

377.5
K-11-2
2-36

レーザ・イメージセンシングによる 自由曲面計測システムの開発



平成 14 年 9 月

岡 田 三 郎

九州工業大学附属図書館



0010516433

目 次

第1章 緒 論

1.1 本研究の背景と目的	
1.1.1 本研究の背景	1
1.1.2 本研究の目的	5
1.2 本論文の概要	6
謝辞	10

第2章 自由曲面計測に関する従来の研究と問題点

2.1 イメージセンシングによる寸法形状計測の現状と問題点	11
2.2 イメージセンシングによる光沢性自由曲面計測の現状と問題点	12
2.3 イメージセンシングによる鏡面自由曲面計測の現状と問題点	20
2.4 加工面の微小傷・欠陥計測に関する従来の研究と問題点	23
参考文献	27

第3章 複合イメージセンサによる高精度寸法形状計測システムの開発

3.1 複合イメージセンサの開発の概要	32
3.2 複合イメージセンサの開発	33
3.2.1 複合イメージセンサの構成	33
3.2.2 画像入力・処理部の構成	38
3.2.3 画像入力ソフトウェアの構成	39
3.2.4 本システムの性能と機械部品への適用例	42
3.3 適応的パターン光投影による高精度三次元形状計測	45
3.3.1 従来 of 三次元形状計測法	45
3.3.2 空間コード化パターン光投影法	47
3.3.3 画像入力変換処理の高速化のための前処理回路と手法の開発	49

3.3.4	適応的に構造化したパターン光投影による画像入力の効率化	53
3.3.5	形状計測結果と精度の検討	56
3.3.6	コード化パターン画像を用いた物体形状認識	58
3.3.7	大局的領域分割	59
3.3.8	区分的直線近似法にもとづくパターンエッジ画素の直線置換	60
3.3.9	勾配ヒストグラムにもとづく平面領域の領域分割	61
3.3.10	三次元形状計測の精度評価	62
3.4	本章の総括と結論	64
	参考文献	65

第4章 同軸線形変位法による光沢性自由曲面の形状計測システムの開発

4.1	光沢性自由曲面の形状計測システムの開発と必要性	67
4.2	形状計測センサの測定原理と課題	68
4.3	開発した形状計測システムの概要	71
4.4	開発した形状計測センサ（プロトタイプ）	71
4.5	形状計測センサ（改良タイプ）の小型軽量化の検討	84
4.6	開発した計測システムの性能評価	90
4.7	本章の総括と結論	94
	参考文献	95

第5章 光線追跡法による鏡面自由曲面の形状計測システムの開発

5.1	開発した鏡面計測システムの概要	98
5.2	校正試験結果と性能評価	106
5.3	金属半球の測定実験結果	109
5.4	本章の総括と結論	113
	参考文献	114

第6章 レーザ回折法による加工面の微小傷・欠陥の検出 識別システムの開発	
6.1 微小傷・欠陥検出識別システムの開発と必要性	117
6.1.1 検査システムの開発目的と概要	117
6.1.2 複合型検査システムの構成	118
6.1.3 光回折パターンの分布形状と検出部の構造	121
6.1.4 検査システムの性能	125
6.1.5 本システムによる傷種識別の性能評価	127
6.2 円筒形状曲面を対象とした傷検査システムの開発	135
6.2.1 微小傷・欠陥検査装置の概要	135
6.2.2 円筒形状内曲面の微小傷・欠陥検査への適用	137
6.2.3 傷自動判定アルゴリズムの検討	143
6.2.4 加工面の面品質評価の検討	147
6.2.5 円筒形状外曲面傷・欠陥検査への適用	150
6.3 本章の総括と結論	155
参考文献	157
第7章 結 論	159

緒 論

1.1 本研究の背景と目的

1. 1. 1 本研究の背景

近年の工業製品は、自動車のボディや内装、携帯電話やハンディビデオカメラ等に代表されるように、高品位かつ自由曲面で構成される繊細で複雑な形状が多くなり、それらを製作するための金型はこれまで以上に高い品質が要求され、それに伴って加工後の表面形状を高精度かつ高速に計測する技術が不可欠となっている。

金型や機械部品の形状計測には、これまでは、接触式プローブが主に用いられている。しかし、接触圧によるプローブや非測定物の変形や傷の発生、先端が有限の大きさの球形のためプローブ径の補正が必要、摩擦のため高速化が困難などの問題があり、光を利用した非接触形状計測技術の研究開発が強く求められていた。特に、高品位の金型では、表面が鏡面に近いため、非接触センサに対するニーズが高い。しかし、拡散光を検出する光学式センサでは鏡面反射光は測定上の重大な障害となっている。したがって、光沢性の高い自由曲面形状の金型や部品の表面形状を、100mm 以上の広い測定レンジを有し、その全域を 0.1mm の測定精度で計測可能な非接触かつ高速の形状計測センサの開発が必要となっている。さらに高品位な鏡面加工された自由曲面の表面形状を加工現場で簡便に測定可能な鏡面形状計測システムの開発が求められ、自動車のボディの品質検査では、表面形状だけでなく法線ベクトルまたは曲率を同時に測定して、ボディの面品質評価に利用したいというニーズがある。

一方、形状計測の自動化に対する要求も高く、TVカメラにより

撮像した画像を利用した二次元および三次元の寸法形状計測法の研究開発が活発に行われている。画像計測法の特徴は、まず測定が高速に行われること、自動化が比較的容易であることなどがあげられる。問題点としては、測定精度が低いことと被測定物の表面性状の影響、鏡面反射光の影響、測定不能領域の発生などがある。標準的な機械部品の寸法形状検査では、対象部品の大きさは50cm以内で、 $\pm 0.1\text{mm}$ の計測精度が要求される。それに対して、汎用の画像処理システムの場合、50cmの視野を確保しようとする、画素分解能は1mmと要求精度より一桁低い。したがって、要求精度を満たすためには、複数のカメラあるいは画素数の極めて多い高解像度のカメラを二次元スライダで移動走査するしかない。さらに、50cmの視野を0.1mmの分解能で画像化すると、扱う画像データ量は2500万画素にも達し、従来比100倍もの大容量の画像データを処理しなければならない。その結果、画像の入力、転送、処理に多大な時間を費やすため、高性能かつ高価な画像処理システムが必要となる等のコストの問題点を生ずる。この問題を解決するには、高精度化と処理データ量の適正な抑制とを両立可能な革新的な計測システムの確立が不可欠である。

