コストが小さくなる次数  $N$  についても確認を行っている。



### 4.2.1 照度差ステレオ法

表面の法線を求める手法として、照度差ステレオ法[34]がある。照度差ステレオ法は、Woodhamが提唱した手法であり、観測方向と物体を固定し、様々な照明条件で撮影した画像を用いることで、物体表面の法線方向を推定する技術である。一般的に照度差ステレオ法では照明数  $m$  は50以上を用いることが多い。  $n$  通りの照明条件で撮像した時に、それぞれの照明方向を  $\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2, \dots, \mathbf{L}_n$ 、照度を  $a_1, a_2, \dots, a_n$  とする。また画像  $\mathbf{I}$  が  $R$  画素より構成されるとき、各画素の法線方向を  $\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2, \dots, \mathbf{N}_R$  とし、各画素の反射率を  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_R$  とする。ここで  $(s_{xi}, s_{yi}, s_{zi}) = a_i \mathbf{L}_i, (v_{xj}, v_{yj}, v_{zj}) = \rho_j \mathbf{N}_j$  とし、物体が Lambert モデルに従っていると仮定すると、観測行列  $\mathbb{I}$  は画素  $R$  と照明条件  $n$  より次式のように示すことができる。

$$\mathbb{I} = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1R} \\ I_{21} & I_{22} & \cdots & I_{2R} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{n1} & I_{n2} & \cdots & I_{nR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{x1} & s_{y1} & s_{z1} \\ s_{x2} & s_{y2} & s_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{xn} & s_{yn} & s_{zn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x1} & v_{x2} & \cdots & v_{xR} \\ v_{y1} & v_{y2} & \cdots & v_{yR} \\ v_{z1} & v_{z2} & \cdots & v_{zR} \end{bmatrix} = \mathbf{SN} \quad (4.1)$$

$\mathbf{S}$ (照明方向と照度)が既知であれば、 $\mathbf{S}^+ = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T$  とする疑似逆行列  $\mathbf{S}^+$  を用いると、法線と反射率を含む行列  $\mathbf{N}$  は式 (4.1) より、次式のように求めることができる。

$$\mathbf{N} = \mathbf{S}^+ \mathbb{I} \quad (4.2)$$

照明条件  $n=3$  の時は、式 (4.2) は連立方程式により解が得られ、 $n > 3$  の時には最小二乗法により解が得られる。このように Woodham は、Lambert モデルを仮定し、法線の推定手法 (LS:Lambertian least-squares-regression-based) を提案した。

### 4.2.2 制限付き二変数回帰を用いた照度差ステレオ法

Ikehata, Aizawa は、一般的な等方性曲面に対して制限付き二変数回帰問題を解くことで法線の推定を行う手法 [40] を提案した。まず、物体を BRDF[46] で表現し、二変数回帰問題を定式化した。回帰関数を数学的安定性が保障されている Bernstein 多項式 [41] で近似し、二次計画問題を解くことで法線を推定した。本節では Ikehata, Aizawa の手法 CVR(Constrained Bivariate Regression) について説明した後、照度

差ステレオ法を用いた工業部品への欠陥検出について示す。また、Bernstein 多項式のパラメータ変更に対する影響についても示す。

### 制限付き二変数回帰問題の定式化

物体の輝度  $I$  は、BRDF( $\rho$ ) に従い、次式のように示せる。

$$\begin{aligned} I &= \rho(\mathbf{n}, \mathbf{l}, \mathbf{v}) \max(\mathbf{n}^T \mathbf{l}, 0) \\ \|\mathbf{l}\| &= \|\mathbf{v}\| = 1 \end{aligned} \quad (4.3)$$

ここで図 4.2 のように、 $\mathbf{n}$  は物体表面の法線、 $\mathbf{l}$  は照明方向、 $\mathbf{v}$  は視線方向であり、 $\max(\mathbf{n}^T \mathbf{l}, 0)$  は陰影表現である。等方性 BRDF は  $K$  個の異なる関数  $\rho_k$  と優位方向  $\alpha_k$ [39] により表現できることを Chandraker ら [38] は示した。

$$\rho = \sum_{k=1}^K \rho_k(\mathbf{n}^T \alpha_k) \quad (4.4)$$

Chandraker らは特定の制限下で式 (4.4) を解くことにより物体表面の法線方向を推定する手法を提案した。しかし未知である  $\mathbf{n}$ 、 $\alpha_k$ 、 $\rho_k$  が同一項にあるため、照度差ステレオ法で解くことは困難である。

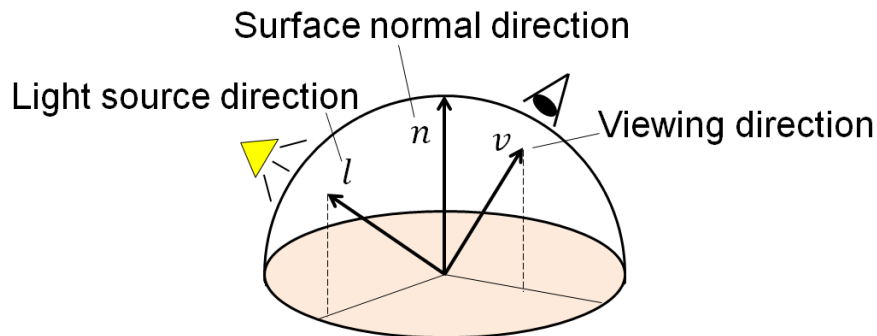


図 4.2 : 反射モデルに用いるベクトル

Ikehata, Aizawa は優位方向  $\alpha_k$  を次のように推定した。

$$\alpha_k = \frac{p_k \mathbf{l} + q_k \mathbf{v}}{\|p_k \mathbf{l} + q_k \mathbf{v}\|} \quad (4.5)$$

ここで、 $p_k$  と  $q_k$  は非負の未知の値である。  $\|\mathbf{l}\| = \|\mathbf{v}\| = 1$  より、  $\mathbf{n}^T \boldsymbol{\alpha}_k$  を次のように変形する。

$$\mathbf{n}^T \boldsymbol{\alpha}_k = \frac{p_k \mathbf{n}^T \mathbf{l} + q_k \mathbf{n}^T \mathbf{v}}{\sqrt{p_k^2 + q_k^2 + 2p_k q_k \mathbf{l}^T \mathbf{v}}} \quad (4.6)$$

$\mathbf{n}^T \mathbf{l}$ ,  $\mathbf{l}^T \mathbf{v}$ ,  $p, q$  が非負であり、  $\mathbf{n}^T \mathbf{v}$  は照明条件毎の定数とみなせる。 よって  $\mathbf{n}^T \boldsymbol{\alpha}_k$  は、  $\mathbf{n}^T \mathbf{l}$  に対して単調増加し、  $\mathbf{l}^T \mathbf{v}$  に対して単調減少する。 よって、  $x = \mathbf{n}^T \mathbf{l}$ ,  $y = \mathbf{l}^T \mathbf{v}$  とし、式 (4.3) にて次式のような関数  $f(x, y)$  を定義することができる。

$$\mathbf{I}_i = f(\mathbf{n}^T \mathbf{l}_i, \mathbf{l}_i^T \mathbf{v}) \quad i = 1, \dots, m \quad (4.7)$$

ここで、  $m$  は照明条件数である。 関数  $f$  は式 (4.4), (4.6) より以下の制限に従う。

- (L1) 単調性 ( $x$ ):  $\partial f / \partial x > 0$
- (L2) 単調性 ( $y$ ):  $\partial f / \partial y \leq 0$
- (L3) 非負性:  $f \geq 0$
- (L4)  $y$  軸上:  $f(0, y) = 0$

式 (4.7) により、BRDF の凸部の数  $K$  と優位方向  $\boldsymbol{\alpha}_k$  を正確に推定する必要なく、Chandraker らの問題を解決することが可能となった。 かしながら、式 (4.7) には未知なパラメータ  $\mathbf{n}$  と  $f$  が同一項に含まれているため、回帰問題として解くことが不可能である。 この問題を解決するために、Ikehata, Aizawa は、  $\{x, y, z\} = \{\mathbf{n}^T \mathbf{l}_i, \mathbf{l}_i^T \mathbf{v}, \mathbf{I}_i\}$  とし、  $x = g(y, z)$  である逆関数  $g$  を定義し、この逆関数  $g$  を式 (4.7) に適用すると、

$$\mathbf{n}^T \mathbf{I}_i = g(\mathbf{l}_i^T \mathbf{v}, \mathbf{I}_i) \quad (i = 1, \dots, m) \quad (4.8)$$

となる。 また、式 (4.8) は、関数  $f$  により以下の制限に従う。

- (L5) 単調性 ( $y$ ):  $\partial g / \partial y \geq 0$
- (L6) 単調性 ( $z$ ):  $\partial g / \partial z > 0$
- (L7) 非負性:  $g \geq 0$
- (L8)  $y$  軸上:  $g(y, 0) = 0$

逆関数  $g$  を定義することで  $\mathbf{n}$  と回帰関数  $g$  を分離することが可能となった。 つまり、求めたい法線  $\mathbf{n}$  と回帰関数  $g$  が同一項にないため、式 (4.8) を (L5)~(L8) の制限下で二変数回帰問題として解くことで、物体表面の法線  $\mathbf{n}$  を推測することができる。

## Bernstein 多項式を用いた近似

式 (4.8) の逆関数  $g$  は, (L5)~(L8) のように, 解空間が制限されている. Ikehata, Aizawa は, 制限のある回帰関数の推定が二次計画問題の解により得られる Bernstein 多項式 [41] を用い回帰関数  $g$  を近似した. Bernstein 多項式は複数基底を持つ関数で次式のように示される.

$$b_{k_1, k_2}(x_1, x_2, N_1, N_2) = b_{k_1}(x_1, N_1)b_{k_2}(x_2, N_2)$$

$$b_{k_i}(x_i, N_i) = \binom{N_i}{k_i} x_i^{k_i} (1 - x_i)^{N_i - k_i} \quad (i = 1, 2) \quad (4.9)$$

ここで,  $0 \leq x_i \leq 1$ ,  $N_i$  は  $x_i$  に関する多項式の次数である. 次に, Bernstein 多項式を回帰関数  $g$  に適用する.

$$x = g(y, z) = \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{b}_{N_y, N_z}(y, z) = \sum_{k_y=0}^{N_y} \sum_{k_z=0}^{N_z} \beta_{k_y, k_z} b_{k_y, k_z}(y, z, N_y, N_z) \quad (4.10)$$

ここで  $\mathbf{b}_{N_y, N_z} \triangleq [b_{0,0}, \dots, b_{N_y, N_z}]^T \in \mathbb{R}^{(N_y+1)(N_z+1) \times 1}$  とし, 関数の重みを  $\boldsymbol{\beta} \triangleq [\beta_{0,0}, \dots, \beta_{N_y, N_z}]^T \in \mathbb{R}^{(N_y+1)(N_z+1) \times 1}$  とする. 次に式 (4.10) の回帰関数  $g$  による制限行列 [47] (*e.g.*, 単調性, 非不性) について考える.

1. 単調性 :  $\partial g / \partial y \geq 0$ ,  $\partial g / \partial z \geq 0$

式 (4.10) の  $y$  による一次導関数は式 (4.9) の定義より

$$\partial g(y, z) / \partial y = N_y \sum_{k_z=0}^{N_z} \sum_{k_y=0}^{N_y-1} (\beta_{k_{y+1}, k_z} - \beta_{k_y, k_z}) b_{k_y, k_z}(y, z, N_y - 1, N_z) \quad (4.11)$$

$0 \leq y, z \leq 1$  より Bernstein 多項式の基底関数は非負であるので, 単調性は  $\beta_{k_{y+1}, k_z} \geq \beta_{k_y, k_z}$  により決定する ( $z$  も同様). したがって制限行列は,  $A_{\text{mono}} \boldsymbol{\beta} \geq 0$  と表される. ただし  $A_{\text{mono}} = [A_y^T \ A_z^T]^T$ ,  $A_y \in \mathbb{R}^{N_y(N_z+1) \times (N_y+1)(N_z+1)}$ ,  $A_z \in \mathbb{R}^{N_z(N_y+1) \times (N_y+1)(N_z+1)}$ .

2. 非負性 :  $g \geq 0$

非負性は  $\forall i \ \beta_i \geq 0$  により保証されているので, 制限行列は,  $A_{\text{nonneg}} \boldsymbol{\beta} \geq 0$  となる. ただし,  $A_{\text{nonneg}} \triangleq \text{diag}(1, \dots, 1) \in \mathbb{R}^{(N_y+1)(N_z+1) \times (N_y+1)(N_z+1)}$ .

3.  $y$  軸上 :  $g(y, \theta)=0$

式 (4.9) より,  $k_z \neq 0$  のとき,  $b_{k_y, k_z}(y, 0) = 0$ .

また  $g(y, 0) = \sum_{k_y=0}^{N_y} \beta_{k_y, 0} b_{k_y, 0}(y, 0, N_y, N_z)$  は  $\forall k_y \beta_{k_y, 0} = 0$  より,  $g(y, 0) = 0$ .  
したがって制限行列は,  $C\beta = 0$  となる. ただし,

$$C \in \mathbb{R}^{(N_y+1)(N_z+1) \times (N_y+1)(N_z+1)} \triangleq \text{diag}(1, 0, \dots, 1, 0, \dots, 1, \dots).$$

式 (4.10) を式 (4.8) に適用すると,

$$\mathbf{n}^T \mathbf{l}_i = \beta^T \mathbf{b}_{N_y, N_z}(\mathbf{l}_i^T \mathbf{v}, I_i) \quad (i = 1, \dots, m) \quad (4.12)$$

ここで,  $N_y$  は  $\mathbf{l}_i^T \mathbf{v}$ ,  $N_z$  は  $I_i$  に関する Bernstein 多項式の次数である. また制限行列は, 1~3 により

$$A\beta = \begin{bmatrix} A_{\text{mono}} \\ A_{\text{nonneg}} \end{bmatrix} \beta \geq 0, C\beta = 0 \quad (4.13)$$

式 (4.12) は線形問題に統合することができる.

$B \triangleq (\mathbf{b}_{N_y, N_z}(\mathbf{l}_1^T \mathbf{v}, I_1), \dots, \mathbf{b}_{N_y, N_z}(\mathbf{l}_m^T \mathbf{v}, I_m))$ ,  $L \triangleq (\mathbf{l}_1, \dots, \mathbf{l}_m)$  とすると,

$$L^T \mathbf{n} = B^T \beta \quad (4.14)$$

また未知の値  $\mathbf{n}$ ,  $\beta$  を統合すると,

$$P_x = [L - B]^T x = 0 \quad (4.15)$$

ここで,  $x \triangleq [n_x \ n_y \ n_z \ \beta_{0,0} \ \dots \ \beta_{N_y, N_z}]^T$  とし,  $n_x, n_y, n_z$  が物体表面の法線方向となる. 式 (4.15) において  $x=0$  になることを防ぐために,  $\mathbf{c} = [1 \ \dots \ 1]^T$  とし,  $\mathbf{c}^T x = 1$  となるような制限  $\sum_i x_i = 1$  を加える. 式 (4.15) より次式のような制限付き線形問題に置き換えられる.

$$\min_x \|Px\|_2^2, \quad s.t. \quad \tilde{A}x \geq 0 \quad \text{and} \quad \tilde{C}x = 0 \quad (4.16)$$

ここで,  $\tilde{A} \triangleq [\mathbf{0} \ A]$ ,  $\tilde{C} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{c}^T \\ \mathbf{0} \ C \end{bmatrix}$ .

Ikehata, Aizawa は, 式 (4.16) を二次計画問題により解くことで, 物体表面の法線方向を効率的に求める手法 (CVR) を提案した.

