

博士論文

画像計測技術を用いた中古自動車車体部品
の自動検査に関する研究

福岡工業大学大学院工学研究科
知能情報システム工学専攻

辻野 和広

2014 年 3 月

目 次

第 1 章	総論	1
1.1	自動車車体部品のリユース	2
1.2	リユース部品の品質保証と画像計測	2
1.3	形状変化の検出のための三次元画像計測の一般方法	7
1.4	色特徴変化の検出のための画像処理の一般方法	14
1.5	本研究の目的と本論文の構成	17
第 2 章	間接パターン光投影および間接照明による画像撮影	18
2.1	自動車部品の画像計測の困難さ	19
2.1.1	ハイライトの影響	19
2.1.2	映り込みと外乱の影響	20
2.1.3	今までのアプローチ	21
2.2	間接パターン光投影及び間接照明技術	22
第 3 章	多重位相差画像解析に基づく凹み検出	27
3.1	位相シフト法による形状計測	28
3.2	多重位相差画像を用いた凹み検出	34
3.3	凹み検出実験結果と考察	40
第 4 章	修正バンドパスフィルタに基づくキズ検出	52
4.1	画像処理に基づくキズ検出の一般方法と問題点	53
4.2	修正バンドパスフィルタによるキズ検出処理	60
4.3	キズ検出実験結果と考察	66
第 5 章	実用システムの開発	72
5.1	計測システムの構成	73
5.2	計測の流れ	76
5.3	システム評価	81
第 6 章	結論	83
	主要記号リスト	86
	参考文献	87
	謝 辞	92

図表目次

図 1-1	中古自動車部品再利用のイメージ図.....	3
図 1-2	リサイクルやリユースされる部品の例.....	3
図 1-3	本研究の対象とする各種自動車車体部品の写真.....	4
図 1-4	自動車車体部品の凹みの例.....	6
図 1-5	自動車車体部品のキズの例.....	6
図 1-6	レンズ焦点法のイメージ図.....	9
図 1-7	両眼視によるステレオ視計測システムの構成イメージ.....	10
図 1-8	両眼視によるステレオ視計測システムの幾何関係図.....	10
図 1-9	両眼視によるステレオ視計測システムの幾何関係図(X-Z 平面).....	11
図 1-10	光レーダ法のイメージ図.....	12
図 1-11	スリット光投影法のイメージ図.....	13
図 1-12	照度差ステレオ法のイメージ図.....	14
図 2-1	鏡面反射物体へのパターン光投影計測の映り込みの問題.....	19
図 2-2	直接パターン光投影を用いた撮影画像.....	20
図 2-3	鏡面反射による映り込みの問題.....	21
図 2-4	室内環境で撮影した自動車車体部品の画像.....	21
図 2-5	間接パターン光投影計測手法のイメージ.....	23
図 2-6	直接パターン光投影および間接パターン光投影による撮影画像.....	24
図 2-7	LED を用いて構成したパターン光投影システムのイメージ図.....	25
図 2-8	提案システムの構成配置図.....	26
図 3-1	LED による位相シフトパターン投影技術.....	29
図 3-2	投影パターンと計測システムの座標関係.....	30
図 3-3	赤色ドアの間接パターン光投影計測手法による計測結果.....	32
図 3-4	投影パターンの位相分布と位相接続語の位相分布.....	33
図 3-5	多重位相画像の生成原理図.....	34
図 3-6	位相差画像と多重位相差画像.....	35
図 3-7	多重位相差画像の強度と法線方向の関係.....	37
図 3-8	多重位相差画像に基づく凹みの検出とサイズ推定.....	39
図 3-9	実験に用いた中古自動車車体部品.....	40
図 3-10	凹み検出実験結果(赤色ドア).....	45
図 3-11	凹み検出実験結果(白色フェンダー).....	46
図 3-12	凹み検出実験結果(緑色ボンネット).....	47
図 3-13	凹み検出実験結果(銀色フェンダー).....	48
図 3-14	凹み検出実験結果(黒色フェンダー).....	49
図 4-1	赤色ドアの全照明画像.....	54
図 4-2	十字フィルタの形状とその適用方法.....	56
図 4-3	HPF の透過率.....	58
図 4-4	赤色ドアのフーリエ解析の結果例.....	59
図 4-5	キズ検出結果の一部拡大画像.....	60
図 4-6	キズ検出処理の流れ.....	61

図 4-7	撮影画像の前処理.....	62
図 4-8	CBPF の透過率.....	63
図 4-9	微小キズの検出結果(赤色ドア).....	65
図 4-10	白色フェンダーのキズ検出実験結果.....	67
図 4-11	緑色ボンネットのキズ検出実験結果.....	68
図 4-12	未検出キズの拡大写真.....	70
図 5-1	計測システムの写真.....	75
図 5-2	アプリケーションのメイン画面.....	75
図 5-3	計測の流れ.....	76
図 5-4	カメラコントロールウィンドウ.....	77
図 5-5	計測ウィンドウ.....	78
図 5-6	領域除外オプション.....	79
図 5-7	検出結果のスクリーンショット.....	80
図 5-8	検出結果の表示オプション.....	81
図 5-9	検出結果の画像出力とテキスト出力.....	81
表 1-1	三次元計測の計測手法による分類.....	7
表 1-2	代表的な三次元画像計測手法.....	8
表 3-1	検証実験対象物体の大きさの特徴.....	41
表 3-2	凹み検出実験結果のまとめ.....	50
表 4-1	キズ検出結果のまとめ(0.5mm 以上).....	69
表 4-2	キズ検出結果のまとめ(0.5mm 未満).....	69
表 4-3	キズ検出の所要時間(単位：秒).....	70
表 5-1	システムの評価結果.....	82

第 1 章 総論

経済産業省及び環境省の統計データにより日本では毎年 400 万台の車が廃車となっており，これらがそのまま廃棄物となった場合，年間 400 万トンもの廃棄量となる．これは日本の毎年の全廃棄物量の 6%を占めており，大きな社会問題となっている¹⁾．この膨大な廃車の再利用が様々な形で行われており，近年では，省エネルギー化が可能である自動車車体部品のリサイクルやリユースが注目されている．特に自動車車体部品のリユースは廃車などによって破棄される自動車から使用可能な部品を取り出し，美化や検査，修理等を行って再使用を行うもので，リサイクルのように素材に変換して製造する手間がないため，省エネルギーの効果が高い特徴がある．

リユース車体部品は新品に比べて凹みやキズが存在している可能性が高いため，リユースする前に部品の検査が必要となる²⁾．現状，凹みやキズの検査は技術者の目視により行われているが，凹みやキズの明確な基準がなく，技術者の違いによって起こる未検出や過検出，検査時間がかかる等の問題がある．画像計測技術が考えられるが，自動車車体部品は鏡面反射が強いため，計測が困難である．そこで，本研究では鏡面反射の問題を解決し自動検査装置を開発することで，凹みやキズ検出の自動化と基準の統一化及び検査時間の短縮を目指す．

本章では，まずリユースの背景と基本的な方法，特に品質保証の方法について述べる．その後凹みの検出に有効と考えられる三次元画像計測について述べ，キズの検出に有効と考えられる画像処理方法について述べる．また本研究の目的と本論文の構成について述べる．

1.1 自動車車体部品のリユース

自動車車体部品のリユースは、生産コストが低く環境への影響が小さいため需要が高まっている。日本においては年間 400 万台の車が廃車となっており、この影響による環境問題を解消するために、2000 年に循環型社会形成推進基本法が制定され、3R(Reduce, Reuse, Recycle)が重要視されてきた³⁾。また、関連法である使用済自動車の再資源化等に関する法律（自動車リサイクル法）の制定により、リサイクル事業やリユース事業が活性化している。

自動車リユース部品の使用は次のような多くのメリットがある。まずリユース部品は「使用済み自動車」から取り出される部品であり、新たな資源の投入を最小限に抑えた部品であるため、新品部品と比べて、平均 48kg の大幅な CO₂ 削減効果となっている。次に新品部品は修理対象車輦と同じ製造ラインで造られるものではなく、リユース部品は同じ製造ラインを通して作られた部品であるため、部品のミスマッチが起こりにくい。またリユース部品の市場価格は新品部品と比べて一般的に 50%程度の価格となっている。最後にリユース部品には個別の部品だけでなく「ASSY 単位：Assembly 単位」の部品があり、組み上げ時間の短縮等によって工期を短縮することができる。一方で新品部品は塗装や付属品がついておらず、リユース部品は塗装や付属品がついている⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

図 1-1 は中古自動車部品再利用のイメージである。上部にある破線に囲まれた部分はリサイクルとリユースの対象部分である。この部分は自動車総重量の 80%を占める。図 1-2 にはリサイクルやリユース率の高い自動車の部品を示し、破線に囲まれる部分は本研究対象とする車体部品である。本研究では、主にドア、フェンダー、ボンネット等パネル類の車体部品のリユースの際の凹みやキズの検査について研究を行う⁸⁾。

1.2 リユース部品の品質保証と画像計測

リユース車体部品を市場に流通するために、凹みやキズなどの有無をチェックし、必要に応じて修理をかけてからユーザに届く品質管理が必要である。従来のリユース部品の品質保証は、リユース部品の供給団体が独自の基準と保証でユーザに提供していた。リユース部品の検査基準は供給団体それぞれで独自の基準がある。またユーザへの保証として、主に初期不良による返品保証を平均 1 週間以内の期間で設定している。しかしこのような方法は、ユーザが求める品質と供給団体が提示する品質にミスマッチが生じるだけでなく、ユーザは十分な品質を提供できる供給団体の選択が難しい問題がある。そのため、各団体の統一基準と保証を「最低基準」で統一化し、ユーザにわかりやすくすることで、リユース部品に対する認知度と信用を高めていくことが必要である。また、統一基準に加えて各

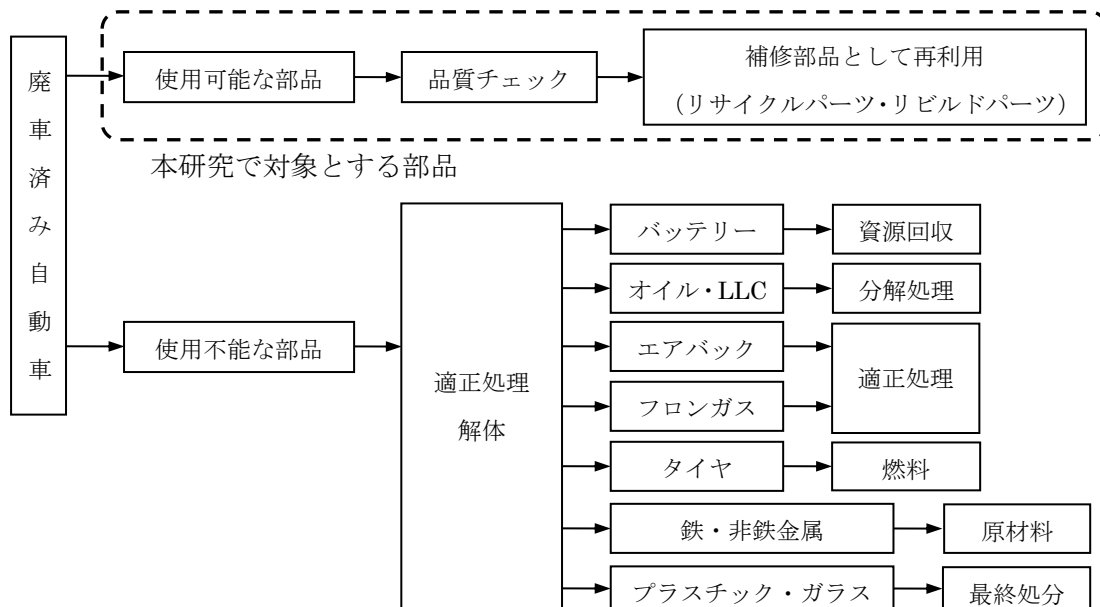


図 1-1 中古自動車部品再利用のイメージ図

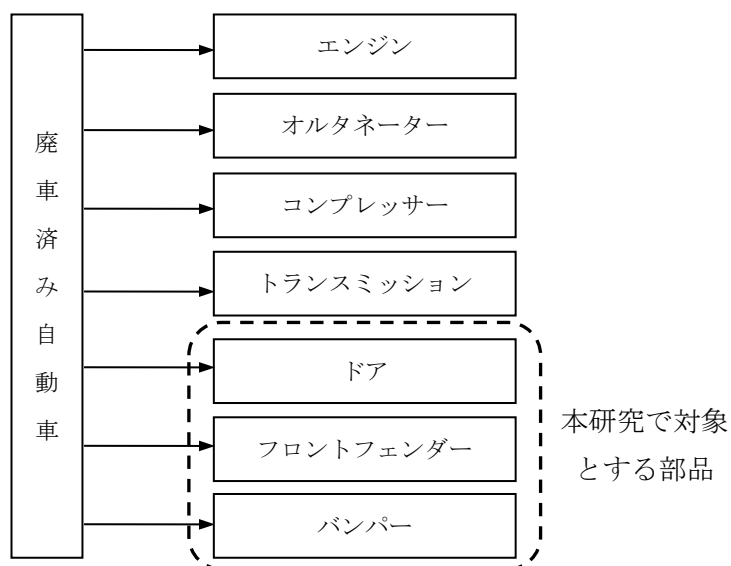


図 1-2 リサイクルやリユースされる部品の例

グループ独自の付加基準を追加できるようにする。しかし自動車車体部品は部品の大きさに対する凹みやキズの大きさが小さいため、検査に時間がかかったり、微小な凹みやキズを見逃したりする要因になる。サイズの大きな物体の情報を短時間で取得する場合には画像計測が有効である。画像計測はカメラを用いて画像を撮影し、撮影された画像を処理することで計測を行う手法である⁹⁾。

本研究で対象とする自動車車体部品の種類，凹みとキズの種類，自動検査の問題点を簡単に紹介する．まず自動車車体部品には，その場所と役割に応じてボンネット・フェンダー・ドアなど様々な種類がある．図 1-3 は本研究の対象とする各種自動車車体部品の例の写真である．本研究では異なる色，サイズ，形状及び表面反射特性を持つ自動車車体部品について研究を行う．



図 1-3 本研究の対象とする各種自動車車体部品の写真

自動車車体部品の検査では，このような部品上にある凹みやキズを探し，その場所に凹みやキズの大きさと特徴を記録して消費者に提示され，要望により修理等を行っている．その際に凹みやキズの未検出や誤検出，検出した凹みやキズのサイズと実際のサイズとの誤差が大きい場合，販売者と消費者でミスマッチが起こる等の問題がある．

次に，自動車車体部品の凹みの特徴について述べる．図 1-4 は車体部品の凹みの撮影画像である．なお，自動車車体部品は鏡面反射が強いため，凹みを強調するために蛍光灯を映り込ませた状態で撮影した．凹みは緩やかな形状変化に伴うので，形状変化を検出できる三次元画像計測技術の適用が考えられる．

またリユース業界の共同研究先が本研究へ要求した凹みの検出基準は直径 2mm 以上かつ深さ 2mm 以上の凹みである．本研究ではより高い凹みの検出基準として，一般車用に直径 2mm 以上かつ深さ 0.15mm 以上，高級車用に直径 2mm 以上かつ深さ 0.08mm 以上の検出基準を目標とする．

次に、自動車車体部品のキズの特徴について述べる。図 1-5 は車体部品のキズの撮影画像である。なお、自動車車体部品は鏡面反射が強いため、キズを強調するために映り込みを抑えた状態で撮影した。写真から分かるように、キズのほとんどは色変化に伴うので、画像から特徴変化を検出できる各種カラー画像処理方法の適用が考えられる。

キズの種類は塗装面の状態もしくはその要因によって分けられる。またリユース業界の共同研究先が本研究へ要求したキズの検出基準は直径 2mm 以上のキズである。本研究ではより高いキズの検出基準として、直径 0.5mm 以上の点状キズと幅 0.5mm 以上の線状キズを目標とする。

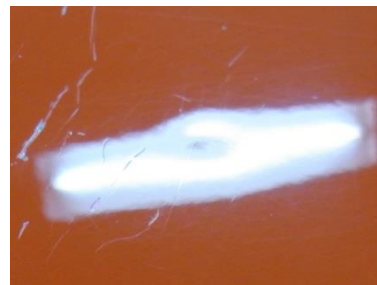
上記の分析から分かるように、自動車車体部品の凹みとキズを検出するために、画像計測技術の使用が考えられる。しかし、車体部品は表面反射が強く、ハイライトや周囲の映り込みがひどいので、通常の画像計測は適用しにくい。映り込みはカメラと計測物体の位置関係や周囲環境に依存するため、映り込み量の予測が難しい。また、ハイライトやオフセット、露出過剰や露出不足、凹みやキズに似た特徴の映り込みが発生する。そのため、外乱の映り込みを避けつつ明るさを確保し、計測に必要な画像を撮影する必要がある。また、確実に凹みやキズを検出し、寸法を推測できる手法を開発する必要がある。



(a)緑色ボンネットの凹み (b)緑色ボンネットの微小凹み (c)白色フェンダーの凹み



(d)赤色ドアの凹み



(e)赤色ドアの微小凹み

図 1-4 自動車車体部品の凹みの例



(a)緑色ボンネットのキズ (b)緑色ボンネットの線キズ (c)白色フェンダーのキズ



(d)赤色ドアのキズ



(e)赤色ドアの微小キズ

図 1-5 自動車車体部品のキズの例

1.3 形状変化の検出のための三次元画像計測の一般方法

自動車車体部品の凹みは、部品の本来の形状とは異なる局所的な表面形状変化を持つため、部品の表面形状変化を計測して解析することで、凹みが検出できると考えられる。物体の立体形状を計測するためには三次元計測技術が有効である^{10) 11)}。

三次元計測とは、計測対象の立体形状や三次元位置の計測を行うことである。計測対象の立体形状や三次元位置などの立体的な情報は、産業分野における製品の欠陥検査、土木分野における測量、医療分野における CT や MRI、デザイン分野における三次元 CG など、多くの分野で求められており、このような需要に対して多くの三次元計測方法が利用されている。

三次元計測は計測手法により接触式と非接触式に分けられる。表 1-1 にはその分類を示す。

接触式は、物理的に接触させたセンサーの位置情報により計測する手法であり、身近なものではメジャー等による距離計測や、プローブの先端を計測対象に当てその位置を位置センサーの出力として読み取る方法などがある。しかし、このような方法は 1 回の計測で 1 点の計測しか行えないため、大きな計測対象の計測や高精細な計測には多大な時間を要し、接触できない物体や接触により立体的な情報が変化する物体の計測は行うことができない。

非接触式は、光や音の伝搬を利用して物体の三次元空間位置や立体形状を計測する手法であり、レーザ計測、超音波計測、画像計測などがある。レーザ計測と超音波計測は、レーザ波もしくは超音波を発射し、計測対象物体の反射時間もしくは位相を測ることにより距離を計測する手法である。この手法は 1 回の計測では 1 点の情報しか得られない。三次元画像計測は、画像処理技術を用いて三次元空間位置や立体形状を計測する方法である。

表 1-1 三次元計測の計測手法による分類

分類	手法		特徴
三次元計測	接触式	メジャー	長さを用いた計測
		プローブ	空間座標を用いた計測
		tong	角度を用いた計測
		etc...	
	非接触式	レーザ計測	電波を用いた計測
		超音波計測	超音波を用いた計測
		画像計測	画像を用いた計測
		etc...	

自動車車体部品の検査を短時間で行う場合、計測環境の物理的な制約を満たし、かつ計

測物体表面全体の形状情報を高速に取得できることが必要である。また、微小な凹みやキズを検出するためには分解能の高い計測を行う必要がある。

そこで、本研究では数 cm から数十 m の対物距離に有効で、一度の計測で点状ではなく面状のデータを取得できる画像計測を用いる。また凹みは形状変化のため、三次元形状を計測可能な三次元画像計測手法を使用する予定である。一方、自動車車体部品のキズは色特徴の変化に伴うため、2次元カラー画像処理の特徴抽出手法の使用を予定している。

三次元画像計測手法は受動型計測と能動型計測に大別できる。表 1-2 には代表的な三次元画像計測手法を示す。

受動型計測とは、計測対象に対して光などの計測のためのエネルギーを加えることなく計測する方法である。受動型計測は計測用画像を容易に取得する事が可能だが、計測対象の画像上の特徴が少ない部分の計測が困難である。

能動型計測とは、計測対象に光などのエネルギーを投影して画像を撮影し、投影したエネルギーと撮影画像の相関を利用して計測を行う方法である。能動型計測は、計測に対する信頼性は高いが計測環境が限定される場合が多い。

表 1-2 代表的な三次元画像計測手法

分類	手法	特徴
受動型計測	レンズ焦点法	レンズのピント調整を用いた計測
	単眼視法	見かけの大きさから計測
	ステレオ視計測法	2台カメラによる三角測量
能動型計測	光レーダ法	信号の飛行時間を用いた距離計測
	アクティブステレオ法	カメラと投光機による三角測量
	照度差ステレオ法	照明による色変化を利用した計測

下記に、代表的な三次元画像計測手法の概要と特徴、用途を述べる。

(1) レンズ焦点法

レンズ焦点法は顕微鏡で多く実用されている計測手法で、計測対象に焦点が合うレンズ焦点距離を探索し、レンズ焦点距離から計測対象の奥行き情報を取得する計測手法である¹²⁾。図 1-6 はレンズ焦点法のイメージ図である。

レンズ焦点法は画像のぼけの程度を判断する機能、焦点距離を自動変化する機能を用意することで、自動的に計測を行うことができる。しかし、レンズ焦点法により計測対象の正確な距離を計測するには、焦点ぼけを大きくする必要があり、そのためには焦点深度を浅くするため、大きな計測対象への適用は困難である。また、焦点のあっている部分を自動検出する処理が困難である。用途として、一般に半導体表面等の微小な物体

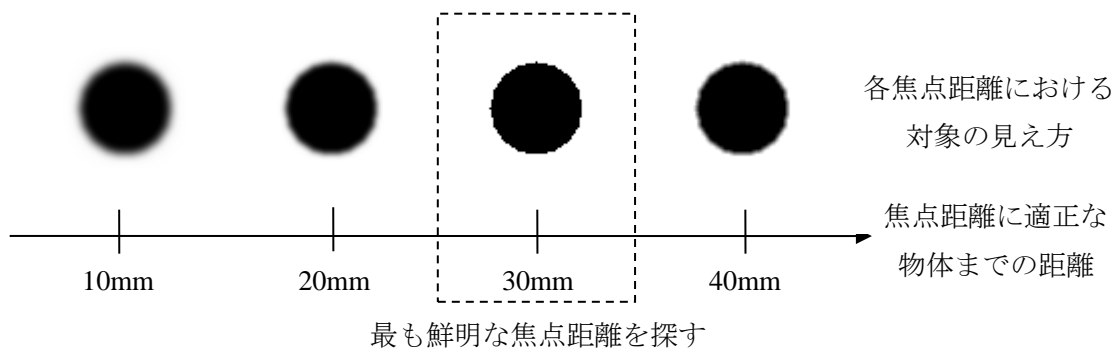


図 1-6 レンズ焦点法のイメージ図

の形状計測に用いられる。

(2) 単眼視法

単眼視法とは，計測対象の見かけの大きさなどから三次元形状を計測する手法である．単眼視は一台のカメラを使用するため軽量でコストが小さい．しかし，単眼視法を用いる場合，あらかじめ計測対象の大きさが既知である，計測対象の位置に制限があるなど多くの拘束条件がある．また，画像上の計測対象と物体モデルとの対応関係を算出するためには複雑な画像処理が必要であり，実用化例は少ない．用途として，一般に移動型ロボットにおける三次元位置の推定等が挙げられる．

(3) ステレオ視計測法

ステレオ視計測法とは，異なる空間位置にカメラを 2 台配置し，三角測量の原理より計測を行う手法である．カメラの台数や配置方法により両眼視，三眼視，カメラ移動型などの方法がある¹³⁾．用途として，建築物等サイズの大きな物体の形状計測に用いられる．図 1-7 は両眼視によるステレオ視計測法の構成例である．

図 1-8 は図 1-7 の両眼視によるステレオ視計測法の構成例を三次元的に配置したものである．焦点距離 f の 2 台のカメラを平行に基線長 b だけ離して計測点 $P(X, Y, Z)$ を撮影したとき，左カメラ画像では $Q_L(x_L, y_L)$ ，右カメラ画像では $Q_R(x_R, y_R)$ として撮影される．このとき， Q_L ， Q_R が P と同じものとする，左カメラのレンズ中心 O_L ，右カメラのレンズ中心 O_R と計測点 P を結んだ三角形を用いて三角測量の原理を適用し，計測点 P の三次元座標を算出することができる．

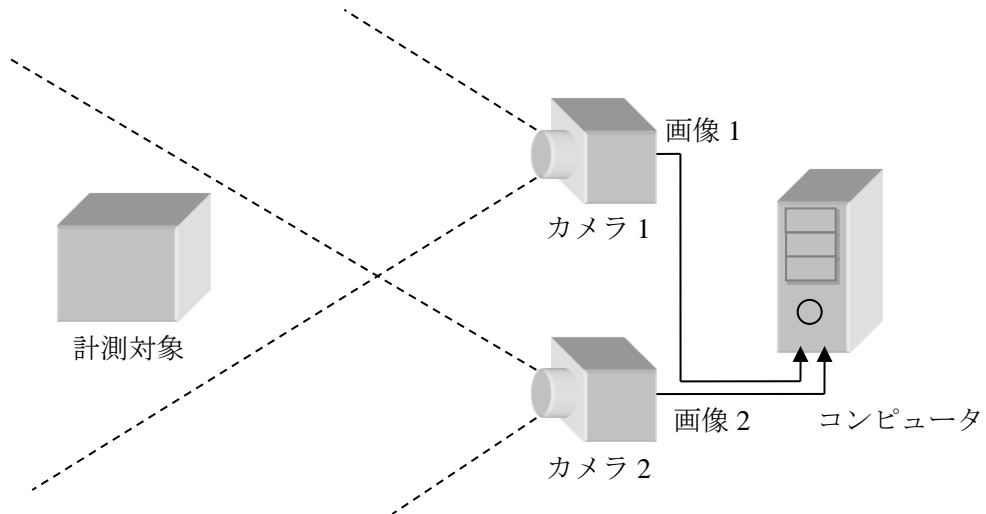


図 1-7 両眼視によるステレオ視計測システムの構成イメージ図

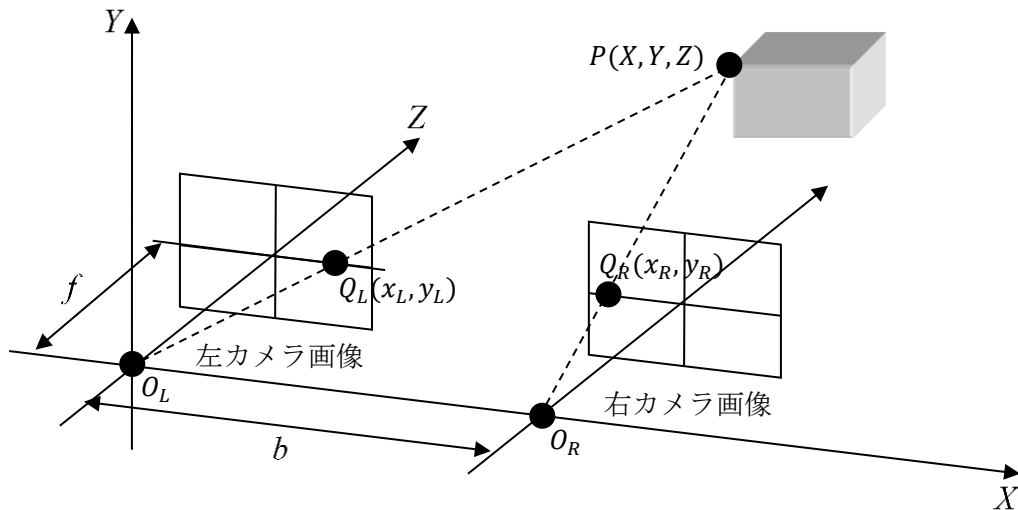


図 1-8 両眼視によるステレオ視計測システムの幾何関係図

図 1-9 は図 1-8 を X-Z 平面から見たものである．図 1-9 から点 Q_L, Q_R はそれぞれ線分 PO_L, PO_R の直線上にあることが分かる．カメラの焦点距離 f はそれぞれ同じであることから三角形 $PO_L O_R$ と三角形 $PQ_L Q_R$ は相似であるため，式(1-1)が得られる．

$$\frac{b}{b - (x_L - x_R)} = \frac{X_P - b}{X_P - (b + x_R)} \quad (1-1)$$

式(1-1)の比例関係により式(1-2)が得られる．

$$X_P = \frac{b \cdot x_L}{x_L - x_R} \quad (1-2)$$

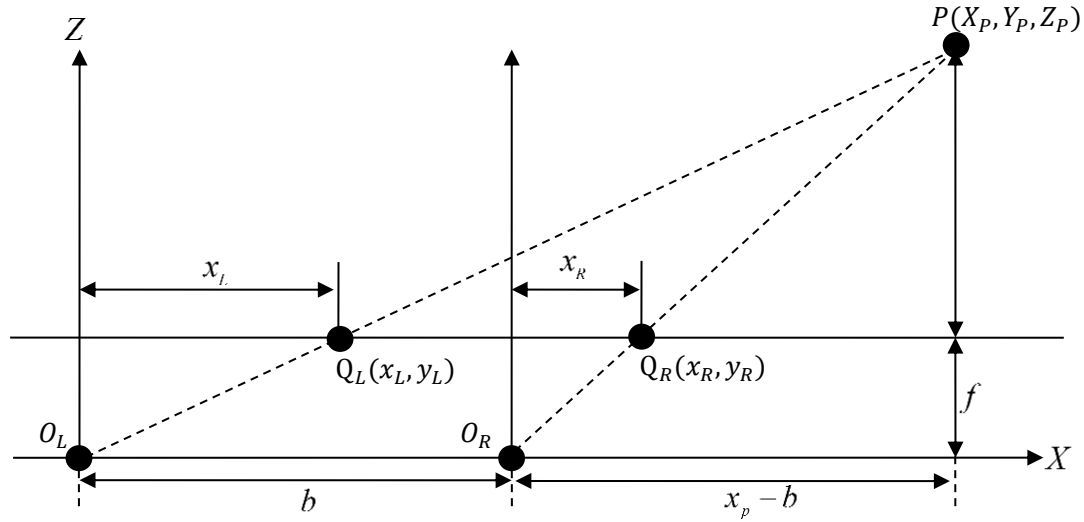


図 1-9 両眼視によるステレオ視計測システムの幾何関係図(X-Z 平面)

同様に、Y-Z 平面から式(1-3)が得られる.

$$Y_p = \frac{b \cdot y_L}{x_L - x_R} \quad (1-3)$$

また図 1-9 から式(1-4)が得られる.

$$\frac{b}{b - (x_L - x_R)} = \frac{Z_p}{Z_p - f} \quad (1-4)$$

式(1-4)の比例関係により式(1-5)が得られる.

$$Z_p = \frac{b \cdot f}{x_L - x_R} \quad (1-5)$$

このように画像座標 x_L , x_R , y_L , y_R が得られれば式(1-2), 式(1-3), 式(1-5)により計測点 $P(X_p, Y_p, Z_p)$ の世界座標系における三次元座標を算出できる.