上記したニーズに応えるため、光を利用した非接触三次元形状計測法として、これまでに数多くの計測法が開発されてきた。代表的な方式として、三角測量法、焦点位置合わせ法、同軸線形法、モアレトポグラフィ法、変調格子位相法、光ファイバ式反射光量法などがある。しかし、これらの方式は長所と短所をもっている。さらに、拡散光検出方式は表面が鏡面に近づくとつれて測定が不安定になり、ついには測定不能となる。そこで、最近ではレーザ光を光源に用いて、対象面の表面性状や各種外乱光の影響を低減し、安定計測を可能にする形状計測法が注目されている。レーザ光は、単一の波長であること、細く絞ることができ光量も強い。特に、半導体レーザは小型軽量で発熱も小さく、長寿命、機械的衝撃に強いなどの特徴を持つ

ている。しかしながら、半導体レーザー光はスポット光の断面形状が楕円形をしているため、そのまま用いた場合、感度に指向性を生ずるなどの問題がある。これまでに、断面形状を楕円形から真円に整形する光学系が開発されてきたが、センサに組み込むことが可能な小型で低コストのビーム形状の真円化法は見当たらない。

他方、製品の高品位化に伴い、従来は許容されてきた微小な傷や欠陥に対しても厳しい検査要求が出されており、現場で簡便かつ高精度に傷検査が可能な検査システムの開発が求められている。従来は、対象表面の画像をTVカメラ等で取り込み、画像処理により傷や欠陥の検出が行われてきた。しかしながら、最近では製造された部品や製品の全品について、多種多様な微小傷や欠陥を0.1mmの精度で検出可能なシステムが求められている。例えば、自動車用部品の一つである油圧シリンダーの内面検査では、内径20mm、長さ150mmの内曲面上に発生する0.1mmの鑄物巣を10秒以内に検出するとともに良品と不良品とを自動選別する検査システムが要求されている。現在用いられているTVカメラによる検査システムは精度及び検査時間ともに上記した要求を満たすことは困難であり、さらに高精度かつ高速の検査技術の開発が急務となっており、微小傷の検出性能に優れた光回折法に基づく検査システムが注目されている。光回折法は、ハードディスク、ウェハ、レンズ等のサブミクロンの傷検査に使われており、種々の傷から発生した回折光パターンを検出解析するため、特殊な形状の受光センサが用いられている。しかし、受光部が大きく高価であることや、多量のデータを高速処理しなければならないこと、精密光学系のため振動を防止する除震台が必要であることなどから、現場で簡便に利用することは困難である。したがって、現場でも使用できるように、検出部の小型軽量化と装置の低コスト化が必要である。

以上に示す現状技術の問題点の解決を図るため、本論文では、レーザー光とイメージセンシング技術とを融合することで、従来法では困

難であった光沢面や鏡面で構成される自由曲面の形状計測法を確立するとともに、従来熟練作業者が行っていた機械部品の内曲面や外曲面に発生する微小傷や欠陥を高精度かつ高速に自動検査可能な検査システムを提案しその実用化を図ることを目指している。

1. 1. 2 本研究の目的

本研究の目的は、前記した様々な課題を解決するための計測法として、光源に半導体レーザを用い、それにイメージセンシング技術を融合した自由曲面の三次元形状計測技術を確立することにある。そこで、本論文では、以下の内容を取り上げる。

1. 複合イメージセンサによる高精度かつ効率的な寸法形状計測法の確立
 - (1)エリアセンサとラインセンサの機能融合による高精度化と高速化の両立
 - (2)二次元および三次元形状計測の効率化
2. 同軸線形変位法による光沢性自由曲面の形状計測法の確立
 - (1)従来法の欠点を解消した同軸線形変位法の実用化
 - (2)半導体レーザによる小型軽量化
3. 光線追跡法による鏡面自由曲面の形状計測法の確立
 - (1)自由形状の鏡面の表面形状と法線ベクトルの同時計測
4. レーザ回折法による加工面の微小傷・欠陥の検出識別法の確立
 - (1)製品表面の微小傷の検出と傷種識別法の提案
 - (2)円筒形状曲面に適用可能な小型傷検査プローブの提案

以上に示す計測技術を確立することで、高品位の金型製作や信頼性の高い検査が可能となり、工業製品の高品質化、信頼性向上、工程の自動化によるコストダウン、等が実現できる。

1. 2 本論文の概要

本論文では、高品位の金型加工や工業製品の外観検査において、二次元及び三次元の寸法形状の高精度かつ効率的な計測法、および光沢面や鏡面などの従来の光計測法では測定が困難な高品位自由曲面を対象とした小型半導体レーザ光を活用したイメージセンシングによる新しい計測法、曲面上の微小な傷欠陥を自動検査可能な傷検出識別法について述べる。その全体構成は、図 1-1 に示す通りである。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的、概要などについて述べる。次に第2章から第6章の概要について、以下に示す。

第2章では、自由曲面計測に関する従来の研究について、計測方式と問題点について整理を行っている。曲面計測では、まず、イメージセンシングによる寸法形状に関する問題点について述べ、ついで、表面の仕上げ状態により、光沢面と鏡面で構成される自由曲面の形状計測の問題点について述べる。さらに、製品表面の微細な傷欠陥の検査方法に関する従来の問題点を述べる。