### 4.2.3 工業部品への適用

一般的に工業部品には CAD データが存在するなど、正確な形状が既知である場合が多い。既知である形状の法線をモデルの法線  $N_{\text{model}}$  とし、推定した形状の法線  $N_{\text{estimate}}$  とモデルの法線  $N_{\text{model}}$  を比較することで欠陥検出を行う。モデルの法線と比較した際に法線方向が異なっている箇所が存在すれば、その箇所が欠陥部と考えられる。法線の推定に照度差ステレオ法を用いた、Lambertian least-squares-regression-based(LS)[34] は、シーンを等方性曲面である Lambert モデルと仮定して法線の推定を行う。Lambert モデルは拡散反射を表現するモデルであるため、異方性曲面を持つシーンでは異方性反射の影響により法線の推定が正しくできないと考えられるが工業部品には異方性曲面を持つ部品も存在する。CVR はモデルを仮定しておらず、BRDF を考慮した法線の推定を行う。式 (4.12) のパラメータである Bernstein 多項式の次数  $N_y, N_z$  によっては、工業部品を等方性曲面とみなして法線を推測できるパラメータが存在すると仮定できる。CVR により工業部品の法線の推定を行う際に、Bernstein 多項式の次数を変化させることで、異方性反射に影響されず、法線の推定が行えるパラメータについての調査を行った。また、工業部品の欠陥検出には検査時間の短縮が求められる。照度差ステレオ法では照明数  $m$  を 50 以上用いて法線の推定をするのが一般的であるが、照明数  $m$  が大きくなるにつれ、検査時の撮像時間に加え法線推定の時間もかかる。よって、本研究では照明数  $m$  を検査時に撮像可能な 16 とし調査を行った。

#### Bernstein 多項式のパラメータ変更による影響

CVR における式 (4.12) のパラメータ  $N_y$  は  $l_i^T v$ ,  $N_z$  は  $I_i$  に関する Bernstein 多項式の次数である。Bernstein 多項式の次数を変化させることによる法線推定への影響について考える。  $N_y$  において、  $v$  は固定であるため定数とみなせる。よって  $N_y$  の次数変化は、  $l_i$  である照明方向に関係する。照明数  $m$  が小さい場合は次数を変化させることによる影響が大きく、照明数  $m$  が大きい場合は影響が少ないと考えられる。また  $N_z$  において、次数変化による影響は、  $I_i$  である観測画像の輝度に関係あると言える。次数が低いと画像をぼかしたような近似となり、次数を高くするほどシャープな近似になる。工業部品の欠陥検出への適用を考慮すると、  $N_y$  に関しては、照明数  $m$  により異なる。  $N_z$  に関しては、次元が高いほど欠陥を検出できると考えられるが、異方性曲面の工業部品であれば、次元を上げすぎると異方性反射によるノイ

ズの影響を受ける可能性がある。よって  $N_z$  の次数決定は欠陥検出において重要であると言える。

### 実験環境

本実験で用いた欠陥は、打痕、傷、変形、ムラの4種類である。部品の表面には異方性曲面であるヘアライン加工が施されている。それぞれの欠陥を図4.3に示す。打痕は凹状の深さ約  $32[\mu\text{m}]$  の窪みがあり、傷は中央に深さ約  $3[\mu\text{m}]$  の直線の窪みが存在する。変形は凸状に湾曲しており、ムラは表面の粗度の違いによる微小な凹凸が楕円状に存在している。照明環境(図4.4)は、部品の中心から円状に配置し仰角  $\phi = 33^\circ$  固定、水平角  $\theta = 22.5^\circ$  ずつ回転させ、照明条件の異なる画像を16枚撮像した。本実験で工業部品は、平坦であると仮定し、モデルの法線  $N_{\text{model}}$  は視線方向  $v$  に一様な法線方向とする。ただし  $v = [0 \ 0 \ 1]^T$  とした。それぞれの欠陥に対して、LS, CVRにより法線  $N_{\text{LS}}, N_{\text{CVR}}$  を推定し、モデルの法線  $N_{\text{model}}$  と比較しずれが生じる場所を欠陥部とした。CVRに関してはBernstein多項式の次数を変更し法線の推定を行う。

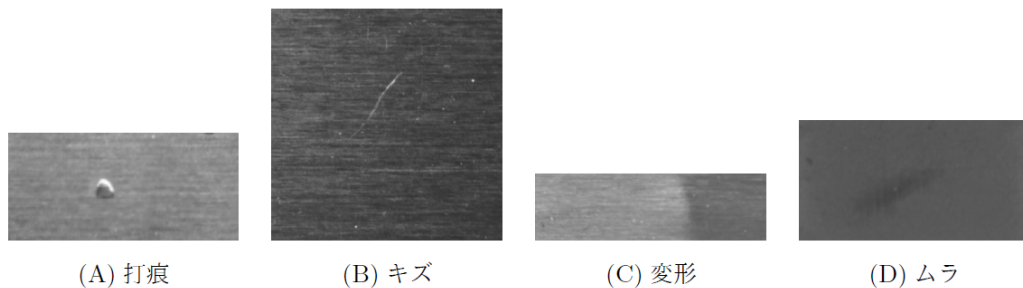


図 4.3 :実験に用いた欠陥

### 法線の推定結果

各欠陥に対し法線の推定結果を示す。各結果であるが、色が赤に近づくほどモデルの法線との差が大きい。法線方向の差が生じている部分は欠陥部であるとみなせる。モデルとした法線との差の様子を図4.5~4.8に示す。ただしそれぞれの結果は  $N_y, N_z$  の値により色のスケールが異なる。法線の推定結果を各欠陥に対して考察していく。打痕についてであるが、LSや図4.5(A2)のように  $N_z$  の次元が低次元であ

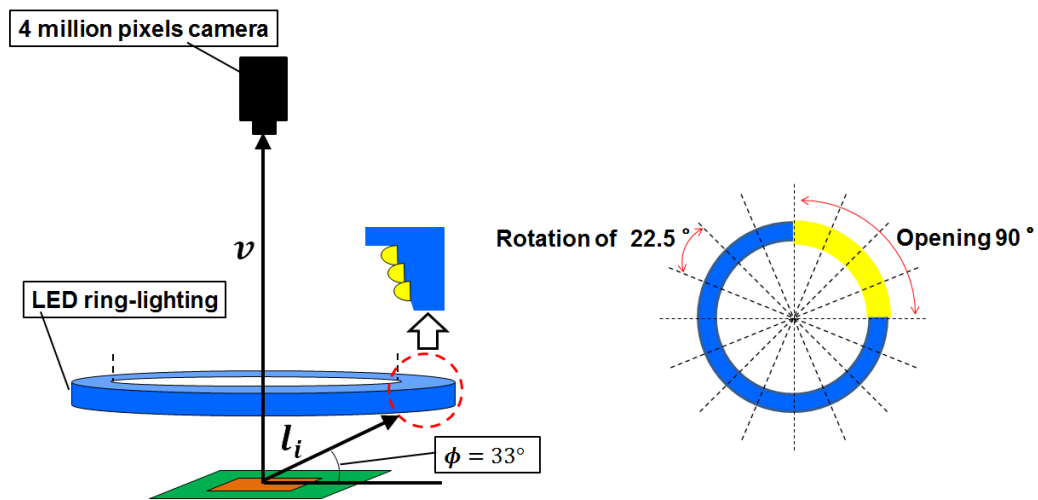


図 4.4 :撮像環境

る場合，打痕の形状は確認できるが，ヘアライン加工に影響され欠陥部以外にもモデルとした法線との差が生じている箇所が現れている．図 4.5(A4)(A5) のように  $N_z$  の次数を高次元にすると，ヘアライン加工の影響を抑えつつ打痕の欠陥部を確認することができる．これは打痕のような急峻な法線変化をもつ欠陥に対して法線推定により検出が可能であると言える．傷については，図 4.6 より  $N_y$ ， $N_z$  の次数に関わらず，今回の実験で用いた照明方向や照明数ではヘアライン加工との分離が困難であり，傷のみを検出することは困難であると言える．変形については，図 4.7 より， $N_y$  が高次元になると照明数  $m$  が少ないため形状が破綻しているが，LS や  $N_y$  が低次元の場合は変形の形状を確認できる．これは，変形のような大きな法線変化をもつ欠陥に対して検出が可能であることを示している．ムラについては図 4.8 より，ムラが微小な凹凸による欠陥であるため，モデルとした法線との差による検出は困難であり，ムラを検出するには照明数  $m$  をより大きくする必要があると考える．今回，工業部品への応用として用いた照明数  $m$  は，一般的に用いられる照度差ステレオ法での照明数より非常に少ない．よって照明  $l$  に関係のある Bernstein 多項式の次数  $N_y$  を変更することで，法線推定への影響は大きくなったと考えられ，法線推定の結果(図 4.5～4.8) からも確認することができた．



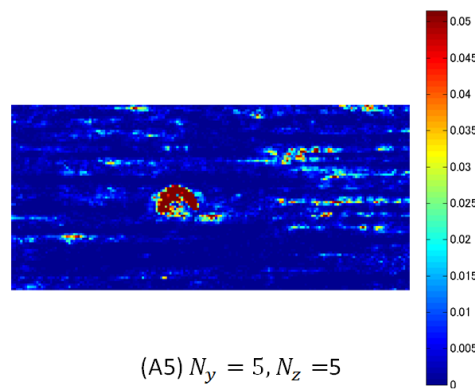
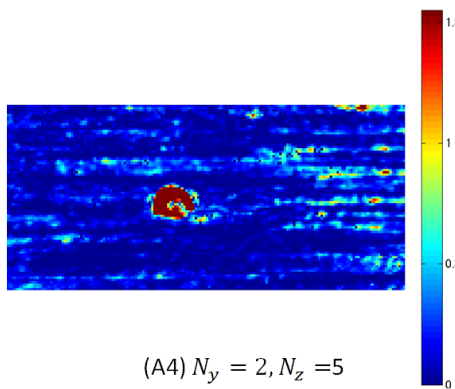
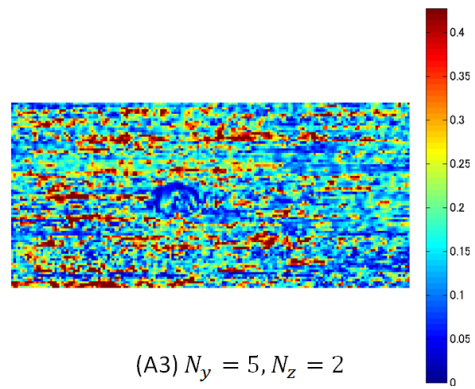
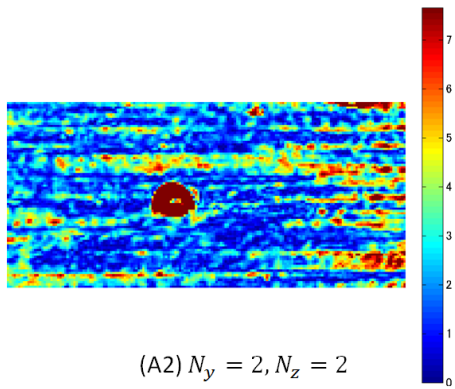
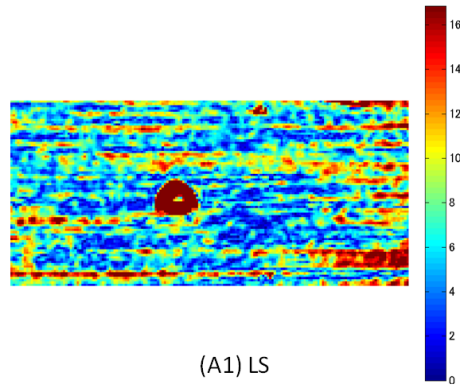
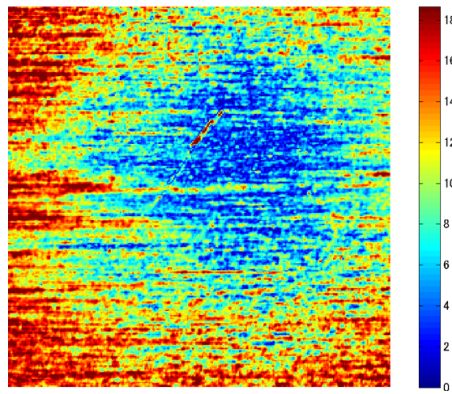
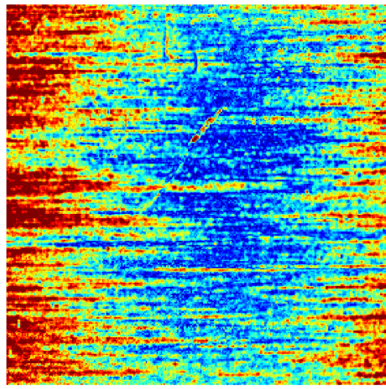