ステレオ視計測法は専用機器を必要とせず, 計測に必要な画像撮影が高速で, 様々なサイズの物体を計測できる利点があるが, 計測物体の注目点を画像上から検出する対応付けに手間がかかるなどの問題がある. 用途としては, 建築物の測量やロボットの視覚等が挙げられる.

(4) 光レーダ法

光レーダ法とは、計測機から対象物体に照射された光が反射して計測機に返ってくるまでの時間、または位相差により距離画像を得る方法である。図 1-10 は光レーダ法のイメージ図である。

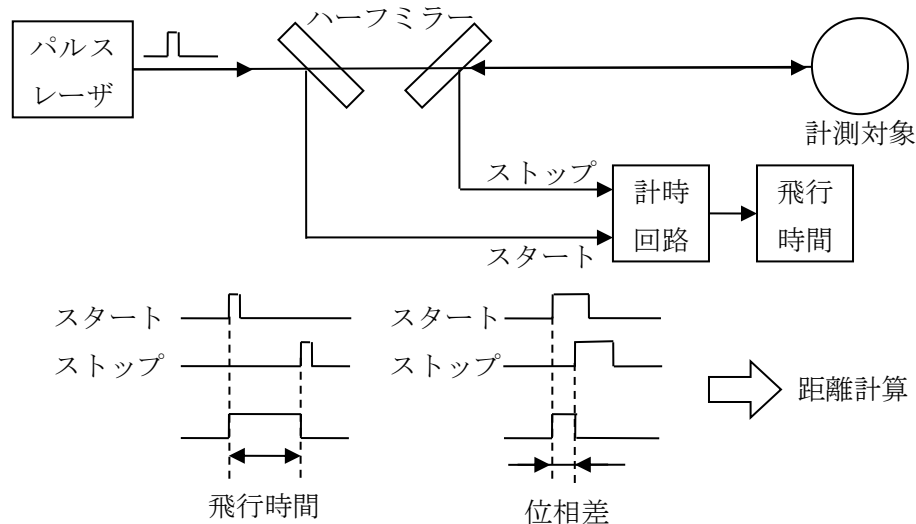


図 1-10 光レーダ法のイメージ図

照射する光は、環境光に影響されにくいレーザや赤外の変調光を用いるのが一般的である。また自動ゲイン制御を用いることで微弱な反射光を安定して検出することができるため、反射光を検出することができれば照明条件の変化に影響することなく距離を計測することができる。しかし、計測機から計測対象までの距離が短い場合、飛行時間や位相差を検出することが困難となるため計測が困難となる。用途としては、一般に地形測量等に用いられる。

(5) アクティブステレオ法

アクティブステレオ法とは、投影機器(プロジェクタ)と撮影機器(カメラ)を用いたステレオ視計測手法で、ある角度から光を計測対象に投影し、それを異なる角度から撮影した時、投影方向(プロジェクタ座標)と撮影方向(カメラ座標)の 2 つから三角測量の原理により計測対象までの距離を算出する手法である。

計測対象に照射する投影パターンには、スポット光、スリット光、コード化パターン光、強度変調パターン光、カラーパターン光など様々なパターンがあり、パターンの種類と解析方法により様々な手法がある^{14) 15) 16) 17) 18)}。図 1-11 はスリット光投影法のイメージ図である。

スリット光投影計測の場合、まずスリット光を計測対象に投影し、スリット光を投影された計測対象をカメラで撮影する。計測対象の形状によりスリット光が変形している画像を取得できる。プロジェクタの位置とスリット光の投影角度、カメラの位置と観測されたスリット光の位置から、三角測量によりスリット光が照射された部分の三次元座標を得ることが出来る。このスリット光の投影位置を順に変化させることで、計測対象物体の三次元座標を得ることが出来る。投影する光は、レーザ光のメカニカルな走査やLCD プロジェクタを用いた任意のパターン照射などが挙げられ、必要な機材も安価なものから高価なものまで様々である。アクティブステレオ法は特徴の少ない領域の三次元情報を取得できる利点があるが、光の投影により特徴付けできない物体は計測できない。用途としては、製品の欠陥検査や曲面を持つ物体の形状解析等が挙げられる。

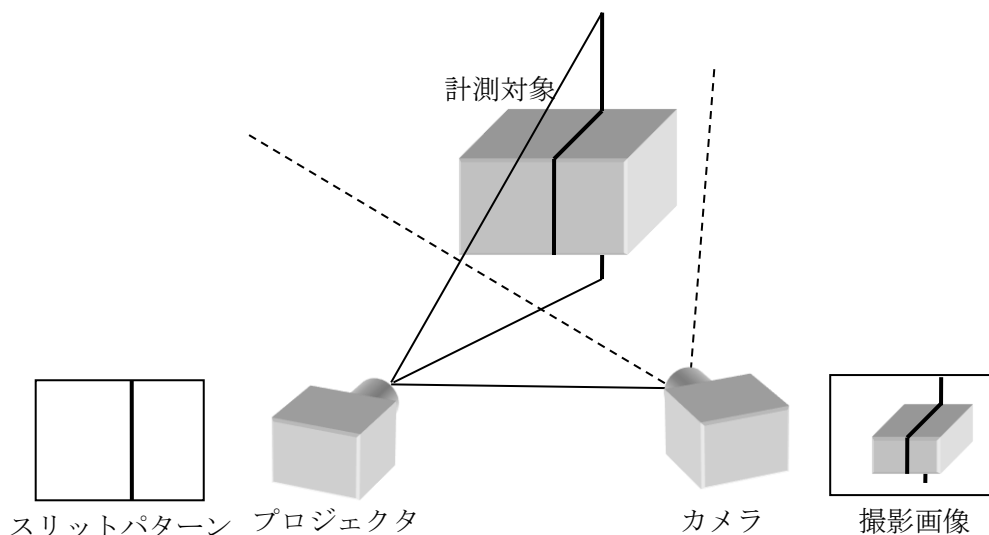


図 1-11 スリット光投影法のイメージ図

(6) 照度差ステレオ法

照度差ステレオ法とは、光源の位置を変化させて画像を撮影し、撮影された画像の明るさの変化から立体形状を算出する手法である¹⁹⁾。光源の位置を変化させて同じ視点から計測対象を撮影したとき、反射率分布が既知である場合、光源の位置と形状に応じて各画素の明度が変化する。この現象を利用して面の傾きを全ての画素に対して算出することで、計測対象の立体形状を算出する。図 1-12 は照度差ステレオ法のイメージ図である。

この手法は画像の濃淡情報を直接利用するため、表面反射率が未知、不均一な物体、光沢を有する物体の計測は困難である。また、光源の位置と計測対象の形状によっては直接表面に光が当たらないため、計測できない箇所もある。

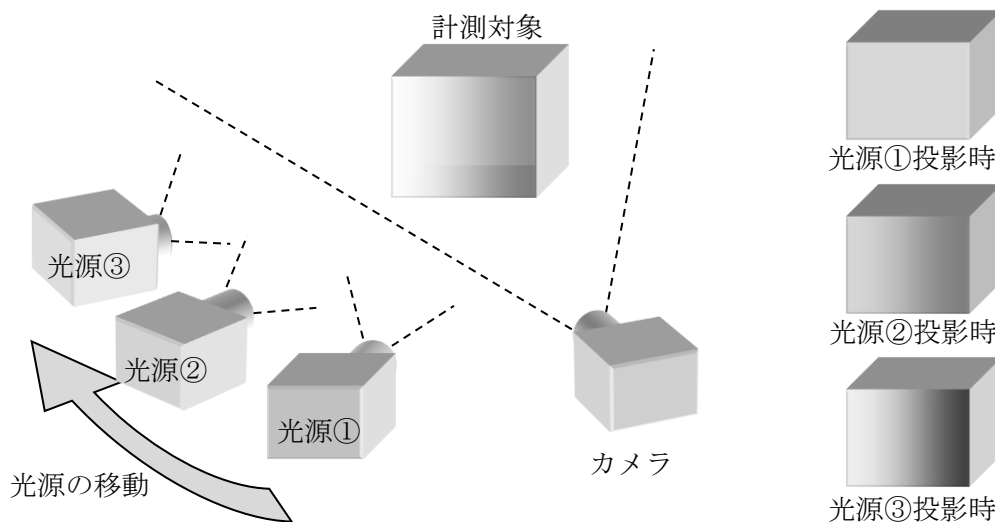


図 1-12 照度差ステレオ法のイメージ図

(7) その他の三次元画像計測方法

上記に述べた三次元画像計測手法のほかに、干渉縞の形状から立体形状を取得する干渉法等が挙げられる。これらの方法は計測範囲や計測時間、計測感度の観点から、いずれも自動車車体部品の計測に適用しにくいので、ここで方法の詳細説明を省略する。

自動車車体部品表面は色特徴の変化が少なく、密な形状計測ができる必要があるため、本研究では凹みを検出するためにアクティブステレオ法を用いる。

1.4 色特徴変化の検出のための画像処理の一般方法

図 1-5 に示したように、自動車の車体部品にあるキズには画像上での色変化や模様変化があるので、画像処理のエッジ抽出や色特徴抽出等の方法はキズの抽出に適応できると考えられる。ここではキズ検査に使えるような画像処理方法の概要と特徴を述べる。

(1) エッジ抽出

エッジ抽出は、画像の中から輪郭や線、点やノイズ等のエッジ情報を抽出する手法である。キズは点や線等のエッジで撮影されるためエッジ抽出が有効であると考えられる。エッジを検出する方法には閾値を用いる方法や、微分によるエッジ抽出等がある。閾値を用いる方法は、閾値よりも明るいまたは暗い部分を抽出することでエッジを抽出する方法である。この方法はエッジ部分が外れ値であり、それ以外の領域が外れ値でない必要があるため、物体の表面特徴が一様なものでなければ使用できない。微分によるエッジ抽出は、画像に対して微分処理を行うことで、濃度変化の大きいエッジ部分を抽出する手法である。デジタル画像は 1 画素が最小単位なので、実際の処理は差分で行う。また、フィルタ処理

により様々な特性を持つエッジ抽出を行うことができ、その特性によって様々な名称がある。例えば一次微分や二次微分、Roberts オペレータ、Sobel オペレータ、Canny オペレータ等があり、エッジ抽出の強度と方向検出の有無等の特徴が異なる。これらの手法はエッジを安定して検出できる一般的な方法であり、強度変化のある部分を高感度に検出できるが、一方でノイズや照明むらをエッジとして誤検出する問題や、幅の大きいエッジの場合に内側部分を検出できない等の問題がある²⁰⁾²¹⁾。

(2) 色特徴抽出

色特徴抽出は画像から特定の色を抜き出す処理方法で、キズは部品の色とは異なる色で観測されるため有効であると考えられる。色抽出の基本的な手法として閾値による手法があり、RGB それぞれに閾値を設定することで特定の色を抜き出す方法や、明度変化の影響を軽減するために YUV や HSL 等に色変換した後に同様の処理を行う方法がある。この手法は抽出対象が画像内で固有の色であれば何色でも抽出が可能であるが、閾値の設定や調整が難しい問題がある。また、画像内の同様の色特徴がある領域が抽出される問題がある。

(3) フィルタリングによる特徴抽出

フィルタリングによる特徴抽出は、フィルタを用いて画像から特定の色分布を持つ領域を検出する方法で、キズは注目領域とその周辺領域の色特徴が大きく異なるため有効な処理であると考えられる。フィルタには汎用性のあるフィルタと抽出対象の特徴の検出に特化したフィルタがある。汎用性のあるフィルタには、1 で述べたエッジ検出フィルタや、照合するためのテンプレート画像を用いるテンプレートマッチング、多数のテンプレート画像を用意して AdaBoost 等の機械学習アルゴリズムにより特徴を抽出する方法、SIFT 特徴量や SURF 特徴量等を用いて画像から特徴量を抽出してから特徴抽出を行う方法等が挙げられる。これらの手法は安定した特徴抽出が可能であり、テンプレートを用いる方法は抽出したい特徴を持つ画像を用意することで適用が可能である。しかし、テンプレートの選び方や閾値の設定等、フィルタの設計や抽出パラメータの改良が難しい問題がある。一方で、抽出対象に特化したフィルタは、領域フィルタや十字フィルタ等、その特徴の抽出に有効な形状を持つフィルタを使用し、それらのフィルタ係数を調整することで特定の特徴の抽出に特化させる方法である。この手法は自由度が高く、抽出したい特徴を安定して抽出できる。また、特徴が複数ある場合でもフィルタを追加することで対応できる。しかし、フィルタの設計には経験が必要であり、複数の抽出したい特徴が存在する場合、有効なフィルタの判別が困難になりやすい問題がある²²⁾²³⁾。

(4) フーリエ解析による特徴抽出

フーリエ解析による特徴抽出は、フーリエ変換を用いて画像の強度信号を周波数信号に変換し、周波数信号から特定の周波数特徴を抽出した後、抽出した周波数信号を強度信号

に逆変換することで、特定の特徴を抽出する方法であり、キズはエッジの特徴を持つことから周波数上では高周波信号であり、高周波信号を抽出することでキズ特徴を抽出できるため有効な方法であると考えられる。

(1)～(3)と大きく異なる特徴として、周波数信号に変換することで画像全体の特徴を考慮することができるため、画像全体の濃度むら等に対応できる。またデジタル画像のフーリエ変換には高速フーリエ変換(Fast Fourier Transformation : FFT)が使用できるため、高速処理が可能になった。しかし、抽出したい特徴と特徴抽出フィルタの組み合わせによっては、アーチファクトやリングングエフェクト等の原因で誤検出が発生する。

自動車車体部品表面は色特徴変化が少ないため、キズ領域とキズ以外の領域のコントラストを確保するために均一な照明を用いることが考えられる。しかし、部品全体から見ると照明むらが発生するため、照明むらの影響が小さい手法が必要である。また、様々な大きさのキズがあるため、領域フィルタを用いた場合には参照画素が指数関数的に増加するため処理時間がかかる問題がある。上記から、本研究ではキズ検出の手法として、フーリエ解析に基づく周波数解析技術を使用する予定である^{24) 25)}。

1.5 本研究の目的と本論文の構成

従来の目視によるリユース自動車車体部品の検査は、技術者の違いにより検査ムラが発生するため、検査結果と部品の状態に差が出るという問題や業界統一的な評価基準が作りにくい等の問題がある。これらの問題を解決する方法として、本研究では画像計測技術に基づいたリユース自動車車体部品の自動検査装置の開発を目指す。

画像処理技術により自動車車体部品の凹みやキズを検査する場合、鏡面反射による問題を解決する必要がある。また、微小凹みや微小キズを検出するための画像計測と画像処理手法を開発する必要がある。これは本研究の技術的な目的である。具体的には下記の3点が挙げられる。

- (1) 鏡面反射による画像計測技術適用困難な問題を解決
- (2) 三次元画像計測技術使用による凹みの自動検出
- (3) 画像処理技術による微小キズの自動検出

本論文では6章より構成する。

第2章では、自動車車体部品の鏡面反射の問題点について述べ、鏡面反射の影響を軽減するための間接パターン光投影および間接照明方法について述べる。その提案手法による撮影実験結果を提示し、結果について考察する。

第3章では、三次元画像計測技術を用いた凹み検出手法について述べる。まず微小凹み検出のための位相シフト法と多重位相差画像による凹み検出手法と凹みのサイズ推定方法について述べる。その後、実際の処理と検出結果を提示し、検出精度について考察する。

第4章では、画像処理技術を用いたキズ検出手法について述べる。まずキズ検出可能ないくつかの画像処理方法を紹介し、その後、微小キズ検出のための改良バンドパスフィルタについて述べ、実際の処理過程と検出結果を提示し、検出精度について考察する。

第5章では、試作した自動車車体部品検査システムを紹介する。具体的にはシステムの構成方法、実計測の流れを述べ、開発したシステムの機能を評価する。

第6章では、結論として本研究の結果を統括し、今後の課題について述べる。

第2章 間接パターン光投影および間接照明による画像撮影

画像計測技術によりリユース車体部品の欠陥検査を行う場合、凹みの検出に対してはパターン光投影計測が有効であり、キズの検出に対しては色特徴による画像計測が有効である。このような画像計測を安定して行うためには、凹みやキズの検出に有効な画像を撮影する必要がある。つまり撮影した画像は明るさやコントラストが十分にあり、ハイライトや周囲環境光の映り込みが含まれない画像を撮影することが要求されている。しかし、リユース車体部品は鏡面反射が強いため、ハイライトや映り込みなどが発生し、凹みやキズの検出を適切に行えなくなるか、映り込んだテクスチャを誤検出する等の問題が発生する。鏡面反射の影響を軽減するために様々な手法が提案されているが、撮影範囲が狭くなることで計測時間が長くなる問題や、暗室にすることで画像計測に必要な明るさを十分に確保できない等の問題がある。このような問題を解決するために、本研究では間接パターン光投影および間接照明による画像撮影手法を提案する。

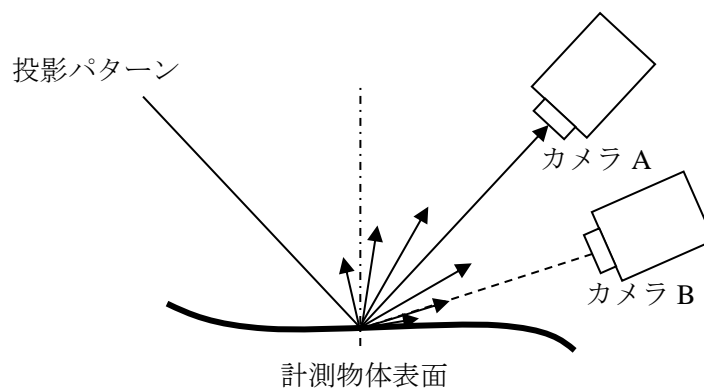
本章では、画像計測における鏡面反射の影響とその特性について述べた後、従来手法の種類とその特徴について述べ、間接パターン光投影及び間接照明技術について述べる。

2.1 自動車部品の画像計測の困難さ

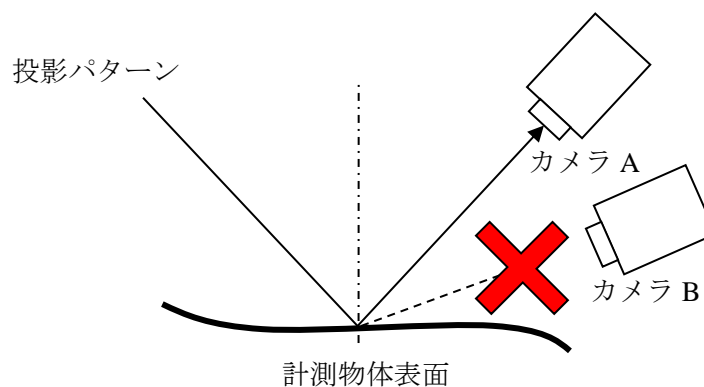
画像計測技術を用いてリユース車体部品の凹みやキズを検出する上では，車体部品の鏡面反射によるハイライトの影響の問題や映り込みと外乱の影響の問題等の大きな問題がある²⁶⁾．

2.1.1 ハイライトの影響

パターン光投影による三次元画像計測を用いる場合，短時間で広範囲の計測が可能である点は有効であるが，鏡面反射物体に対しては計測そのものが難しい問題がある．これは，パターン光投影三次元画像計測の多くは拡散反射物体に有効な計測手法であり，鏡面反射物体に対しては適用が難しい問題があるためである．図 2-1 は鏡面反射物体へのパターン光投影計測の問題のイメージ図である．



(a) 拡散反射物体の光の反射



(b) 鏡面反射物体の光の反射

図 2-1 鏡面反射物体へのパターン光投影計測の映り込みの問題

図 2-1(a)に示すように拡散反射物体にパターンを投影した場合、投影パターンは計測物体表面で拡散反射が起こる。カメラ A は反射パターンの強反射方向にあるためパターンを観測できる。カメラ B は強反射方向にはないが、拡散反射したパターンの一部を観測できるため、同様にパターンを観測できる。一方、図 2-1(b)に示すように鏡面反射物体にパターンを投影した場合、投影パターンは計測物体表面で鏡面反射が起こる。カメラ A は反射パターンの強反射方向にあり、投影パターンは全反射しているため、非常に強いパターンが観測される。カメラ B は強反射方向になく、投影パターンは拡散反射していないため、パターンを観測できない。そのため、観測パターンがカメラの位置によってハイライトやオフセットになってしまい、投影パターンを観測できないことがある。

図 2-2 は三次元計測用のパターンを直接自動車の車体部品に投影した時の撮影画像であり、中央部付近と右下の部分ではハイライトが生じていることが分かる。また画像の中央部分には強度が強くパターンがはっきり見えるが、左上と右上の部分ではパターンがあまり見えないこともわかる。このような画像は凹みやキズの検出に使いにくい。

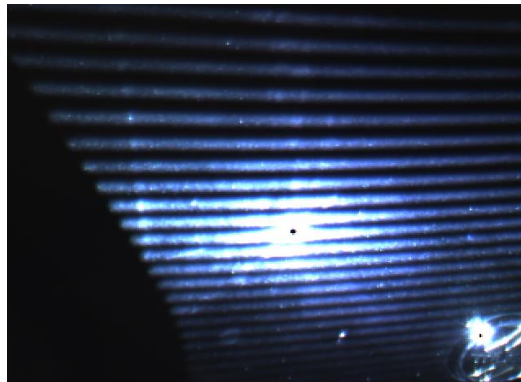


図 2-2 直接パターン光投影を用いた撮影画像

2.1.2 映り込みと外乱の影響

鏡面反射による映り込みの問題のイメージを図 2-3 に示す。図中の矢印は光の経路であり、物体を撮影する際に、外部にある木や天井にある電球も映り込まれた。即ち計測物体を撮影する際、カメラで得られる画像色強度は計測物体の本来の色に加えて外乱の色特徴の影響を受ける。そのため、本来の物体の色特徴が得られない問題がある。また、外乱の映り込みは計測物体の形状に依存するため、映り込み先の特徴を推定することは難しい。図 2-4

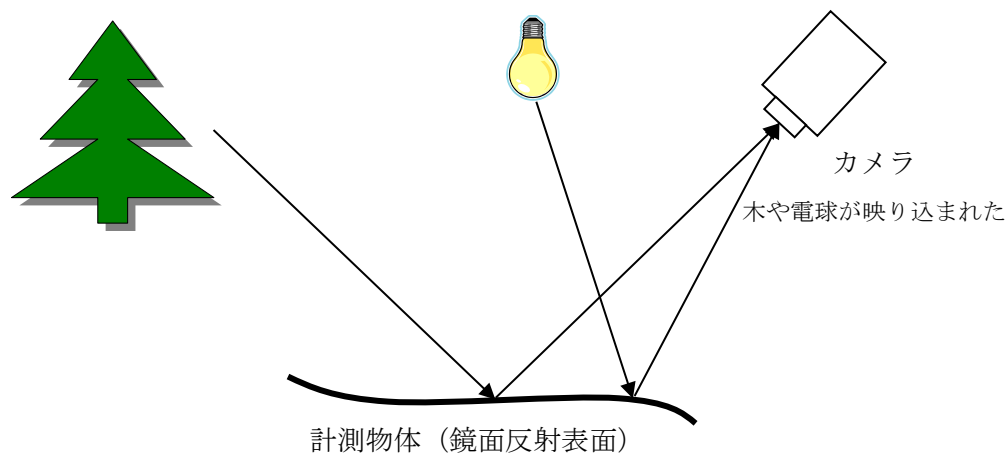


図 2-3 鏡面反射による映り込みの問題

は一般の室内環境で撮影した自動車の車体部品の画像であり，撮影者や周囲にある物及び窓などが映り込まれてしまっており，このような画像は凹みやキズの検出に使いにくいことが分かる．



図 2-4 室内環境で撮影した自動車車体部品の画像

2.1.3 今までのアプローチ

自動車車体部品の鏡面反射による生じたハイライト問題や映り込み問題に対し，現在では主に 2 つのアプローチで鏡面反射を考慮した画像計測手法が提案されている．

1 つは鏡面反射成分や法線方向の推定により鏡面反射の影響を軽減して三次元画像計測手法を適用する手法である．三宅達は複数の方向から撮影を行って反射特性や法線方向を推定し，法線方向情報から形状の再構成を行う手法を提案した．この手法は鏡面による光

源の反射像が画像面の中心に位置するようにカメラを移動、回転させ撮影するため、5 自由度のカメラシステムを必要とし、システム構成が複雑である。また、一回の撮影で計測できる範囲が狭いので、計測に必要な撮影時間が長い。なお、法線計測に基づく手法では、法線設定誤差が最終的な計測誤差に大きな影響を与えるので、精密な計測のためには高精度の法線設定が必要となる^{27) 28)}。

もう 1 つは計測用パターンを鏡面反射物体に映りこませて画像を撮影し、映りこんだパターンを解析して三次元画像計測を行う手法である。この手法には絶対距離を計測する手法と、絶対距離と法線方向の 2 変数に依存する形状情報を相対計測し、場合により他の手法により得られた部分的な三次元計測結果を用いて三次元形状を再構築する手法がある。絶対距離を計測する手法は鏡面反射を利用したステレオ視計測手法が用いられ、1 つの手法で三次元計測が可能であるが、光軸方向を確定するためにパターンの奥行変化が必要なため、広範囲計測を行うシステムを構成するには不向きである。また、相対計測後に形状再構成を行う手法は、主に正弦波パターンや位相シフトパターンを計測物体に映り込ませて撮影し、パターンの強度情報を用いて相対計測を行い、ステレオ視計測手法や鏡面反射を利用したステレオ視計測手法により形状を再構成する。これらの手法は汎用の機器で実用可能なためコストやメンテナンス性が良く、固定カメラのため撮影時間が短い利点がある。しかし、パターン生成に液晶ディスプレイやプロジェクタを用いる場合には配置場所や映り込み範囲の制限が強く、広範囲計測には不向きである。また、照明機器を用いる場合には生成できるパターンの種類が制限されるため、照明機器により設定したパターンのみで計測できる手法を考える必要がある^{29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36)}。

2.2 間接パターン光投影及び間接照明技術

凹みの検出について、従来では、映り込みを利用して目視による観測が主であった。その方法は様々であるが、実務上はコントラストの大きい直線状の物を映り込ませて観測することが多い。特に、映り込みのコントラストを強調する上では、蛍光灯の光源や、白と黒のストライプパターンを用いることが多い。

蛍光灯を利用する目視的な観測方法は直接画像計測に実用できない。その理由は車体部品のハイライト問題と周囲環境光の映り込み問題があるためである。

一方、ストライプパターンを用いる理由としては、黒と白の境界が最もコントラストが高いため、凹みによる境界の歪みを観測できるためである。しかし、映り込みによる境界が出現する領域は狭いため、このようなパターンを用いて自動化を行う場合にはカメラやパターンを動かして撮影を行う必要があり、計測時間がかかる問題がある。また、ストラ