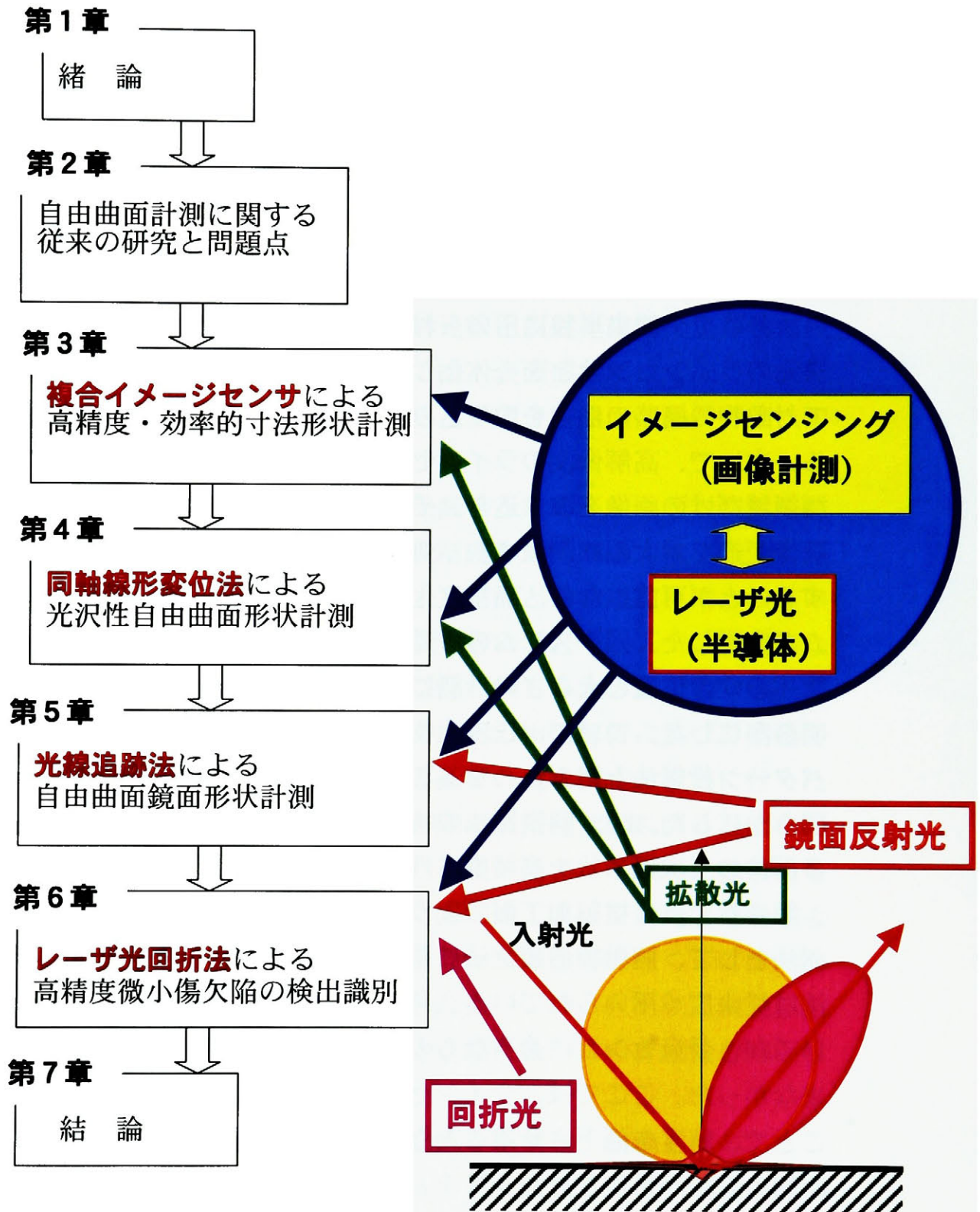


図 1 - 1 本論文の全体構成

以上に示した従来研究の問題点の解決を図るため、本研究で行った内容を第3章以降に述べる。

第3章では、画像を用いた高精度かつ効率的な寸法形状計測法として複合イメージセンサを用いた計測法を提案する。従来の画像計測法では、高精度な形状計測を行うためには画素数の多い特殊なカメラを用いるしかなく、膨大な画像データの処理に多大な時間と高価な処理システムを必要とするなど極めて非効率的な計測法しかない。そこで、従来単独に用いられている二次元のエリアセンサと一次元のラインセンサとを一体化し、まず、低解像度のエリアセンサで対象物の概略の形状を取り込み、その画像から計測領域を抽出する。次いで、高解像度のラインセンサを回転移動して指定された計測領域だけの画像を取り込む。その結果、計測に関係のない無駄な画像データが大幅に削減され、処理データ量を極めて効率的に削減することが可能になり、高精度化と高速処理を両立する計測システムが実現した。同システムの有効性を検証するため、まず、二次元物体の穴の位置と大きさの計測に適用し、従来法と比較し有用性を明らかにした。ついで、三次元物体の形状計測へ拡張し、コード化パターン投影法と組み合わせることで高精度な計測が可能なことを明らかにした。また、同投影法の特徴を生かした領域分割法により、多面体の三次元形状を高精度に計測できることを示した。

第4章では、機械加工面のように光沢性の高い加工曲面の形状計測法として、同軸線形変位法に基づく計測システムを提案した。同法は従来広く用いられている三角測量法に比べ多くの利点を有しているが、受光センサに適当なものがないため、実用化することが出来なかった。ここでは、ラインセンサを回転する受光部を考案することで、精度を低下させることなく測定範囲の大幅な拡大と、測定時間の短縮が可能な計測システムを開発し、実用化の目途をつけることができた。

第5章では、さらに高品位な鏡面を対象とする光線追跡法に基づ

く計測システムを提案した。自由曲面でかつ表面が鏡面の場合、従来の拡散光を利用する光学式計測法は適用できない。その理由は、入射したレーザ光の照射位置を直接検出することが出来ないからである。そこで、高さ方向に離れた位置に複数の一次元光位置検出センサ（PSD）を配置し、これを回転させることで、すべての方向からの反射光を検出する。反射光を空間的に離れた二つ以上の光センサで検出することで、反射光線は、三次元空間内の二点を通る直線の式で表される。その結果、入射光線と反射光線の交点が物体表面の照射点を示している。本方式では、表面形状だけでなく、反射点の法線ベクトルを同時に求めることができ、曲面の品質評価への利用が可能である。