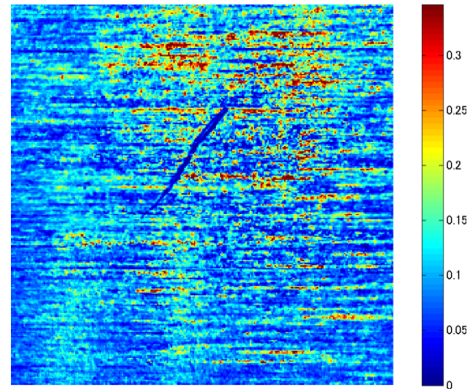
図 4.5 :打痕の法線推定



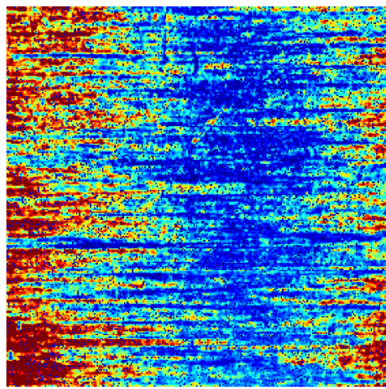
(B1) LS



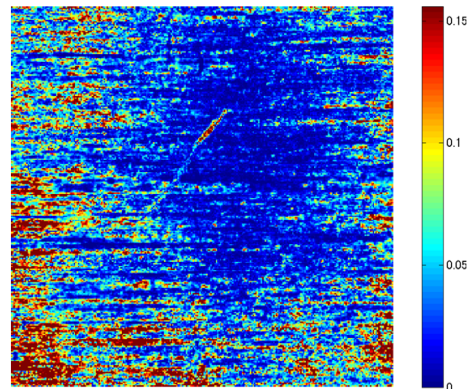
(B2)  $N_y = 2, N_z = 2$



(B3)  $N_y = 5, N_z = 2$



(B4)  $N_y = 2, N_z = 5$



(B5)  $N_y = 5, N_z = 5$

図 4.6 :傷の法線推定

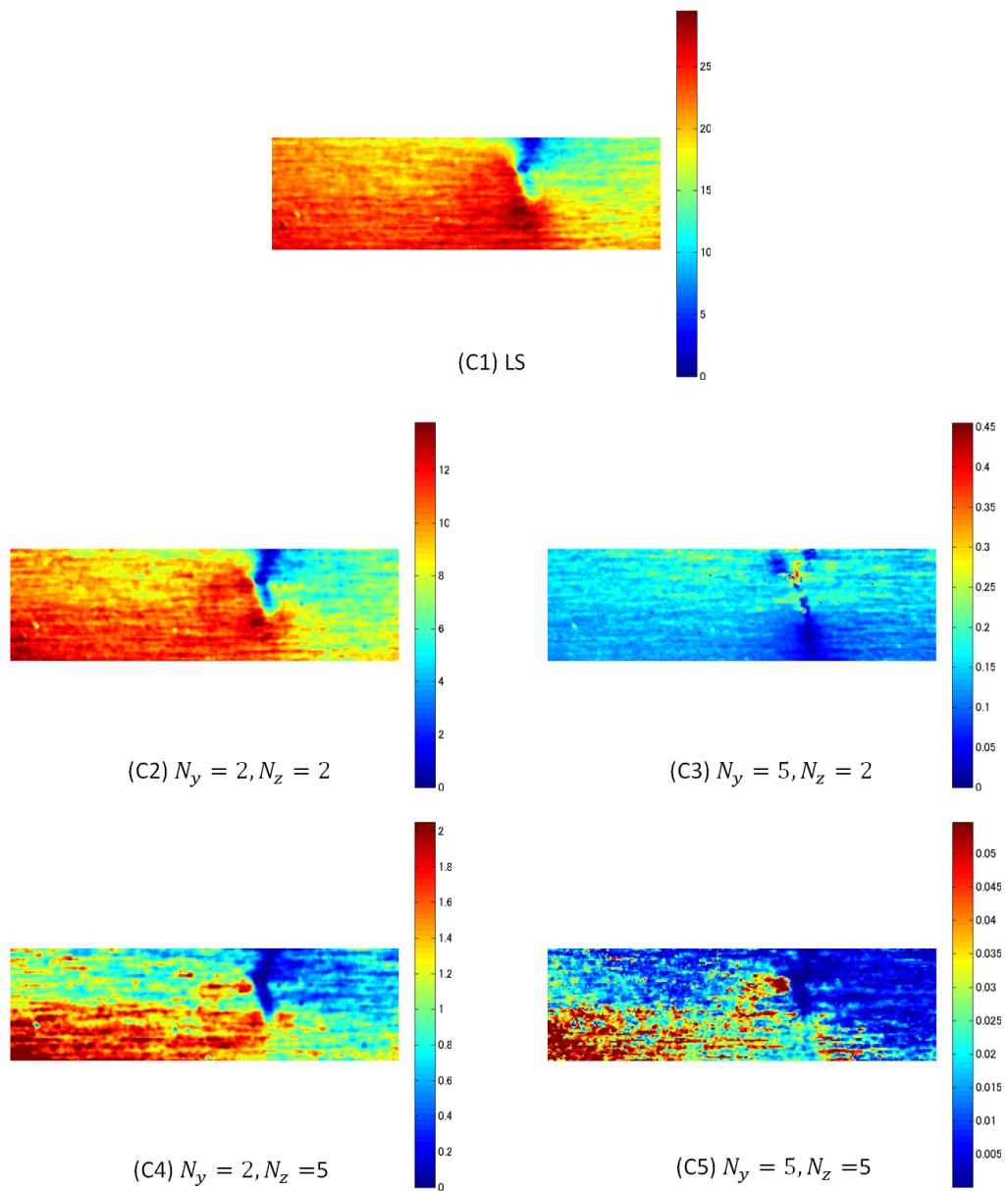


図 4.7 :変形の法線推定

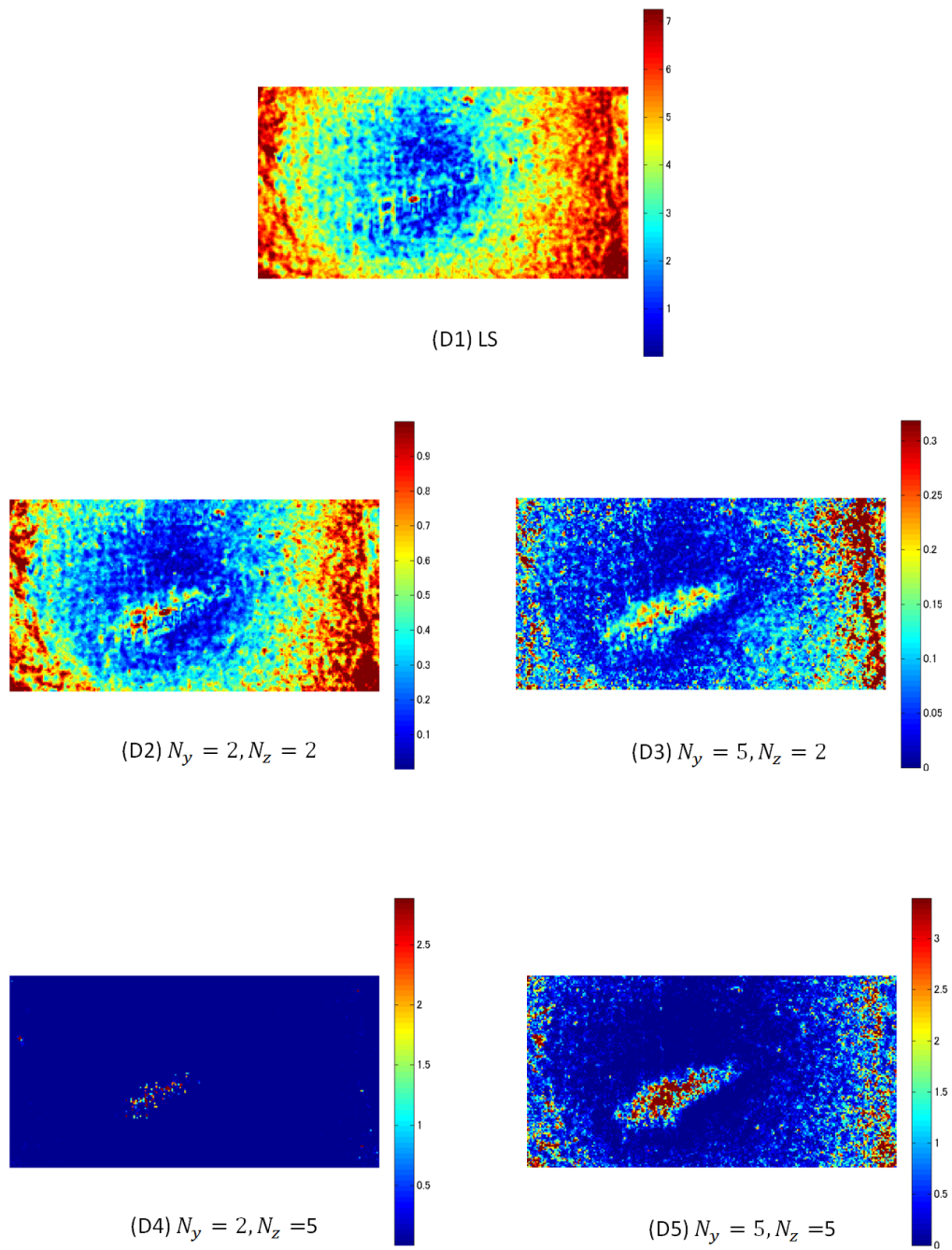


図 4.8 :ムラの法線推定

#### 4.2.4 総合評価

本節では、照度差ステレオ法を用いた工業部品への欠陥検出について検討した。法線の推定を行う際、工業部品にはヘアライン等の異方性曲面も存在するため、CVR (Constrained Bivariate Regression) のパラメータである Bernstein 多項式の次数に注目し、異方性反射の影響を低減できる次数を調査した。急峻な法線変化をもつ欠陥に関しては、次数  $N_y$ ,  $N_z$  を高次元にし、欠陥部の法線推定をより細密に行うことにより欠陥部を特定可能であった。また大きな法線変化をもつ欠陥に関しては、次数  $N_y$ ,  $N_z$  を低次元にすることで、ヘアラインの影響を低減することにより欠陥部を特定可能であった。検出結果として、打痕といった急峻な法線変化をもつ欠陥や、変形のように大きな法線の変化をもつ欠陥については検出に可能性があることを確認した。しかし、傷やムラといった欠陥に関しては検出が困難であった。ヘアラインにおける法線変化と欠陥部での法線変化に差がなく、背景との分離が難しかったと考えられる。本研究において用いた光源数は、一般的に照度差ステレオ法で用いられる光源数より少ない。より多くの光源数を準備することで精度の向上は期待されるが、工業部品の欠陥検出には検査時間の短縮が求められる。今回少ない光源数ではあったが、打痕や変形といった欠陥に対して照度差ステレオ法のように法線情報を取得する手法の有効性を確認することができた。しかし、傷やムラといった欠陥に関しては検出が困難であったため、傷やムラに対応するためには、別の手法を提案し追加する必要があると考える。また本来、得たい情報は欠陥であるか否かであり、詳細な法線情報は必要ない。そこで直接法線情報を扱うのではなく、正常部と欠陥部の法線の違いから取得できる計算コストの小さい情報を用いた欠陥検出手法についても検討する必要がある、次節で提案を行う。

### 4.3 照明環境を変更した複数枚画像に基づく欠陥検出

前節では、照度差ステレオ法により法線方向を推定し工業部品への欠陥検出へ適用した。打痕といった急峻な法線変化をもつ欠陥や、変形のように大きな法線の変化をもつ欠陥については検出に可能性があることが確認できた。そこで照度差ステレオ法のように法線方向を把握することで欠陥部を特定する手法の適用を考える。しかし、照度差ステレオ法では法線方向の詳細な推定を行うため、計算コストが大きくなる。本研究にて得たい情報は欠陥であるか否かであるため、詳細な法線情報は



必要ない。そこで、正常部を局所的に見た場合、ほぼ平面であり法線方向は一方向であると仮定できるのに対し、欠陥部では、法線方向に“ぼらつき”が存在することに注目し、法線の詳細な推定をすることなく、“法線のぼらついている箇所”を特定することで欠陥を検出する手法を提案する（法線のぼらつきに基づく評価値）。しかし、照度差ステレオのように法線方向を詳細に推定し欠陥検出へ適用した結果においても、傷やムラといった欠陥部における法線の変化が微小なものに関しては検出が困難であった。そこで、法線のぼらつきに基づく評価値に加えて、欠陥が持つエッジに対し垂直または平行に光をあてると欠陥箇所が強調される画像が得られると仮定し、様々な光源方向から撮像した画像に対し、各画像単体毎に輝度のぼらつきに基づく評価値を算出し、法線のぼらつきに基づく評価値と輝度のぼらつきに基づく評価値を併用した欠陥検出を行うこととした。ここで、併用して欠陥検出を行う際に以下の課題が考えられる。

1. 法線のぼらつきに基づく評価値と輝度のぼらつきに基づく評価値をどのように統合するか。
2. 統合する際、2つとも使用すると計算コストが大きくなる。
3. それぞれの評価値を算出する際に適したフィルタサイズが未知である。

まず課題1に対し、本研究では、法線のぼらつきに基づく評価値と輝度のぼらつきに基づく評価値を重み付き線形和で統合し、この重みが欠陥毎に適切なものに切り替えながら検査できるよう、予め用意した欠陥サンプルを用いた繰り返し推定により、自動決定する手法を提案する。次に課題2に対しては、検査システムの提案を行う。検査コスト低減のため検査処理を2段階で行い、検査処理1では計算コストの小さい処理で明らかな正常領域と欠陥領域を分け、検査処理1にて欠陥を含むとされた領域に対し、詳細な（計算コストの高い）検査を行うこととする。最後に課題3であるが、工業部品の表面領域には、サイズ、種類等、様々な欠陥が発生する。そのため、画像全体に対して評価値を算出する際に同じフィルタサイズを用いた場合、欠陥を見逃すリスクを含んでいると言える。様々な欠陥に対応するため、課題1と同様に予め用意した欠陥サンプルを用いた繰り返し推定により、欠陥に対して適切なフィルタサイズを自動決定する手法を提案する。本研究では、表面領域に発生する欠陥を検出するため、法線のぼらつきに基づく評価値、輝度のぼらつきに基

づく評価値，検査システム，繰り返し推定による検査パラメータの自動決定手法を提案する。

### 4.3.1 法線のばらつきに基づく評価値

法線方向と反射光の関係について

物体表面で観測される反射光の状態は，様々な反射モデルで表現され，その多くの反射モデルは，反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分の和で近似する [48](図 4.9). 物体表面上のある点  $x$  を観測するとき，拡散反射モデルとして，Lambert モデルが広く用いられ，式 (4.17) のように照明方向  $\mathbf{L}$  と法線方向  $\mathbf{N}$  のなす角の余弦に比例すると仮定される (図 4.10).

$$i = \rho_d \max(0, \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) \quad (4.17)$$

$\rho_d$  は拡散反射率である．また，鏡面反射モデルとしては Phong モデル [49] があり，式 (4.18) のように照明方向の正反射  $\mathbf{L}'$  と観測方向  $\mathbf{V}$  のなす角  $\alpha$  の余弦のべき乗として近似される．

$$i = \rho_s \cos^n \alpha \quad (4.18)$$

$\rho_s$  は鏡面反射率，係数  $n$  は表面の粗さを表すパラメータである．Lambert モデルで表される拡散反射成分も，Phong モデルで表される鏡面反射成分も，表面の法線方向により，観測できる反射光に変化が起こることがわかる．ここでカメラと物体までの距離を固定し，図 4.11 のように，光源と観測点  $x$  までの距離  $d$ ，光源と物体とのなす角  $\theta$  を固定した状態でカメラ光軸と観測点  $x$  を軸として光源を回転させたとき，法線方向とカメラ光軸が一致する場合は光源が回転してもカメラに入力される反射光は同じであると仮定できる．しかし，法線方向とカメラ光軸が一致しないときは，各光源位置により入力される反射光に違いが生じる．よって光源を回転させ撮像したときの各画像を解析することにより，検査対象である平面の法線方向と検査カメラの光軸が一致しているか，いないかを確認できると仮定できる．そこで図 4.1 に示すように工業部品の表面を局所領域で見ると，正常部は平面であり法線方向は一方向であるのに対し，欠陥部では法線方向に傾きがあることに注目し，物体の真上にカメラを配置したとき，カメラ光軸に対して法線方向が不一致である箇所を欠陥と定義し，欠陥を検出する手法を適用する．