イプパターンそのものを切り替えて撮影する方法も考えられるが、微小凹みを検出するためには密な形状情報が必要なため、同様に計測時間がかかる問題がある。

そこで、本研究では凹み検出のため間接パターン光投影手法、キズを検出するため間接照明手法を提案する。

(1) 間接パターン投影技術

パターン光投影に基づく三次元画像計測は計測対象物体にパターンを投影する必要がある。間接パターン光投影手法は、パターン光を直接計測物体に投影することなく、半透明拡散膜を通じて間接的に物体に投影する。これによりハイライトの問題を解決し、外乱や環境光、投光器等の映り込みを遮断する。図 2-5 は間接パターン光投影のイメージ図である。

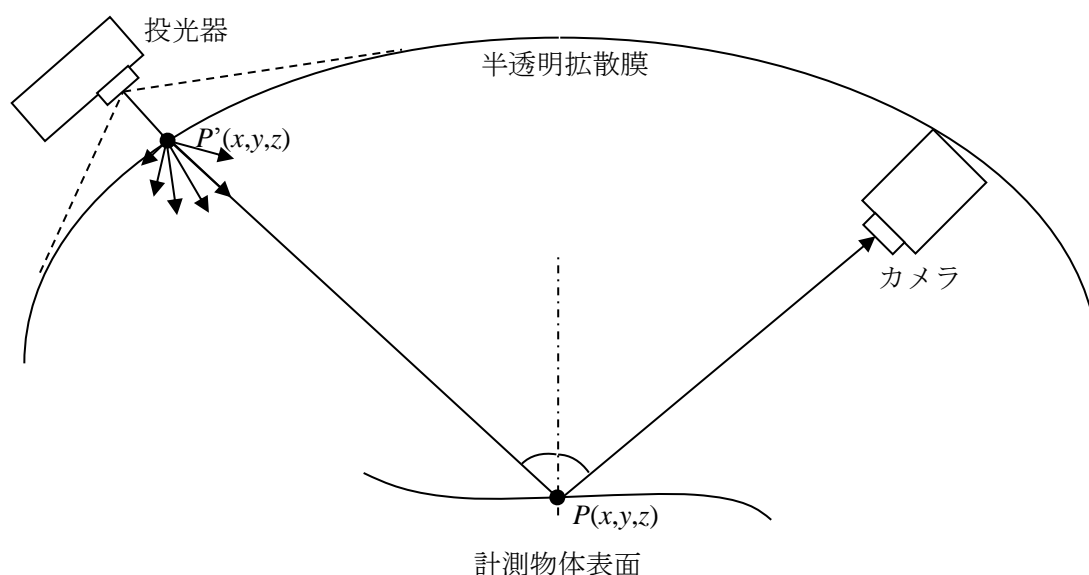


図 2-5 間接パターン光投影計測手法のイメージ

計測システムはカメラ、投光器、半透明拡散膜により構成する。投光器からのパターン光は半透明拡散膜に投影され、半透明拡散膜によって拡散された光を計測物体に映り込ませて撮影する。計測物体を半透明拡散膜で覆うことで外乱や環境光、投光器等の映り込みを遮断し、投光器により画像撮影に必要な明るさを確保するとともにパターン等の投影を可能にする。また、計測物体の任意の鏡面反射方向に対して、光源からの拡散反射パターンが観測できる。また、拡散反射された光は観測する方向に対する強度変化が少ないため、撮影角度や強反射方向による強度のハイライトやオフセットを軽減でき、強度分布の均一な画像を撮影できる。

図 2-6 は一般の直接パターン光投影および提案した間接パターン光投影による撮影画像の例であり、(a)は直接パターン光投影、(b)は間接パターン光投影の撮影画像、(c)(d)はそれぞれ撮影画像の A-A'ライン、B-B'ラインの緑チャンネルの強度分布である。なお、対象物体は平面の板であり、投影パターンは白と黒の2値を持つストライプパターンであり、8本のストライプを投影した。

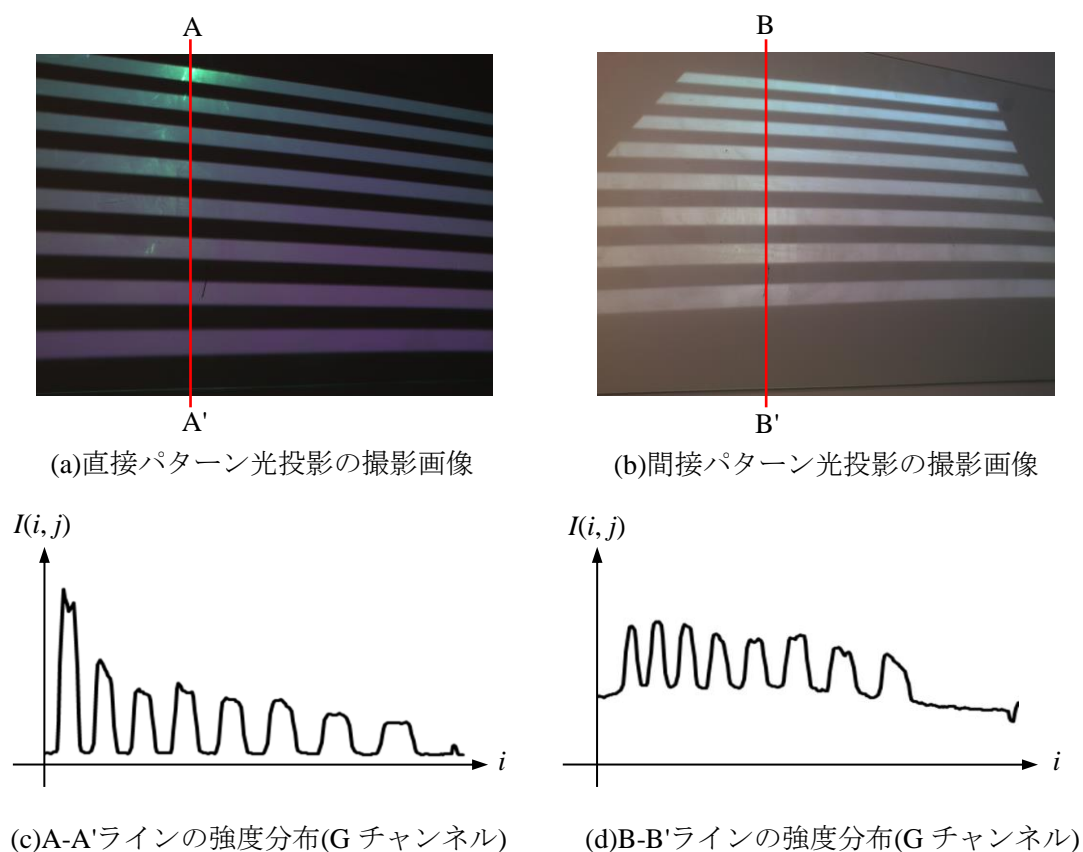


図 2-6 直接パターン光投影および間接パターン光投影による撮影画像

(a)では画像の上部に正反射によるハイライトと外部環境光の映り込みがある一方、投影と撮影の角度の関係により物体の下の部分には反射光の強度が低い領域がある。(b)ではハイライトがなく、比較的強度分布の均一な画像であり、三次元計測に使用できる。

次に、間接パターン光投影計測手法に位相シフト法を適用する。図 2-7 は LED を用いて構成したパターン光投影システムのイメージ図であり、図 2-8 は提案システムの構成配置図である。

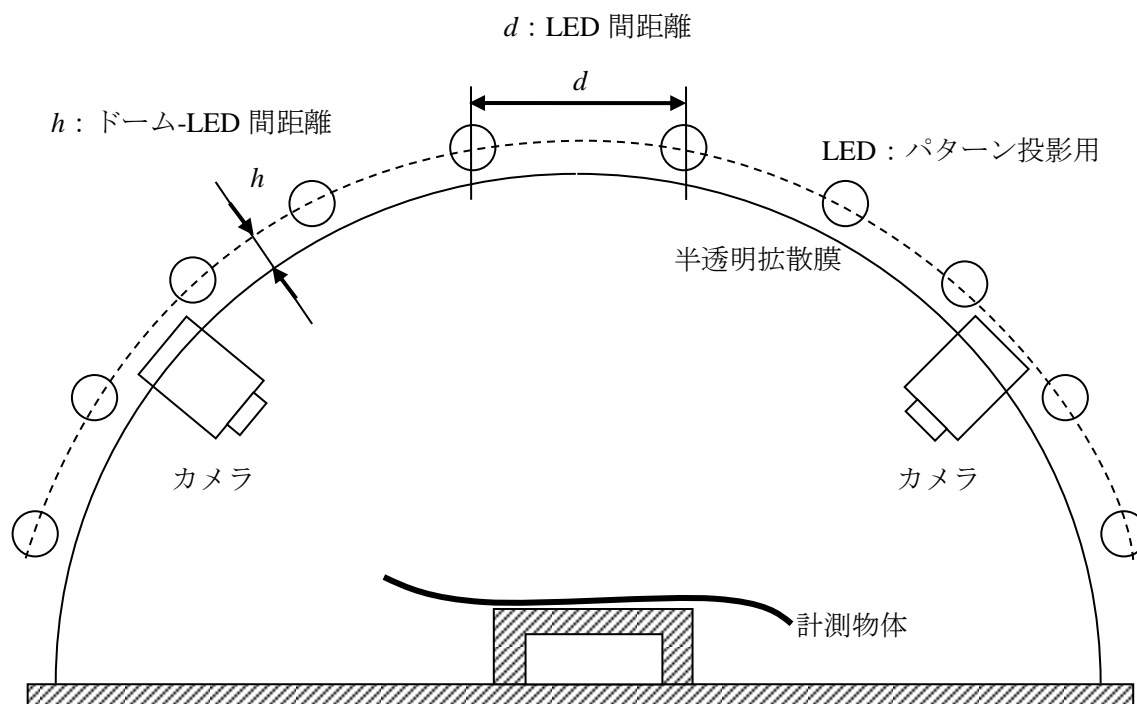


図 2-7 LED を用いて構成したパターン光投影システムのイメージ図

映り込みの少ない広範囲の画像を短時間で取得するために，提案システムはトンネル状の形状にし，LED にはトンネルの形状に合わせて棒状の LED を用いた．また，棒状 LED 光源の ON-OFF 制御により，計測に必要なパターン光を生成する．本研究では位相シフト法に合わせてシステムを構成しており，システムを設置する際の初期設定として，画像の撮影範囲を決定するためにカメラの位置と角度を調整し，正弦波パターンを調整するために LED 間距離（図中の d ），ドーム-LED 間距離（図中の h ）を調整する．

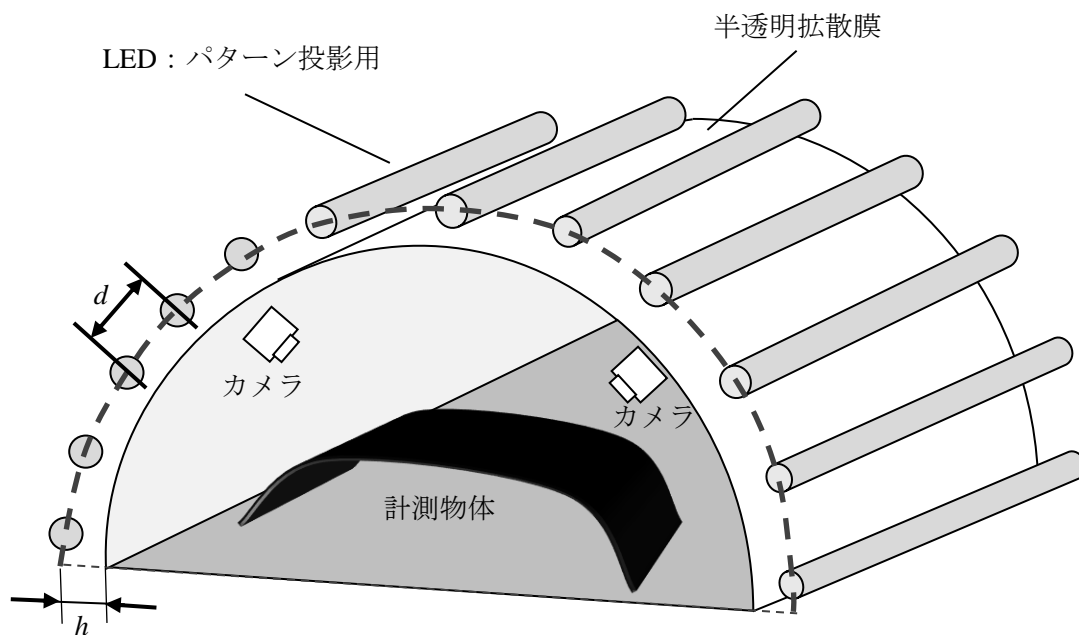


図 2-8 提案システムの構成配置図

(2) 間接照明技術

キズを検出するために、ハイライトと外部環境光の映り込みのない照明と撮影手法を必要とし、物体に均一的な明るい照明が必要である。

本研究では車体部品のキズを検出するために、間接照明技術を提案する。具体的には、前述の間接パターン光投影システムの LED をすべて点灯させることで明るさが一様な間接照明を実現する。

第3章 多重位相差画像解析に基づく凹み検出

リユース自動車車体部品の凹みを自動検査する上で要求されることは、微小凹みを検出できるように形状計測データを得ることと、形状計測データから微小凹みを検出すること、その凹みの大きさを推定することである。自動車車体部品の凹みは色特徴が少ないため、パターン光投影三次元画像計測が有効である。しかし、自動車車体部品は鏡面反射が強いため、パターン光投影による三次元画像計測の適用が難しい問題がある。また、形状計測データは、微小凹みを見つけるために密な形状情報が必要である。

上記問題を解決するために、本研究では間接パターン光投影計測手法と位相シフト法を用いて、自動車車体部品の密な相対形状計測を行う。また、凹みの検出には多重位相画像生成手法を提案し、計測物体の形状の影響を軽減した微小凹みの検出を行う。

本章ではまず位相シフト法による形状計測と、間接パターン光投影計測手法を用いた相対形状の計測方法、間接パターン光投影による位相シフト法の適用方法を述べ、次に多重位相差画像の生成方法と凹みの検出方法、凹みのサイズ推定方法について述べる。最後に提案手法による凹み検出実験結果と考察を述べる。

3.1 位相シフト法による形状計測

(1) 間接パターン光投影手法と位相シフト法の融合

リユース車体部品の凹みを検出する上では，短時間で高感度な形状計測が行えることが望まれる．また全視野計測が必要となる．全視野計測とは，投影されるパターン領域のすべての画素が計測可能な計測手法である．このような計測手法として，最適強度変調パターン光投影による三次元計測手法が挙げられる．最適強度変調パターン光投影は，画像強度の異なるスリットを複数同時に投影し，異なる角度から計測物体を撮影する．撮影によって得られた観測パターン画像を強度解析し，投影したスリットの強度と観測パターン画像から抽出したスリットの強度を対応させることで，1回のパターン投影と1~2回の撮影で三角測量の原理より計測物体の三次元座標を推定する³⁷⁾．

間接パターン光投影計測においては，強度の対応付けができれば，映り込んだ領域が判定できるため，相対形状を計測できる．

全視野計測には様々な手法があるが，計測物体の色の影響を受けにくく，最小4回の投影と撮影で形状計測可能な位相シフト法は凹み検出に適す³⁸⁾．位相シフト法は初期位相の異なる正弦波パターンを複数回投影して観測パターン画像を複数回撮影し，計算によりパターンが観測されたすべての画素の位相の値を求め，さらに形状情報を得られる手法である．本研究に用いる位相シフト法は初期位相が $\pi/2$ 異なる正弦波パターンを4回投影し，各パターンが投影された状態で画像を撮影することで4枚の観測パターン画像を取得する．図3-1に示すように，各LED光源のON-OFF制御により位相が 90° ずつ異なる投影パターンを4回計測物体に投影し，4枚の観測パターン画像を撮影する．まず，投影する正弦波パターンの初期位相 θ_k は式(3-1)で表わす．

$$\theta_k = \frac{k\pi}{2} \quad (3-1)$$

このとき，投影パターン $P_k(x)$ の強度は式(3-2)で表わす．

$$P_k(x) = C_1 \sin(\omega x + \theta_k) + C_2 \quad (3-2)$$

但し， k は投影撮影の回数， ω は投影パターンの角周波数， θ_k は投影パターンの初期位相， x は投影座標系 (x, y) における投影パターンの画像座標である(図3-2参照)． C_1 と C_2 はパターンの強度を表す定数であり，光源の照度や光源間の距離および光源から半透明拡散膜までの距離(図2-8中の d と h)によりその値を調整する．

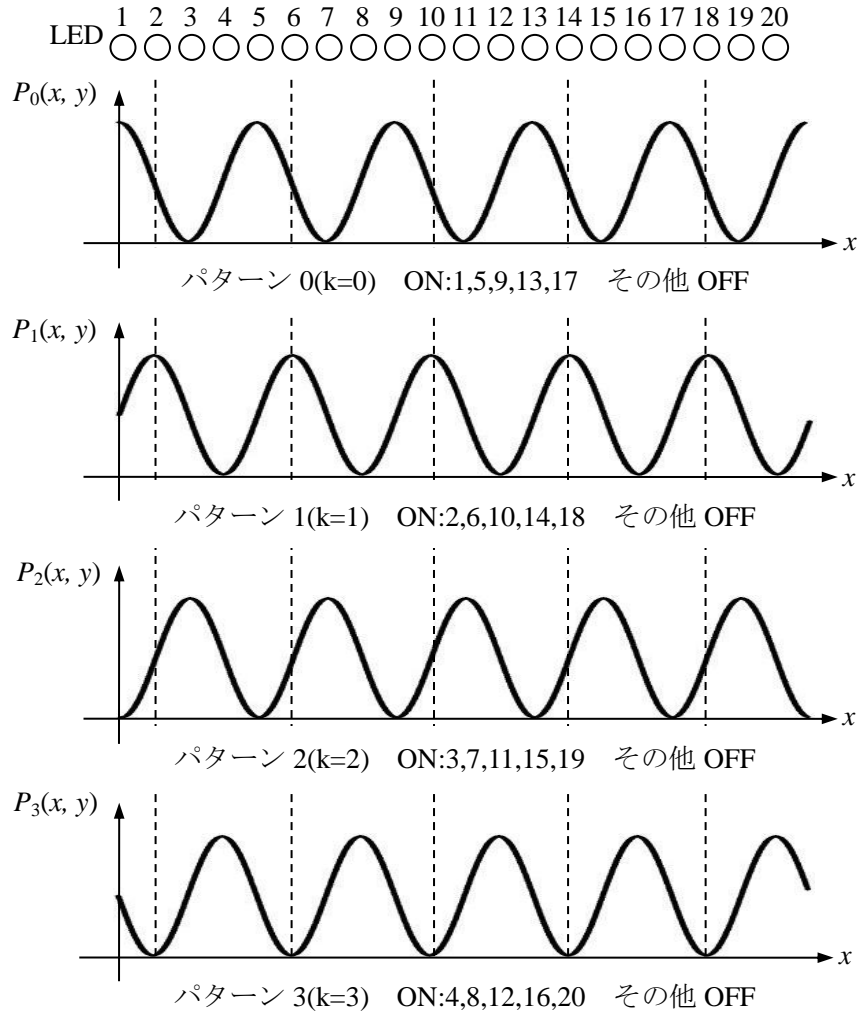


図 3-1 LED による位相シフトパターン投影技術

図 3-2 は計測システムの座標関係を示し、投光系、カメラ系、世界座標系はそれぞれ (x, y) , (i, j) , (X, Y, Z) で表示する．(a) に示すように投影パターン $P_k(x)$ は投光系の x の関数であり、 y に伴う変化がない．また、計測物体における注目点 $Q(X, Y, Z)$ に投影されたパターンの強度は $P_k(x)$ となり、環境光の強度を $P_E(X, Y, Z)$ 、表面反射率を $R(X, Y, Z)$ とすると、カメラに撮影される観測パターン画像における注目点の画像強度 $I_k(k=0, 1, 2, 3)$ は(3-3)式で表すことができる．

$$I_k(i, j) = \{P_k(x) + P_E(X, Y, Z)\}R(X, Y, Z) \quad (3-3)$$

投光座標系 (x, y) 、カメラ座標系 (i, j) 及び世界座標系 (X, Y, Z) の間の相互関係は三角測量の方法により求められるが、本研究では画像の位相解析に基づき凹みを検出するため、その相互関係を求める必要がない．

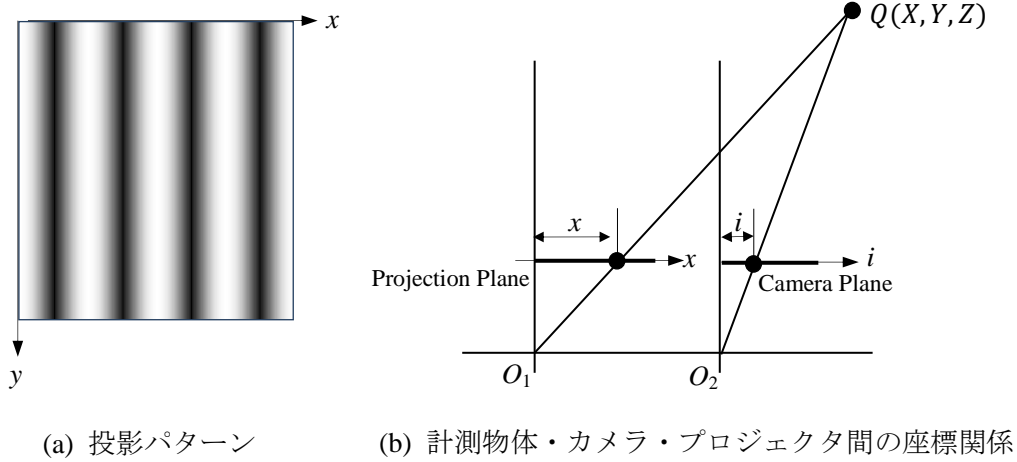


図 3-2 投影パターンと計測システムの座標関係

次に、観測パターン画像 $I_k(i, j)$ 4 枚を用いて位相シフト法により位相画像を生成する．本研究では多重位相差画像の生成のために，(3-4)~(3-7)式を用いて計算順序の異なる 4 枚の位相画像 $I'_k(i, j)$ を生成する．

$$I'_0(i, j) = C_3 \tan^{-1} \frac{I_1(i, j) - I_3(i, j)}{I_2(i, j) - I_0(i, j)} + C_4 \quad (3-4)$$

$$I'_1(i, j) = C_3 \tan^{-1} \frac{I_2(i, j) - I_0(i, j)}{I_3(i, j) - I_1(i, j)} + C_4 \quad (3-5)$$

$$I'_2(i, j) = C_3 \tan^{-1} \frac{I_3(i, j) - I_1(i, j)}{I_0(i, j) - I_2(i, j)} + C_4 \quad (3-6)$$

$$I'_3(i, j) = C_3 \tan^{-1} \frac{I_0(i, j) - I_2(i, j)}{I_1(i, j) - I_3(i, j)} + C_4 \quad (3-7)$$

但し， C_3 ， C_4 は位相画像の強度を調整するための定数である．例えば位相画像の解像度を n 階調で表現する場合， $\tan^{-1}x$ の値域が $-\pi \leq \tan^{-1}x < \pi$ であれば， $C_3=n/2\pi$ ， $C_4=n/2$ を設定する．ここで，(3-4)式と(3-6)式，および(3-5)式と(3-7)式は数学上では同じ式に見えるが，実際の計算においては，分母と分子の符号の正負を用いて計算結果の象限を定義することで， $\tan^{-1}x$ の値域を $-\pi/2 \leq \tan^{-1}x < \pi/2$ から $-\pi \leq \tan^{-1}x < \pi$ に拡張するため，実際の計算では異なる式となる．（計算結果は 3.2 節の図 3-6 を参照）

(3-3)式を(3-4)~(3-7)式に代入すると，(3-8)~(3-11)式になる．

$$I'_0(i, j) = C_3 \left(\omega x - \frac{\pi}{2} \right) + C_4 \quad (3-8)$$

$$I'_1(i, j) = C_3(\omega x) + C_4 \quad (3-9)$$

$$I'_2(i, j) = C_3 \left(\omega x + \frac{\pi}{2} \right) + C_4 \quad (3-10)$$

$$I'_3(i, j) = C_3(\omega x + \pi) + C_4 \quad (3-11)$$

投影パターンが 1 周期しかない場合、位相画像の強度と投影パターン強度は 1 対 1 の対応関係が確立できるので、対応付けが容易である。一方、多周期の場合、位相画像の強度および投影パターン強度が周期的に現れるため対応付けが難しくなるが、位相画像の位相変化の範囲が大きいので、1 周期の位相画像より奥行分解能の高い計測が可能である。また、観測パターン画像の強度変化が十分に得られない場合、多周期になるほど強度変化が大きくなるため有効である。本研究では画像強度変化を十分に確保し、奥行分解能を向上するため、投影パターンの周期を 5 に設定する。

この計算方法を用いることで、計測物体の表面反射率の影響を軽減でき、パターンが投影された領域のすべての画素の形状情報を取得できるため、微小凹みの形状を観測できる。投影パターンの位相と計算された位相画像の位相により対応付けを行うことで、三次元計測が可能である。また、位相画像には密な位相強度が格納されており、微小凹みの形状を観測することができる。

図 3-3 は赤色ドアの間接パターン光投影と位相シフト法による形状計測結果であり、(a)~(d)は初期位相が異なる 4 枚の投影パターン画像 (a: $\theta_0 = 0$, b: $\theta_1 = \frac{\pi}{2}$, c: $\theta_2 = \pi$, d: $\theta_3 = \frac{3\pi}{2}$), (e)~(h)はそれぞれの観測パターン画像 (e: $\theta_0 = 0$, f: $\theta_1 = \frac{\pi}{2}$, g: $\theta_2 = \pi$, h: $\theta_3 = \frac{3\pi}{2}$), (i)は計算された位相画像, (j)~(l)はそれぞれ平面・浅い凹み・深い凹みが存在する領域の位相画像の拡大表示である。なお、(i)の計算の際には、(e)~(h)のカラー画像を濃淡画像に変換してから位相計算を行った。(j)~(l)の画像から分かるように、平坦な部分では画像強度は均一的に変化するのに対し、凹みのある部分では画像強度が均一ではない変化が起こる。これで、強度変化の様子から凹みを検出することが可能になった³⁹⁾。

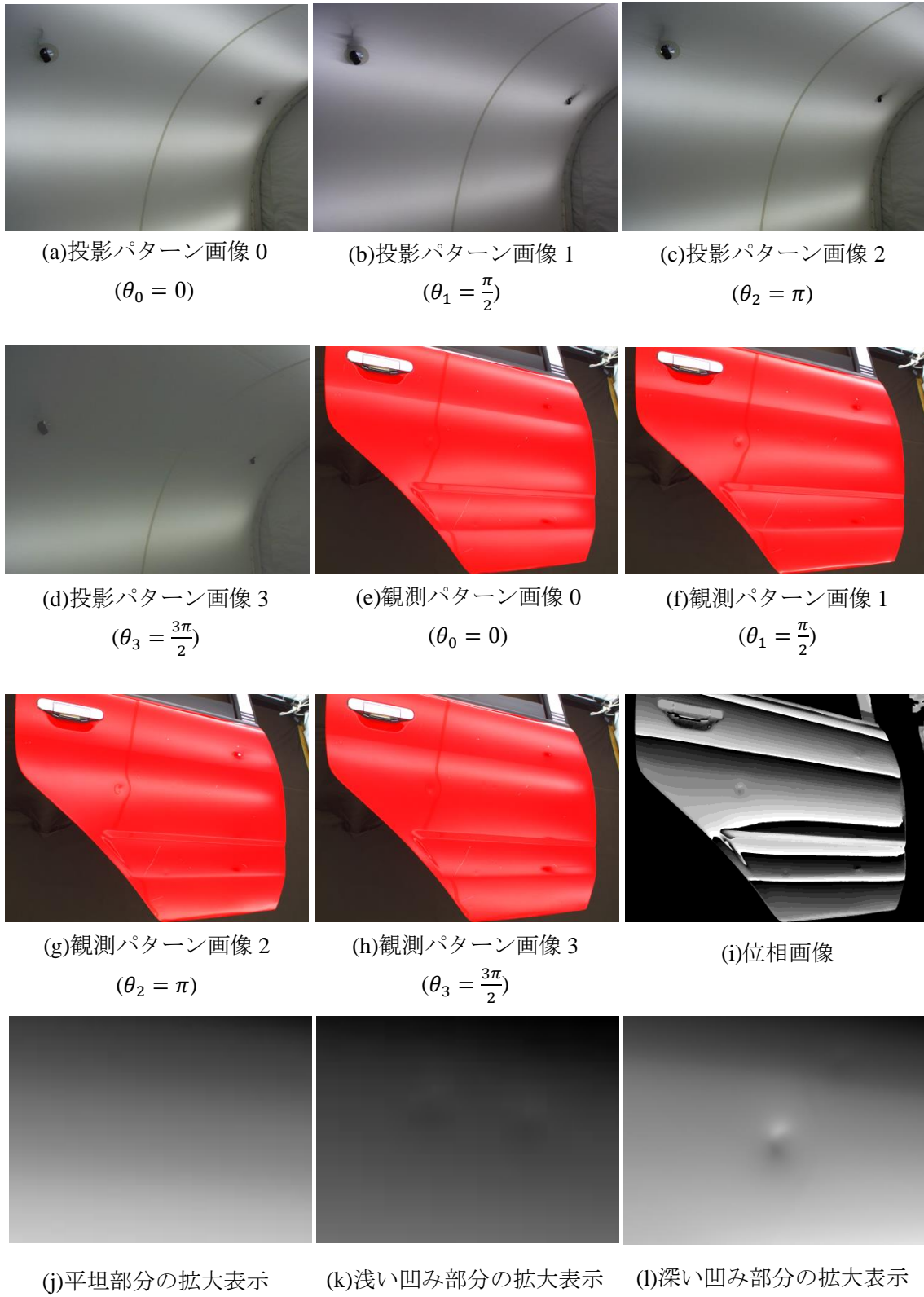


図 3-3 赤色ドアの間接パターン光投影計測手法による計測結果

(2) 位相接続の問題

前述のように，計測精度を向上するために，多周期の投影パターンの使用が望ましい．多周期の位相シフトパターンを投影した場合，(3-8)~(3-11)式より算出された位相画像には位相の周期による境界が発生し，形状計測には位相の接続が必要になる．図 3-4 はそのイメージ図である．(a)は 4 周期($T=1,2,3,4$)をもつ位相画像の位相分布，(b)は各周期の位相を接続した後の位相分布であり，(b)の縦の点線は(a)の各周期の境界線を示す．