第6章では、製品表面の品質を保証するため、レーザ光回折法に基づく加工面上の微小傷や欠陥を高精度かつ効率よく検出識別する手法を提案した。同法はハードディスクなどの検査に利用されているけれども、検出センサ部の形状が大きいことやシステムが高価なため、機械部品等の検査への適用は行われていない。ここでは、傷面からの光回折パターンの空間分布形状の検出解析に基づく傷種の識別法を検討する。ついで、機械部品等の現場検査を容易に行うため、従来装置の問題点であった検出部の小型軽量化を図るとともに低コスト化を検討した。検出部に、小径の光ファイバーを二重のリング状に並べ、二次元的に広がった回折光と直接反射光とを効率よく分離集光するとともに、光量検出センサの数を少なくしてデータ処理の高速化を図るなどの改良をした。ついで、自動車用機械部品の内外曲面の傷検査に適用し、開発したシステムの有用性を評価した。

第7章では、本研究で得られた結果を総括し、結論とする。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、懇切丁寧なご指導を賜りました九州工業大学情報工学部 緒方純俊教授に、深く感謝し心より御礼申し上げます。さらに、論文作成にあたり、有益かつ貴重なご助言とご指導を賜りました九州工業大学情報工学部 横関俊介教授、藤井仁教授、江島俊郎教授、尾辻泰一助教授の先生方には、謹んで感謝の意を表し、厚く御礼を申し上げます。また、励ましの言葉とご助言を頂いた岡山大学 住本哲宏教授に心より感謝致します。

本研究を進めていく過程で、研究開発とデータの取りまとめに惜しみない協力と支援をしてくださった産業技術総合研究所基礎素材研究部門（中国センター）予測診断技術研究グループの宮内秀和主任研究員、今出政明主任研究員に厚くお礼申し上げます。

また、本研究で開発した計測システムの試作等に多大な協力を頂いた、日本システムデザイン株式会社 麦田憲司社長、井谷優技術総括、二井矢秀司営業総括に感謝の意を表します。

最後に、本研究は、重要地域技術研究開発プロジェクト「生産技術における視覚認識・識別システムの研究開発」ならびに、「自由曲面精密成形のためのデザイン及び加工技術の研究開発」の一環として行ってきたものであり、研究を進める上で、旧通商産業省工業技術院中国工業技術研究所（現在、独立行政法人産業技術総合研究所中国センター）の関係各位と大学、企業、公設機関の諸兄の温かいご支援とご協力の賜物であることを記し、心より御礼申し上げます。

第2章

自由曲面計測に関する従来の研究と問題点

近年の工業製品は、自由曲面で構成される繊細で複雑な形状が多くなり、加工後の形状を高精度かつ高速に計測する技術が求められている。特に、高品位金型加工では、表面の光沢度が高く鏡面に近いいため、非接触計測センサに対するニーズが高い。ここでは、曲面を対象としたイメージセンシングによる形状計測技術に関する従来研究について、その問題点の整理を行う。

最初に、イメージセンシングによる高精度の寸法形状計測の現状と問題点を整理する。ついで、イメージセンシングによる自由曲面形状計測技術として、光沢性のある加工面および鏡面を対象とした計測法の現状と問題点を整理する。また、加工面の高品質化を支える表面検査技術として、加工面の微小傷・欠陥の検出識別技術の現状と問題点を整理する。

2.1 イメージセンシングによる寸法形状計測の現状と問題点

近年、イメージセンシング技術の生産工程への導入には目ざましいものがあり、自動化、省力化の有力な決め手として注目されている。しかしながら、現在用いられている工業用カメラを用いた画像処理システム[2-1] [2-2]の標準的な解像度は縦横500画素程度(視野サイズの0.2%の精度)が主流であり、生産工程で要求される0.1mmの精度で寸法や形状の計測を行おうとすると、視野サイズは5cm程度しかなく、要求仕様である50cm平方の対象物全体の画像を一度に撮り込むことは極めて困難である。したがって、カメラあるいは対象物を精密に移動する装置が必要となり、画像計測の長所である高速性、機動性が失われてしまう。この問題点を解決する方法としては、

画像入力・処理装置の解像度（画素数）を上げることが最も望ましいが、装置が特殊で高価なものになる上、高解像度化に伴いデータ量が急増し、処理速度が著しく低下することや多量のデータを高速処理するためにシステムが大型化、複雑化、高価格化する等の問題が新たに発生する。

精度の向上を図る方法として佐藤等[2-3]、成瀬等[2-4]は画素補間、内挿、関数当てはめなどの画像処理手法を提案している。しかし、広い視野に対して0.1mmの検出精度を安定的に得ることは困難である。この他にも、精度を向上しかつ画像入力処理の効率化を図ったインテリジェント機能を有する画像入力センサの開発が行われている[2-5] [2-6]。有賀等[2-7]の極座標方式のカメラは、ラインセンサの角度を変えながら画像入力を行い、画面の中央付近の解像度を周辺部より数倍高め、画素数を増加させずに精度の改善を図っている。しかし極座標系のため、座標変換と画素補間処理が必要なこと、場所により精度が異なる等の点から、寸法・形状計測には適しているとは言い難い。

上記したように、現状では、大きな物体を対象とする高精度で汎用的な画像入力センサに適当なものがなく、高精度位置決め、寸法計測用途にイメージセンシング法を導入する上での障害となっている。さらに、解像度とデータ処理量とはトレードオフの関係にあり、解像度を高くするとデータ処理量は、急増する。したがって、精度を保ちながら効率的な画像入力と画像処理が可能な画像計測処理システムの開発が求められている。

2.2 イメージセンシングによる光沢性自由曲面計測の現状と問題点

近年の工業製品は、製品の高品位化と質感を向上させるため、光沢性のある自由曲面が多用されており、それに対応した計測技術が求められている。計測法としては、接触式と非接触式に大別されるが、それぞれに長所と短所があり、用途により使い分けられている

のが現状である。

接触式は、球形プローブを対象面にそって做わせる計測法であるが、先端はある大きさの球形となっており、その径より小さい凹凸形状は測定できない。また、正確な座標を得るためには、プローブ補正が不可欠である。また、プローブで表面を做うため、測定速度が遅いなどの問題点があるものの、サブミクロンの高い計測精度を有している。

一方、非接触式は、対象物に触れないため、傷や痕跡が残らない、測定点の正確な座標が得られる、高速測定が可能である。その反面、測定面の表面の影響を受けやすいなどの欠点がある。