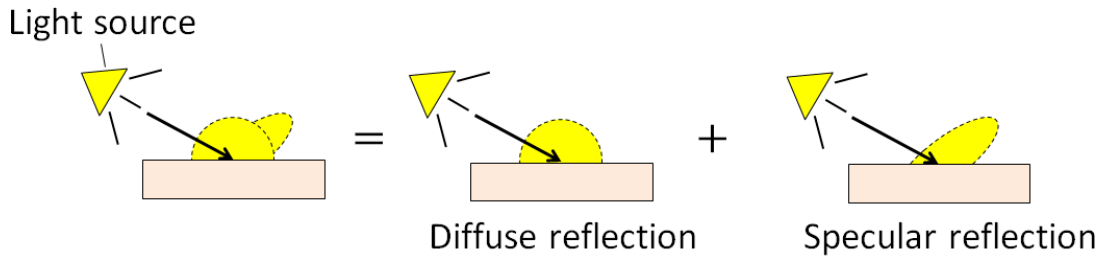


図 4.9 :拡散反射成分と鏡面反射成分

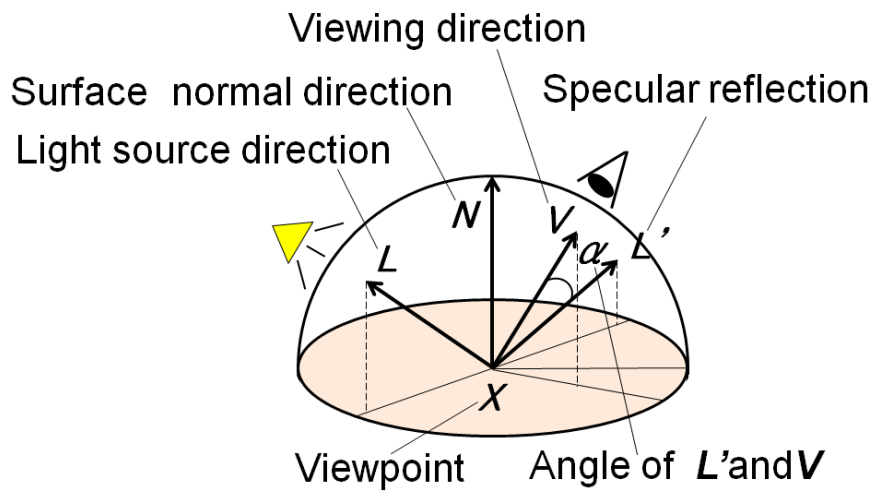


図 4.10 :反射モデルに用いる角度とベクトル



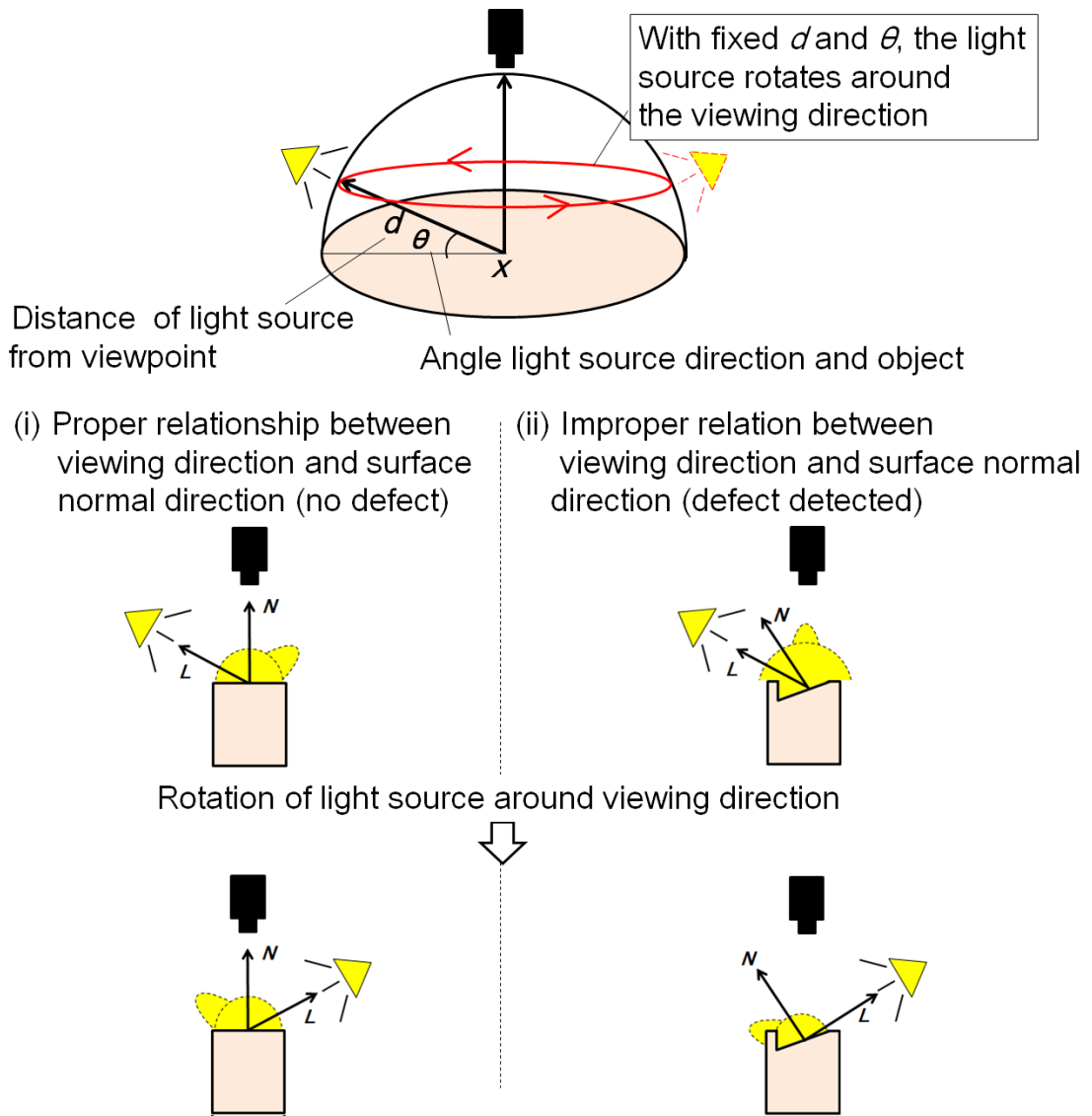


図 4.11 :光源と表面の法線方向について

## 法線のばらつきに基づく評価値

カメラ光軸と表面の法線方向が不一致である領域を特定するため，異なる光源方向から撮像した複数の画像を用い，各画像に対して同一箇所での輝度の分散 ( $V_h$ ) を算出する手法を提案する (図 4.12)．この分散値  $V_h$  の大小により欠陥を検出する (法線のばらつきに基づく評価値)．照度差ステレオ法では詳細な法線方向を推定し欠陥検出に適用したが，本研究では法線のばらつきに注目し少ない計算コストで欠陥箇所を特定を実現する．またこの  $V_h$  は各光源方向で撮像した画像間で分散を求めるためフィルタサイズを最小 1 画素で設定可能であり，小さなフィルタサイズを用いることで欠陥箇所を正確に特定可能である． $N$  個の光源方向 ( $\theta_i = 1, 2, \dots, N$ ) から撮像した画像にて同一箇所の分散値  $V_h$  を算出する ( $s_h$ :  $V_h$  に使用するフィルタサイズ)．

$$V_h(x, y) = \frac{1}{N \cdot s_h^2} \sum_{\theta_i=1}^N \sum_{i=1}^{s_h} \sum_{j=1}^{s_h} (I(x+i, y+j) - \bar{I}(x, y, s_h))^2 \quad (4.19)$$

$\bar{I}$  はフィルタサイズ毎の輝度の平均値

検査領域をラスタスキャンし全画素に対し，式 (4.19) を用い， $V_h$  を算出する． $V_h$  は異なる照明条件により観測された各画像間の分散値を局所領域毎に算出することで，法線方向とカメラ光軸の一致度を推定可能である．

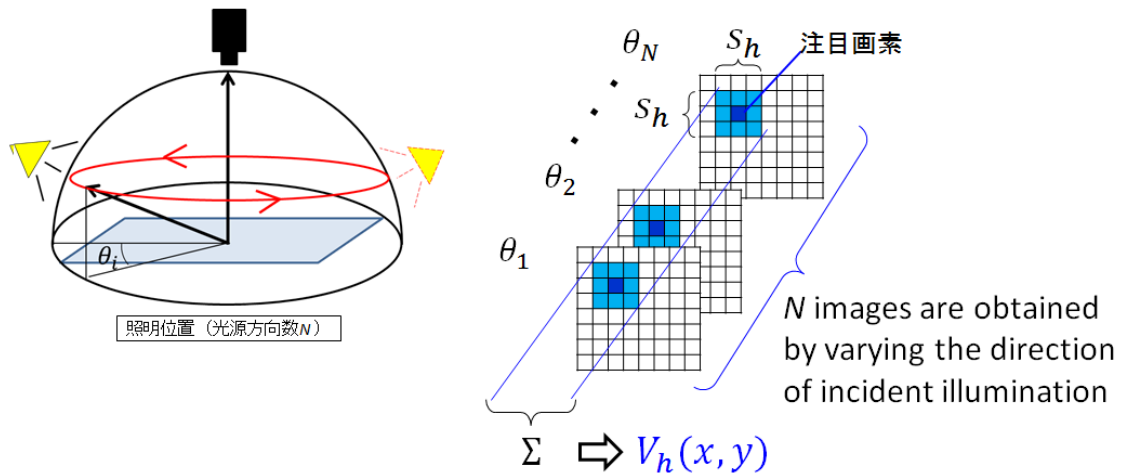


図 4.12 :  $V_h$  算出のイメージ

ここで法線のばらつきに基づく評価値を用いる手法は、照度差ステレオを用いた欠陥検出でも示した通り、傷やムラといった欠陥部における法線の変化が微小なものに関しては検出が困難である。これに加えて、 $V_h$ による小さなフィルタサイズのみでの検出結果を判定に用いた場合はノイズの影響を受けるリスクがあり、また光学条件が理想的な状態(カメラ光軸に対し、物体が水平に配置され光源からの入射角が保たれた状態)にないとき、つまりカメラ・光源・検出対象の物体の関係にわずかな傾きがあるときに、法線方向とカメラ光軸にずれが生じてしまい、正常な判定ができない(図4.13)。そこで次項に説明する様々な光源方向から撮像した画像に対して、画像単体毎から算出する輝度のばらつきに基づく評価値と併用して欠陥検出を行う。

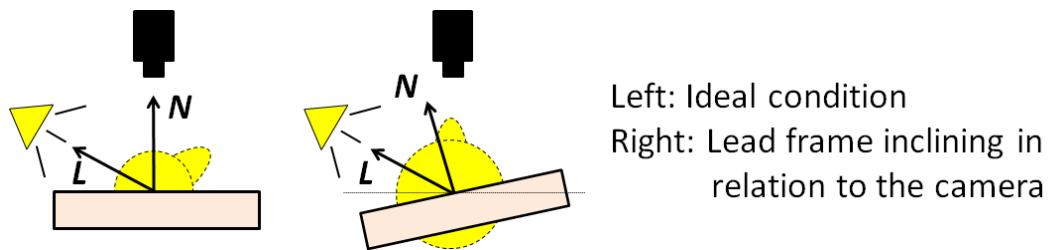


図 4.13 :光学系の傾き

### 4.3.2 輝度のばらつきに基づく評価値

本研究では、法線のばらつきに基づく評価値に加えて、様々な光源方向から撮像した画像に対して、各画像単体毎にも欠陥検出を行う手法を提案する。これは、複数の光源方向から撮像した場合、光源の方向と物体の位置によってヘアラインの影響が低減され、欠陥が強調される画像が存在することに注目した手法である(図4.14)。この判定に、各画像単体毎に輝度変化領域を特定することで欠陥の判定を行う分散値  $V_l$  を用いる。この  $V_l$  は領域(フィルタサイズ)内に、周囲とは異なる輝度値を持つ欠陥が存在していた場合に、フィルタサイズ内の分散値が大きくなるため欠陥の検出ができる。 $N$  個の光源方向 ( $\theta_i = 1, 2, \dots, N$ ) から撮像した画像毎にフィルタサイズ ( $s_l$ :  $V_l$  に使用するフィルタサイズ。  $s_l$  は画像単体毎に分散を算出するため、法線のばらつきに基づく評価値  $V_h$  に使用するフィルタサイズ  $s_h$  に比べ大きいものを使用する必要がある) における輝度の分散を算出し、各画像の同一箇所でも最大

値を持つ画像の分散値をその箇所の  $V_l$  値とする (図 4.15). 最大値を用いることで、欠陥に対して最も周囲との輝度差が大きく観測される光源方向の結果 (欠陥が強調された結果) が採用される. これは現状の目視検査においては、様々な方向から光を当てた後、最も違和感のあるテクスチャを投影する方向に固定して注意深く表面を観察する検査段階を模したものである.

$$V_l^{(\theta_i)}(x, y) = \frac{1}{s_l^2} \sum_{i=1}^{s_l} \sum_{j=1}^{s_l} (I(x+i, y+j) - \bar{I}(x, y))^2$$

$$V_l(x, y) = \max_{\theta_i \in N} \{V_l^{(\theta_i)}(x, y)\} \quad (4.20)$$

$\bar{I}$  はフィルタサイズ毎の輝度の平均値

検査領域をラスタスキャンし全画素に対し、式 (4.20) を用い  $V_l$  を算出する. 輝度のばらつきに基づく評価値  $V_l$  は大域領域にて画像単体毎に分散を算出するため、法線のばらつきに基づく評価値  $V_h$  での問題 (小さなフィルタサイズを用いることからノイズの影響大、光学系に傾きがあった場合に正常な判断ができない) に対して影響が小さい.

### 4.3.3 検査システム

前項で提案した「法線のばらつきに基づく評価値」と「輝度のばらつきに基づく評価値」であるが、課題として挙げたように、すべての検査に2つの評価値を使用した場合、計算コストが大きくなってしまう. そのため計算コストを低く抑えるための検査システムの提案を行う. 検査処理は2段階で構成し、1段階目は計算コストの少ない処理で、検査エリア毎に欠陥を含むか否かの判定を行い (検査処理1)、2段階目で検査処理1にて欠陥を含むとしたエリアに対して、詳細な検査として欠陥とみなされる箇所を特定する処理 (検査処理2) を行うこととする. 検査全体の流れをに図 4.16 示す.

#### 検査処理1「検査エリア毎、正常/欠陥を判定」

検査処理1では、検査エリア毎に欠陥を含むか否かの判定を行う. 本来正確な検査を行うには、「法線のばらつきに基づく評価値」と「輝度のばらつきに基づく評価値」の両方を用いた方が良いが、計算コストを削減するため、「輝度のばらつきに基づく