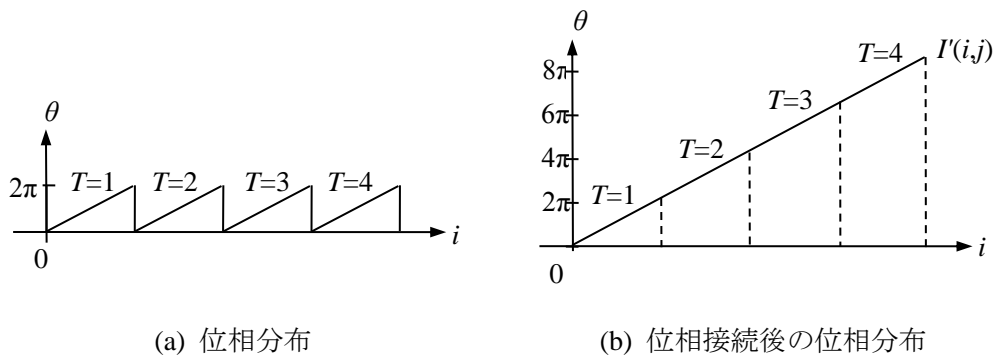


図 3-4 投影パターンの位相分布と位相接続後の位相分布

(a)においては，各周期の境界付近では，画像の強度値が 255（もしくは画像システムの最大値）か 0（もしくは画像システムの最小値）の近くにあるので，カメラの非線形の影響を受けやすい．また，図 3-4 では各周期の位相が正しく接続されているが，形状変化が激しい場所ではパターンの不連続が生じやすく，位相の接続が難しくなる⁴⁰⁾．

位相接続の従来手法として， x - y 軸接続や最小木探索やエネルギー最小化法等の 1 枚の位相画像から隣接画素間で位相差を観測して強度を補正する手法や，周期の異なるパターンを再度投影して位相境界のない部分で強度を補正する手法等があるが，前者は 1 枚の位相画像により位相接続が可能であるがノイズの影響により位相境界の検出が不安定になる問題があり，後者は周期の異なる観測パターン画像を取り直す必要があるため計測に時間がかかる．

そこで，本研究では位相接続を必要としない位相解析手法を提案する．具体的には，まず 4 枚の位相画像 $I_k(i, j)$ を用い多重位相差画像を生成する．その後，多重位相差画像の解析に基づいて凹みを検出する⁴¹⁾．

3.2 多重位相差画像を用いた凹み検出

(1) 多重位相差画像の生成

多重位相差画像を生成するために、まず(3-12)式のように位相画像の差分を取ることで 4 枚の位相差画像 $\Delta I'_k(i, j)$ を生成する。

$$\Delta I'_k(i, j) = I'_k(i - \Delta i, j) - I'_k(i, j) \quad (3-12)$$

ここで、 Δi は注目点からのスキップ量であり、定数である。

凹みの径によって位相変化の位置は変化するため、凹みの径に適したスキップ量 Δi を設定する必要がある。そこで、各サイズの凹みに対するスキップ量で差分を計算し、スキップ量を考慮して総和を取ることで、微小な凹みから大きな凹みまで対応できるように位相差画像を生成する。計算には(3-13)式を用いた。

$$\Delta I'_k(i, j) = \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{1}{2^{m-1}} \{ I'_k(i - 2^m, j) - I'_k(i, j) \} \right\}, \quad i \geq 2^M \quad (3-13)$$

但し、 m はスキップ量を表す係数、 M は凹み検出範囲である。 M の値は検出を想定している凹みの中で、最も大きな凹みの画像上の垂直画素数から設定する。本研究では $M=4$ を用いた。

次に 4 枚の位相差画像 $\Delta I'_k(i, j)$ から位相の境界を除去して重ね合わせた多重位相差画像 $D(i, j)$ を生成する。図 3-5 は多重位相差画像の生成の原理図である。

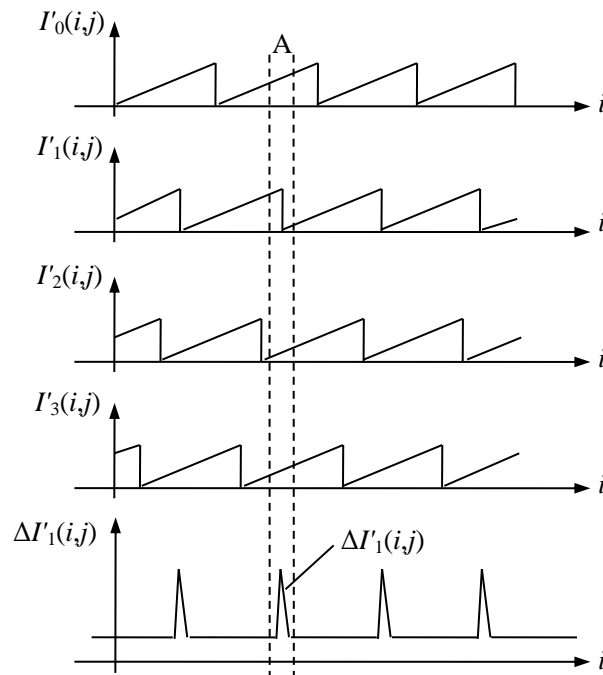


図 3-5 多重位相差画像の生成原理図

4枚の位相差画像に対し、任意の位置 (i, j) の付近に境界線が存在する画像は最大1枚しか存在しない。また、境界線のある画像の位相差 $\Delta I'_k(i, j)$ は必ず境界線のない画像の位相差より絶対値が大きい。4つの $\Delta I'_k(i, j)$ の中で値が一番大きい者を取り除けば境界線部分の影響を避けることができる。また、位相差画像にあるノイズなどの影響を軽減するために、メディアンフィルタを用いた残った三つの位相差 $\Delta I'_l(i, j)$ の中央値を用いて、多重位相差画像 $D(i, j)$ を(3-14)式により生成する。

$$D(i, j) = C_5 \text{median}\{\Delta I'_l(i, j)\} + C_6 \quad (3-14)$$

但し、 C_5 は増幅率であり、検出感度を高めたい場合に高い値を設定する。 C_6 は画像強度調整用の定数である。

例えば注目点が領域Aにある場合では、境界線のある $\Delta I'_1$ の値が最大なので $\Delta I'_1$ が外され、 $\Delta I'_0$ 、 $\Delta I'_2$ 、 $\Delta I'_3$ のいずれかの値が選ばれ多重位相差画像を作る。これで、多周期位相解析の際に境界線付近に存在する位相接続の問題を避けることができる。

図3-6は図3-3に示した赤ドアの位相画像と多重位相差画像の例であり、(a)～(d)はそれぞれ $k=0$ ($\theta_0 = 0$)、 $k=1$ ($\theta_1 = \frac{\pi}{2}$)、 $k=2$ ($\theta_2 = \pi$)、 $k=3$ ($\theta_3 = \frac{3\pi}{2}$)の際の位相画像、(e)は多重位相差画像である。図(e)からわかるように、凹みや形状変化以外には、均一な強度値があるため、位相の境界が除去できていることがわかる。

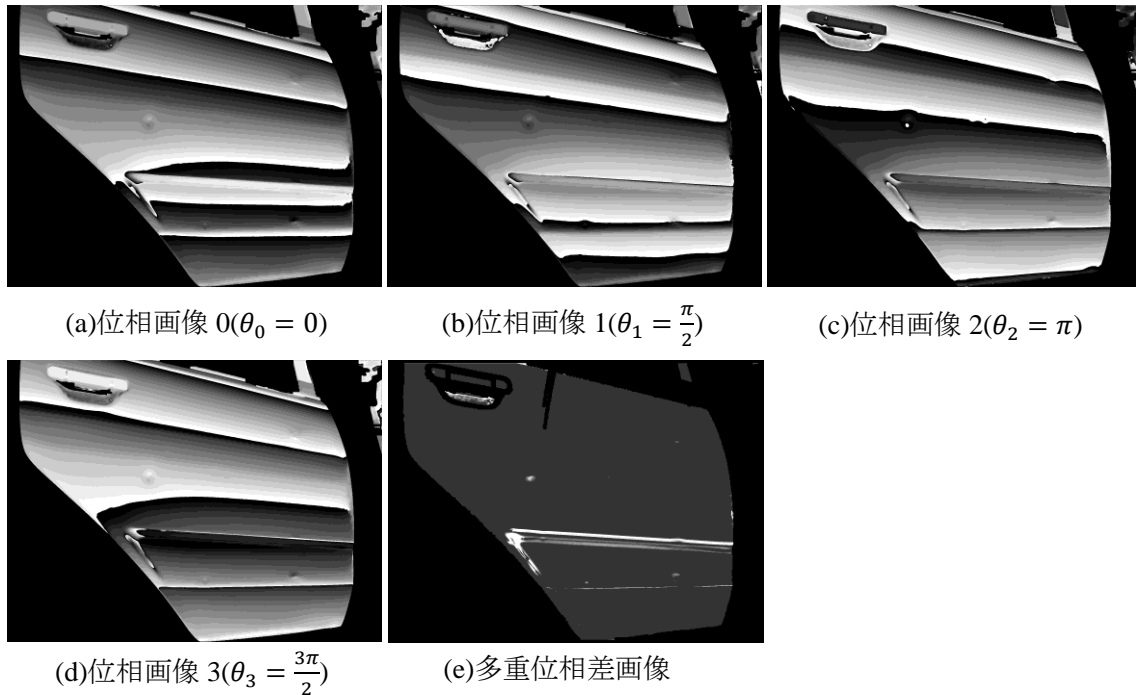


図 3-6 位相差画像と多重位相差画像

(2) 凹みの検出

形状変化のない平面では，投光座標系の Δx とカメラ座標系の Δi は正比例の関係を持つので，(3-15)式が成り立つ．

$$\Delta x = \delta \Delta i \quad (3-15)$$

ただし， δ は比例定数である．(3-15)式及び(3-8)～(3-11)式より，(3-14)式は下記のように書き換える．

$$D(i, j) = -C_5 C_3 \delta \omega \Delta i + C_6 = \text{定数} \quad (3-16)$$

即ち，形状変化のない平面では多重位相差画像の強度値が定数である．一方，凹みなど形状変化がある部分では，(3-15)式が成り立たないので，(3-16)式が成立せず，多重位相差画像の強度値の変化が生じる．これで，多重位相差画像の強度変化の有無より凹みを検出することができる．

次に図示に基づき説明する．計測物体の位相画像強度は位相シフトパターンが投影されている映り込み先の奥行き座標に比例し，その奥行き座標の変化は計測物体の表面の形状変化即ち表面形状の法線方向に依存する．図 3-7 は凹みの形状と法線方向及び多重位相差画像の強度値との対応関係のイメージ図であり，(a)は平面，(b)は浅い凹み，(c)は深い凹みの法線ベクトル分布イメージ，(d)は多重位相差画像における凹み領域の強度変化であり，同じサイズであれば凹みが深いほど法線方向が急激に変化し，注目画素とその近傍の位相差 $\Delta\theta/\Delta i$ が大きくなるため， $D(i, j)$ の強度値によって凹みの深さが推定できる．

本研究では，多重位相差画像の強度がある閾値を越える領域を凹み領域として検出し，この領域の二次元形状及びサイズを凹みの二次元形状及びサイズとする．また，閾値はキャリブレーションにより設定する．

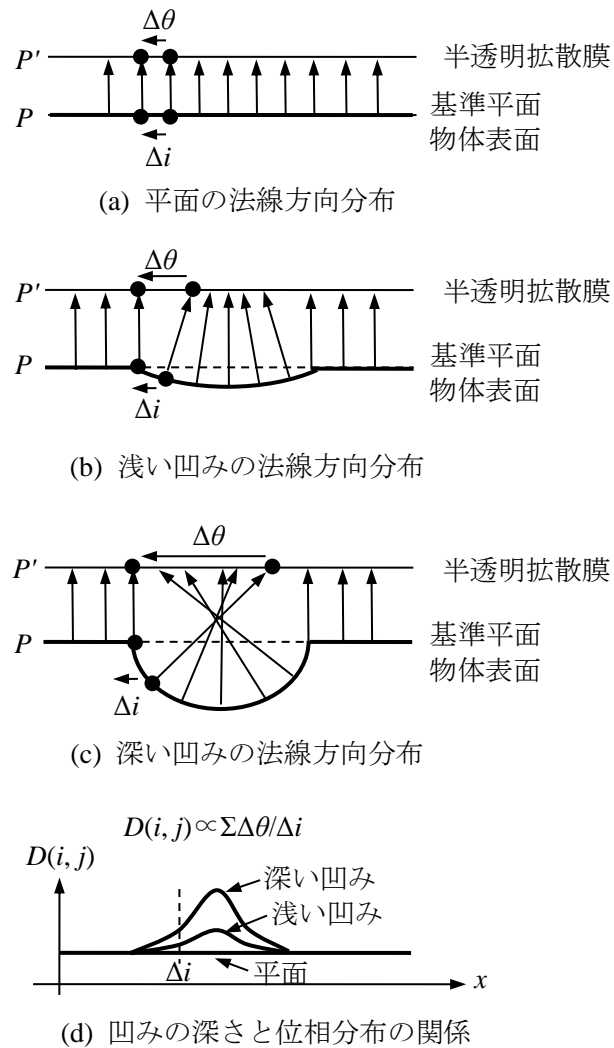


図 3-7 多重位相差画像の強度と法線方向の関係

(3) 凹みの深さ推定

位相シフト画像の計測点の強度値はその空間奥行き値に正比例するので、多重位相差画像の強度値は凹みの深さに正比例する。このため、本研究では多重位相差画像の強度値から凹みの深さを推定する。

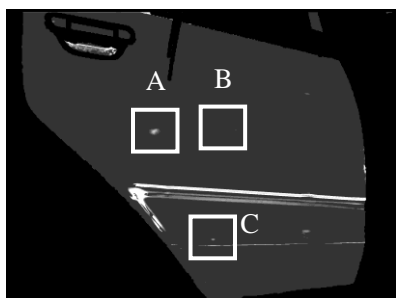
次に検出結果の画像に基づき、凹みの深さ推定の具体的な方法を説明する。

図 3-8 は多重位相差画像の解析例であり、(a)は図 3-6(e)に示された赤色ドアの多重位相差画像、(b), (c), (d)はそれぞれ(a)に示された多重位相差画像にある領域 A, B, C の拡大表示、(e), (f), (g), (h)はそれぞれ凹みが存在する a-a', b₁-b₁', b₂-b₂', c-c'ラインの強度分布である。

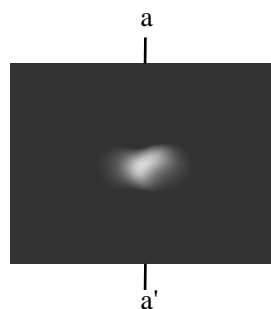
式(3-16)及び図 3-7 に基づき、画像の強度変化 d と強度変化の範囲 w を検出する。画像の凹みの深さは強度変化 d に比例し、凹みの直径は強度変化の範囲 w に比例する。そこで凹みの深さと直径はそれぞれ凹み領域の位相強度変化の大きさ d と範囲 w から推算する。

その結果、領域 A にある凹みは直径 22mm, 深さ 1.16mm(実寸:直径 20mm, 深さ 1.16mm), 領域 B にある凹み 1 は直径 10mm, 深さ 0.06mm (実寸:直径 9mm, 深さ 0.10mm), 凹み 2 は直径 11mm, 深さ 0.09mm (実寸:直径 9mm, 深さ 0.10mm), 領域 C にある凹みは直径 13mm, 深さ 0.52mm(実寸:直径 15mm, 深さ 0.48mm)である。直径の推定誤差は 2mm 以内, 深さの推定誤差は 0.05mm 以下であり実用可能と考えられる。

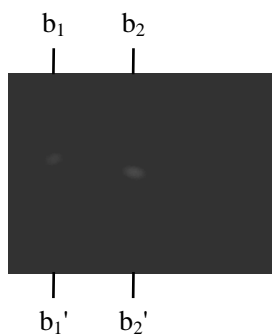
凹みの直径の推定誤差の要因としては、多重位相差画像における凹みの境界の抽出に誤差が存在することが考えられる。凹みの深さに関しては、線状 LED 光源により生じたパターン光は図 3-1 に示す理想的な正弦波分布になってないことが考えられる。



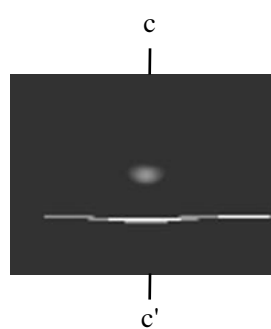
(a)多重位相差画像



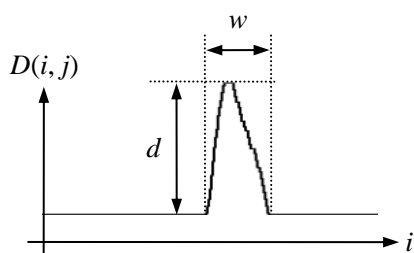
(b)領域 A の拡大画像



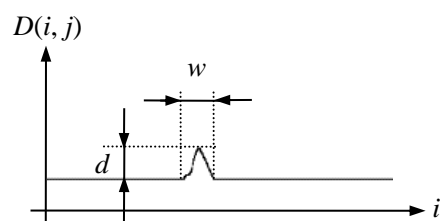
(c)領域 B の拡大画像



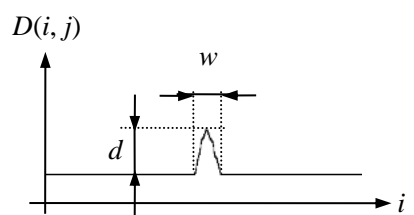
(d)領域 C の拡大画像



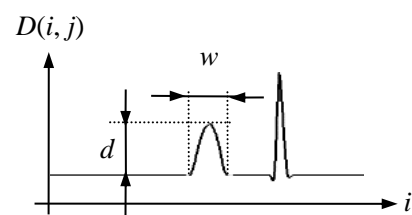
(e)a-a'ラインの強度分布



(f)b₁-b₁'ラインの強度分布



(g)b₂-b₂'ラインの強度分布



(h)c-c'ラインの強度分布

図 3-8 多重位相差画像に基づく凹みの検出とサイズ推定

3.3 凹み検出実験結果と考察

提案手法の有効性を検証するために、本研究では、異なるサイズと形状、色の中古自動車車体部品計 23 個への検証実験を行った。自動車リサイクル業界の要望により、直径 2mm 以上かつ深さ 0.08mm 以上の凹みを検出対象とした。図 3-9 は上記 23 個の検証実験対象物



図 3-9 実験に用いた中古自動車車体部品

体の画像であり、表 3-1 はその大きさと特徴である。

実験計測システムは半透明拡散膜、カメラ、直線状 LED 光源及びコンピュータより構成される。半透明拡散膜はトンネルのように設置され、カメラは 2048×1536 ピクセルの USB2.0 カメラであり、画素サイズは 2.2μm×2.2μm、部品の形状を考慮して部品全体を一度に撮影するために、トンネルの左前、右前、左後、右後に計 4 台設置し、サイズが小さい物体にはカメラ 1 台、大きい物体には最大 4 台で撮影を行う。検出結果は、直径 2mm 以上深さ 0.08mm 以上の凹み計 38 個はすべて検出され、未検出と過検出はゼロである。

もっと細かく検出結果を評価するために、本論文では代表的な色と形状及びサイズを持つ赤色のドア(サイズ：900×1200mm)、白色のフェンダー(サイズ：900×800mm)、緑色のボンネット(サイズ：1400×1400mm)、銀色のフェンダー(サイズ：700×500mm)、及び黒色のフェンダー(サイズ：1000×1000mm)の 5 種類の計測実験結果の詳細を紹介する。

図 3-10、図 3-11、図 3-12、図 3-13、図 3-14 は 5 種類のサンプルの計測実験結果画像である。ドアとフェンダーはサイズが小さいのでカメラ 1 台、ボンネットはカメラ 4 台を用いて撮影する。現場の要求により、検出した凹みの深さの真値を異なるマークで表しており、○は深さ 0.08mm 未満、□は 0.08mm 以上 0.15mm 未満、△は 0.15mm 以上である。直径の真値はノギスを用いて凹みの長径を測定した。その際、凹みの境界線をはっきりするために、棒状の蛍光灯等の光源を映り込ませながら凹みの境界の位置を確認した。深さの真値は凹みを横断するようにプレート当てて、厚みが既知のプレートを凹みとプレートの隙間に通すことで測定した。

表 3-1 検証実験対象物体の大きさと特徴

部品の種類	色	サイズ (mm)	奥行変化 (mm)	形状	光沢
緑色ボンネット	緑	1,400×1,400	約 100mm	緩やかな変化のある面状	+++
黒色バンパー	黒	1,700×400	約 350mm	端部に急激な形状変化	+
黒色トランク	黒	1,400×800	約 200mm	中央に折れ目のある平面	++
白色ボンネット	白	1,300×600	約 100mm	上部に丸みのある面状	+
赤色ドア	赤	900×1,200	約 50mm	緩やかな変化のある面状	+++
赤色フェンダー	赤	800×900	約 150mm	中程度の変化がある面状	+++
薄緑色ボンネット	薄緑	1,100×600	約 100mm	上部に丸みのある面状	++
黄色フェンダー	黄	800×900	約 100mm	中程度の変化がある面状	+++
白色フェンダー	白	900×800	約 100mm	上部に丸みのある面状	++
白色ドア	白	1,000×1,400	約 100mm	緩やかな変化のある面状	++
黄色ボンネット	黄	1,100×800	約 50mm	緩やかな変化のある面状	++

黒色フェンダー	黒	400×600	約 100mm	上部に丸みのある面状	+++
銀色フェンダー	銀	700×500	約 50mm	上部に丸みのある面状	+++
白リアゲート	白	1,400×1,200	約 150mm	端部に急激な形状変化	+
黄色バンパー	黄	1,600×400	約 300mm	端部に急激な形状変化	+++
白色フェンダー	白	900×1,000	約 100mm	緩やかな形状のある面状	+++
緑色ボンネット	緑	1,500×1,400	約 200mm	上部に丸みのある面状	+++
黒色ボンネット	黒	1,500×1,400	約 150mm	緩やかな形状のある面状	+++
青色ドア(ツートン)	青+銀	1,300×1,200	約 100mm	緩やかな形状のある面状	+++
白色フェンダー	白	400×600	約 100mm	上部に丸みのある面状	+++
黒色ドア	黒	1,100×1,200	約 50mm	緩やかな変化のある面状	+++
黒色フェンダー	黒	1,000×1,000	約 100mm	中程度の変化のある面状	+++
白色ドア	白	900×1,300	約 100mm	緩やかな変化のある面状	+++

+++：非常に強い

++：強い

＋：比較的に強い

続いて、5種類のサンプルの計測の詳細を述べる。

(1) 赤色ドアの計測実験

赤色ドアのサイズは 900mm×1200mm，奥行き変化は約 50mm 程度であり，緩やかな形状変化を持つ面状の物体であり，物体表面にはドアノブと水平方向のプレスが 4 箇所存在する．また光沢が強い．凹みは 9 箇所あり，0.15mm 以上の凹みが 3 個，0.08mm 以上の凹みが 2 個，0.08mm 未満の凹みが 4 個存在する．写真撮影は 1 台のカメラにより行い，写真撮影から凹み検出結果を出力するまでの計測時間は 45 秒である．凹み検出結果は表 3-2 に示し，画像は図 3-10 に示す．(a)はオリジナル画像，(b)は計測対象とする部分の間接照明画像であり，映り込みやハイライトが無くなり，画像強度分布が均一な写真が撮影されていることが分かる．(c)~(f)はそれぞれ位相が異なるパターン光を投影して撮影した観測パターン画像であり，投影パターンの位相は $\pi/2$ ずつ変化している．(g)~(j)は(c)~(f)を計算順序の異なる位相シフト法により処理して得られた 4 枚の位相画像であり，画像から位相の変化がはっきりと分かる．(k)は多重位相差画像であり，凹みやプレスライン等の形状変化の激しいところは色が明るくなり，他のところは均一な灰色になる．(l)は検出結果の画像であり，0.08mm 以上の凹み 5 個はすべて検出できた．0.08mm 未満の凹み 4 個はいずれも検出できなかった．原因として，4 個の凹みはいずれも凹みの深さが 0.05mm 程度であり，凹みの深さが十分に浅いため検出できなかった．

(2) 白色フェンダーの計測実験

白色フェンダーのサイズは 900mm×800mm, 奥行き変化は約 100mm 程度であり, 上部に丸みのある緩やかな形状変化を持つ面状の物体であり, 物体表面には水平方向のプレスが 1 箇所存在する. 凹みは 2 箇所あり, 0.15mm 以上の凹みが 1 個, 0.08mm 未満の凹みが 1 個存在する. 写真撮影は 1 台のカメラにより行い, 写真撮影から凹み検出結果を出力するまでの計測時間は 41 秒である. 凹み検出結果は表 3-2 に示し, 画像は図 3-11 に示す. (a)はオリジナル画像, (b)は間接照明画像, (c)~(f)は観測パターン画像であり, 投影パターンの位相は $\pi/2$ ずつ変化している. また白色の計測物体は投影パターンの強度変化がほとんどわからないため, 他の色の計測物体に比べて計測が難しい. (g)~(j)は位相画像, (k)は多重位相差画像である. 提案手法により位相がはっきりわかるようになり, 提案手法の有効性を実証した. (l)は検出結果の画像であり, 0.15mm 以上の凹み 1 個を検出できた. 0.08mm 未満の凹み 1 個は検出できなかった. 原因として, 凹みの直径や深さは十分大きい, 白色の計測物体は他の色と比べて画像にノイズが多く, ノイズを除去しながら微小凹みの位相変化を検出できなかったことが挙げられる.

(3) 緑色ボンネットの計測実験

緑色ボンネットのサイズは 1400mm×1400mm, 奥行き変化は約 100mm 程度であり, 緩やかな形状変化を持つ面状の物体であり, 物体表面には垂直方向のプレスが 2 箇所存在する. 凹みはボンネット全体で 10 箇所あり, 0.08mm 以上の凹みが 3 個, 0.08mm 未満の凹みが 7 個存在する. 写真撮影は 4 台のカメラにより行い, 写真撮影から凹み検出結果を出力するまでの計測時間は 3 分 50 秒である. 凹み検出結果は表 3-2 に示し, 画像は図 3-12 に示す. (a)はオリジナル画像, (b)は間接照明画像, (c)~(f)は観測パターン画像, (g)~(j)は位相画像, (k)は多重位相差画像である. 中央付近にある縦のプレス痕の処には激しい位相変化があることが画像から分かる. (l)は検出結果の画像であり, 0.08mm 以上の凹み 3 個をすべて検出でき, 0.08mm 未満の凹みを 7 個中 3 個検出できた. 検出できた凹みはその中でも深さ 0.06mm~0.07mm の大きい凹み 3 個が検出でき, 他の深さ 0.04mm~0.05mm の深さの小さい凹み 4 個が検出できなかった.