一方、レーザを用いた非接触計測では、図2-1に示すように、対象面が光沢面であるか鏡面であるかにより、測定方法を変える必要がある。すなわち、一般的な光計測法では、細く絞ったレーザスポット光を対象面に当て、その反射散乱光（拡散光）を検出する。これに対して、対象面が鏡面の場合、反射散乱光はほとんどなく鏡面反射光のみとなる。

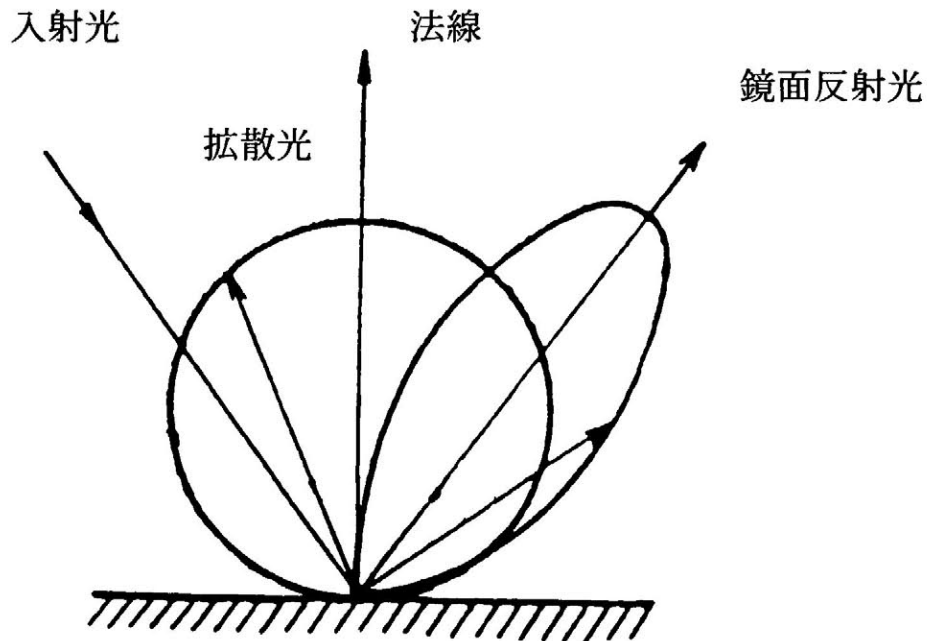


図2-1 表面での反射特性

したがって、反射散乱光を用いる測定法は適用できない。そこで、鏡面以外の面は、拡散光と鏡面反射光との比率により、拡散光が支配的な場合を拡散面（粗面）、鏡面反射光が支配的な場合を光沢面に分けてそれぞれに最適な計測法を適用する必要がある[2-8] [2-9]。ここでは、光学的形状計測における計測原理を以下に示す。最も一般的な計測原理に三角測量法がある。レーザ光は被測定物表面にスポット状に集光して照射され、その反射散乱光を、光源から既知の距離と角度で固定された受光器により検出し、三角測量法の原理に基づいて、照射点までの距離を求める方式である。本方式の欠点は、距離により、測定精度が大きく変化することにある。

(1) 従来の光触針法

光学的微小変位を測定する方式で、微小な変位を高精度に測定することを目的とし、従来から用いられている測定法として、臨界角法、非点収差法[2-10]、ナイフエッジ法、ヘテロダイン法[2-11]、合焦点法[2-12]等がある[2-13] [2-14]。以下に、代表的な測定法の原理を示す。臨界角法は図2-2に示すように、対物レンズを通して鏡面反射物体に微小スポット像を結ばせる。スポット像が対物レンズの焦点面上にあれば、対物レンズを戻って出る光は平行光となり、臨界角プリズムに入射する。スポット像の位置が対物レンズの焦点面の手前または奥にある場合で、2分割フォトダイオードに入射する光量は左右で異なるので、その差をとれば、物体面の位置に比例した出力が得られる。

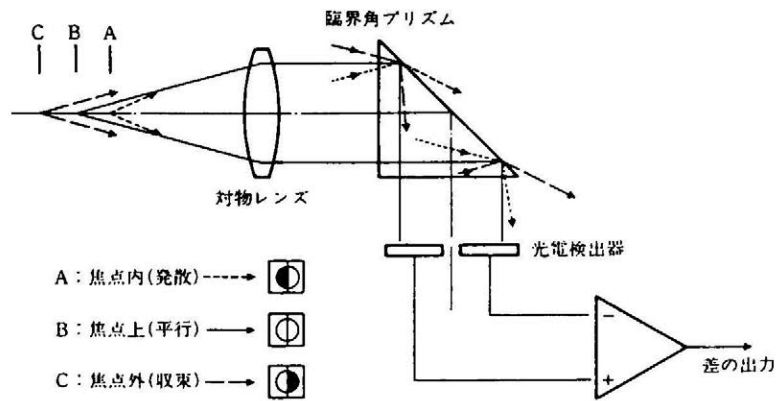


図 2 - 2 臨界面法の測定原理図

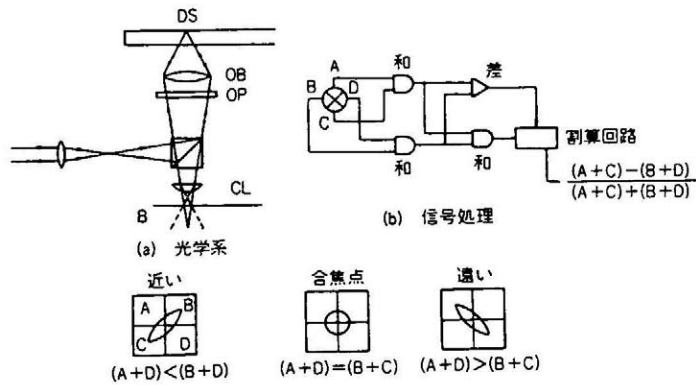


図 2 - 3 非点収差法の測定原理図

非点収差法[2-10]は、図 2 - 3 に示すように、非点収差をもった光学系で点像を結像すると、観測面の位置によって像が縦長、円形、横長へと変化する。この光スポットの形状を 4 分割光検出器で測定し、次式で計算することにより、変位を求める。