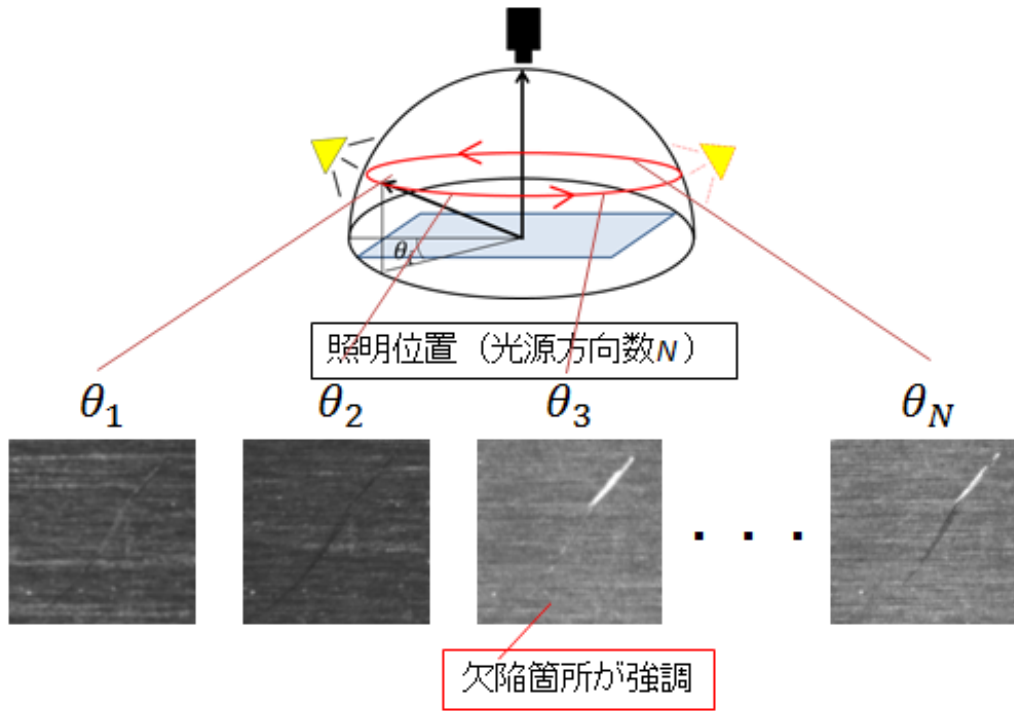


図 4.14 : 光源方向と欠陥の入力画像

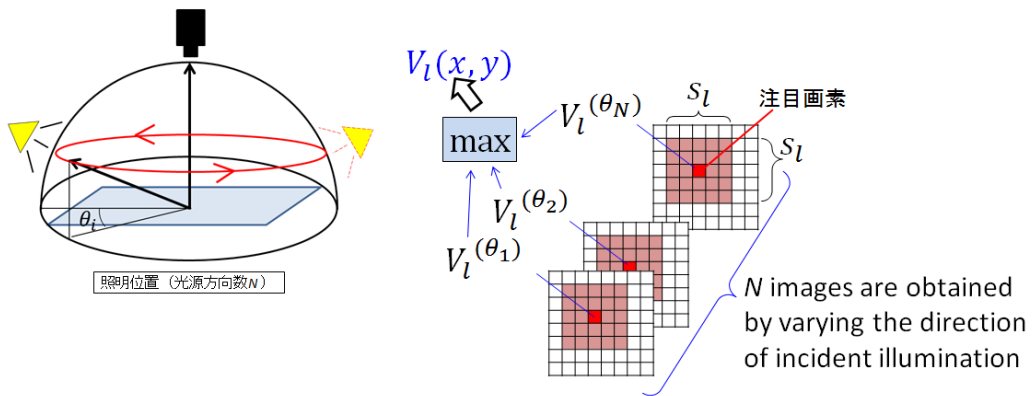


図 4.15 :  $V_l$  算出のイメージ

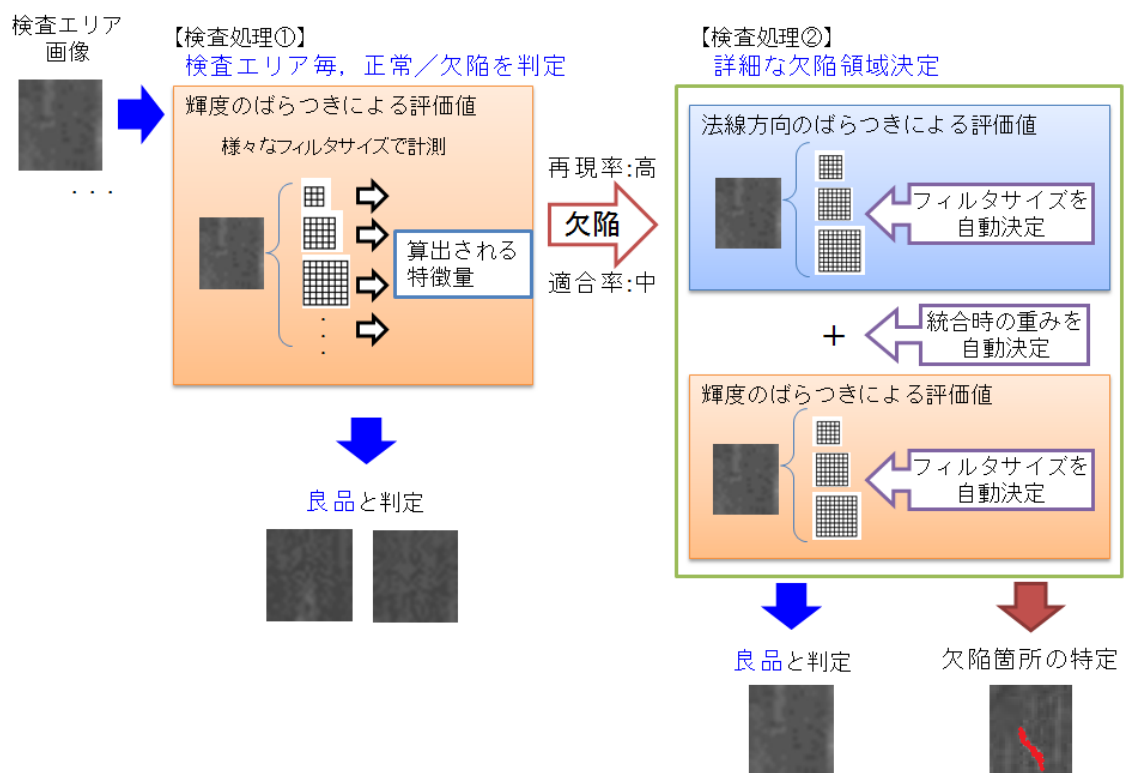


図 4.16 :検査処理の流れ

評価値」のみを用いて判定を行う（輝度のばらつきに基づく評価値の算出式 (4.20) と法線のばらつきに基づく評価値の算出式 (4.19) を比べると輝度のばらつきに基づく評価値の方がより計算コストが少ないことがわかる）。このとき、表面領域に発生する欠陥のサイズは様々であるので、用いるフィルタサイズも様々用意し輝度のばらつきを測る。それぞれのフィルタサイズの結果の統合方法であるが、フィルタサイズ毎に検査エリアにおける  $V_l$  の最大値を算出し、その最大値から中央値を取得する手法を提案する（図 4.17）。算出された中央値と閾値  $T_{p1}$  を比較し、欠陥を含むか否かの判定を行う。

$$\begin{aligned}
 V_l(s_l) &= \max_{(x,y) \in R} \{V_l(x,y)\} \\
 \hat{V}_l &= \text{median}_{s_l} \{V_l(s_l)\} \\
 \hat{V}_l &> T_{p1}
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

$\bar{l}$  はフィルタサイズ毎の平均値,  $R$  はエリアの画素数

フィルタサイズ毎の最大値から、中央値を算出し利用することで、あるフィルタサイズでは反応してしまうノイズの影響を除去できるとともに、欠陥が存在すれば、様々なフィルタサイズでも  $V_l$  値がある程度大きくなるとの考えから、ロバストに欠陥を含むか否かを判定できる。

ここで検査処理 1 では、欠陥を見逃さないように適合率は低くなくても、再現率が 100% に近くなるような閾値  $T_{p1}$  を設け、欠陥については漏れなく検査処理 2 の詳細な検査を行うようにする。

## 検査処理 2 「欠陥とみなされる箇所の特定」

検査処理 2 では、検査処理 1 にて欠陥を含むと判定されたエリアに対して、欠陥とみなされる箇所を特定する。このとき、欠陥箇所を正確に特定するため、検査処理 1 で算出した「輝度のばらつきに基づく評価値」に加え、「法線のばらつきに基づく評価値」を重み付き線形和により統合し用いる（このとき輝度のばらつきに基づく評価値は検査処理 1 で算出済み）。 $V_h$  値と  $V_l$  値をそれぞれの最大値で正規化し、 $V_h$  値と  $V_l$  値の割合を決める係数  $\alpha$  と、検出レベルを決める  $T_{p2}$  を用いて欠陥箇所の特定を行う。

$$(1 - \alpha) \frac{V_h(x,y)}{\max V_h} + \alpha \frac{V_l(x,y)}{\max V_l} > T_{p2} \tag{4.22}$$

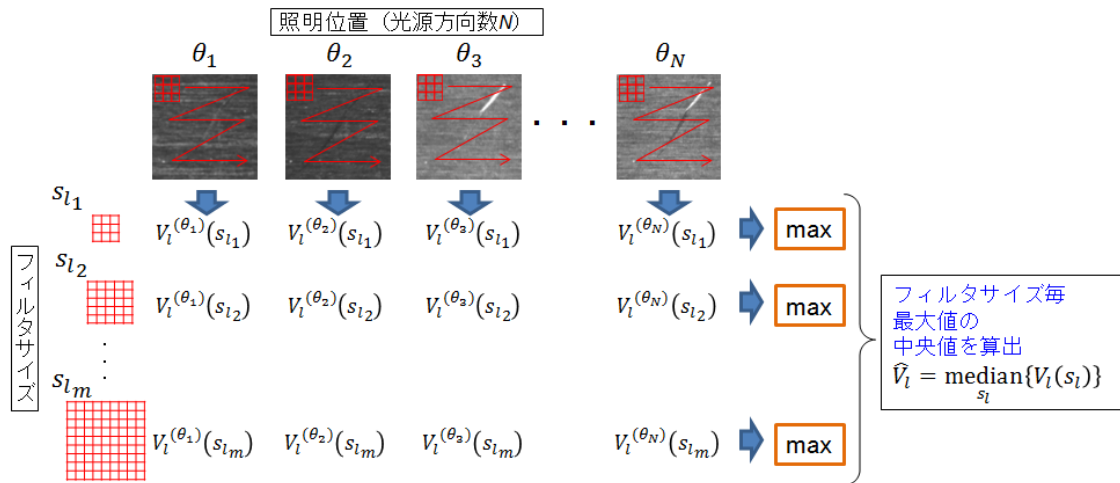


図 4.17 :  $\hat{V}_l$  の算出方法

また  $V_h$  値と  $V_l$  値算出に用いるフィルタサイズであるが、 $V_h$  は表面の法線方向とカメラ光軸の一致度を局所領域で測ることが可能であり、 $V_l$  は画像単体毎に大域領域でエリア内の輝度の分散を測る（画像単体で分散を測るため、ある程度広いエリアが必要）ことから、図 4.18 のように  $s_l > s_h$  となるよう設定する。ここで、実際に検出を行う際、 $V_h$  値と  $V_l$  値算出に用いるフィルタサイズセット  $(s_h, s_l)$ 、 $V_h$  値と  $V_l$  値の割合を決める係数  $\alpha$ 、検出レベルを決める  $T_{p2}$  が検出結果に大きく影響し、決定が非常に重要である。それに加え、様々なサイズや種類の欠陥を対象とする必要があり、固定したパラメータでは検出が困難であるため、欠陥に対し適切なパラメータへ変更しながら検査を行う必要がある。そこで本研究では、繰り返し推定による検査パラメータの自動決定手法の提案を行う。

#### 4.3.4 繰り返し推定による検査パラメータの自動決定手法

物体表面の欠陥検出を行う文献 [21]~[27] に挙げられる手法は、取得した画像に対して画像特徴を算出するフィルタサイズ等のパラメータを固定して検査処理を行っている。そのため、実際に工業部品等に検査処理を適用する際は、その工程や発生する欠陥に合わせて、設計者がパラメータの設定を行う必要があるが設定コストが多くかかる。また、実際の工業部品では、サイズ、種類等、様々な欠陥が発生するため、画像全体に対して同じパラメータを用いた検査では、欠陥を見逃すリスクを含



んでいると言える。そこで、欠陥に対して適したパラメータへ切り替えながら検査ができるよう、予め用意した欠陥サンプルを用い、繰り返し推定によりパラメータを自動決定する手法を提案する。ここでパラメータの自動決定には大量のサンプルを用いた機械学習による手法も考えられるが、運用上、実際に各生産工程で大量のサンプルを用意することはコストが高く、生産される工業部品の入れ替えが頻繁に起こる生産工程では導入が困難となる。そこで、本論文では、少ないサンプルからパラメータを自動決定する手法を提案する。具体的には、パラメータ空間において与えられた数少ないサンプルに対して、現時点でのパラメータセットを基に欠陥検出性能を評価し、それらに関数近似することによって評価値を最大とするパラメータを推定し、さらに推定されたパラメータ付近で同様の推定処理を繰り返し更新する手続きである。本研究では欠陥検出性能の評価に  $f$  値を利用する。 $f$  値とは、欠陥サンプルに対して予め正解とする欠陥領域 (Ground truth) を与えておき、Ground truth として与えた欠陥領域から検出された領域の割合と、検出された領域に占める Ground truth の割合の調和平均を算出したものである (調和平均を用いることで一方が著しく低い場合の結果は低く抑える)。処理の詳細を、本研究で用いるパラメータ ( $V_h$  値と  $V_l$  値で使用するフィルタサイズセット ( $s_h, s_l$ ),  $V_h$  値と  $V_l$  値の割合を決定する  $\alpha$ , 検出レベルを決定する  $T_{p2}$ ) を例に説明する (図 4.19)。また、各欠陥の特徴量として検査処理 1 で算出される  $\hat{V}_l$  (式 (4.21) より算出) を使用する (予め欠陥サンプルに対して  $\hat{V}_l$  を算出しておく)。

- (1) 図 4.19 のように横軸に検査処理 1 で算出される欠陥の特徴量である  $\hat{V}_l$ , 縦軸に  $f$  値をとり、まず適当な  $\alpha$  と  $T_{p2}$  を用い、用意した全ての欠陥サンプルに対し、フィルタサイズセット毎 (説明ではフィルタサイズセット 3 種で行うが実際には、さらに複数用意しても同様の処理にて決定可能) に検出を行い Ground truth とで算出した  $f$  値の結果をプロットする。(図 4.19 で、同じ  $\hat{V}_l$  値上に縦に並んだ 3 点は、同じ欠陥に対し検出に用いたフィルタサイズが異なっているため、 $f$  値が異なっていることを示している。)
- (2) 横軸の  $\hat{V}_l$  値に対してフィルタサイズ毎に  $f$  値が高くなる領域を確認するため、プロットした結果をフィルタサイズ毎に関数で近似する。
- (3) 近似した関数から接点を算出し、各欠陥サンプルの  $\hat{V}_l$  値により  $f$  が高くなるようなフィルタサイズを決定できる閾値とする。(これにより、各欠陥サンプルに対して  $f$  値が高くなるようなフィルタサイズが決定される。)

- (4) フィルタサイズセット毎に決定した欠陥のみを用い  $f$  値が高くなるよう  $\alpha$  値と  $T_{p2}$  値を調整する。(これにより、フィルタサイズ毎に適切な  $\alpha$  値と  $T_{p2}$  値が決定される.)
- (5) フィルタサイズセット毎に (4) で調整された  $\alpha$  値と  $T_{p2}$  値を用いた検出結果による  $f$  値をプロットする。プロットした結果に対し、再度 (2) を実施する。

上記をフィルタサイズを決定する閾値が一定値以下に収束するまで (式(4.23)) 繰り返し、少ないサンプルで対象とする生産工程に適切な検査パラメータを決定する。

$$|\hat{V}_{l_{a-b}}^{(t)} - \hat{V}_{l_{a-b}}^{(t-1)}| < \epsilon_{a-b} \quad (4.23)$$

$\hat{V}_{l_{a-b}}^{(t)}$  はループ  $t$  回目のフィルタサイズ  $a$  と  $b$  を決める閾値,  $\epsilon_{a-b}$  は収束条件として設定した値である。

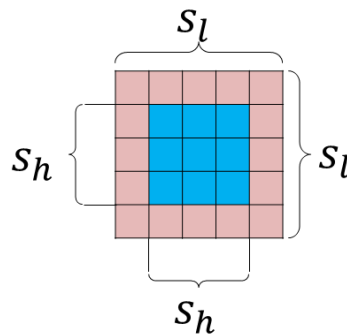


図 4.18 : フィルタサイズの設定

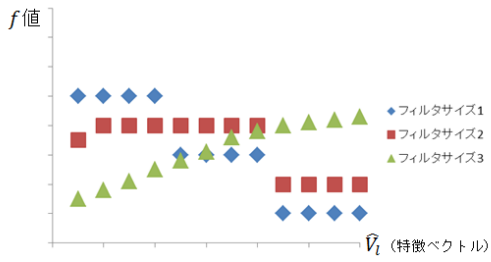
## 4.4 実験

### 4.4.1 実験環境

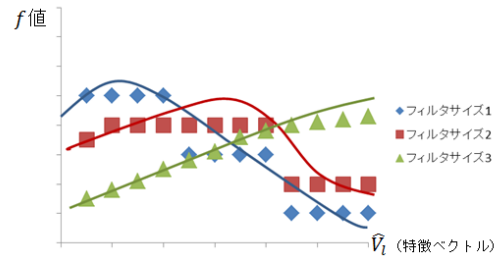
#### 検査機器

検査機器の構成を図 4.20 に示す。複数の光源方向から撮像可能なように設計した。図 4.20 の下図のようにリング状 LED 照明を  $90^\circ$  分だけ開口し、異なる光源方向として、 $22.5^\circ$  ずつ回転させ、計 16 方向の光源から撮像した画像を取得できる。図 4.21