(4) 銀色フェンダーの計測実験

銀色フェンダーのサイズは 700mm×500mm, 奥行き変化は約 50mm 程度であり, 上部に丸みのある緩やかな形状変化を持つ面状の物体であり, 物体表面には水平方向のプレスが 2 箇所存在する. 凹みは 4 箇所あり, 0.15mm 以上の凹みが 1 個, 0.08mm 以上の凹みが 2 個, 0.08mm 未満の凹みが 1 個存在する. 写真撮影は 1 台のカメラにより行い, 写真撮影から凹み検出結果を出力するまでの計測時間は 39 秒である. 凹み検出結果は表 3-2 に示し, 画像は図 3-13 に示す. (a)はオリジナル画像, (b)は間接照明画像, (c)~(f)は観測パターン画像であり, 投影パターンの位相は $\pi/2$ ずつ変化している. (g)~(j)は位相画像, (k)は多重位相差画像である. 銀色の計測物体は白色と同様にパターンの観測が難しいが, 白色と同様に位相

がはっきりわかるようになっている。(l)は検出結果の画像であり、0.08mm 以上の凹み 3 個をすべて検出できた。0.08mm 未満の凹み 1 個は検出できなかった。原因として、凹みの深さは 0.07mm と十分に大きいですが、白色と同様に位相にノイズが多く、ノイズを除去しながら微小凹みの位相変化を検出できなかった。

(5) 黒色フェンダーの計測実験

黒色フェンダーのサイズは 1000mm×1000mm、奥行き変化は約 100mm 程度であり、全体が中程度に丸みを持つ面状の物体であり、物体表面には曲線のプレスが 2 箇所存在する。凹みは 3 箇所あり、0.08mm 以上の凹みが 2 個、0.08mm 未満の凹みが 1 個存在する。写真撮影は 1 台のカメラにより行い、写真撮影から凹み検出結果を出力するまでの計測時間は 1 分 18 秒である。凹み検出結果は表 3-2 に示し、画像は図 3-14 に示す。(a)はオリジナル画像、(b)は間接照明画像、(c)~(f)は観測パターン画像であり、投影パターンの位相は $\pi/2$ ずつ変化している。(g)~(j)は位相画像、(k)は多重位相差画像である。黒色フェンダーは他の部品に比べて曲面やプレス痕が多く、複雑な位相分布となっている。(l)は検出結果の画像であり、0.08mm 以上の凹み 2 個をすべて検出できた。0.08 未満の凹み 1 個は検出できなかった。原因として、凹みの深さが 0.05mm 程度の浅い凹みであり、また曲面部分にある凹みのため、凹みの形状変化が強調されなかったことが挙げられる。

上記の実計測結果の説明から、提案手法は異なる色、形状及び表面反射特性を持つ自動車車体部品の凹み検出に実用できることが分かる。

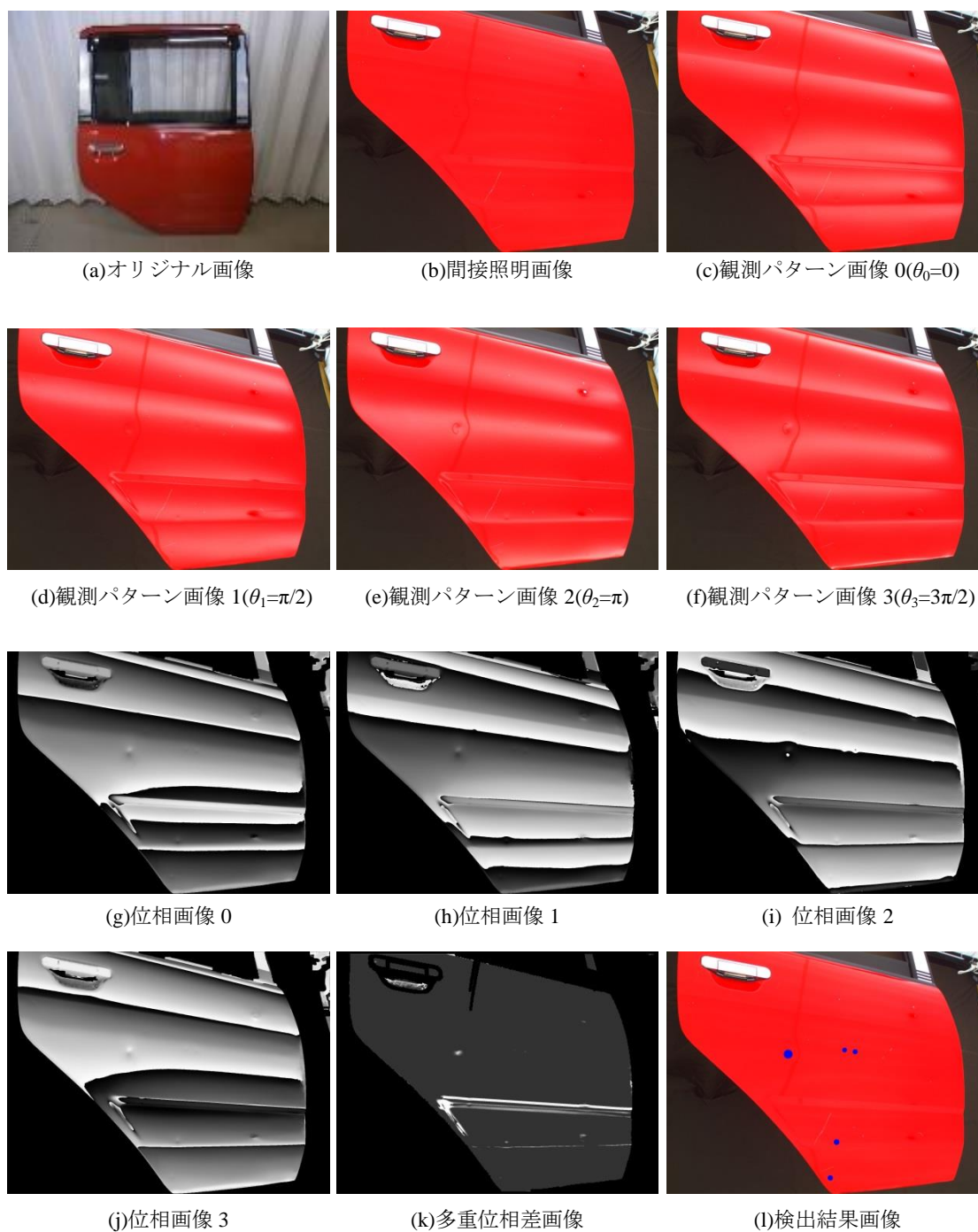


図 3-10 凹み検出実験結果(赤色ドア)

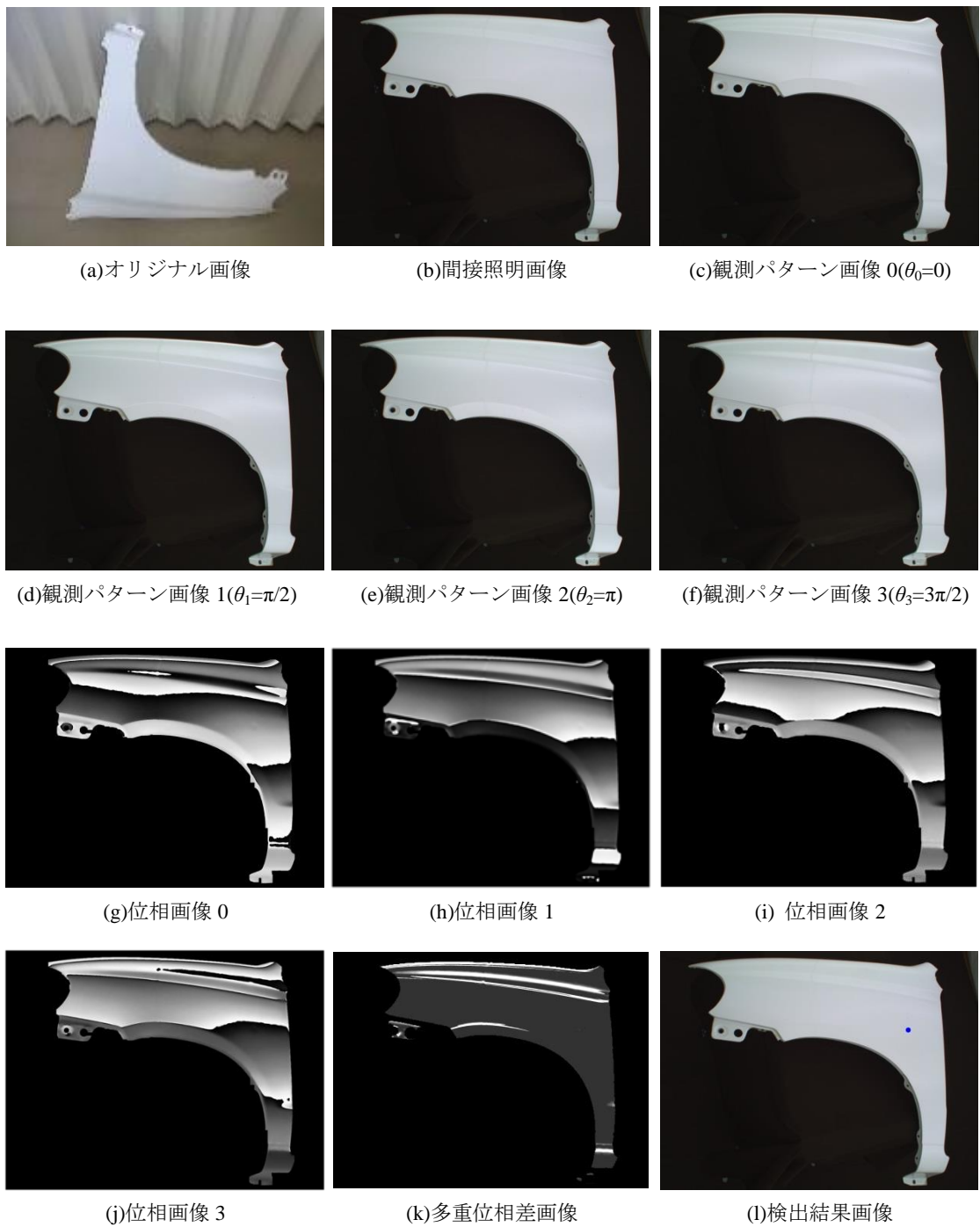


図 3-11 凹み検出実験結果(白色フェンダー)

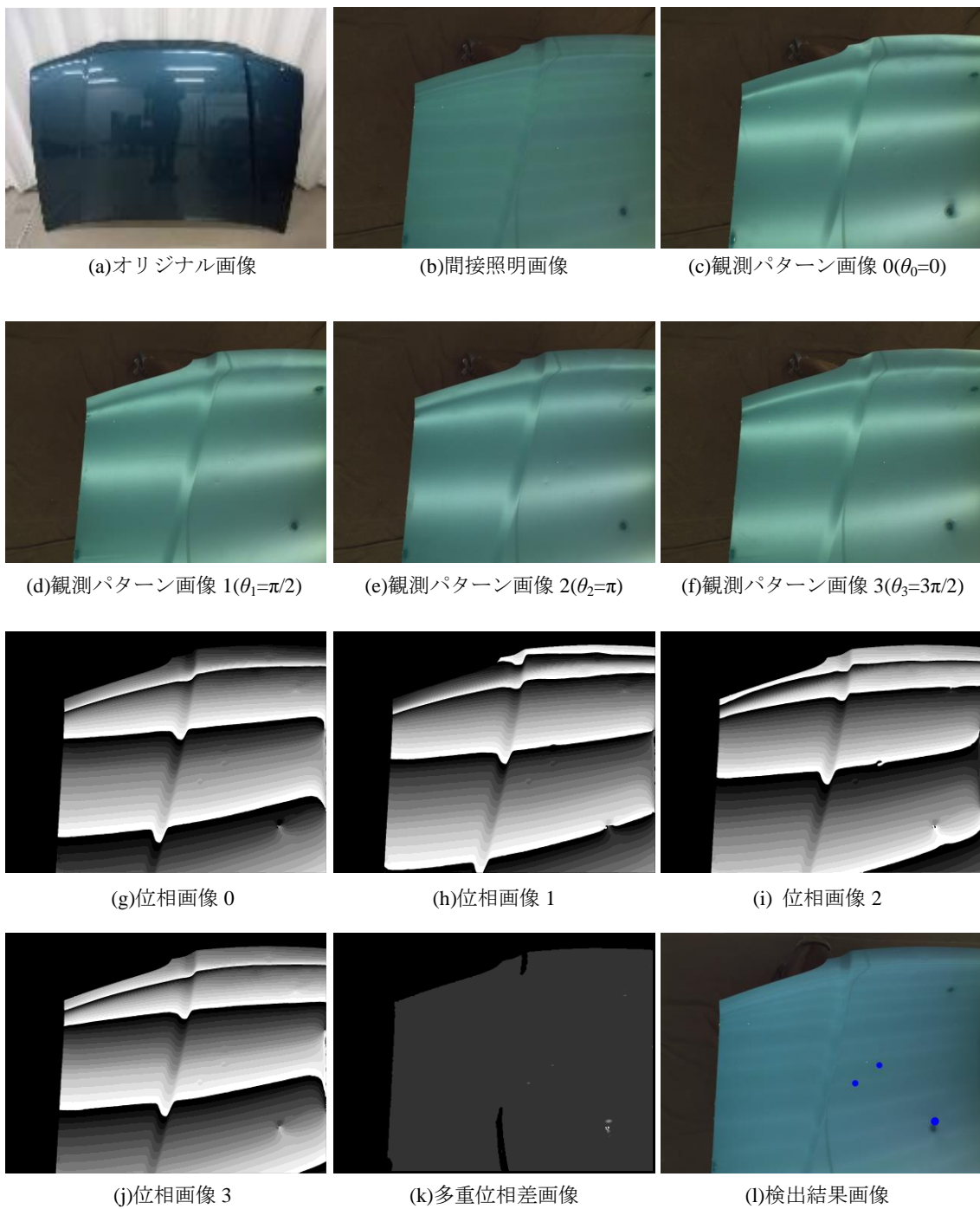


図 3-12 凹み検出実験結果(緑色ボンネット)

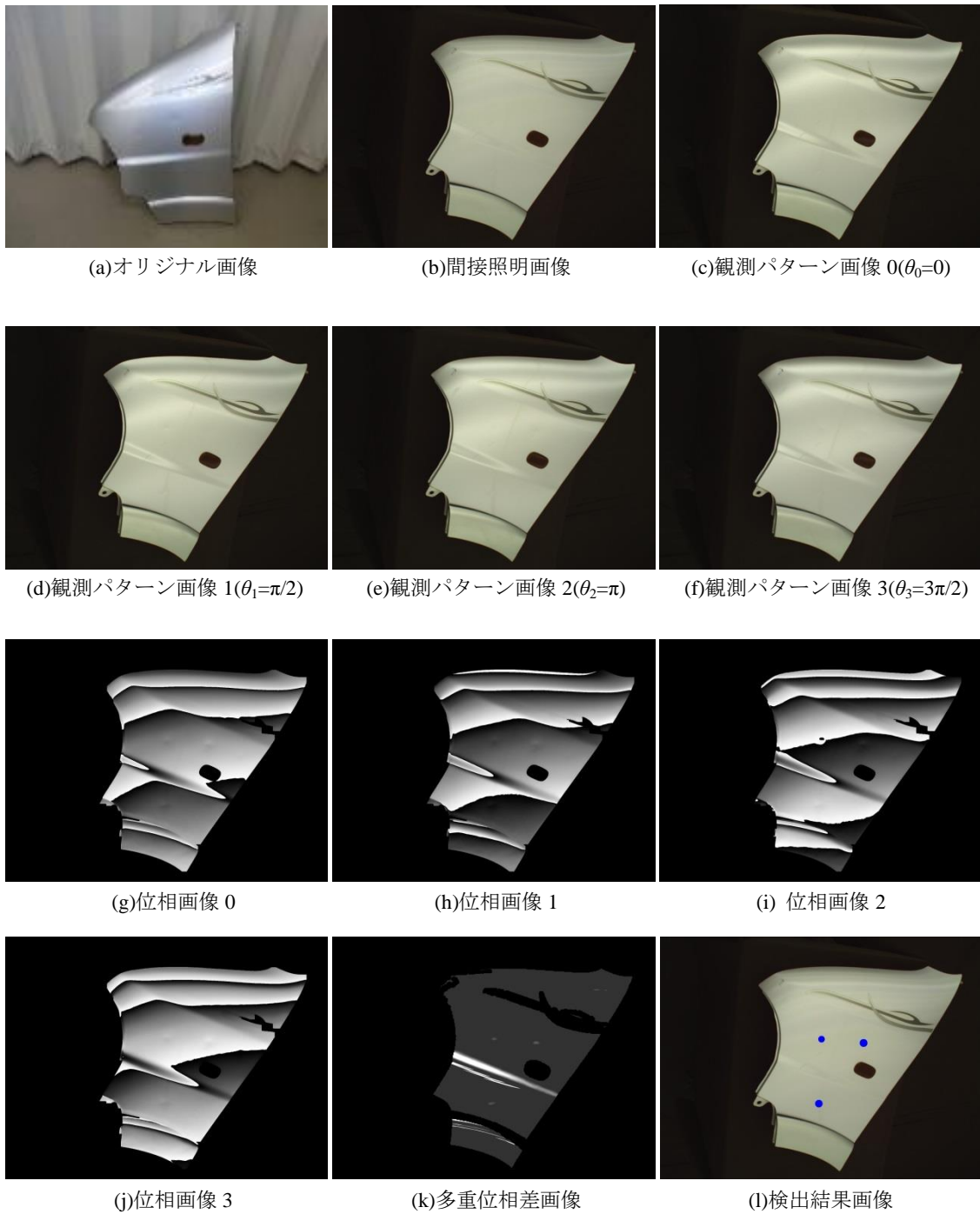


図 3-13 凹み検出実験結果(銀色フェンダー)

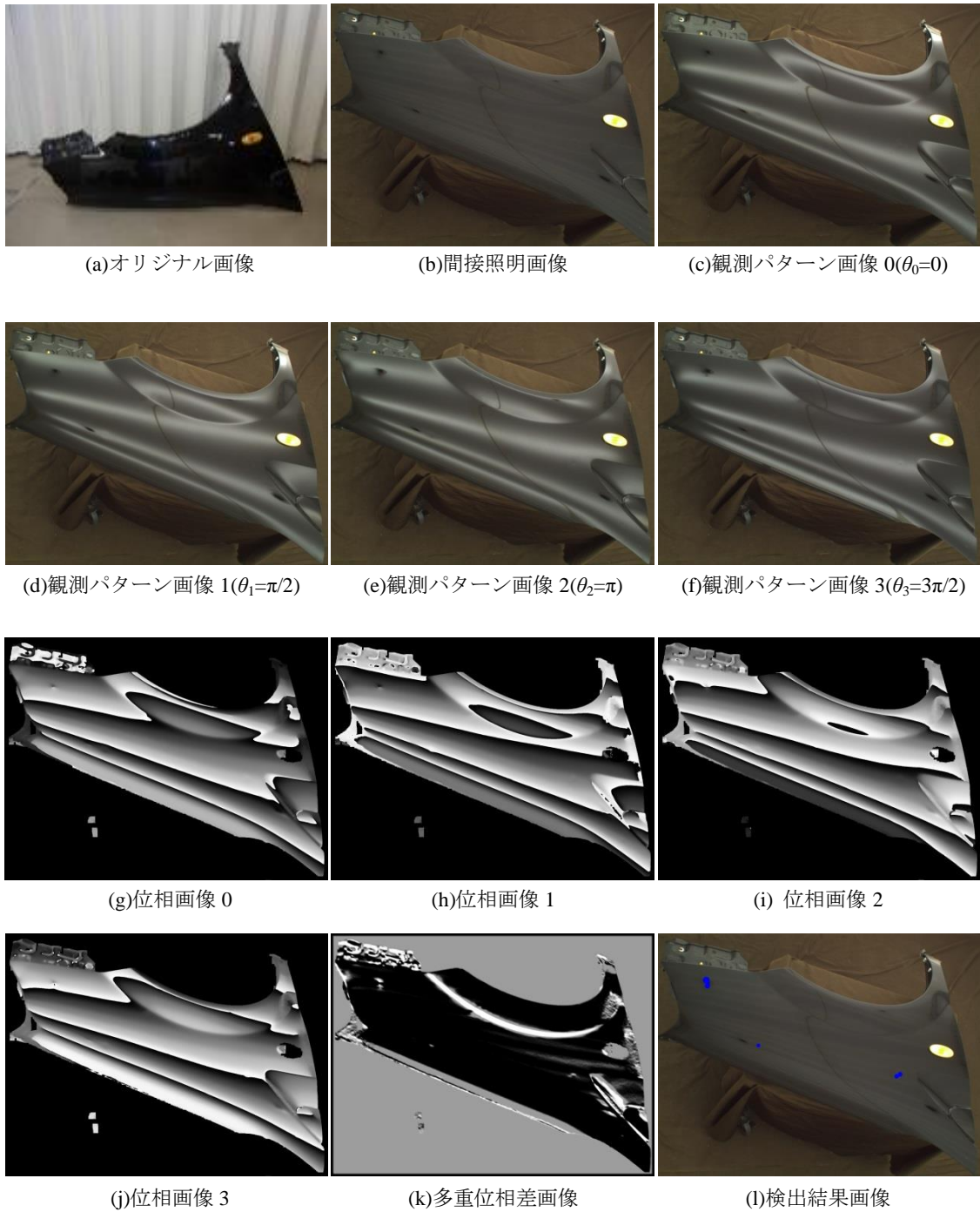


図 3-14 凹み検出実験結果(黒色フェンダー)

表 3-2 は凹み検出実験結果のまとめである。

表 3-2 凹み検出実験結果のまとめ

計測対象	カメラ数	計測時間	凹み深さ	正常検出	未検出	誤検出	検出率
(1)赤色 ドア	1	45s	0.08mm 未満	0	4	0	0%
			0.08mm 以上 0.15mm 未満	2	0	0	100%
			0.15mm 以上	3	0	0	100%
(2)白色 フェンダー	1	41s	0.08mm 未満	0	1	0	0%
			0.08mm 以上 0.15mm 未満	0	0	0	-
			0.15mm 以上	1	0	0	100%
(3)緑色 ボンネット	4	3m50s	0.08mm 未満	3	4	0	43%
			0.08mm 以上 0.15mm 未満	3	0	0	100%
			0.15mm 以上	0	0	0	-
(4)銀色 フェンダー	1	39s	0.08mm 未満	0	1	0	0%
			0.08mm 以上 0.15mm 未満	2	0	0	100%
			0.15mm 以上	1	0	0	100%
(5)黒色 フェンダー	1	1m18s	0.08mm 未満	0	1	0	0%
			0.08mm 以上 0.15mm 未満	2	0	0	100%
			0.15mm 以上	0	0	0	-

本研究では自動車リサイクル業界のニーズにより、凹みの深さの検出基準は 0.08mm（高級車用）と 0.15mm（一般車用）の二つを設定した。深さ 0.08mm 以上の凹みの検出率は 100% であり、提案手法は高級車にも適用できることが分かる。深さ 0.08mm 未満の凹みの検出率は 21% である。どのレベルの深さの検出基準でも、誤検出がゼロである。但し、物体そのものの形状や物体境界等に挟まれた凹みは検出の対象外とする。浅い凹みの検出率が低い原因として、凹み検出のための多重位相差画像の閾値設定が困難であることが考えられる。閾値を低く設定すれば凹みが検出し易くなるが、照明むら等のノイズが凹みとして誤検出される可能性も高くなる。なお、写真撮影から凹み検出し表示するまでの検査時間は 1 台カメラでは 1 分以内、4 台カメラでは 4 分以内となった。手動検査では 5 分から 10 分程度かかるため、提案手法の検査時間は現状の半分以上に短縮することができた。

本章では、リユース自動車車体部品表面の凹みを自動検査するために、間接パターン光投影計測手法、位相シフト手法に基づく多重位相差画像による凹み検出とサイズ推定手法を提案した。提案手法の使用により、鏡面反射を持つ様々な色の車体部品の形状計測、強度分解能の高い多重位相差画像を用いた微小凹みの検出を実現した。実験により直径 2mm 以上かつ深さ 0.08mm 以上の凹みを 100% 検出できた。

提案手法では形状変化に基づき凹みを検出するため、車体部品のデザイン上の形状変化

を凹みとして誤検出することがある．特にデザイン上の形状変化の部分にある凹みの検出が困難である．今回の研究ではこれらを検出対象外としたが，今後デザイン上の形状変化と凹みによる形状変化の特徴を解析し，その相違から両者を区別する研究を行う予定である．

また，提案手法では深さ 0.08mm 以下の凹みの検出精度は低く，中古自動車車体部品以外の高精度計測に適用しにくい問題が考えられる．これは今後の研究課題である．

第4章 修正バンドパスフィルタに基づくキズ検出

自動車車体部品の品質検査においてキズの検出も凹み検出と同様に重要な問題である。キズの検出手法には従来から様々な手法が提案されており、それらについて検証するとともに、リユース車体部品に有効なキズ検出手法を提案する。

本研究では、まず検出処理の安定化のために全照明パターンを投影することで均一な照明の画像を撮影する。次に、アーチファクト問題を回避するために、本研究では物体抽出と背景塗りつぶし処理を行う。その後、キズ検出フィルタにより微小キズを検出する。キズ検出フィルタには、画像全体の特徴を考慮するために周波数解析を行い、リングングエフェクト等の問題を解決するために改良バンドパスフィルタを提案する。

本章ではまず画像の撮影方法とキズ検出処理の原理について述べ、次に具体的な処理について述べる。最後にキズ検出実験を述べ、実験結果について考察する。

4.1 画像処理に基づくキズ検出の一般方法と問題点

自動車車体部品のキズの種類は主にコーティング上の微小キズ、塗装面にかかったキズ、金属面にかかった大きなキズがある。一般的に、自動車部品の表面には防錆、塗装、表面保護や反射面形成用のコーティング加工が多層的に行われており、キズの深さによりキズの色特徴が大きく変化する。下記に大まかなキズの深さとその特徴について述べる。

(1) コーティング上のキズ

洗車や木の葉等の擦れにより発生する非常に微小なキズで、爪で引っかからない程度の深さのキズである。キズの状態によるが適切な角度以外では目視が難しい。しかし、リユース車体部品の検査を行う際には、美化によってリユース車体部品表面が研磨されるため、それらのキズは除去されやすい。

(2) 塗装面にかかるキズ

走行中の飛び石や小枝等の擦れにより発生する微小なキズで、爪に引っかかる程度の深さのキズである。目視自体はほとんどできるが、キズの面積が小さい場合には検出に時間がかかる。修理する際にはタッチアップペンや塗装等の表面加工を行う。

(3) 金属面にかかるキズ

コンクリートやレンガ等の擦れにより発生する比較的大きなキズで、経年により錆などが発生する。キズそのものが大きいため目視で観測でき、大きすぎるキズがある場合や錆の状態によっては、塗装だけでなく研磨等を行う。また、衝突等によってキズが発生している場合には、部品全体の歪みの修復やリサイクル等を行う。

上記の特徴から、塗装面にかかるキズを優先して検出する必要がある。それよりも小さなキズは美化の際に除去される場合が多く、それよりも大きなキズは研磨によって周囲のキズがまとめて除去されるためである。

一方、自動車車体部品のリユースにおいて、下記の理由によりキズは凹みに比べて検出の優先順位が低いといえる。

(1) キズの修理にはタッチアップペンや塗装等の表面処理を行うのに対し、凹みの修理には板金塗装等の研磨処理を行うため、凹み周辺のキズは除去される。

(2) コーティング上の微小なキズは車体部品の美化によって除去されることが多い。

(3) 大きなキズは人の目からも検出が容易で、大きなキズがある場合、それを内包する大きな領域で研磨処理等を行うため、その周辺のキズは除去される。

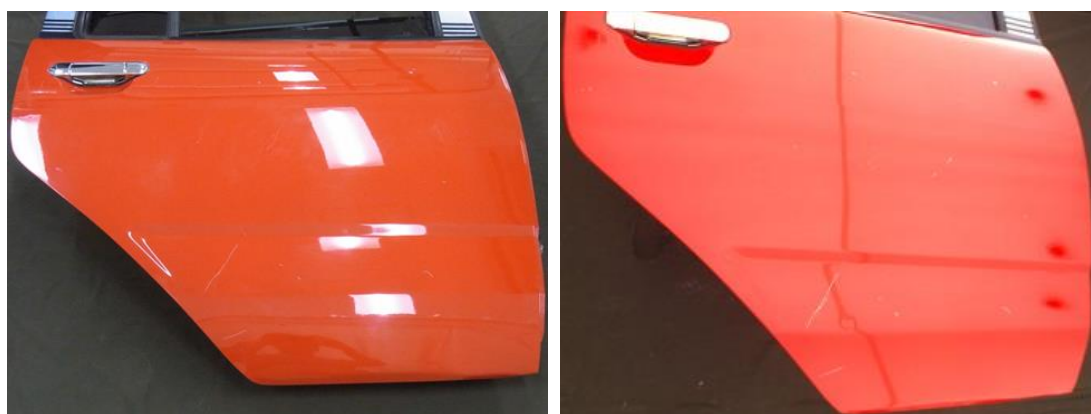
上記の理由から、本研究では塗装面にかかるキズに着目する。そのような場合、塗装面

にかかるキズは画像における色変化があり，また塗装面にかからないキズに比べて可視できる角度の制限が小さい．そのため，画像技術を用いてキズを検出できる可能性がある．

キズ検出を行うためには，まずキズとキズ以外の色差がはっきりわかる画像を撮影し，その後撮影した画像から計測物体の色強度を解析してキズ検出を行う必要がある．

従来手法では微小欠陥の検出のために，レーザー光を用いた方法が提案されている^{42) 43)}．⁴⁴⁾ レーザー光反射パターンの画像解析により，キズ等微小欠陥の検出が可能であるが，レーザー光を走査する必要があるので検査には時間がかかる．またレーザー光を用いているので，安全管理体制を整備する必要がある．