$$e = ((a+d) - (b+c)) / (a+b+c+d)$$

その他、ナイフエッジ法、ヘテロダイン法[2-11]については、原理のみを、図 2 - 4 と図 2 - 5 に簡単に示す。

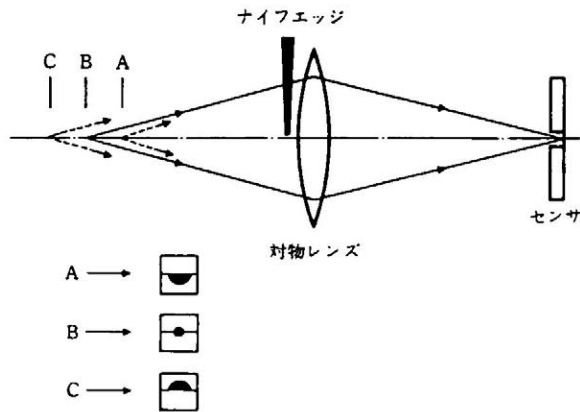


図2-4 ナイフエッジ法の測定原理図

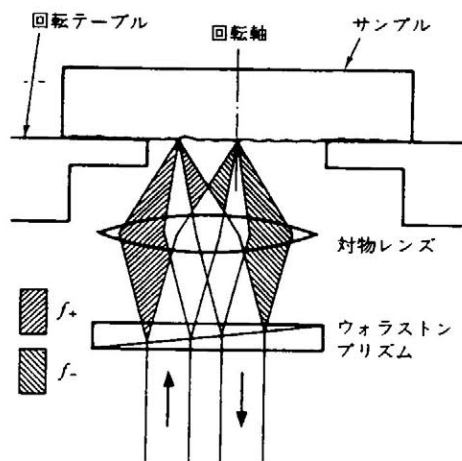


図2-5 ヘテロダイン法の測定原理図

(2) 光切断法

光切断法は、図2-6に示すように、測定対象物にシート状の光を投影し、前記した三角測量法の原理を用いて、一度に多点の形状を測定する方式である[2-15][2-16]。通常は、TVカメラと画像処理装置と特殊光源が必要となる。利点としては、同時多点測定のため、測定時間は短くなるが、TVカメラの分解能の制約を受け、測定精度は数mm程度と低い。

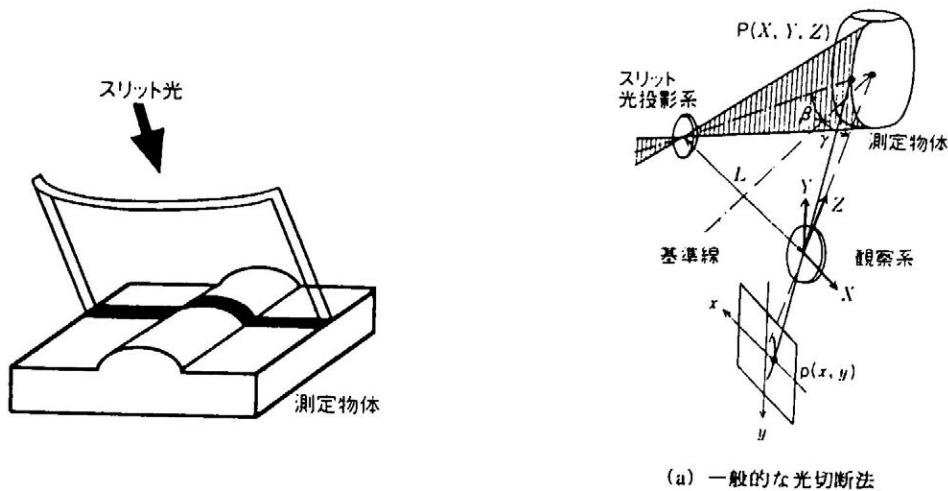


図 2 - 6 光切断法の測定原理図

(3) 新しい光触針法

前記した従来の光触針法は、測定範囲を狭くして、高精度の測定を行う用途に適しており、工業製品等の大きな対象物の形状測定には不向きである。そこで、以下に示すセンサは、測定精度を抑えることで、測定範囲を広くするものである。

三好ら [2-17] により開発された光触針式倣いセンサは、拡散光検出方式で、図2-7に示す構造である。同図において、L1、L2は焦点距離が f_1 、 f_2 の凸レンズで、レーザー光は、対物レンズの右から光軸を通過して被測定物に直角に照射される。測定面で反射散乱した光は、対物レンズで集光され、スリットを通り、次のレンズでラインセンサ上に結像する。このとき、各光学系の位置関係を同図のように調整すると、結像点における距離 d と各定数との関係は次式で示される。

$$d = a f_2 / f_1^2 \cdot z \quad (2-1)$$

上式において重要なことは、変位 z とラインセンサ上の距離 d とが線形関係となっていることである。すなわち、測定範囲の中では、すべて同じ精度で測定できることを意味している。このことは、三角測量法が、センサからの距離により精度が大きく変わることと大きく異なり、本手法の優れている点である。

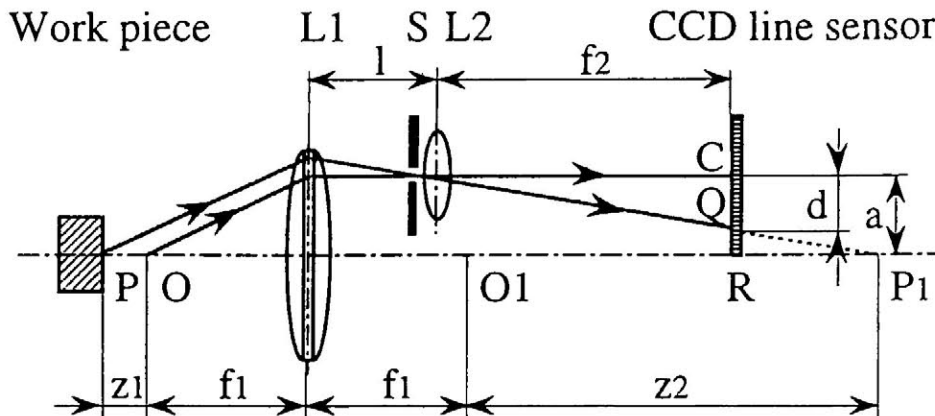


図 2-7 光触針式倣いセンサの構造

(4) 同軸線形変位方式 (光リング式)