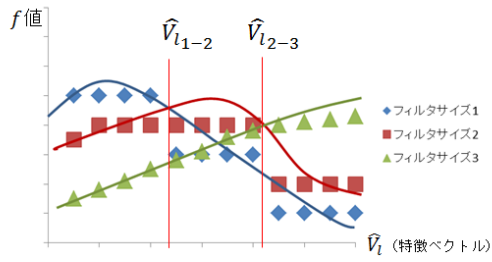
(1) フィルタサイズ毎に、検出結果をプロット



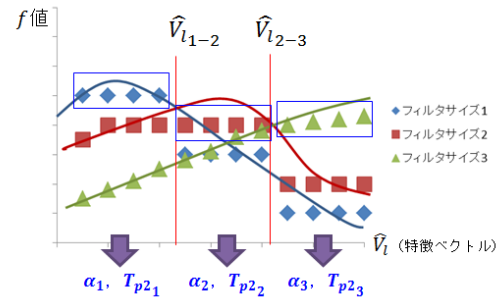
(2) 関数で近似



(3) 近似関数の接点を算出し、フィルタサイズを決定する閾値とする



(4) フィルタサイズ毎に決定した欠陥サンプルのみを用い、 $f$ 値が高くなるよう $\alpha$ と $T_{p2}$ を調整



(5) 調整した $\alpha$ と $T_{p2}$ を用いてフィルタサイズ毎に再プロット

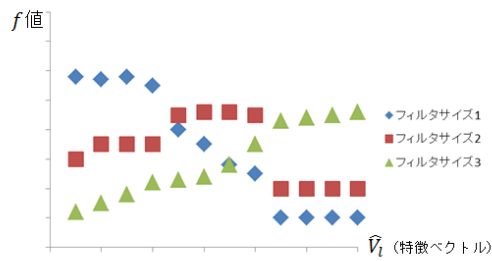


図 4.19 :パラメータの自動決定の流れ

に本撮像環境にて，光源を右側に配置し白紙を撮像したときの明るさの分布を示す．  
 図 4.21 のように光源から近い位置程明るくなるため，光源の位置を変えたときにも  
 光量が安定する中央付近のエリアを検査に使用する．今回の検査機器では，光量の  
 安定領域は  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  程度であるが，今回使用したものよりも大きな照明を用  
 いることで安定領域の拡大は可能である．また 1 画素のサイズは  $30\mu\text{m}$  程度である．

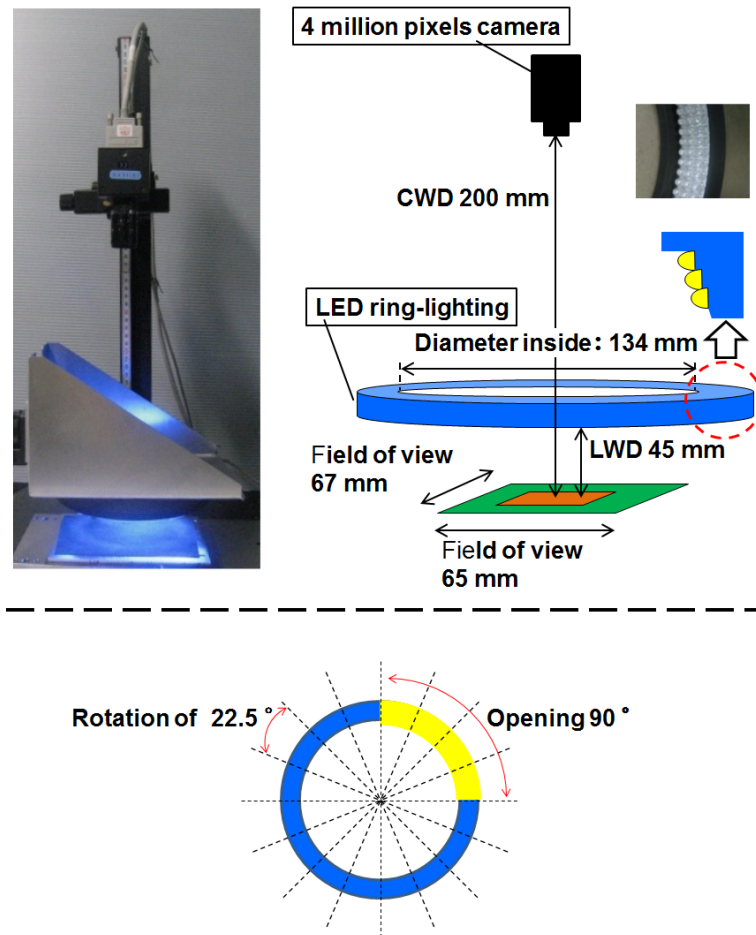


図 4.20 :検査機器

### 評価用サンプル

今回実験に使用したサンプルは，正常品 41 サンプル，欠陥品 64 サンプル（傷，打痕，ムラ，変形，各 16 個ずつ）の計 105 サンプルである．各サンプルに対し，16 方向の

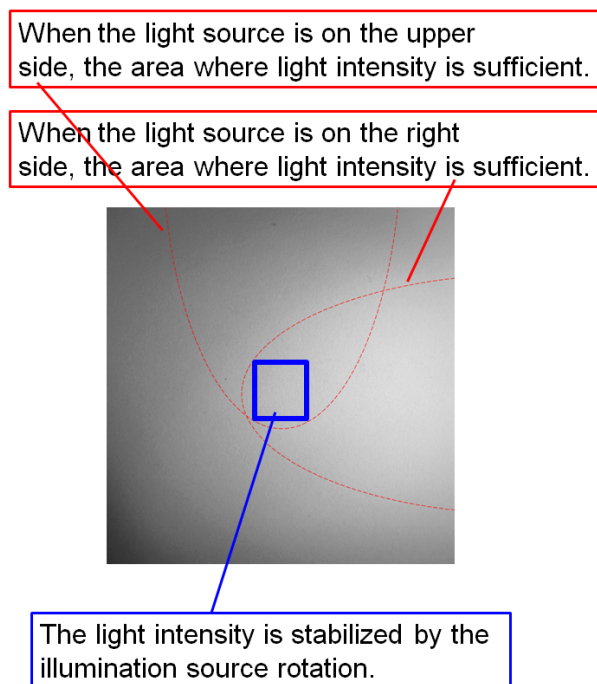


図 4.21 :光源を右に配置したときの明るさ分布

光源から撮像を行い画像取得し，16枚の画像において，検査処理1「検査エリア毎，正常／欠陥を判定」と，検査処理2「欠陥とみなされる箇所の特定」を行った．各光源方向から撮像したときの画像例を図4.22に示す．

#### 4.4.2 検査処理1「検査エリア毎，正常／欠陥を判定」の結果

##### 実験条件

今回用意した全105サンプルに対して，輝度のばらつきに基づく評価値を使用し，検査エリア毎の正常／欠陥の判定を行った．フィルタサイズについては実験により適切に発見した値  $s_l = 9, 17, 25, 33, 41, 49$  を用いた．実験では，各欠陥サンプルに対して  $\hat{V}_l$  値を算出し，正常／欠陥を判定する閾値を変化させ検証を行った．また今回のサンプルは，材料表面にヘアライン加工がされており，光源方向とヘアライン方向の関係により，図4.23のように各撮像画像で輝度差が生じるため，正常と欠陥を正しく分離できないことが事前実験でわかった．そのためヘアラインの影響が少ない，ヘアラインに対して平行に照射する光源方向(図4.22の光源方向1, 2, 8,

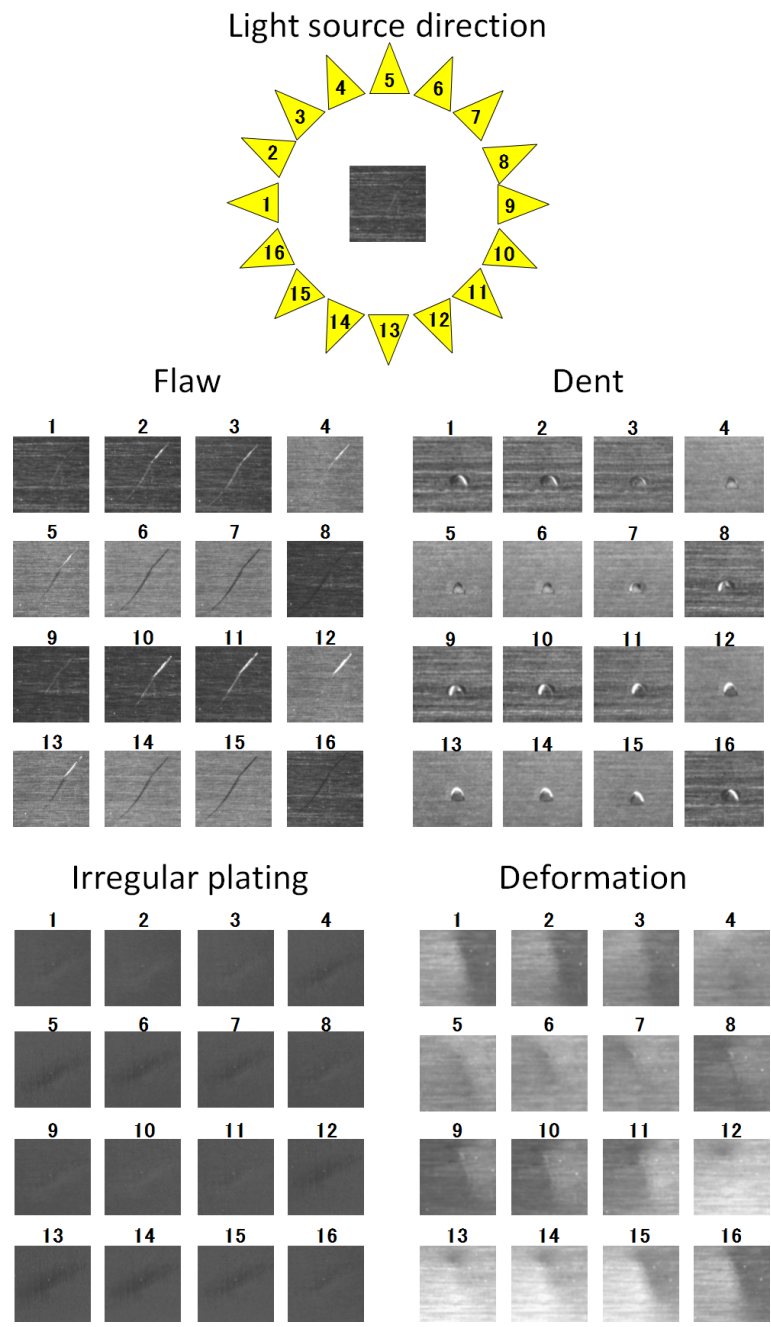


図 4.22 :光源方向と入力画像

9, 10, 16)のみを使用することとした。

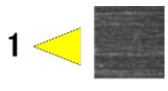
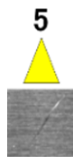
Light source direction is parallel to hairline.	Light source direction is perpendicular to hairline.
	
The whole area is dark	The whole area is bright to create reflections in a hairline

図 4.23 :ヘアラインと光源方向

## 結果と考察

欠陥検査実験において、閾値による検証を行った結果を図 4.24 に示す。まず式(4.21)にて中央値を用いることのメリットであるが、図 4.24 の平均値を用いた結果に比べ、良い検出精度を示している。これは良品にも存在する不規則なパターン（ヘアライン）に対し、中央値を用いることでロバストな判定ができたことを示している。各閾値の結果に対し、特徴的なものについて考察を行い、提案手法の特性を解析する。まずは、検証 1：欠陥の再現率が 100%で誤り受け入れが最小となるときの閾値の結果であるが、正常品 41 サンプル中、6 サンプルを欠陥として誤って受け入れた。誤り受け入れ(正常品)の例を図 4.25 に示す。これらを確認すると、画像中の一部に周囲と輝度差が生じている箇所が複数存在し、欠陥を敏感に受け入れる閾値設定のため過剰に反応したと言える。これらは、傷やムラといった欠陥と判別がつきにくく、見逃すリスクよりも欠陥として再検査を行った方が良いレベルであると考えられる。

次に検証 2：適合率 100%で検出漏れが最小となるときの閾値の結果であるが、検出漏れが欠陥サンプル 64 サンプル中、3 サンプルで発生した。検出漏れした欠陥サンプルを図 4.26 に示す。図 4.26 を確認すると、輝度差の小さい欠陥が検出漏れとなっており、これらを検出するためには検証 1 のときの閾値で誤検出した良品を受け入れなければならないことが確認された。この 1 段階目の処理では、ある程度誤りを受け入れてでも、検出漏れをなくす閾値を設定し不良流出防止を図る必要がある。実際の検査では過剰検出側の閾値を用いる必要がある。

検証1にて欠陥の再現率が100%のときの閾値で誤り受け入れした正常品が、再検査を行った方が良いレベルであったことから、実験で用いた種類もサイズも様々な欠陥に対して、提案手法は、正常／欠陥の判定に有効であることを確認した。また検査を実施する工程によっては、誤り受け入れ低減を行う必要も考えられるが、検出漏れのリスクを考慮しつつ閾値の調整により対応する必要がある。

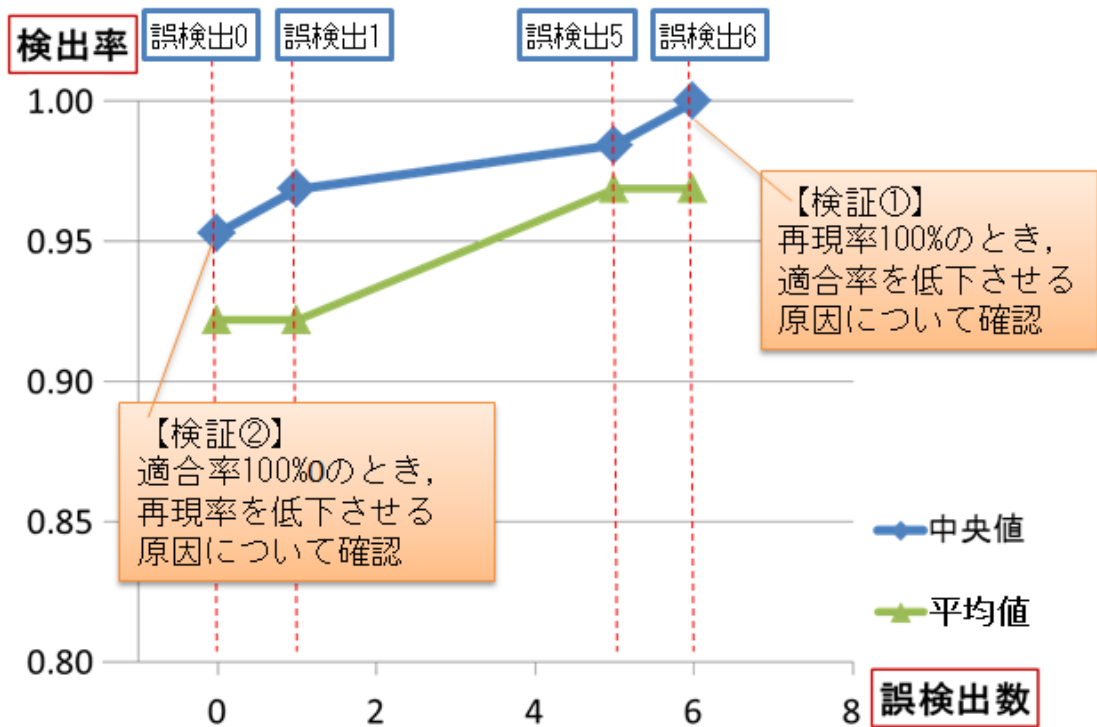


図 4.24 :閾値変動による検出率と誤検出数

#### 4.4.3 検査処理2「欠陥とみなされる箇所の特定」の結果

##### 実験条件

欠陥64サンプルに対して、欠陥とみなされる箇所の特定を行った。今回用意した64サンプルを16サンプルずつの4セットに分け、3セットをパラメータ自動決定に用い、残りの1セットで検出の評価を実施する（つまり検出の評価には、パラメータの自動決定に用いた欠陥サンプルは用いていない）。パラメータの自動決定と評価を行うデータセットを入れ替え、4回の評価を実施した。フィルタサイズセットは大