まず，キズ検出に有効な画像を撮影する方法について述べる．キズの検出を行う場合には，そのキズとキズでない領域の色特徴を明確に分ける必要があるため，均一な照明環境で画像を撮影することが望ましい．そのため，2章で述べた凹み検出用の画像では，位相シフトパターンによって部品表面の明るさが不均一に撮影されているため，微小なキズの形状を計測することが困難である．そこで本研究では間接パターン光投影計測システムの照明をすべて点灯させることで全照明パターンを投影し，全照明画像を撮影することで均一な明るさの画像を撮影する．全照明画像を撮影することにより，キズ以外の鏡面反射の強い領域は均一な明るさの画像になるため，キズ特徴が強調される．図4-1は赤色ドアの観測パターン画像である．間接パターン光投影手法により映り込みが軽減され，全照明パターンにより明るさを確保することができる．



(a) 一般照明画像

(b) 間接照明画像

図 4-1 赤色ドアの全照明画像

次に，間接照明画像に対する既存技術によるキズ検出方法とその問題点を述べる．

(1) 閾値二値化処理によるキズ検出

キズ検出のもっとも単純な方法として閾値二値化による手法が挙げられる．閾値二値化は(4-1)式で表すことができる．但し，入力画像 I ，出力画像 I' ，注目画素の座標 (i, j) ，キズかどうかの判定を *High* または *Low* で表している．

$$I'(i, j) = \begin{cases} \text{True}, & I(i, j) \geq th \\ \text{False}, & I(i, j) < th \end{cases} \quad (4-1)$$

注目画素の強度 $I(i, j)$ が設定した閾値 th よりも大きい場合にはキズ(True)，そうでない場合にはキズではない(False)と判定する手法である．しかし，閾値二値化による手法は，注目画素周辺の強度情報を利用しないため，ノイズや模様等，明るさが近い強度の画素をすべて検出する問題がある．また，キズとキズでない領域の画素強度が明確に判別できる必要があり，実際のキズはその深さや形によって色むらがあるため，安定してキズ検出を行うことが困難である．

(2) 色特徴抽出によるキズ検出

色特徴抽出によるキズ検出では，キズの部分の色が元々の塗装の色に比べて変化していることを利用し，本来の物体の色以外の色を抽出することでキズを検出する．色抽出によるキズ検出は閾値二値化処理と同様に，閾値を RGB それぞれに適用することで特定の色を抽出したり除去したりする．しかし RGB 色空間を用いる方法は，明るさの変化に対して $R \cdot G \cdot B$ すべての色が変わるため，色相や彩度を考慮して閾値を調整することが難しい．そのため YUV や HSV 等の色変換を用いることで明度や色相等を 1 つの値で判断できるようにし，その値を使用して色抽出を行う方法がある．しかし，色抽出により安定してキズを検出するためには，画像の任意の位置でキズとキズ以外の領域の色特徴を明確に判別できる必要があり，画像に色むらがある場合，抽出のための基準値設定は非常に困難である．

(3) 特徴フィルタによるキズ検出

次に画像の空間領域フィルタによる手法がある．フィルタによる手法は，キズの検出に有効な形状のフィルタを生成し，画像を走査して各画素にそのフィルタを適用し，そのフィルタの計算結果を閾値二値化することで，領域判定を行う手法である．

$$I'(i, j) = \begin{cases} \text{True}, & \sum_{l, m} \{f(l, m)I(i + l, j + m)\} \geq th \\ \text{False}, & \sum_{l, m} \{f(l, m)I(i + l, j + m)\} < th \end{cases} \quad (4-2)$$

フィルタはその用途に応じて様々な形状を設定するが，キズ検出に有効なフィルタとして十字フィルタが挙げられる．図 4-2 は十字フィルタの形状とその適用方法である．

中心の領域がキズ領域で、なおかつ周辺領域がキズでない領域であるほど、フィルタで計算された値が極値となり、この値を用いて閾値二値化を行うことでキズ領域を抽出する。

フィルタの設計を行う場合には手動でフィルタの形状や設計をする方法だけでなく、Ada-boostのような自己学習アルゴリズムによる方法が挙げられる。しかし、様々な形状のキズに対して有効なフィルタを設計する必要がある、そのためにフィルタの数を増加させた場合、キズの未検出や誤検出がどのフィルタに依存するものかを判定することが困難である。そのため、有効なフィルタの分類が難しい問題がある。また、同程度のキズであっても、照明環境によりキズ領域とキズでない領域の強度差は変化するため、安定したキズの検出が困難な場合がある⁴⁵⁾。

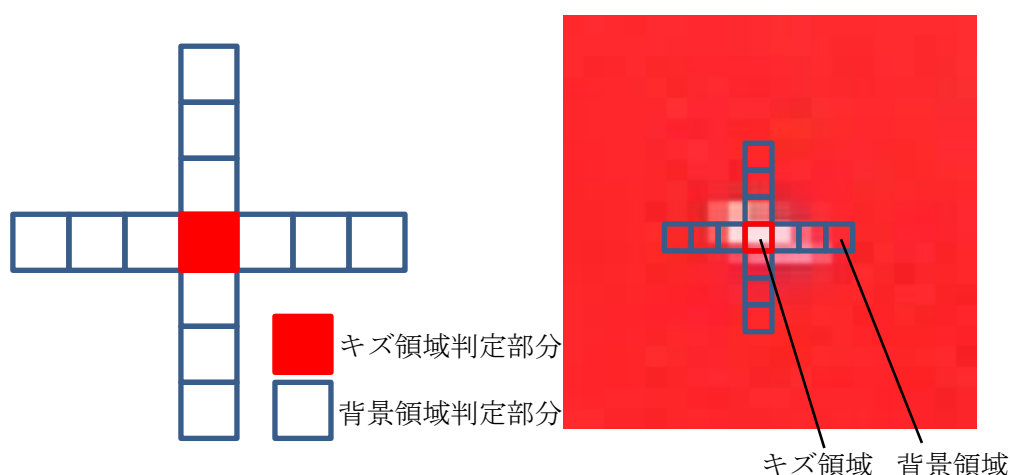


図 4-2 十字フィルタの形状とその適用方法

(4) 周波数解析によるキズ検出

上記問題を解決するうえでは、画像全体の明るさや特徴を考慮する必要がある、周波数領域によるフィルタ処理はそれらの特徴を画像全体の周波数として扱うことができるため有効である。周波数フィルタは、画像を二次元の周波数信号と考え、画像を二次元フーリエ変換し、周波数フィルタ処理を行った後、二次元フーリエ逆変換することで目的データの抽出や除去を行う手法である。フーリエ変換は(4-3)式で表すことができる。また、逆フーリエ変換は(4-4)式で表すことができる。

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (4-3)$$

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (4-4)$$

(4-3)式により空間領域画像を周波数領域画像に変換し、周波数領域でフィルタ処理の後、(4-4)式により周波数領域画像を空間領域画像に変換できる。

また、デジタル画像は離散的な値を持つため、離散フーリエ変換を用いる。離散フーリエ変換(Discrete Fourier Transform : DFT)を用いてフーリエ変換を行う。離散フーリエ変換は(4-3)(4-4)式の dx および dy の極限を 1pixel で近似し、積分を総和で表した式であり、DFT は(4-5)式、逆 DFT は(4-6)式で表すことができる。

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (4-5)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (4-6)$$

また、水平画素数と垂直画素数の両方が 2 の乗数である場合には、(4-5)(4-6)式の指数関数部分の周期性を利用して処理を高速化できるため、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transformation : FFT)を用いることができる。

撮影画像の水平画素数と垂直画素数が 2^n になるように撮影画像を規格化し、二次元の高速フーリエ変換処理を行って周波数画像を得る。周波数画像は光学的 FFT の場合、中央ほど低周波領域、周辺ほど高周波領域の強度分布が得られる。キズは急激な強度変化を持つため、高周波領域に強度分布を持つ。そこで、低周波を除去して高周波を残すためにハイパスフィルタ処理を行う。

フィルタ処理は式(4-7)で表わされる。

$$F'(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) \quad (4-7)$$

二次元フーリエ変換によって周波数スペクトルが得られ、その周波数スペクトルから背景情報やキズ情報等を観測できる。光学的フーリエ変換の場合、スペクトルの中央が直流成分、中央に近いほど低周波成分、中央から離れるほど高周波成分である。注目する周波数の画像強度は振幅スペクトル、またはパワースペクトルと呼び、実数と虚数の二乗和で表現する。これは、周波数スペクトルは複素数のため、結果を表示する際に信号の特徴を表現しにくい。振幅スペクトル画像を(4-8)式で計算する。

$$|F(u, v)| = \sqrt{\text{Re}(F(u, v))^2 + \text{Im}(F(u, v))^2} \quad (4-8)$$

但し， $\text{Re}(x)$ は x の実数部の値， $\text{Im}(x)$ は x の虚数部の値である．

フィルタ処理後の周波数スペクトルを逆フーリエ変換し，低周波領域が除去された画像を得る．その後，キズ候補領域を閾値二値化処理により検出する．

ここで一般的な周波数フィルタであるハイパスフィルタ(HPF)の例を示す．HPF は図 4-3 のような透過率特性を持ち，周波数の値が閾値 R より小さい場合，透過率は 0 であり，閾値 R 以上の場合，透過率は 1 である．

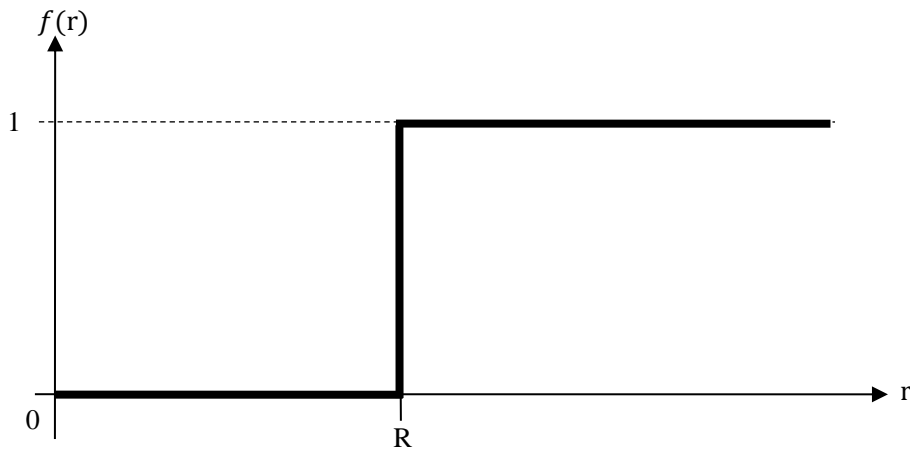
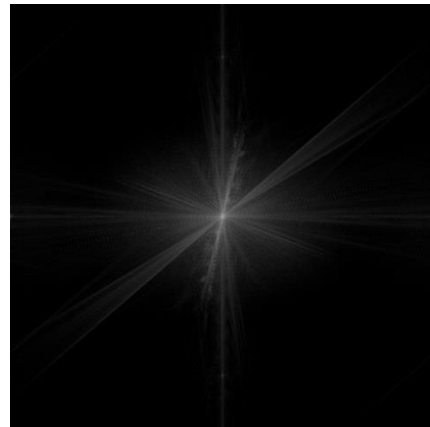


図 4-3 HPF の透過率

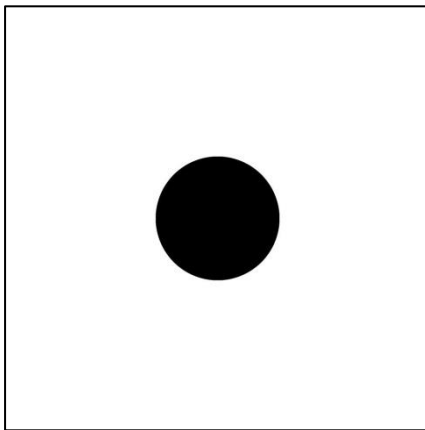
図 4-4 は赤色ドアの処理結果例である．まず(a)のようなカラー画像を入力し，水平画素数と垂直画素数が 2^n になるように画像の拡大処理を行う．次に，FFT によりフーリエ変換を行うことで，周波数スペクトルが得られる．周波数スペクトルを振幅スペクトルに変換して表示したものが(b)である．なお，(b)の計算の際には，(a)のカラー画像をグレースケール画像に変換した．周波数スペクトルに(c)のハイパスフィルタを乗算する．ハイパスフィルタには低周波をどの程度除去するか係数があり，ここでは半径 300 ピクセル以下を除去する設定にしている．これにより低周波成分が除去された周波数スペクトルが得られ，この振幅スペクトル画像が(d)である．その後，逆フーリエ変換を行うことで，(e)のようなエッジ以外が除去された空間領域画像が得られる．(e)の画像を閾値二値化処理することで(f)のようなキズ検出結果が得られる．なお，閾値二値化の閾値 th には 120 を用いた．また，ラベリングや物体抽出処理等を適用することで，抽出された輪郭などを除去できる．



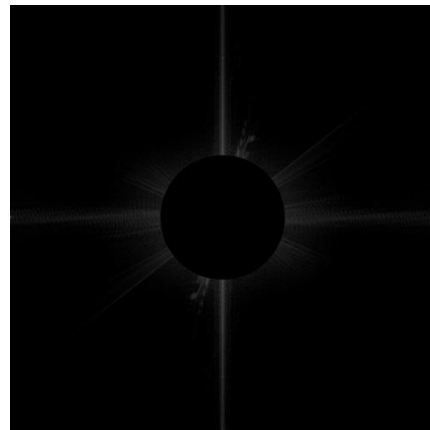
(a) 赤色ドアの全照明画像



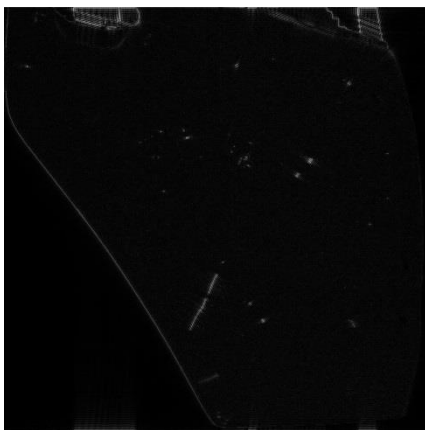
(b) フィルタ処理前の振幅スペクトル画像



(c) ハイパスフィルタ(半径 300 ピクセル)



(d) フィルタ処理後の振幅スペクトル画像



(e) 逆フーリエ変換処理結果画像



(f) 閾値二値化処理結果(th=120)

図 4-4 赤色ドアのフーリエ解析の結果例

フーリエ変換を用いることで、周波数空間で処理を行うことができ、画像全体を考慮したキズ検出が可能となる。しかし、上記のハイパスフィルタ処理を用いてキズ検出を行った場合、リングングエフェクト現象が発生しやすく、適切なキズ領域を検出できない問題がある。図 4-5 はキズ検出結果の図 4-4(f)の中央からやや左下にある線状キズ付近の拡大画像であり、線状キズ及び 3 つの点状キズの処にリングングエフェクト現象が発生していることが分かる。

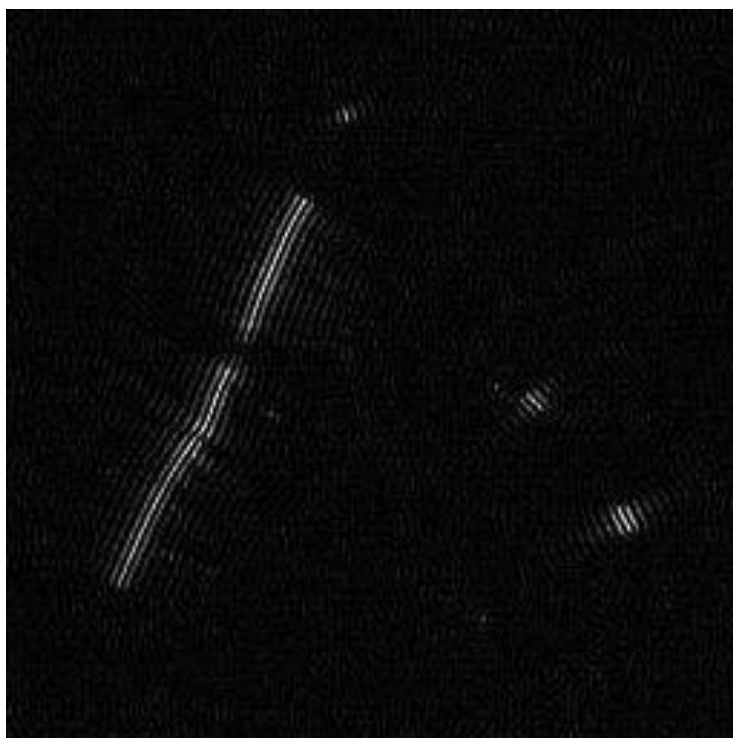


図 4-5 キズ検出結果の一部拡大画像

リングングエフェクト現象の原因はフーリエ変換が画像強度を周波数信号の和によって表しているため、エッジを周波数信号で表現する際、抽出したい部分の周囲の信号を打ち消す信号が除去されて存在しないために発生する。このような問題はハニング窓関数等の窓関数の使用により軽減できるが、窓関数をかけることより画像周囲の強度が弱くなってしまうので、画像の周囲の部分にあるキズの検出が困難になる。ウェーブレット解析は窓関数の使用を必要としないが、離散マザーウェーブレットの選択問題や特定の周波数成分の損失等問題が残っているので、微小キズや特定形状のキズの検出が困難である⁴⁶⁾⁴⁷⁾⁴⁸⁾。上記問題を解決するために、本研究では修正バンドパスフィルタ(CBPF, Corrected Band-Pass Filter)を提案する。

4.2 修正バンドパスフィルタによるキズ検出処理

本節では、キズ検出の基本方法を述べ、次に具体的な手法を述べる。

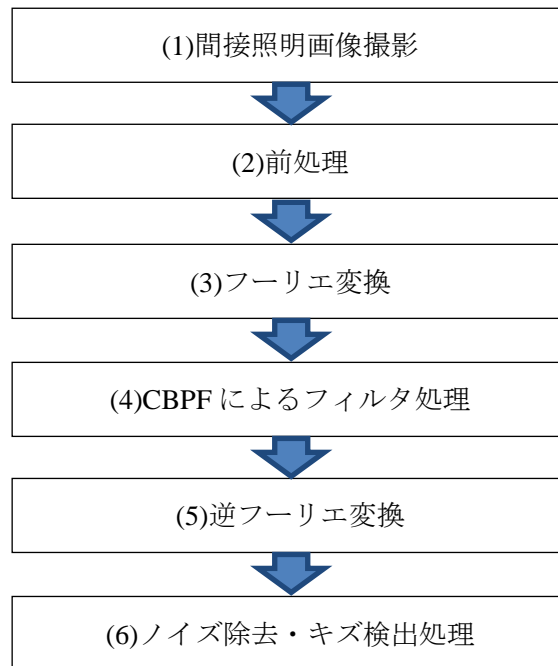


図 4-6 キズ検出処理の流れ

本研究では、微小キズ検出のために、修正バンドパスフィルタを提案する。修正バンドパスフィルタを適用するために、画像の規格化等の前処理を行う。撮影からキズ検出までの流れは図 4-6 に示し、各ステップの詳細について以下に述べる。

(1) 間接照明画像の撮影

まず、第 2 章に述べた間接照明手法を用いて、計測対象物体の全照明画像を撮影し、キズの検出に必要なハイライトや周りの映り込みのない理想的な画像を取得する。

(2) 前処理

次に、撮影画像の前処理を行う。撮影画像にはカメラのピクセルノイズ等が含まれているため、移動平均フィルタを用いてノイズを除去する。また、高速フーリエ変換を行うために、画像の解像度が 2^n になるように水平方向と垂直方向で拡大・縮小処理を行う。

その後、提案手法では撮影画像を自動車部品である計測対象物体と計測対象物体ではない背景領域に分割する。また、背景領域の色を計測対象物体領域の平均色に入れ替えることで、物体の輪郭のみを抽出し、高周波領域以外への信号の干渉を軽減する。これによりアーチファクト問題を軽減できる。アーチファクト問題とは画像変換の際に、エッジにボケやジャギー等が発生する問題である。アーチファクト問題を解決する他の手法としてハ

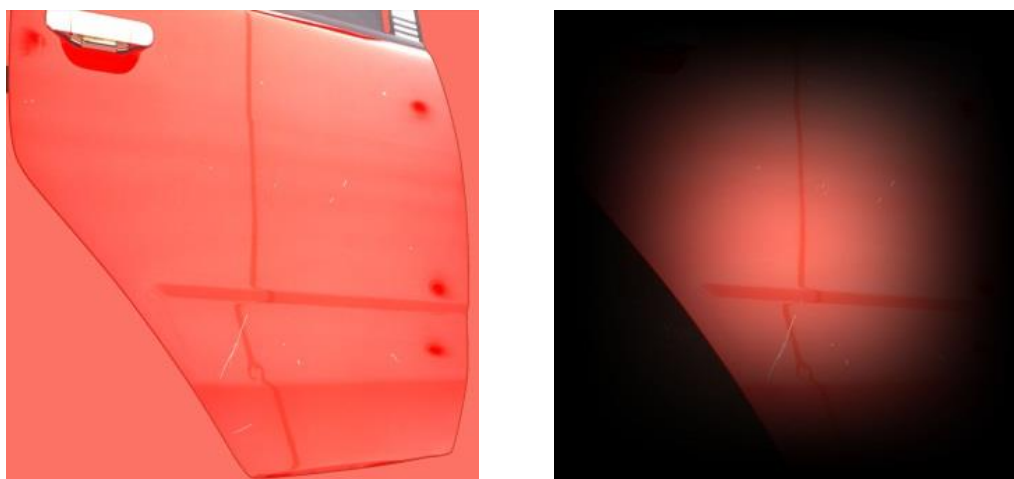
ニング窓による処理がある。ハニング窓は窓関数のひとつで、画像に窓関数を適用することで、不要な情報を0にして必要な情報を残す手法である。ハニング窓は(4-9)(4-10)式で表すことができる。

$$I'(i,j) = w(i,j) \cdot I(i,j) \quad (4-9)$$

$$w(i,j) = 0.5 - 0.5 \cos 2\pi \sqrt{\left(i - \frac{h}{2}\right)^2 + \left(j - \frac{w}{2}\right)^2} \quad (4-10)$$

但し、 h は垂直画素数、 w は水平画素数である。

図 4-7 は撮影画像の前処理の結果であり、(a)は提案手法、(b)はハニング窓による処理結果である。



(a)提案手法による処理

(b)ハニング窓による処理

図 4-7 撮影画像の前処理

(a)と(b)を比較すると、提案手法では画像周辺の強度が落ちていないため、キズの色強度を十分に確保することができる。

(3) フーリエ変換

次に高速フーリエ変換を用いて、前処理後の画像を周波数変換する。フーリエ変換の方法は高速フーリエ変換を使用することで短時間で周波数変換を行う。

(4) CBPF によるフィルタ処理

周波数領域でのフィルタ処理により、キズ領域の周波数信号を抽出し、それ以外の部分を除去する。

フィルタ処理の際、微小キズの抽出とカメラノイズの軽減を行い、かつリングングエフェクト現象の問題を解決するために、本研究では修正バンドパスフィルタ(CBPF, Corrected Band-Pass Filter)を提案する。CBPF の透過率は(4-11)式の通りであり、そのグラフを図 4-8 に示す。

$$f(r) = \begin{cases} 0 & r \leq R_{\min} \\ F_c - F_c \left(\frac{R_c - r}{R_c - R_{\min}} \right)^{\gamma_1} & R_{\min} < r \leq R_c \\ F_c + (1 - F_c) \left(\frac{r - R_c}{R_1 - R_c} \right)^{\gamma_1} & R_c < r \leq R_1 \\ 1 & R_1 < r \leq R_{\text{noise}} \\ F_t + (1 - F_t) \left(\frac{R_t - r}{R_t - R_{\text{noise}}} \right)^{\gamma_2} & R_{\text{noise}} < r \leq R_t \\ F_t - F_t \left(\frac{r - R_t}{R_{\max} - R_t} \right)^{\gamma_2} & R_t < r < R_{\max} \end{cases} \quad (4-11)$$

但し, $f(r)$ はCBPFの透過率, r は周波数を示すフーリエ変換後の画像中心からの半径, R_{\min} はCBPFの最小通過周波数, R_{\max} はCBPFの最大通過周波数, R_c は透過率曲線が上る際に必ず通る周波数($R_{\min} \leq R_c \leq R_1$), F_c は $r=R_c$ の時の透過率($0 \leq F_c \leq 1$), R_1 は透過率が1となる最小周波数, R_{noise} は想定した画像センサーの固有ノイズの最小周波数, R_t は曲線が下る際に必ず通る周波数($R_{\text{noise}} \leq R_t \leq R$), F_t は $r=R_t$ の時の透過率($0 \leq F_t \leq 1$, 本論文では $F_t = F_c$ とする), γ_1 と γ_2 は透過率の曲線の形状を決めるパラメータ(ガンマ値)である。

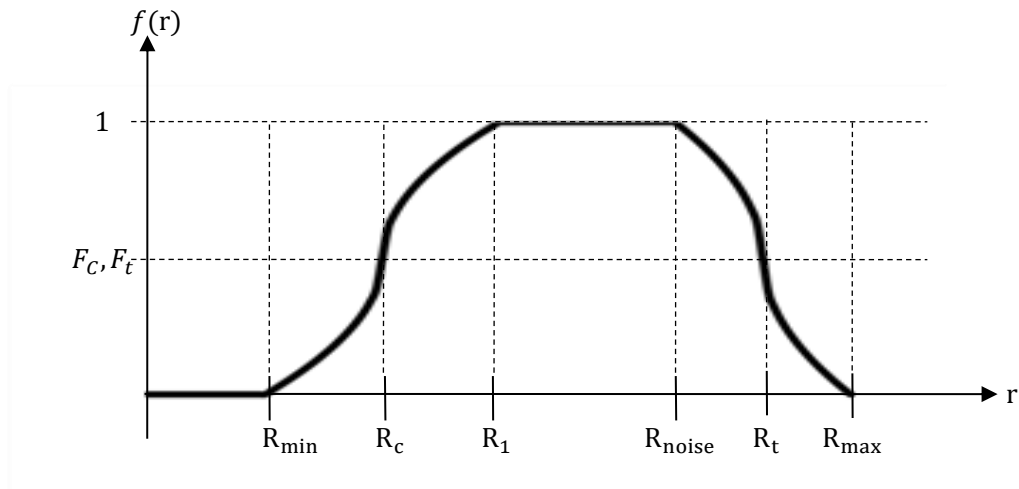


図 4-8 CBPF の透過率

図 4-8 は CBPF の透過率の曲線である。自動車車体部品の表面形状等の固有周波数成分の値は R_{\min} より小さく、表面キズの周波数成分のほとんどは R_1 から R_{noise} までの範囲内に分布され、画像センサーに固有のゴマ塩状のノイズの周波数成分の値は R_{noise} より大きいと考えられる。CBPF では、まず R_{\min} より小さい成分をゼロにすることより、計測対象物体の表面形状成分を削除する。また、 R_1 から R_{noise} までの領域にキズの周波数成分が集中するので、透過率を「1」とする。 R_{\max} より大きい領域ではキズの成分が殆どなく画像センサーのゴマ塩状のノイズ成分が集中しているので透過率を「0」とする。 R_{\min} から R_1 までの領域及び R_{noise} から R_{\max} までの領域では、離散フーリエ変換固有のリングングエフェクト現象を軽減するために、フィルタの透過率をガンマ曲線により平滑化する。

(5) 逆フーリエ変換

次に高速フーリエ変換の逆変換を用いて、フィルタ処理後の周波数領域画像を空間領域画像に変換する。

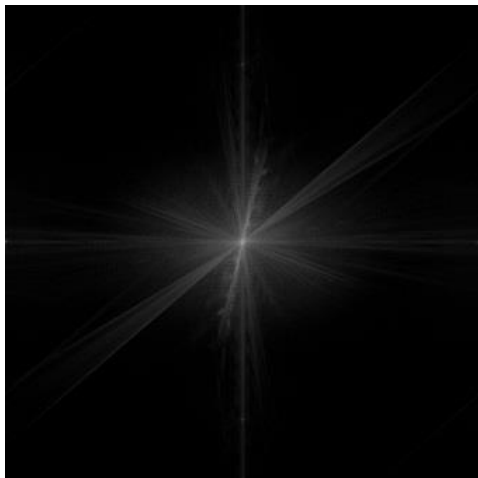
(6) ノイズ除去・キズ検出処理

最後にフィルタ処理された空間領域画像からノイズや物体形状領域を取り除き、閾値二値化を用いて最終的なキズ検出結果を出力する。

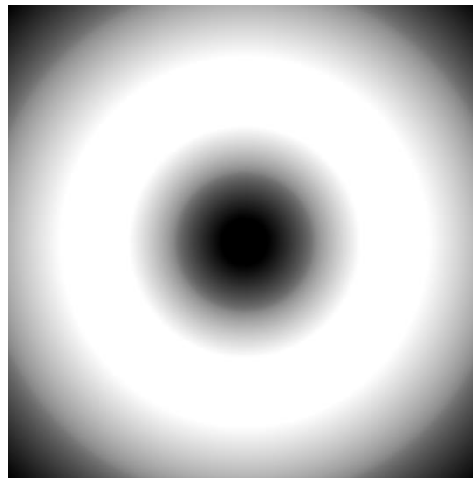
図 4-9 は赤ドアの微小キズの抽出結果であり、(a)は図 4-4 に示した赤ドアの画像のフーリエ変換結果の画像であり、(b)は CBPF、(c)は CBPF をかけた結果の画像である。CBPF のフィルタ係数は、 $\gamma_1 = 0.8$, $\gamma_2 = 0.8$, $R_{\min} = 100$, $R_1 = 500$, $R_{\text{noise}} = 800$, $R_{\max} = 1448$, $F_c = 0.5$, $F_t = 0.5$ を用いた。