(3)の方式をさらに改良発展させた測定法が、以下の方式であり、本研究で開発する形状計測センサの基礎となる方式である [2-18] [2-19] [2-20]。本方式も拡散光検出方式に含まれる。

光学系の構成を図2-8に示す。2枚の非球面凸レンズの間に円環状のスリット板をおき、光軸上の右側から入射したレーザ光は被測定物表面で反射し、その拡散反射光は対物レンズで集光した後、円環状スリット板の開口部を通過して、後方のレンズで集光し、結像面に円環状の光像を形成する。そこで、この光像を CCD エリアセンサ等で検出し、光像の半径 R を計測することにより、対象物の形状を次式により求めることができる [2-21]。

$$R = a f_2 / f_1 \cdot z_1$$

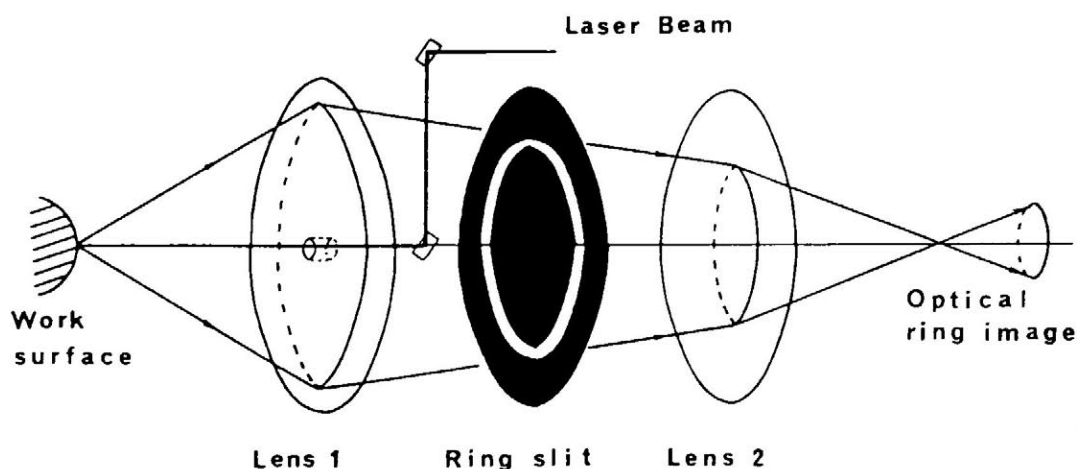


図 2 - 8 光学系の構成

本方式の特徴を以下に示す。

- ①被測定面の表面性状（材質、反射率、粗さ、傷等）の影響を受けにくい
- ②被測定面の形状（曲率、傾斜角など）の影響を受けにくい
- ③作動範囲が長く、測定範囲が広い
- ④レーザ光の入射軸と受光軸が同一のため、測定不能領域が狭い
- ⑤構造が簡単のため、装置化しやすく低コストで製作できる
- ⑥光像直径と変位の関係が線形のため、測定範囲全体で同じ精度で測定できる

しかし、本方式には以下に示す問題点があり、実用化の障害となっており、早急に解決する方法の研究開発が求められている。

- ①受光用検出器にエリアセンサ以外に適切なものがないため、その解像度により、測定範囲と測定精度に制限がある。
- ②円環状光像の直径の測定に時間を要するため、測定に時間がかかる
- ③材料表面と円環状スリット板端面で発生するスペックルノイズの影響を受け、安定計測が困難であるとともに測定精度を低下

させている。

- ④測定原理からレーザー光はスポット径が円形で0.3mm程度の平行光であることが望ましいため、現状ではHe-Neレーザー等の大きな光源を用いており、小型軽量化のネックとなっている。

2.3 イメージセンシングによる鏡面自由曲面計測の現状と問題点

近年、製品の高品位化に伴い、家電製品をはじめ表面が鏡面の自由曲面で構成される製品が多くなり、製品設計や検査等では表面形状だけでなく曲面の品位（法線ベクトルまたは曲率）まで検査することが求められている。また、コンピュータビジョン、ロボットビジョンの分野においても、拡散反射物体だけでなく、鏡面物体を対象とする機会が多くなり、鏡面計測技術を確立することで、その適用範囲が広がるなど多くの波及効果が期待される。その場合、鏡面物体では、形状復元において表面形状だけでなく、曲率や法線ベクトルが測定されれば、高品位の形状復元が実現可能なことから、両者を同時に測定するシステムの開発が望まれている。これまでに、レンズ、反射鏡等の光学素子の球面や平面を高精度に計測する測定法の開発が行われてきた[2-22]。しかし、非接触方式で球面以外の自由曲面形状の鏡面物体の形状と法線ベクトルとを生産現場で簡便に同時測定可能な装置は見当たらない[2-23]。

鏡面物体の三次元復元に関する研究は、80年代のはじめから行われてきた。K. Ikeuchi の分布式光源照度差ステレオ法[2-24]、越川の反射偏向法[2-25]、中川らのスポット光走査式光切断法[2-26]、A. C. Sanderson らの構造化ハイライト法[2-27]、S. K. Nayar らの照度差サンプリング法[2-28]、葉らのM系列符号化格子光源照明法[2-29][2-30]などがある。K. Ikeuchi は複数の分布式光源を用いて、無限遠光源および既知の物体位置の仮定のもとで反射光の輝度とその輝度に対応する光源位置との角度関係から物体表面の向きを復元している。しかし、同法では、周囲を暗くする必要があり、計測精