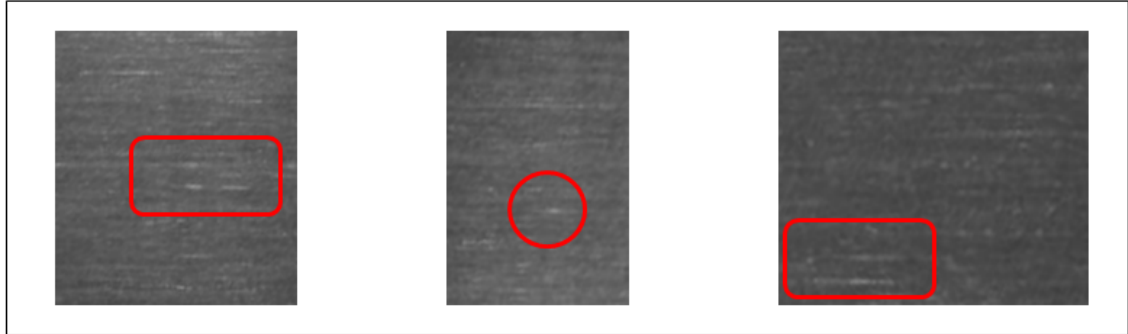


図 4.25 :誤り受け入れした正常品

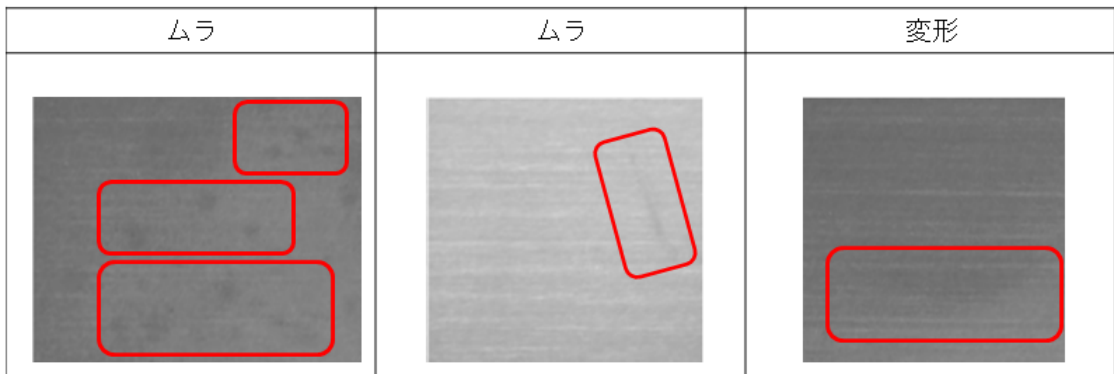


図 4.26 :検出漏れした欠陥

小2種の  $(s_h, s_l)=(3, 9)$  と、 $(s_h, s_l)=(5, 25)$  を用い、フィルタサイズが適切に決定できるか確認する。パラメータの自動決定では、近似関数にガウス関数を用い最小二乗法で近似計算を行った。ガウス関数を用いた理由として特徴量に対してフィルタサイズ毎、局所的に  $f$  値が高くなることを仮定した。またフィルタサイズを決定する閾値が収束するまで繰り返し推定を実施した。

#### パラメータの自動決定過程での確認

パラメータの自動決定過程での検出結果を図 4.27 に示す。図 4.27 のように、1 ループ目で決定したパラメータによる検出結果よりも、収束時に決定したパラメータによる検出結果の方が、欠陥箇所の特定が優れており、パラメータの推定過程で適切なパラメータへと変化したことを示しており、提案手法が有効に機能したことを確認できた。次に、自動決定した各パラメータを用い欠陥検出を行った結果を図 4.28 ~ 4.30 に示す。各図は上から、元画像 / Ground truth / (自動決定なしで) フィルタサイズセット“小”における  $f$  が最も高かったパラメータでの結果 / (自動決定なしで) フィルタサイズセット“大”における  $f$  値が最も高かったパラメータでの結果 / 提案手法にて自動決定されたパラメータでの結果を示している。図 4.28 は、提案手法によりフィルタサイズセット“小”に、図 4.29 はフィルタサイズセット“大”に自動決定された画像例であり、自動決定なしの各フィルタサイズセットの結果と提案手法の結果を比較すると、より欠陥箇所の特定が優れているフィルタサイズセットに自動決定されていることがわかる。また、図 4.28 でより顕著であるが、自動決定あり / なしの画像を比較すると、自動決定ありの方が欠陥箇所の特定がより正確になっている。これは、 $V_h$  値と  $V_l$  値の割合を決める係数  $\alpha$  と、検出レベルを決める  $T_{p2}$  も適正なものに変更されたことを示しており、提案手法の有効性を示した。しかし、フィルタサイズセットの決定に失敗した場合もあった。図 4.30 は、フィルタサイズセットの決定に失敗した例である。これらは提案手法により、フィルタサイズセット“大”に選択されているが、自動決定なしの画像をみるとフィルタサイズセット“小”の方が欠陥箇所の特定が正確である。この失敗の原因として、予め用意した欠陥サンプルに特化した自動決定がなされた可能性があり、今後欠陥サンプルに特化しない自動決定手法について検討を行う必要がある。

元画像		
Ground truth		
ループ1回目	 $(s_h, s_l) = (5, 25)$ $\alpha = 1.0 \quad T_{p2} = 0.6$	 $(s_h, s_l) = (5, 25)$ $\alpha = 0.8 \quad T_{p2} = 0.6$
収束時	 $(s_h, s_l) = (3, 9)$ $\alpha = 0.4 \quad T_{p2} = 0.6$	 $(s_h, s_l) = (3, 9)$ $\alpha = 0.4 \quad T_{p2} = 0.6$
元画像		
Ground truth		
ループ1回目	 $(s_h, s_l) = (5, 25)$ $\alpha = 0.8 \quad T_{p2} = 0.6$	 $(s_h, s_l) = (3, 9)$ $\alpha = 0.6 \quad T_{p2} = 0.6$
収束時	 $(s_h, s_l) = (3, 9)$ $\alpha = 0.4 \quad T_{p2} = 0.6$	 $(s_h, s_l) = (5, 25)$ $\alpha = 0.8, \quad T_{p2} = 0.6$

(背景黄は小さなフィルタサイズに決定,  
背景青は大きなフィルタサイズに決定)

図 4.27 :パラメータ自動決定過程での変化

元画像			
Ground truth			
自動決定なし			
サイズ セット 小			
サイズ セット 大			
提案手法により 自動決定			

元画像			
Ground truth			
自動決定なし			
サイズ セット 小			
サイズ セット 大			
提案手法により 自動決定			

図 4.28 :フィルタサイズセット“小”に決定した結果

元画像				
Ground truth				
自動決定なし				
サイズ セット 小				
サイズ セット 大				
提案手法により 自動決定				
元画像				
Ground truth				
自動決定なし				
サイズ セット 小				
サイズ セット 大				
提案手法により 自動決定				

図 4.29 :フィルタサイズセット“大”に決定した結果

元画像				
Ground truth				
自動決定なし				
サイズ セット 小				
サイズ セット 大				
提案手法により 自動決定				

図 4.30 :フィルタサイズセットの決定に失敗した例

### 検出結果と考察

データセットを入れ替え4回評価した結果、欠陥箇所の特정에成功した割合は84.4%であった。特정에成功した画像例を図4.31に示す。また正しく判定できなかった画像例を図4.32に示す。本実験において、欠陥箇所の特定期間を欠陥の種類毎で調査したところ、“変形”に関しては全てのサンプルについて正しく欠陥箇所が特定されたことを確認した。これは、法線が大きく変化している変形という欠陥に対し正しく機能したためと考えられ、本手法の有効性を確認することができた。その他の欠陥については、欠陥箇所の特定期間が正しく判定できなかったものが発生していた。“打痕”と“ムラ”は共通した欠陥箇所特定の失敗傾向がみられ、図4.32に示す通り、欠陥箇所以外に広く過剰に反応している。この原因として、打痕に関しては急な法線の変化が存在するものの欠陥として特定すべきエリアが小さいもの、ムラに関しては正常部と判別ができる程の反射光の強度変化が観測できなかったものが、ヘアラインの輝度変動との分離が難しく、これらの欠陥箇所を特定しようとする欠陥箇所以外にも過剰反応したと考えられる。さらに性能を向上させるためには、変形といった広い領域で法線の変化を持つ欠陥とはパラメータを別に設定する方法が考え

られ、今後確認を行う。“傷”については、図 4.32 のように欠陥箇所以外に過剰反応している箇所と、欠陥箇所の特定漏れが発生している箇所が存在した。傷のように線状に発生する欠陥は、材料表面のヘアライン加工と切り分けることが難しいことを示しており、本手法のみでは欠陥箇所の特定は不可能であると結論付ける。傷のような欠陥については、本手法のみではなく他の画像処理手法と組み合わせることで精度の向上を目指す必要がある。

#### 4.4.4 総合評価

検査処理 1 では、再現率が 100% のとき誤り受け入れした正常品が、傷やムラといった欠陥と判別がつきにくく、見逃すリスクよりも欠陥として再検査を行った方が良いレベルであったことから、実際に生産工程で利用が可能であると言える。検査処理 2 では、自動決定したパラメータを用いた検査において、従来手法では正確な検出が難しい欠陥に対して有効に機能することを確認した。しかし課題として、パラメータの自動決定が用意した欠陥サンプルに特化して行われてしまう問題への対応が挙げられる。また傷のように線状に発生する欠陥は、材料表面のヘアライン加工と切り分けることが難しく、他の画像処理手法の検討の必要がある。さらに今回の提案した検査システムでは、検査処理 2 の判定結果次第では良品と判定することで、誤検出削減を行うとしているが、現状では良品のみを分離する手法が見つかっておらず今後検討を行う必要がある。

本章では目視検査において、検査対象の物体に対して視線（もしくは光源の位置）を変更しながら表面の法線方向を確認し検査を行う点を画像処理で再現するため、様々な光源方向から撮像した画像を用いた検査手法を提案した。様々な光源方向から撮像した画像を用いて法線を推定する手法として照度差ステレオ法に注目し、事前実験として詳細な法線情報を取得し欠陥検出を行い、急峻な法線変化をもつ欠陥や大きな法線変化をもつ欠陥に対して有効であることを確認した。しかし詳細な法線情報を算出する照度差ステレオ法は計算コストが大きいので、詳細な法線情報を算出することなく法線のばらつきに起因した反射光強度の分散を算出する手法（法線のばらつきに基づく評価値）について提案を行った。また法線のばらつきに基づく評価値を用いた手法のみでは、微小な法線変化しかもたない欠陥については検出が難しいことが確認された。そこで、目視検査において視線を変えながら検査対象物体を確認するとき、最も欠陥が強調される方向で注意深く観察を行う点に注目し、


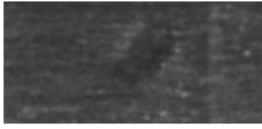
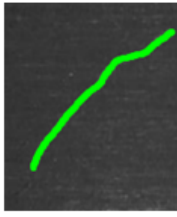
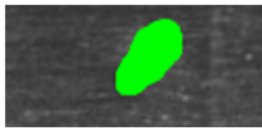
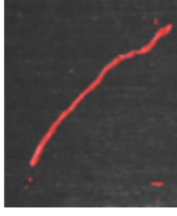

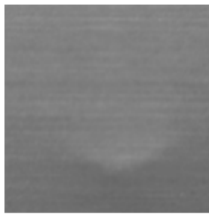

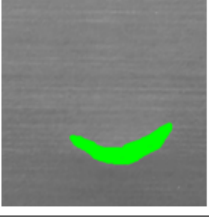
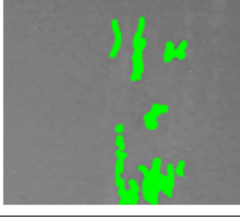


	傷	打痕
元画像		
Ground truth		
検出結果		
	変形	ムラ
元画像		
Ground truth		
検出結果		

図 4.31 :欠陥箇所の特定に成功した例





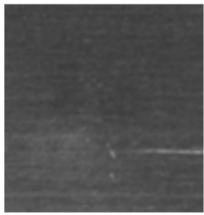
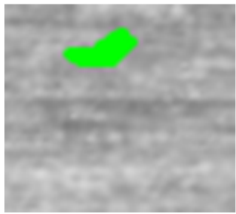
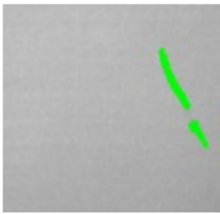
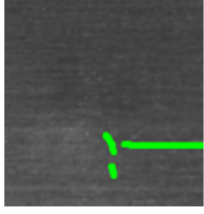


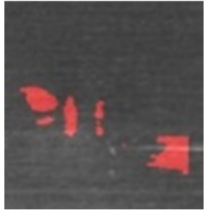
	打痕	ムラ	傷
元画像			
Ground truth			
検出結果			

図 4.32 :欠陥箇所の特定に失敗した例

様々な光源方向から得られた画像に対し、画像単体毎に輝度のばらつきに基づく評価値を算出し、法線のばらつきに基づく評価値と輝度のばらつきによる評価値を併用して用いる手法を提案し、検出力の向上を図った。このとき、検査対象エリア全てに法線のばらつきに基づく評価値と輝度のばらつきに基づく評価値を併用した検出を適用すると計算コストが大きくなるため、検査処理を2段階で行う検査システムを提案し、まず計算コストの小さい処理で明らかな良品エリアと欠陥エリアを分け、欠陥を含むとされたエリアに対し、詳細な処理を行うこととした。また画像処理で検査を行うとき、用いるパラメータの決定が重要になるが、予め用意した欠陥サンプルを用いた繰り返し推定による自動決定手法について提案した。この手法では、実際に生産工程で大量のサンプルを用意するのは難しいため、少ないサンプルから適切なパラメータを決定可能である。以上の手法を実験にて性能を確認し、既存の画像処理による手法では検出が困難な欠陥に対し有効性を確認した。

## 第5章 結言

本論文では工業部品に発生する多様な欠陥に対し画像処理による自動検出を実現するため、人が行う目視検査をモデルとした欠陥検出手法を提案した。まず第一に目視検査において、“検査領域を注視し欠陥を探す”点に着目し画像処理による再現を図った。このような検査では、人はある箇所を注視しているつもりでも視覚生理機構である固視微動（常に起こっている細かな目の揺れ）により、観測点と周囲とを比較し違和感を感じる箇所を欠陥として検出していると仮定し、この固視微動を画像処理で再現するため注目領域と近傍の複数画像から算出される主曲率に注目した。主曲率を算出することで人の目が欠陥として反応しやすい箇所を特定可能であるが、この主曲率の直接的な算出は計算コストが大きいので、主曲率と同等の計算が高速に可能な Harris corner detector を用い、得られたコーナー特徴量の大小により、工業部品のエッジ領域に発生する微小欠陥（良品の規格内のばらつきより小さい欠陥）に対して検出を行う手法を提案した。この際、工業部品にはデザイン上のコーナーも存在するが、コーナー特徴量を算出する際の領域サイズを複数用意し、それぞれにコーナー特徴量を計算し注目領域サイズ間にて分散を計測することで、デザイン上のコーナーと欠陥箇所を分離可能であることを確認した。実験では、検査対象の工業部品として IC リードフレームを用い、部品のエッジ領域に対し従来手法であるマスター画像とのマッチングに基づく手法では検出が難しい、良品の規格内のばらつき（ $30\mu\text{m}$ ）以下の欠陥検出に有効性を確認した。

第二に目視検査において、“視線や光源の位置を変え多方向から観察を行う”点に着目し画像処理による再現を図った。このような検査では、物体に対する光源方向を変化させることで、注目領域内での表面の法線方向を推定し、周囲とは異なる法線方向をもつ箇所を欠陥として特定していると仮定し、様々な光源方向から撮像される複数画像に対して法線情報を推定する照度差ステレオ法に注目した。事前実験として、照度差ステレオ法により法線を推定し、モデルとした法線との比較による欠陥検出を試みたところ、急峻な法線の変化や大きな法線の変化をもつ欠陥に対して