(a)の画像に比べ、(c)の画像では、画像中心部の領域の画像強度がゼロになり、画像の周りの部分の画像強度が(a)の画像より弱くなり、画像の R_1 から R_{noise} までに相当するリング状領域の画像強度が(a)の画像とは全く変わらないことが分かる。(d)は(c)の逆フーリエ変換の画像であり、計測対象物体の輪郭や物体表面にあるキズが白く見える。強度値がある閾値以上、画素数が所定の範囲以内の画素をキズとして検出する。(e)は図 4-5 のような線状キズ付近の拡大表示画像である。(e)のようにリングングエフェクト現象が発生されてないことが分かる。

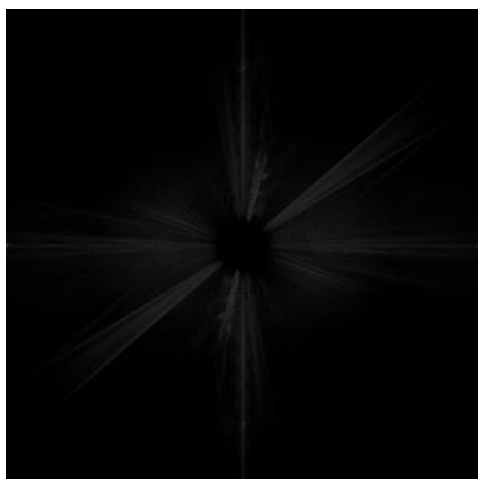
サイズが 0.5mm より大きいキズはほぼ全部検出され、キズではないノイズなどがキズとして誤検出されたことはなかった。また、キズ検出の精度などに関する考察は 4-3 節で述べる。



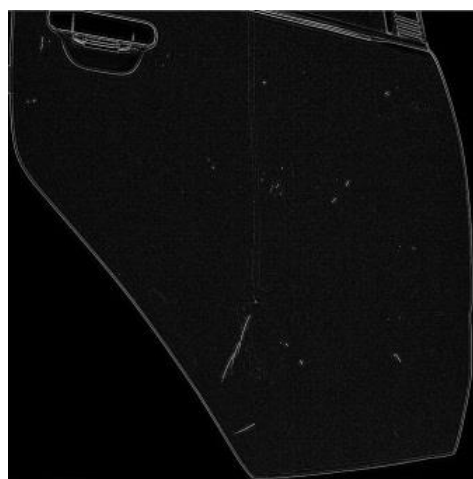
(a)フーリエ変換結果



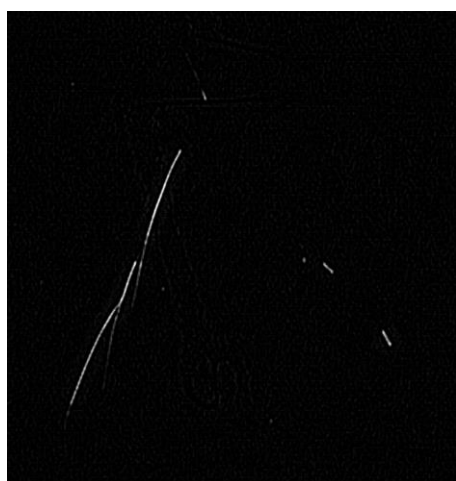
(b)CBPF



(c)CBPF によるフィルタ処理結果



(d)逆フーリエ変換結果



(e)キズ検出結果の拡大画像



(f)キズ検出結果

図 4-9 微小キズの検出結果(赤色ドア)

4.3 キズ検出実験結果と考察

本節では前述の赤色ドアに加え，白色フェンダー，緑色ボンネットのキズ検出実験結果を説明し，結果の考察を行う．実験装置は2章で述べた計測システムを使用し，間接照明手法を用いて撮影する．

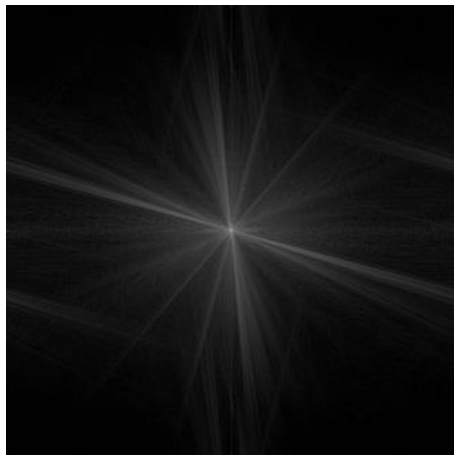
図 4-10 は白色フェンダーの実験結果，図 4-11 は緑色ボンネットのキズ検出実験結果の画像である．



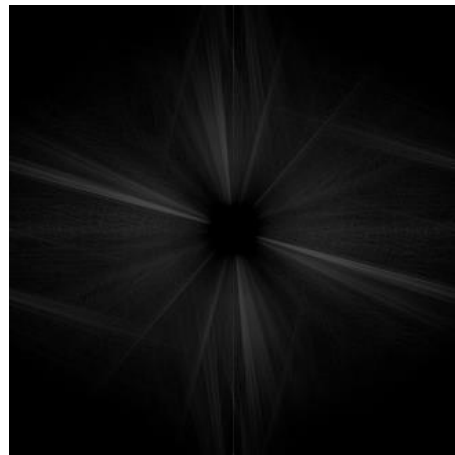
(a)全照明画像



(b)前処理後の画像



(c)フーリエ変換結果画像



(d)CBPF の出力画像



(e)逆フーリエ変換結果画像

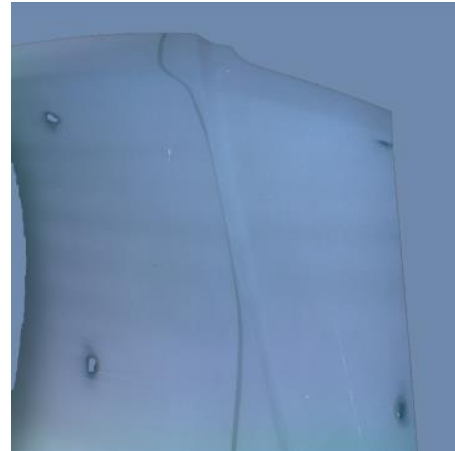


(f)キズ検出結果

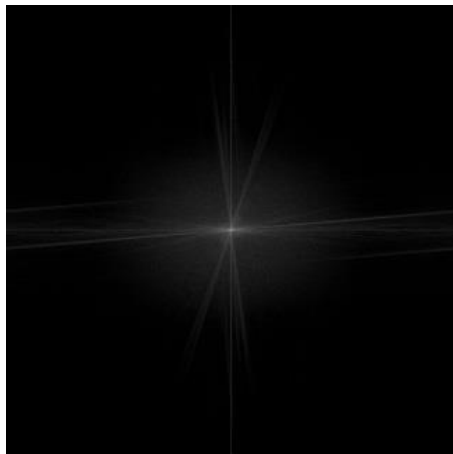
図 4-10 白色フェンダーのキズ検出実験結果



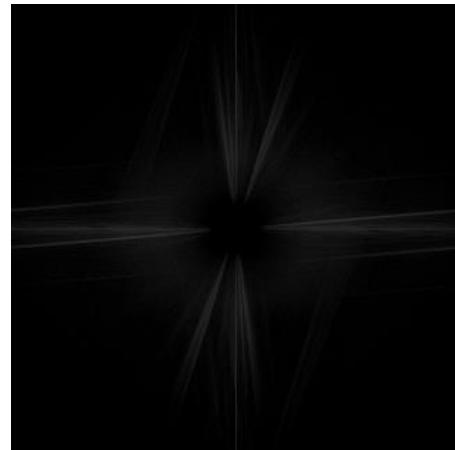
(a)全照明画像



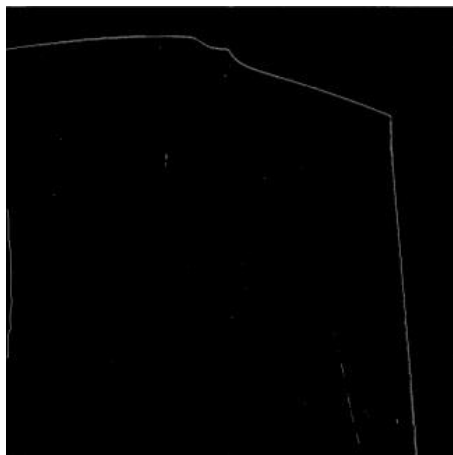
(b)前処理後の画像



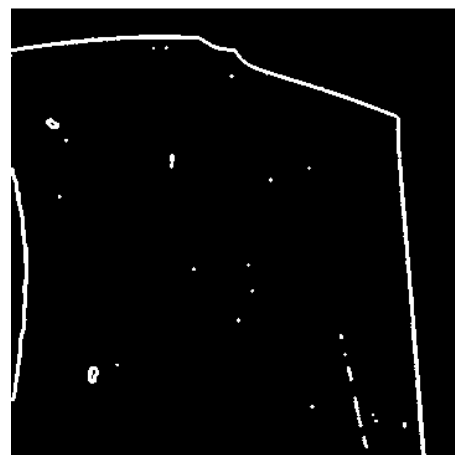
(c)フーリエ変換結果画像



(d)CBPF の出力画像



(e)逆フーリエ変換結果画像



(f)キズ検出結果

図 4-11 緑色ボンネットのキズ検出実験結果

表 4-1 はサイズ 0.5mm 以上, 表 4-2 はサイズ 0.5mm 未満のキズ検出結果のまとめである。自動車リサイクル業界のキズ検出水準を考慮し, 本研究では 0.5mm 未満と 0.5mm 以上の 2 種類で判定を行った。また, 実際のキズの判定は爪に引っかかるキズとし, その大きさは

表 4-1 キズ検出結果のまとめ(0.5mm 以上)

物 体	0.5mm 以上				
	個数	未検出	誤検出	正常検出	正解率
赤色ドア	31	1	0	30	96.8%
白色フェンダー	7	0	0	7	100%
緑色ボンネット	14	0	0	14	100%
合計	52	1	0	51	98.1%

表 4-2 キズ検出結果のまとめ(0.5mm 未満)

物 体	0.5mm 未満				
	個数	未検出	誤検出	正常検出	正解率
赤色ドア	15	5	0	10	66.7%
白色フェンダー	1	0	0	1	100%
緑色ボンネット	2	1	0	1	50.0%
合計	18	6	0	12	66.7%

色変化のある領域の長径で計測した。

0.5mm 以上のキズの検出率は全体で 98.1%となり, 業界の基準を満たしていると言える。また, 0.5mm 未満においても全体で 66.7%の検出率が得られており, 提案手法の有効性が実証された。

次に未検出の原因を解析する。図 4-12 は 0.5mm 以上のキズのうち, 未検出であったキズの拡大写真である。このキズは長さが 0.5mm 以上であっても, その幅が 0.2mm 未満のため, 細線として検出できなかったと考えられる。同様の理由で, 0.5mm 未満のキズに対しても, 全体的に細い線状のキズほど未検出になる傾向がある。

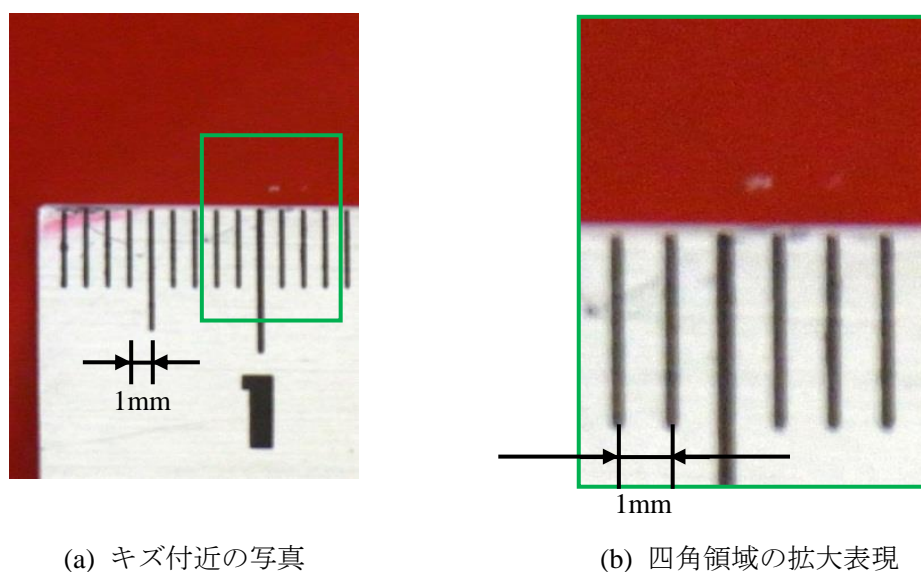


図 4-12 未検出キズの拡大写真

また、キズ検出の所要時間は表 4-3 の通りであり、赤色ドアと白色フェンダーの場合で 9 秒以下、緑色ボンネットは物体のサイズが大きいため 4 枚の計測で 40 秒以下となり、提案手法は短時間で計測可能であるといえる。

ここで、3 つの実物体のキズ検出実験結果しか説明していないが、他の車体部品でも類似する検出精度と検出時間であった。

表 4-3 キズ検出の所要時間(単位：秒)

物 体	画像枚数	撮影時間	画像処理時間	総時間
赤色ドア	1	2.0	6.7	8.7
白色フェンダー	1	1.9	6.7	8.6
緑色ボンネット	4	7.8	26.4	34.2
画像 1 枚の平均	-	1.95	6.63	8.58

本章では自動車車体部品のキズ検出を高感度かつ確実にを行うために、間接照明手法と周波数解析手法の融合によるキズ検出手法を提案した。また周波数解析の際には、修正バンドパスフィルタを提案し、リングングエフェクトを回避しつつ微小キズの検出を行うことができた。

キズの検出精度をサイズが 0.5mm 以上と 0.5mm 未満の 2 つの基準で検証し、0.5mm 以上に対して 98.1%の検出率であった。また、0.5mm 未満に対しても 66.7%の検出率であり、十分な検出精度があるといえる。また、計測時間は画像 1 枚に対して平均 9 秒以下であり、短時間で高感度な計測が可能といえる。

今後の課題としては、線幅 0.2mm 以下の細い線状キズの検出精度が十分に得られていないので、細い線状キズを検出するための専用のフィルタの設計や、その検出結果のキズの判定方法の検討が挙げられる。

第 5 章 実用システムの開発

本研究では第 2 章，第 3 章，および第 4 章で述べた手法を実装した計測システムを構築する．提案システムの有効性は凹みやキズの検出感度，計測時間，計測安定性，保守性及び運用性等を検証する．

本章では，まず提案システムの構成のための計測環境構築，カメラの選択，ソフトウェア開発環境の選択などについて述べ，その後計測の流れとアプリケーションの機能について述べる．最後にシステムの評価を行う．

5.1 計測システムの構成

まず自動車車体部品の凹みとキズの計測システムを試作するために必要な計測環境の構築，カメラの選択，アプリケーション開発等について説明する．

(1) 計測環境の構築

間接パターン光投影，間接照明に基づく写真撮影システムを構築するために，下記のような計測環境を試作した．

自動車車体部品の形状，大きさなど計測対象物体の要因と，間接パターン光投影と間接照明など計測に必要な条件を総合的に考慮した結果，本研究ではトンネル状の計測空間を試作した．半透明拡散膜は布により構成し，間接パターン光及び間接照明は線状の LED ランプより実現する．

三次元計測用のパターン投影装置には，パターンを長期的かつ低コストで持続的に投影できるようにすることや，工場等の環境に対する機械的な耐久性や持久性，位相シフトパターンの投影と間接照明パターンの投影を両立できる照明装置として，線状 LED 光源を用いた．また，LED の切り替えは ON-OFF 制御により行う．尚，線状 LED の配置は撮影時に十分な強度と範囲の広さ及び位相シフトパターンにおける正弦波強度が得られるように配置する．

異なる大きさの計測対象物体に対応するために，計測空間に 4 台のカメラを設置し，小さい計測物体に対しては 1 台のカメラで撮影し，大きい計測物体には最大 4 台のカメラを用いた撮影ができる．

(2) カメラの選定

カメラの役割は，サイズの大きな物体の微小凹みや微小キズが観測でき，十分な明るさの画像を撮影でき，最適な間接パターン投影が可能ながことが挙げられる．上記の機能を満たすためには以下のような要素が必要である．

- ・サイズの大きな物体の観測：焦点距離の短いレンズ
- ・微小凹みや微小キズの観測：分解能の高いカメラおよびレンズ
- ・十分な明るさの画像の撮影：F 値の低いレンズ，間接パターンの明るさ

上記の内容から，計測範囲と計測感度はレンズの焦点距離や対物距離とのトレードオフの関係になっており，計測したい物体の大きさと検出したい凹みやキズの大きさから決定する必要がある．

画像の明るさに関しては、レンズの露光は明るさと被写界深度のトレードオフの関係になっており、必要な明るさと焦点を合わせる範囲により決定する必要がある。また、間接パターンを投影する際、照明は明るいほど明瞭な画像が撮影できる。但し、明るさは半透明拡散膜の透過率に依存し、透過率が十分に低くなければ映り込みが発生するため、透過率を十分に下げた状態でパターンが投影できる明るさを確保する必要がある。また、照明自体は正弦波を投影できなくても、LED 間の距離の調整により分布を調整することができる。しかし、照明の距離が半透明拡散膜から離れるほど、パターンの分解能と明るさが低下するため、検出したい凹みの大きさや深さに合わせてパターンの分解能を決定し、そのパターン配置を満たせる照明環境を構築する必要がある。

インターフェースは計測装置本体をソフトウェアで制御したり、計測装置から送られるデータをソフトウェアに取り込む上で重要である。(1)で述べた計測装置に対して制御に必要な機器はカメラおよび照明である。また、カメラは映像を取り込むために高速で安定した通信インターフェースが必要であり、照明は電源のスイッチ切り替え機能が必要である。

最終的に、デジタルカメラは高感度な計測を実現できるようにするとともに、コンピュータから制御ができるようにするため、工業用の USB2.0 カメラを選んだ。

試作した計測システムの外観写真は図 5-1 に示す。

(3) ソフトウェア開発

ソフトウェアは撮影された画像から凹みやキズを検出するための機能を実装するために必要である。またソフトウェアの使用感を高めるために、凹みやキズを検出感度や検出量の設定、検出結果の表示や保存、その他にもマニュアル制御や表示変更などのオプションなどを実装する。本ソフトウェアは技術者でなくても容易に使用できるようにするために、基本的な操作はシンプルにし、細かい機能を設定したい場合には各種設定機能を使用できるようにソフトウェアを開発する。

また、画像処理は取り扱う画像データが多いため、処理が高速なプログラミング言語を使用する必要がある。

上記のシステムを構築するため、本研究では、ソフトウェア開発環境は Windows、開発言語は C 言語、C 言語の開発ツールは Microsoft Visual Studio を選んだ。

試作した凹みとキズ検出アプリケーションのメイン画面は図 5-2 に示す。左下の計測機能により凹みとキズの検出感度を調整して計測ボタンを押下することで、計測結果が左上の画面に表示される。また、計測結果表示画面上にマウスポインタを移動させると、右上の

拡大表示画面にそのマウス位置の拡大画像が表示される。計測システムの手動調整を行いたい場合には右下のシステム設定機能を使用する。



図 5-1 計測システムの写真

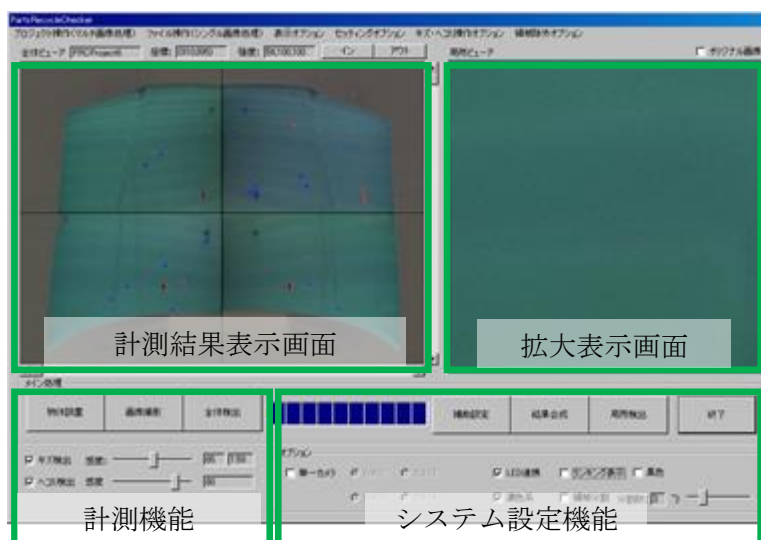


図 5-2 アプリケーションのメイン画面

5.2 計測の流れ

本節では試作した計測システムを用いた凹みとキズの検査について述べる．図 5-3 は計測の流れである．まず計測に適切な画像を撮影するために，計測物体の設置を行った後，システム設定に合わせて計測物体を判定する．その判定結果からカメラパラメータを調整し，間接投影パターンを切り替えながら画像を撮影する．画像を撮影したら，計測物体表面以外の部分を処理しないように物体抽出処理を行い，その後凹み検出処理および凹みのサイズ推定処理を行う．次にキズ検出処理およびキズサイズ推定処理を行う．次に各部分の詳細を説明する．

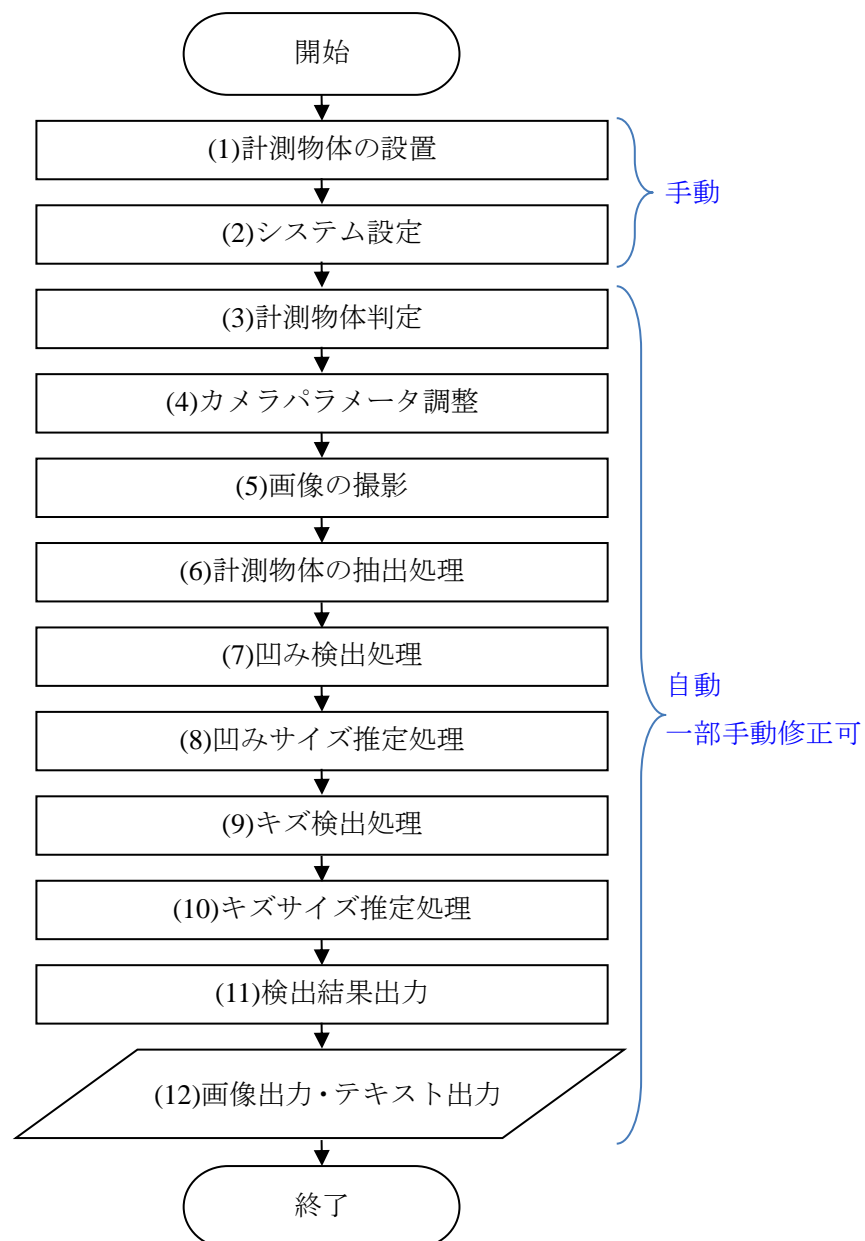


図 5-3 計測の流れ

(1) 計測物体の設置

計測装置内に計測物体を設置する．計測アプリケーションのカメラコントロール画面を用いることで計測物体がどのように映っているか確認することができる．図 5-4 はカメラコントロールウィンドウである．



図 5-4 カメラコントロールウィンドウ

カメラコントロールウィンドウではカメラの映像をリアルタイムに表示できる．また，露光自動制御における明るさの基準値の設定や，カメラ画像を直接撮影できる機能を有する．計測の際には，計測したい領域が画面内に収まるように計測物体の位置を調整する．また，このウィンドウでカメラの露光やカラーバランスの自動調整および手動調整を行う．

露光の自動調整方法には比例制御方式を採用し，(5-1)式を用いて露光を調整する．

$$t_{k+1} = t_k + C(I_k - I_0) \quad k = 0, 1, \dots, N \quad (5-1)$$

但し， N は撮影回数， t_k は露光時間， I_0 は目標とする画像強度， I_k は k 回目の際に撮影した画像強度， C は比例係数である．

カラーバランスの自動調整方法は，カメラに白色の板を置き，自動色調整を押下することで，各色のゲインを比例制御方式で自動調整する．

(2) システム設定

処理の短縮のための設定を行うことができる。撮影するカメラの接続台数やカメラの調整方法等を行うことで処理の短縮や計測の安定化を図る。図 5-5 は計測ウィンドウである。

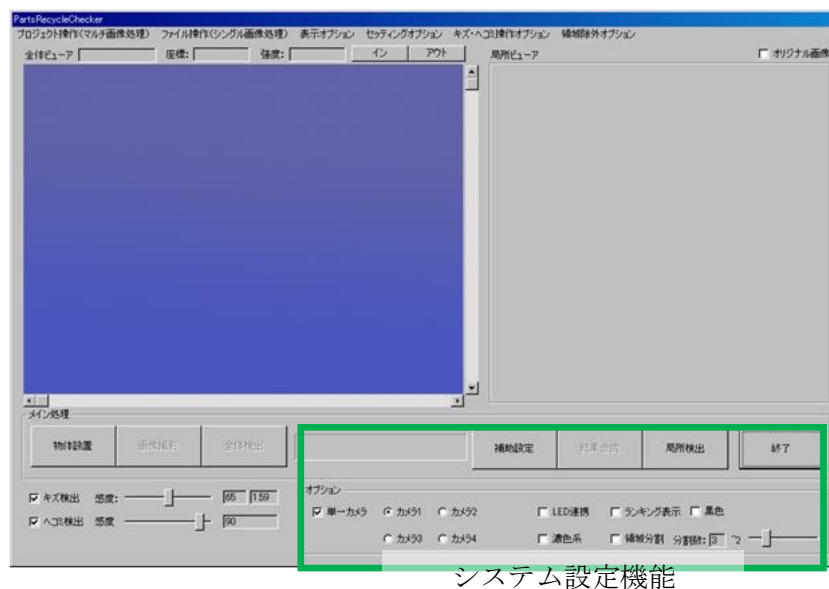


図 5-5 計測ウィンドウ

画面右下はシステム設定用のボタン群である。各ボタン設定を切り替えることで、手動設定を行うことができる。機能としては、サイズの小さい部品を高速に計測するための単一カメラオプション、照明の自動制御と手動制御を切り替えるオプション、凹みとキズをサイズ順に表示するランキング表示オプション、画面上の凹みとキズの数領域ごとに係数して表示する領域分割オプションを実装した。

(3) 計測物体判定

撮影ボタンを押下すると、初めに計測物体の判定を行う。計測物体の判定は、最適な画像を撮影するために、計測物体の色と明暗を判定する。

まず白色が適正になる露光で撮影し、各チャンネルのヒストグラムを解析する。ヒストグラムの分布により、物体の色と明暗を判定する。

(4) カメラパラメータ調整

次に、計測物体の色と明暗の判定結果に基づき、カメラパラメータを調整する。カメラパラメータの調整は主に露光時間を調整する。露光調整は初期値を計測物体判定で得られた露光時間に設定し、その後(5-1)式で述べた比例制御を用いて露光の微調整を行う。