有効であることを確認したが、詳細な法線方向を算出する照度差ステレオ法は計算コストが大きい。そのため詳細な法線方向を算出することなく法線のぼらつきに起因した反射光強度の分散を算出する手法（法線のぼらつきに基づく評価値）について提案を行った。しかし法線のぼらつきに基づく評価値を用いた手法のみでは、微小な法線変化しかもたない欠陥については検出が難しいことが確認された。そこで、目視検査において視線を変えながら検査対象物体を確認するとき、最も欠陥が強調される方向で注意深く観察を行う点に注目し、様々な光源方向から得られた画像に対し、単体毎に輝度のぼらつきによる評価値を算出し、法線のぼらつきに基づく評価値と輝度のぼらつきによる評価値を併用して用いる手法を提案し、検出力の向上を図った。法線のぼらつきに基づく評価値と輝度のぼらつきに基づく評価値を併用するにあたり、併用した場合計算コストが大きくなるという課題と、併用に伴い検査に用いるパラメータが様々存在し決定が困難という課題が考えられた。そこで計算コストに関しては、計算コストを少なくするための検査システムの提案を行った。検査コスト低減のため検査処理を2段階で行い、検査処理1では計算コストの小さい処理で明らかな正常領域と欠陥領域を分け、検査処理1にて欠陥を含むとされた領域に対し、検査処理2として詳細な（計算コストの高い）検査を行うこととした。次に検査に用いるパラメータの決定であるが、予め用意した欠陥サンプルを用いた繰り返し推定により自動決定する手法の提案を行った。この際、検査パラメータの自動決定には、大量のサンプルを用いた機械学習による手法も考えられるが、運用上、各生産工程で大量のサンプルを用意することはコストが高く、生産される工業部品の入れ替えが頻繁に起こる生産工程では導入が困難となる。そこで本研究では、少ないサンプルからパラメータを自動決定する手法を提案し、有効なパラメータが決定可能であることを確認した。実験では、ICリードフレームの表面上に発生する様々な欠陥事例を収集し、欠陥箇所の自動検出実験を実施した。その結果、欠陥の見落としがゼロとなるように運用した場合でも誤り受け入れ数は十分に抑えられていることが確認できた。

以上の結果より、工業部品に対し、既存の画像処理を用いた検査手法では検出が困難な欠陥について検出力の高い手法を提案したと言える。また画像処理を用いた検査においては、既存手法においても用いる検査パラメータにより検出力が左右されるため、少数サンプルによる検査パラメータ自動決定手法は、広く利用可能な手法と提案したと言える。

今後の課題として、実際の生産工程で本手法を適用し検出能力を確認することが

挙げられる。また今回実験に用いた IC リードフレーム以外の様々な工業部品の検査についても本論文で提案した手法をもとに応用，改善することで，広く実用されることを目指したい。

# 謝辞

本論文をまとめるにあたり、日々懇切丁寧に御指導、御鞭撻を賜りました九州工業大学情報工学府 准教授 榎田修一先生には、心より感謝致します。榎田先生には、入学以前から画像処理技術に関して御指導頂き、博士後期課程への入学を希望した私を、多大な御支援を頂き導いて頂きました。また社会人として入学し、十分な研究時間が取れない私に対し時間を都合頂き、大変御苦勞をお掛け致しました。榎田先生との出会いがなければこの成果は達成できませんでした。本当に有難うございました。

学位論文審査において、懇切なる御教示を賜りました、九州工業大学情報工学府 教授 竹内章先生、同 教授 瀬部昇先生、同 教授 林英治先生に深く感謝の意を表します。

博士後期課程入学以前から御指導、御支援賜りました、九州工業大学情報工学府 教授 江島俊朗先生に深く感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり基礎実験に御協力を賜りました、九州工業大学情報工学府榎田研究室 田中貴士氏に深く感謝致します。

九州工業大学情報工学府榎田研究室の皆様には、終始暖かく接して頂いたことに深く感謝致します。

博士学位取得の機会を与えて頂きました株式会社三井ハイテック代表取締役社長 三井康誠氏、専務取締役 丸岡好雄氏、常務取締役 栗山正則氏、常務取締役 石松憲治氏、取締役 辻本圭一氏、取締役 白川裕之氏、取締役 草野敏昭氏、取締役 坂上隆紀氏に深く感謝致します。

社会人として博士学位取得するにあたり、多大な御助力賜りましたリードフレーム事業本部技術統轄部 統轄部長 岩淵洋司氏に深く感謝致します。博士学位取得に推薦して頂き、また博士学位取得までの間、多大な御配慮を賜りました同 第二生産技術部 部長 上田和敏氏に深く感謝致します。学位取得と業務を両立するにあたり、多大な御支援、御配慮を賜りました同 第二生産技術部 第三生技グループ

ループ長 松田光晴氏に深く感謝致します。基礎知識，基礎実験について御指導，御鞭撻を賜りました 同 第二生産技術部 第三生技グループ 榎添政博氏に深く感謝致します。

博士学位取得にあたり御理解御協力を賜りました，株式会社三井ハイテックの皆様

## 参考文献

- [1] 谷口慶治・編：画像処理工学 ー応用編- (4章 部品・製品の自動検査), 共立出版, 1999.
- [2] 長嶋千恵, 塚田敏彦：金属平板傷検査のための落射照明光学系の開発, ビジョン技術の実利用ワークショップ 2012, OS4-H7, 2012.
- [3] 長嶋千恵, 青木公也, 塚田敏彦, 三和田靖彦：内視鏡型センシングと気付きアルゴリズムによる自動車部品検査方式, ビジョン技術の実利用ワークショップ 2014, OS1-O1, 2014.
- [4] 長嶋千恵, 青木公也, 塚田敏彦, 三和田靖彦, 輿水大和：内視鏡型センシングと気付きアルゴリズムによる自動車部品検査方式, 精密工学会誌 / Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.81, No.12, pp.1180-1184, 2015.
- [5] 長嶋千恵, 青木公也, 塚田敏彦, 三和田靖彦, 輿水大和：自動車用円筒形状部品の高精度・高速内面検査, DIA2015 動的画像処理実利用化ワークショップ, OS1-3, 2015.
- [6] 長嶋千恵, 塚田敏彦, 宮地修平, 鯛直樹, 猪原友樹, 宮崎秀和：ブレーキホースメス口金部品の外観検査 (1) 構造を利用したシート面撮像方法, ViEW2015 ビジョン技術の実利用ワークショップ, OS1-02, 2015.
- [7] 宮地修平, 長嶋千恵, 塚田敏彦, 鯛直樹, 猪原友樹, 宮崎秀和：ブレーキホースメス口金部品の外観検査 (2) 検査アルゴリズムとその性能評価, ViEW2015 ビジョン技術の実利用ワークショップ, OS1-H1, 2015.
- [8] 岡田三郎, 今出政明, 宮内秀和, 住本哲宏, 山本秀樹：傷種識別機能を有する複合型傷検査システム, The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. C 115(3), pp.452-458, 1995.



- [9] 江崎泰史：半導体レーザを使用したキズ検査装置のインライン活用，検査技術，Vol.16，No.12，pp.64-67，2011.
- [10] 包躍，小屋裕太郎：ブロック分割による輝度情報を用いた金属部品表面のキズ検出，計測自動制御学会産業論文集，Vol. 9，No.15，pp.108-114，2010.
- [11] 野坂健一郎，荒木秀和，中原智治：位相シフト法インライン3次元外観検査システム，パナソニック電気技報 特集「生産技術」，Vol. 57，No. 3，pp.29-34，2009.
- [12] 谷口慶治，長谷博行・編，画像処理工学 ー応用事例編ー (6.1 部品の検査方式)，共立出版，2005.
- [13] 例えば：川嶋 聡：学習画像との比較検査による画像検査技術，アズビル株式会社技術報告書，Vol. 22，2004-02，pp.2-9，2004.
- [14] 劉偉，北英樹，岩澤剣，三谷洋之：FPD 点灯検査用画像処理システムの開発，動的画像処理実利用化ワークショップ2005，pp.33-38，2005.
- [15] 青木公也，舟橋琢磨，輿水大和，三和田靖彦：周辺視と固視微動に学ぶ「傷の気付き」アルゴリズム，ビジョン技術の実利用ワークショップ2012，OS4-H3，2012.
- [16] 青木公也，平井大喜，吉村祐一郎，舟橋琢磨，輿水大和，三和田靖彦：実部品による【傷の気付き】処理の性能検証，ビジョン技術の実利用ワークショップ2013，OS4-H4，2013.
- [17] 青木公也，吉村祐一郎，平井大喜，根来秀多，舟橋琢磨，輿水大和，三和田靖彦：傷【のみ】に気付く，時空的【傷の気付き】処理の検討，第20回画像センシングシンポジウム，IS1-34，2014.
- [18] 青木公也，吉村祐一郎，平井大喜，舟橋琢磨，輿水大和，三和田靖彦：【傷の気付き】処理における傷【のみ】の気付きの検討，動的画像処理実利用化ワークショップDIA2014，IS1-5，2014.
- [19] 根来秀多，吉村祐一郎，青木公也，舟橋琢磨，輿水大和，三和田靖彦：時空間傷の気付きアルゴリズムの提案，DIA2015 動的画像処理実利用化ワークショップ，IS1-A6，2015.

- [20] 横山良雄, 川村成, 南貴雄, 加藤敏夫:規則性評価による欠陥候補検出技術を用いた外観検査自動化, デンソーテクニカルレビュー, Vol.8, No.2, pp.105-110, 2003.
- [21] 広瀬修, 石井明, 秦清治, 鷺崎一郎:パターン照明を用いたフィルム表面凹凸欠陥の検出, 精密工学会誌, Vol. 66, No. 7, pp.1098-1102, 2000.
- [22] 広瀬修, 石井明, 秦清治, 鷺崎一郎:パターン照明を用いたフィルム表面凹凸欠陥の検出(第2報), 精密工学会誌, Vol.67, No.7, pp.1135-1139, 2001.
- [23] 森本吉春, 藤垣元治, 梶谷明大:サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測, Journal of the Vacuum Society of Japan, Vol. 54, No. 1, pp.32-38, 2011.
- [24] 杉野直規, 森川香織, 山根八洲男:面型パターン照明を用いた凹凸判定機能付き欠陥検査法の開発, 2005年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, pp.423-424, 2005.
- [25] 杉野直規, 藤山宗之, 山根八洲男:面型パターン照明による欠陥検査法の開発-欠陥の形状推定-, The bulletin of Institute of National Colleges of Technology, Japan, Oshima College of Maritime Technology 41, pp.87-92, 2008.
- [26] 松田守弘:自動車の塗装外観計測, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vo 1 .29 No.2, pp.1-10, 1994.
- [27] 田中一基, 新原良美, 池田浩志, 山田直樹, 木葉博, 笹西和人:塗装表面検査の自動化技術, 日本機械学会論文集(C編)60巻, 577号, pp.309-316, 1994.
- [28] 例えば, 野村誠, 山本和彦, 大田紘高, 加藤邦人:低解像度文字認識における特徴積分法の提案と検証, 信学技報, PRMU, 105(615), pp.55-60, 2006.
- [29] E. H. Adelson, C. H. Anderson, J. R. Bergen, P. J. Burt and J. M. Ogden : Pyramid Method in Image Processing, RCA Engineer, Vol.29(6), pp.33-41, 1984.
- [30] P. Viola and M. Jones : Robust Real-time Object Detection, Proceedings of Second International Workshop on Statistical and Computational Theories of VisionModeling, Learning, Computing, and Sampling, pp.1-24, 2001.

- [31] 固視微動とはなんですか?, NTT 技術ジャーナル, pp.60-61, 2004.
- [32] 金子寛彦: 知っておきたいキーワード固視微動, 映像情報メディア学会誌, Vol. 63, No. 11, pp.1538-1539, 2009.
- [33] C. Harris and M. Stephens: A combined corner and edge detector. Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference, pp.147-151, 1988.
- [34] R. Woodham: Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images, Optical Engineering, Vol.19, No.1, pp.139-144, 1980.
- [35] Peter N. Belhumeur, David J. Kriegman, and Alan L. Yuille: The bas-relief ambiguity, Int.Journal of Computer Vision, Vol.35, pp.33-45, 1999.
- [36] L. Wu, A. Ganesh, B. Shi, Y. Matsushita, Y. Wang, and Y. Ma: Robust photometric stereo via low-rank matrix completion and recovery, Proceedings of ACCV, pp.703-717, 2010.
- [37] D. Goldman, B. Curless, A. Hertzmann, and S. Seitz: Shape and spatially-varying brdfs from photometric stereo, Proceedings of ICCV, pp.341-348, 2005.
- [38] M. Chandraker and R. Ramamoorthi: What an image reveals about material reflectance, Proceedings of ICCV, pp.1076-1083, 2011.
- [39] T. Higo, Y. Matsushita, and K. Ikeuchi: Consensus photometric stereo, Proceedings of CVPR, pp.1157-1164, 2010.
- [40] Satoshi Ikehata, Kiyoharu Aizawa: Photometric Stereo using Constrained Bivariate Regression for General Isotropic Surface, Proceedings of CVPR, pp.2187 - 2194, 2014.
- [41] G. G. Lorentz: Bernstein Polynomials, Chelsea Publishing Company, New York, 1986.
- [42] 岡部孝弘: 形状復元の基礎, コンピュータビジョン特論 ii, 第 9 回, pp.31-35, 2014.

- [43] A. Agrawal, R. Raskar, and R. Chellappa : What is the range of surface reconstructions from a gradient field ?, Proceedings of ECCV, pp.578-591, 2006.
- [44] Guido Gerig : Photometric Stereo, Shape from Shading SfS, Chapter 2 new F&P, 2013.
- [45] Chaman Singh Verma and Mon-Ju Wu : Photometric Stereo, [http://pages.cs.wisc.edu/~csverma/CS766\\_09/Stereo/stereo.html](http://pages.cs.wisc.edu/~csverma/CS766_09/Stereo/stereo.html)(2015/01/27アクセス).
- [46] 向川康博ほか : パターン認識とビジョン, 電子情報通信学会「知識ベース」, 5章照明・反射解析, pp.1-20, 2013.
- [47] Satoshi Ikehata, Kiyoharu Aizawa : Supplementary Material for 'Photometric Stereo using Constrained Bivariate Regression for General Isotropic Surface', Proceedings of CVPR, pp.2187 - 2194, 2014.
- [48] 向川康博 : 反射・散乱の計測とモデル化, 情報処理学会報告書, Vol.2010-CVIM-172, No.34, pp.1-11, 2010.
- [49] B. T. Phong : Illumination for computer generated pictures, Proceedings of SIGGRAPH '75, pp.311-317, 1975.
- [50] 田中貴士 : 多項式近似を用いた照度差ステレオ法による工業部品の欠陥検出に関する研究, 九州工業大学卒業論文, 2014.

## 発表論文（査読付き）

- [1] Yoshiharu Nakamura, Shuichi Enokida : Development of Defect Verification System of IC Lead Frame Surface using a Ring-lighting, In Proceedings of the 11th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2016) - Volume 4: VISAPP, pp.117-125, 2016.
- [2] 中村良治, 榎田修一 : リング状光源を用いた IC リードフレーム表面の欠陥検査システムの開発, 精密工学会誌 / Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.81, No.12, pp.1198-1205, 2015.
- [3] Yoshiharu Nakamura, Shuichi Enokida : Defect Detection Based on the Variance of the Surface Normal Direction Using a Ring-Lighting System, Proceedings of the World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS 2015), pp.336.1-336.9, 2015.

## 学会発表（査読なし）

- [1] 中村良治, 榎田修一: IC リードフレームの欠陥検査における特徴抽出フィルタサイズの自動決定, ViEW2015 ビジョン技術の実利用ワークショップ, IS1-6, 2015.
- [2] 中村良治, 榎田修一: リング状光源を用いた法線方向の分散に基づく欠陥検査, ViEW2014 ビジョン技術の実利用ワークショップ, OS1-H4(IS1-3), 2014.
- [3] 中村良治, 榎添政博, 榎田修一: コーナーエッジ検出を用いた欠陥検査とマスキング処理に関する研究, 第19回画像センシングシンポジウム, IS3-15, 2013.
- [4] 中村良治, 榎添政博, 榎田修一: コーナーエッジ検出を用いたマスターレス欠陥検査に関する研究, 画像電子学会研究会第264回研究会, pp.1-6, 2013.