(5) 画像の撮影

カメラパラメータ調整を行った後、すべてのカメラから画像を撮影する。但し、システム設定で撮影するカメラの種類を設定した場合には、指定したカメラのみで撮影を行う。間接パターンを切り替えながら凹み検出用の位相シフトパターンの観測画像を 4 枚撮影する。その後、キズ検出のための全照明画像を撮影する。

(6) 計測物体の抽出処理

凹み検出処理やキズ検出処理を行う前処理として、計測物体領域の抽出を行う。物体領域は色判定結果から自動で抽出される。また、抽出が正常に行えなかった場合等を想定して、手動操作による抽出処理が可能である。手動操作による抽出モードとして、座標指定後にその色に近い領域を除外する処理と、指定した座標を中心に指定した半径で領域を除外する処理を実装した。図 5-6 は領域除外オプションの動作例であり、(a)は色濃度値により領域除外する機能、(b)は半径により領域除外する機能である。黒の透過色で塗りつぶされた領域が背景除去されている領域であり、その領域は処理されないため処理時間が短縮できる。

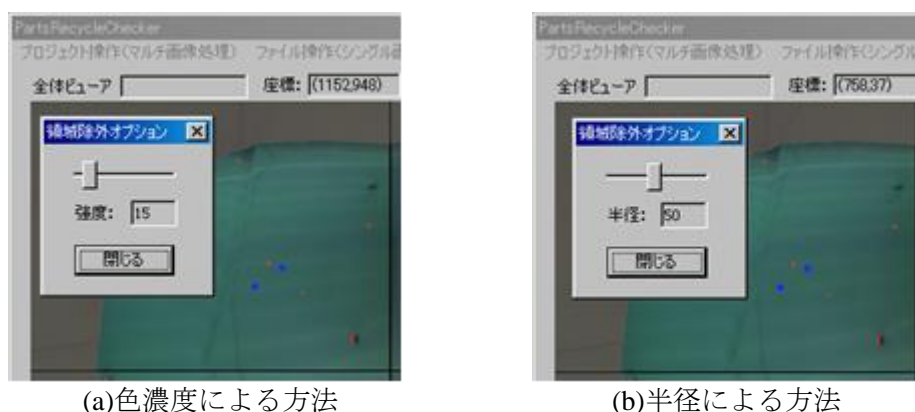


図 5-6 領域除外オプション

(7) 凹み検出処理

第 3 章で提案した手法による凹み検出処理を行う。処理のパラメータはカメラパラメータ調整時に判定された色や明るさを基準に設定される。感度の範囲は有効な閾値を基準として、0~100 までの百分率で設定する。

(8) 凹みサイズ推定処理

第 3 章で提案した手法による凹みサイズ推定処理を行う。

(9) キズ検出処理

第 4 章で提案した手法によるキズ検出処理を行う。処理のパラメータはカメラパラメータ調整時に判定された色や明るさを基準に設定される。

(10) キズサイズ推定処理

第 4 章で提案した手法によるキズサイズ推定処理を行う。キズのサイズ推定はカメラ設定時に設定したパラメータで行う。

(11) 検出結果出力

計測ウィンドウの左画面に凹み検出結果とキズ検出結果をモニターに出力し表示する。図 5-7 は検出結果のスクリーンショットである。

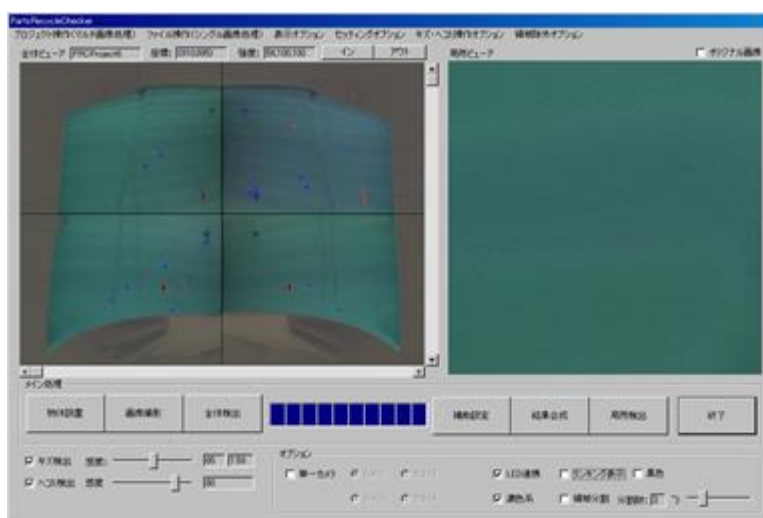
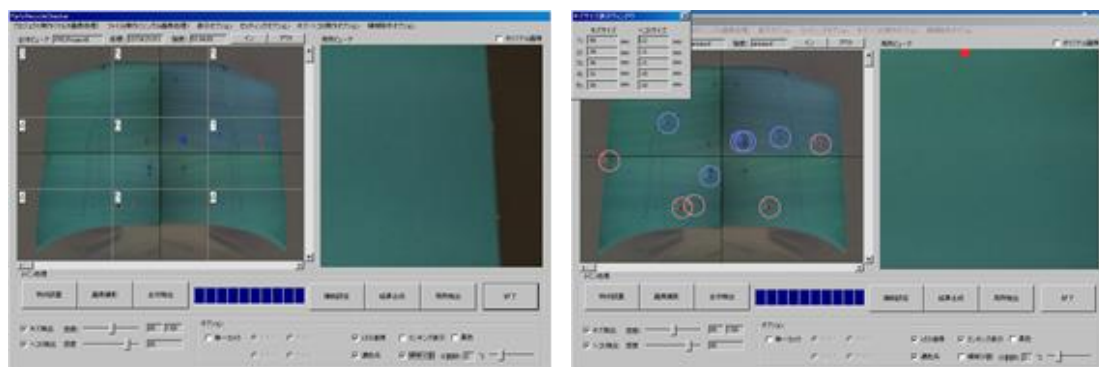


図 5-7 検出結果のスクリーンショット

標準設定では、凹み領域は青で表示され、キズ領域は赤で塗りつぶして表示する。但し、塗りつぶす色が計測物体の色判定結果と重複する場合には、それ以外の 3 原色のいずれかの色を使用して表示する。また、詳細情報は計測ウィンドウの右画面に表示し、凹みサイズ推定とキズサイズ推定で得られた凹みやキズのサイズを表示する。

また、図 5-8 は表示オプションであり、(a)は領域分割オプション、(b)はランキング表示オプションである。凹みやキズの位置や大きさなどの状況を把握しやすくするために実装した。



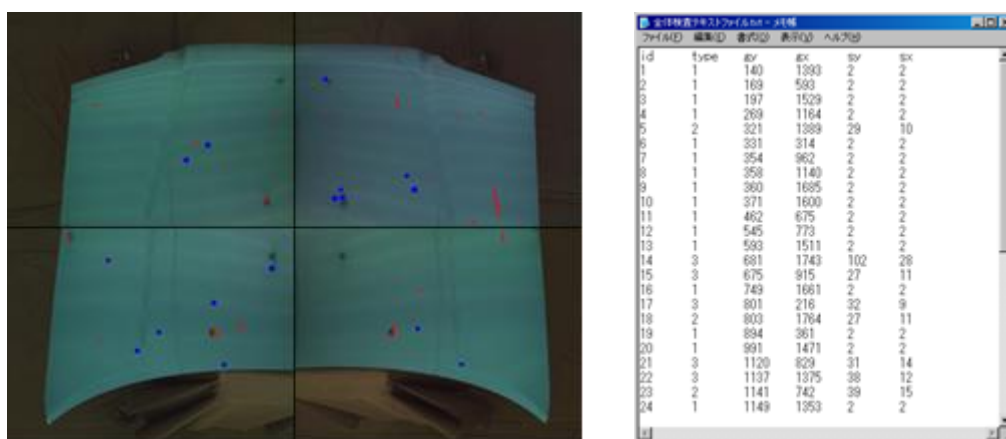
(a) 領域分割オプション

(b) ランキング表示オプション

図 5-8 検出結果の表示オプション

(12) 画像出力・テキスト出力

計測結果をファイル形式で出力する. 図 5-9 は検出結果の画像出力とテキスト出力結果であり, 画像出力では(a)のように計測ウィンドウの左画面に表示されている画像のマーカを強調して保存でき, テキスト出力では(b)のように検出した凹みやキズの場所とサイズ情報をテキスト形式で出力する.



(a)画像出力結果

(b)テキスト出力結果

図 5-9 検出結果の画像出力とテキスト出力

5.3 システム評価

システムの評価方法として計測時間, 検出精度について評価する. 表 5-1 はシステムの評価結果である.

表 5-1 システムの評価結果

項目	提案手法	従来手法
計測精度	凹み：直径 2mm 以上かつ深さ 0.08mm 以上 キズ：直径 0.5mm 以上の点キズや幅 0.5mm 以上の線キズ	技術者によって異なる
計測安定性	上記の精度は安定して検出でき，上記より小さい損傷も検出可能	技術者と技術者の健康状態等により前後し，見逃しがある場合がある
計測時間	カメラ 1 台で 1 分，最長 5 分以内	平均 10 分，最長 20 分
運用性	1 クリックで計測可能 設定によってはトレーニングが必要	技術者のトレーニングが必要 トレーニングの度合いが品質に直結
保守性	システムの調整やメンテナンス 初期コストが割高，維持コストが割安	技術者のトレーニングや健康管理 初期コストが割安，維持コストが割高

評価方法のうち，計測精度および計測時間はそれぞれ以下の方法で評価した．

計測時間は，計測物体が設置されている状態から計測ボタンをクリックし，凹みとキズの表示が終了するまでの時間を測定した．なお，計測物体の設置時間は設置者に依存するが，1 分以内で設置可能である．また，撮影が終了した時点で新たな計測物体の設置が可能のため，設置時間はシステム評価に含めなかった．計測時間は最長 5 分以内であり，技術者の検査時間である平均 10 分，最長 20 分よりも短時間で検査が可能である．また，物体設置を含めた場合でも，およそ 1 分程度の時間増加であり，短時間で計測できるといえる．

検出精度について，実験では，凹みは直径 2mm 以上かつ深さ 0.08mm 以上で 100%，キズは直径 0.5mm 以上の点キズや幅 0.5mm 以上の線キズで 98.1%であり，十分な検出精度であると言える．熟練の技術者に対しては感度が高いとは言えないが，人的要因に左右されない検出安定性や検査時間の短縮，人に依らない業界統一基準の作成が可能であること，検査技術がなくても簡単な操作で検査ができるため，システムは実用可能といえる．

上記より提案システムが優位な項目は計測安定性と計測時間および運用性と思われる．

一方どちらが優位でもない項目は計測精度と保守性である．これは計測精度と保守性はトレードオフの関係にあるため，従来手法よりも十分に優位なシステムを構成するためには技術の改良やシステムのコスト低減が必要なためである．

第 6 章 結論

中古自動車車体部品のリユースはCO₂削減を低コストで実現できる方法のひとつであり、自動車車体部品の自動検査は、業界が要求するテーマである。

本研究の目的は、大きく 3 つに分類できる。

一つ目は、強い鏡面反射を持つ自動車車体部品の凹みを検出し、検出した凹みのサイズ推定する。

二つ目は、強い鏡面反射を持つ自動車車体部品のキズを検出し、検出したキズのサイズ推定する。

三つ目は、凹み検出やキズの検出のための実験システムを試作し、検査用のプログラムを開発する。

本論文の構成は下記のとおりである。

第 1 章では、本研究の背景として、自動車車体部品のリユースの背景について紹介し、リユース車体部品の凹みとキズの自動検査に必要な三次元画像計測技術および画像処理技術の諸方法を紹介し、鏡面反射物体の計測の際の問題点や研究動向を分析した。

第 2 章では、自動車車体部品の凹みを検出するためにパターン光投影三次元画像計測する際、鏡面反射の影響により計測に必要なパターンが得られない問題を示し、間接パターン光投影計測手法を提案した。また、キズ検出の際に均一な照明が得られない問題を示し、間接照明手法を提案した。

第 3 章では、提案手法を用いて自動車車体部品の微小凹みを検出するために、位相シフト法に基づく多重位相差画像による凹み検出手法を提案し、実験結果を示した。また、提案手法の有効性を評価するために、23 種類の色特徴および形状が異なる部品を計測し、直径 2mm 以上かつ深さ 0.08mm 以上の凹みを自動検出することができた。

第 4 章では、自動車車体部品のキズを検出する際、映り込みと照明むらのない画像を撮影する必要がある問題を示し、間接照明手法に基づく画像撮影手法を提案した。また、キズ検出の際に色むら等の影響を軽減してキズ検出を行うために、背景平均化処理と修正バ

ンドパスフィルタによる周波数解析を提案し、実験結果を示した。尚、提案手法の有効性を評価するために、3 種類の色特徴が異なる部品を計測し、直径もしくは幅 0.5mm 以上のキズを自動検出することができた。

第 5 章では、実用的な自動車車体部品検査システムを構築するために、提案システムの構成要素とその構成に必要な要件、及び提案システムに必要な機能について述べた。また、開発した提案システムの処理の流れと処理手順について述べ、その機能を有したソフトウェアを開発し、性能評価を行った。その結果、計測精度と計測時間及び計測安定性と運用性について分析し、提案システムの実用性を示した。

以上の論述より以下の結論を示す。

- (1) 本研究では間接パターン光投影計測手法及び位相シフト手法を用いた多重位相差画像による凹み検出手法を提案した。これにより、鏡面反射物体に対してコントラストの高いパターン光投影を行うことができ、さらに位相シフト手法を用いることで鏡面反射物体の密な形状情報を取得でき、多重位相差画像により微小な凹みを安定して検出することができる。
- (2) 本研究では間接照明を投影し、背景平均化処理と修正バンドパスフィルタによる周波数解析手法を提案した。これにより、鏡面反射物体を均一な明るさで撮影することができ、さらに周波数解析手法によりリングングエフェクト現象等の問題を回避し、安定して微小なキズを検出することができる。
- (3) 本研究では実用可能なリユース自動車車体部品検査システムを試作し、リユース車体部品の凹みやキズの自動検査を実現した。これにより、リユース車体部品の検査技術がないユーザでも短時間で簡単に部品検査を行うことができ、目視検査の技術がなくても短時間で安定して高精度な凹みとキズの検査を行うことができる。

今後の課題として以下の点が挙げられる。

- (1) 新品部品や液晶パネル、セラミック等のような中古自動車車体部品以外の鏡面反射物体に対応する場合の、計測精度をさらに向上する必要がある。現状は自動車車体部品の計測精度を検証しており、鏡面反射物体の計測は自動車車体部品以外でも様々なニーズがあるため、それらの要求を満たすためには、その鏡面反射物体の特性に応じたパターン投影方法や検査アルゴリズムを改良する必要があると考えられる。

- (2) 提案システムの小型化が挙げられる。一部の工場現場では、今回試作したシステムの体積が大きく、導入しにくい問題がある。今後システムの小型化が必要である。

主要記号リスト

θ_k : k 番目の投影パターンの位相シフト量

ω : 位相シフトパターンの角周波数

T : 位相シフトパターンの周期

$P_k(x)$: k 番目の投影パターンの照度

$P_E(X,Y,Z)$: 三次元座標 (X,Y,Z) の環境光の照度

$R(X,Y,Z)$: 三次元座標 (X,Y,Z) の表面反射率

(x,y) : 投光座標系

(i,j) : カメラ座標系

(X,Y,Z) : 世界座標系

$I_k(i,j)$: k 番目の画像 I_k の注目画素 (i,j) の強度値

$I'_k(i,j)$: k 番目の位相画像 I'_k の注目画素 (i,j) の強度値

$\Delta I'_k(i,j)$: k 番目の位相差画像 $\Delta I'_k$ の注目画素 (i,j) の強度値

m : 位相差画像の参照画素のスキップ量を表す係数

M : スキップ量を設定する際の凹み検出範囲

$D(i,j)$: 多重位相差画像 D の注目画素 (i,j) の強度値

$\text{median}\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$: 要素 $f_1 \sim f_n$ の中央値

(u,v) : 周波数空間の座標系

$I'(i,j)$: 処理結果画像 I' の注目画素 (i,j) の強度値

$F(u,v)$: 周波数領域画像 F の注目画素 (u,v) の強度値

$H(u,v)$: ハイパスフィルタ H の注目画素 (u,v) のフィルタ係数

$\text{Re}(F(u,v))$: 周波数領域画像 F の注目画素 (u,v) の実数部の強度値

$\text{Im}(F(u,v))$: 周波数領域画像 F の注目画素 (u,v) の虚数部の強度値

$|F(u,v)|$: 周波数領域画像 F の注目画素 (u,v) のパワースペクトル

$w(i,j)$: ハニング窓 w の注目画素 (i,j) のフィルタ係数

$f(r)$: 修正バンドパスフィルタ(CBPF)の距離 r のフィルタ係数

参考文献

- 1) 経済産業省・環境省：自動車リサイクル法の概要（アクセス日：2013.11.06）
<http://www.meti.go.jp/policy/automobile/recycle/Rejigyousyamuke.pdf>
- 2) 日本自動車リサイクル部品協議会（アクセス日：2013.11.06）
<http://www.japra.gr.jp/cms/recycling>
http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004358/029_05_02.pdf（品質保証）
- 3) 総務省：循環型社会形成推進基本法（アクセス日：2013.11.06）
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H12/H12HO110.html>
- 4) グリーンポイントクラブ（アクセス日：2013.11.06）
<http://www.gpc.ne.jp/> (Ver.1305)
- 5) トヨタ自動車, <http://toyota.jp/prius/ecology/>（アクセス日 2012.7.7）
- 6) 日産自動車, <http://www.nissan-global.com/JP/COMPANY/PROFILE/>(アクセス日 2012.7.7)
- 7) エコチュウ, <http://ecochu.goo-net.com/> (アクセス日 2012.7.7)
- 8) NGP 日本自動車リサイクル事業協同組合(アクセス日 2012.7.7)
<http://www.ngp.gr.jp/recycle/co2/>
- 9) 井口征二, 佐藤宏介：三次元画像計測, 昭晃堂, 東京(1990)
- 10) 長元気, 盧存偉：投影パターン自動調節に基づく実用型全自動 3 次元計測システム, 電学論 C, Vol.127, No.4 pp.561-567 (2007)
- 11) 盧存偉, 上塘広也, 孫可, 辻野和広, 長元気：立体カメラ：全自動三次元画像計測システムの開発と応用, 電学論 C, Vol.131, No.2, pp.320-328 (2011)
- 12) S. K.Nayar, M.Watanabe, and M. Noguchi : Real-Time Focus Range Sensor, Technical Report CUCS-028-95, November 1994. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence(1996)

- 13) 杉本茂樹, 奥富正敏: 多眼ステレオ画像を用いた高速平面パラメータ推定と仮想焦点面画像生成への応用, 信学誌, Vol.J92-D, No.5, pp.671-682(2009)
- 14) 相田貞蔵, 芹川聖一, 中島渉, 山下昭裕, 永村栄治: 背景光の影響を補正した PSD カメラによる三次元座標検出法, 電気学会論文誌 C, Vol.107, No.7, pp.632-639 (1987)
- 15) 横山敦, 佐藤宏介, 芦ヶ原隆之, 井口征士: 無調整型フォト VLSI センサを用いた実時間距離画像計測: シリコンレンジファインダ, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J79-D-2, No.9, pp.1492-1500(1996)
- 16) 土居謙介, 辻徳生, 山本健吉, 石井抱: 高フレームレート三次元画像計測のためのコード化パターン光投影法, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J91-D, No.5, pp.1359-1368(2008)
- 17) 盧存偉, 相立民, 井口征士: 三次元画像計測のための投影パターンの最適化及び準最適組合せ生成アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌, J88-D-II, 2, 325-333(2005)
- 18) 成瀬央, 野村由司彦, 山本俊雄: スリット光投影法による高精度距離・姿勢計測, 信学誌 D, Vol.69, No.12, pp.1888-1895(1986)
- 19) 肥後智昭, 宮崎大輔, 池内克史: 疎な形状を利用した多視点照度差ステレオ法 反射パラメータ推定への応用, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2008)(2008)
- 20) 峯直道, 八木康史, 谷内田正彦: 空間微分画像と差分画像の結合による変化領域検出法, 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol.77, No.3, pp.631-634(1994)
- 21) 山田典彦, 谷口慶治, 仲野豊, 砂原潤治, 飯野修: 画像処理装置を用いたベアリング・シールド板の外観検査の自動化, 電気学会論文誌 C, Vol.117, No.4, pp.432-438(1997)
- 22) 藤吉弘亘: 一般物体認識のための局所特徴量(SIFT と HOG), 映像メディア処理シンポジウム資料, Vol.13th, pp.9-16(2008)
- 23) 藤吉弘亘, 安倍満, 画像技術の最前線 局所勾配特徴抽出技術-SIFT 以降のアプローチ-, 精密工学会誌, Vol.77, No.12, pp.1109-1116(2011)
- 24) 馮澤, 辻野和広, 盧存偉: 自動車車体部品のキズの高精度画像計測, 第 65 回電気関係

学会九州支部連合大会, 10-1A-9, 長崎大学(2012)

- 25) 馮澤, 辻野和広, 盧存偉: 間接照明と周波数解析による自動車車体部品のキズ検出, 電子情報通信学会総合大会, D-11-73(2012)

- 26) K.E.Torrance, E.M.Sparrow : Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surface, JOSA, Vol.57, Issue 9, pp.1105-1112(1967)

- 27) 三宅哲夫, ハイリ ユスフ, 本郷裕一郎: 「鏡面の法線計測と形状再構成」, 信学誌, Vol.J81-D-2, No.7 pp.1556-1563 (1998)

- 28) 日浦慎作, 佐藤宏介, 井口征士: 対象物体の回転による形状と反射率の同時計測, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.10(1995)

- 29) 長峰和也, 川端晃一, 伊藤稔: パターン板の虚像からの受動式鏡面位置・形状計測法, 信学誌, Vol.J91-D, No.6 pp. 1625-1633 (2008)

- 30) 黒田隆史, 三池秀敏: 投影パターン光の鏡面反射像による 3 次元形状計測, 信学技報, Vol.20, No.63(BCS96 53-59/MIP96 64-70) pp.15-20(1996)

- 31) 徐剛, 牛曉明, 山崎雅起, 岩田将: ステレオカメラと位相シフトによる拡散反射面と鏡面の 3 次元形状計測, 情報学研報, Vol.2007, No.1(CVIM-157) pp.45-51 (2007)

- 32) 山崎雅起, 岩田将, 徐剛: ステレオカメラと位相シフト法による鏡面と透明物体の 3 次元形状復元, 情報学論, Vol.49 , No.SIG6(CVIM20) pp79-88 (2008)

- 33) 辻俊明, 猪田良介: 高速度カメラ画像に基づく鏡面反射光の除去, 電気学会論文誌 D, Vol.130, No.3, pp.261-267, (2010)(周期性のある照明+高速度カメラ・精度不明)

- 34) 田中法博, 富永昌治: 3 次元反射モデルの解析と推定, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.SIG10(CVIM1), pp.1-11, (2000)

- 35) 町田貴史, 竹村治雄, 横矢直和: 複数の照明条件の組合せによる物体の表面反射特性の密な推定, 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol.J84-D-II, No.8, pp.1873-1881, (2001)

- 36) 岩瀬正樹, 山村毅, 大西昇, 田中敏光 : 映り込み分離カメラシステム, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-2, No.6, pp.1224-1232 (1998)
- 37) SUN Ke, LU Cunwei : A Three-dimensional Shape Measurement Method Requiring only a Single Observation Image Based on Pattern Projection Technique, IEEJ Trans, Vol.131-C, No.12, Page.2224-2225(2011)
- 38) 藤垣元治 : 光学的全視野計測における位相解析技術, システム制御情報学会誌, Vol.48, No.12 pp.495-503 (2004)
- 39) Kazuhiro Tsujino, Cunwei Lu : Surface form analysis of the parts of the car with specular reflection, Proc. of International Workshop on Image Analysis (IWIA' 2010), S3, pp.1-5(2010)
- 40) J.M.Huntley : Noise-immune phase unwrapping algorithm, AppliedOptics, Vol.28, Issue 16, pp.3268-3270(1989)
- 41) 辻野和広, 盧存偉 : リュース自動車車体部品の微小凹み自動検出のための画像計測システム, 電気学会論文誌 D, Vol.133, No.12, pp.1112-1119(2013)
- 42) 岡田三郎 ; レーザー光回折法による微小キズ検査システム, 検査技術, 9, 3, 8-13, (2004)
- 43) 森秀夫 : 自動車産業と画像処理 金属表面の計測技術, 画像ラボ, 17, 10, 29-32, (2006)
- 44) 江崎泰史 : 自動車産業に貢献する非破壊検査技術 2)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 加工穴表面検査用レーザキズ検査装置, 検査技術, 16, 12, 64-67 (2011)
- 45) キーエンス : 外観検査ソリューション
<http://www.keyence.co.jp/gazo/solution/use/gaikan/features01.jsp>
- 46) 梅津信幸, 鵜野克宏, 清水勲, 小野達矢 : フーリエ変換強度差分を用いた欠陥検出法の実装と評価, 精密工学会誌, 78, 6, 500-504 (2012)
- 47) LEE Jung-ryul, CIANG CHIA Chen, JIN SHIN Hye, PARK Chan-yik, JIN YOON Dong : Laser ultrasonic propagation imaging method in the frequency domain based on wavelet transformation, Opt Lasers Eng, 49, 1, 167-175, (2011)

- 48) 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖夫: ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版, (1999)

謝 辞

本研究を行う機会を与えてくださり、常日頃から多くの御指導を頂きました、盧存偉教授(工学部電子情報工学科)に心より感謝を申し上げます。学部4年次から大学院修士課程、博士課程、博士研究生の今日におけるまでの7年間、私のために多くの時間を割いて研究の考え方について惜しみのないご指導を賜りました。私にとって多くのことを学ぶきっかけになり、研究の考え方について大きな影響を与えてくださいました。また国際会議や学会発表等の貴重な発表の機会を賜りました。また研究室において、実用研究のために様々な実験設備を与えてくださり、研究の面白さを実感させていただきました。さらに学外からの企業の方々との共同研究や、姉妹校等から来日された方々との国際交流等、貴重な交流の機会を賜りました。また、本論文の主査として細部に渡り丁寧かつ貴重な御指導・御意見を頂きました。ここに心から感謝の意を表させていただきます。

本論文の副査として御指導賜りました赤木文男教授、横田将生教授、片山龍一教授には、お忙しい中、本論文の副査を快く受けて頂き、論文の細部に渡り丁寧かつ貴重な御指導・御意見を頂きました。また日頃の研究活動や研究発表、大学院の講義等においても幅広い視点から貴重な御指導・御意見を頂きました。先生方の惜しみのない御指導のおかげで私はこの論文を完成することが出来ました。ここに心から厚く御礼申し上げます。

本研究を行うにあたり、日頃の生活だけでなく研究面やシステム開発、プログラミング等の多くの技術指導を頂きました、盧研究室の博士課程修了生で元株式会社3Dイメージ研究所取締役の長元気氏に厚く御礼申し上げます。氏の多くの御指導と御協力により、実用システムを開発でき、展示会等の場で多くの成果を挙げることができました。ここに深く感謝致します。

本研究を行うにあたり、日頃の生活や研究面で多くの御指導を頂きました、盧研究室の博士後期課程修了生の孫可氏と単位取得者の上塘広也氏に厚く御礼申し上げます。氏の多くの御指導と御協力により、実用システムを開発でき、展示会等の場で多くの成果を挙げることができました。ここに深く感謝致します。

本研究を行うにあたり、多くの助力を頂きました、盧研究室の修士課程修了生の馮澤氏、修士課程在学生の朱永虎氏に厚くお礼申し上げます。氏らの熱意により、実用化システムは展示会等の場で多くの成果を挙げることができました。ここに深く感謝致します。

本研究を行うに当たり、日頃の生活や研究面で多くの御指導を頂きました、電子情報工学科の先生方に厚く御礼申し上げます。氏らの多くの御指導と御協力により、実用システムを開発でき、展示会等の場で多くの成果を挙げることができました。ここに深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり、快く御尽力を頂きました株式会社永田プロダクツ代表取締役社長の永田則男氏、並びに **NGP** 日本リサイクル事業協同組合の方々に厚く御礼申し上げます。氏らは産学連携共同研究の中で、実用システムのための設備投資や実験用部品提供、現場実験等の多くの御支援・御対応を頂きました。また展示会等の発表の場を用意して頂き、私は貴重な体験をさせていただきました。そのお陰で私は円滑に実用システムの開発を進めることができました。ここに深く感謝致します。

大学院生活を支えていただきました、大学院事務室の常軒佐和子氏に厚く御礼申し上げます。氏の御協力・御助言により、私は勉学や研究に専念することができました。ここに深く感謝致します。

本研究を進めるに当たり、多くの御尽力を頂きました産学連携関係者、並びに本大学の総合研究機構の方々に厚く御礼申し上げます。氏らの惜しみない御協力により、私は研究活動や実用システムの開発を円滑に進めることができました。ここに深く感謝致します。

最後に、充実した勉学や研究の機会を与えてくださいました両親、辻野保夫氏と辻野幸恵氏に心から感謝致します。

なお、私は在学中、日本学生支援機構より毎月貴重な奨学金を頂きました。この援助により、私は勉学や研究に専念することができました。ここに深く感謝致します。