度は反射光の輝度の測定精度に強く依存する。中川ら[2-26]は、スポット投影法にもとづく特殊な光学系により、はんだ付け部の金属表面形状を計測した。A. C. Sanderson ら[2-27]は対象を覆う点光源アレーを走査することで得られる画像上のハイライトに着目して、鏡面物体の形状復元を行っている。しかし、同法は、ハイライトの検出能力に左右され、広い視野を得るには特殊な照明装置が必要となる。S. K. Nayar ら[2-28]は照度差サンプリング法を用いて、光沢性物体の形状および反射特性の復元法を示している。しかし、同法は、暗室条件が必要である。葉ら[2-27]は、M系列符号化格子をもつ拡散面光源を用いた平面からなる鏡面物体の三次元計測法を示している。しかし、対象とする物体表面は平面で構成される多面体である必要があり、自由曲面へは適用できない。

他方、鏡面形状を測定することが目的ではなく自動車ボディ、プレス金型の面品質の評価装置として、カナダの DIFFRACTO 社の D-SIGHT 測定機と称する表面欠陥検査装置[2-31]がある。本装置の特徴は、図2-9、図2-10に示すように、スクリーンに張り詰められた指向性の強い特殊なビーズの効果により、被検査物の表面の凹凸を強調して画像に取り込み、表面欠陥の検査を行うことにある。得られた画像には、表面の局所的な面勾配に対応した明暗が現れているので、積分処理することで断面形状を復元することが可能である。反面、積分による誤差が累積されるため、測定精度は低いことと自動車のボディのように連続かつゆるやかな曲面でなければ測定できない。逆に、二次微分をとることで、従来法では測定が困難な局所曲率を容易に求めることができる利点がありハイライト線を用いた面品質評価法として注目されている。

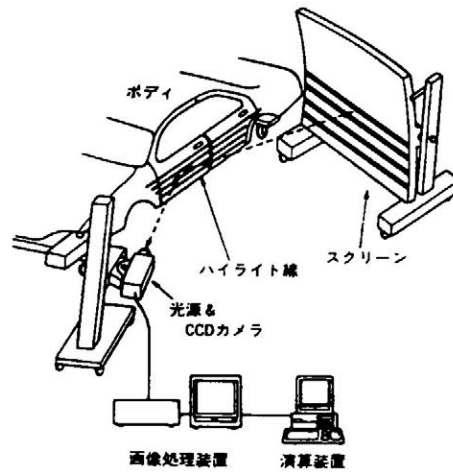


図 2 - 9 表面欠陥検査装置の構成

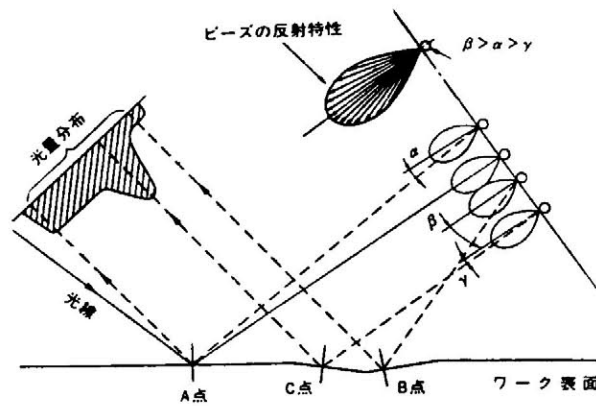


図 2 - 10 ビーズ球による凹凸測定原理図

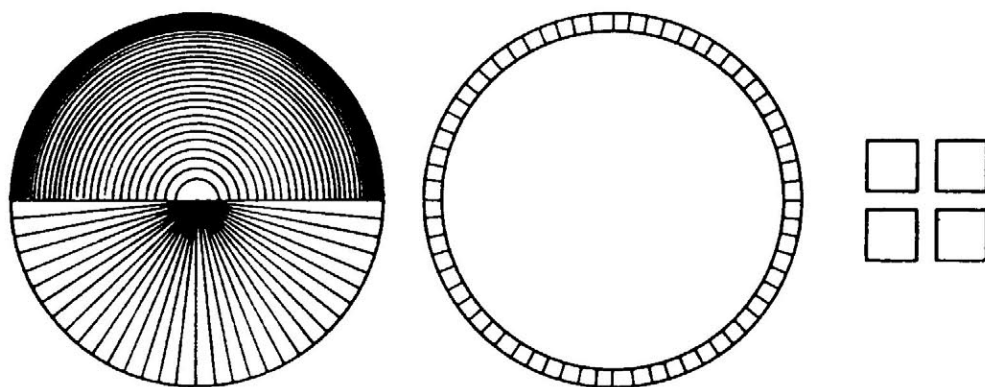
これまでに、鏡面物体の形状計測に関して、様々な計測法が提案されてきた。しかし、拡散反射と異なり、鏡面反射の場合、反射光は反射点の位置だけでなく面の傾きにも依存する。したがって、撮影された二次元画像と幾何学的なパラメータのみでは反射点の位置を一意に求めることが出来ないこと等から、平面で構成される比較的単純な形状の鏡面体しか測定することができず、複雑な自由曲面の形状計測法は確立されているとは言い難い。

2.4 加工面の微小傷・欠陥計測に関する従来の研究と問題点

工業製品や加工品表面の傷検査は、高品質の製品を安定供給する上で必要不可欠である。特に、近年の製造技術の急速な進歩に伴い、表面品質検査に対する要求は年々厳しさを増している[3-32][2-33]。したがって、光学式、電磁式、超音波式等様々な検査技術が研究開発され、中でも、光学式表面検査法は、非接触、高速、高精度、高信頼性等の点で他法よりすぐれ、回折、散乱、偏光等の光特有の性質を利用した検査システムが次々と考案され生産ラインへ導入されてきた[2-34][2-35][2-36]。また、検査内容に関しても、従来は、検査の高速化、自動化と微小な傷・欠陥の有無を正確かつ確実に検出する技術の開発が要求されていた。しかし、最近では、傷の有無だけでなく傷種を識別して、その傷がどのような原因で付いたものかを分析し、設備の改善や品質向上に役立てることが求められるようになり、付加価値の高い検査システムの開発が要求されるようになった[2-37][2-38][2-39]。これまでに報告されている傷種識別が可能な検査システムとして、深沢ら[2-40]が開発した鋼板、樹脂板を対象とした表面傷検査装置は、レーザ光回折法を用い、傷種の違いが最も明瞭に現れる鏡面反射光周辺の特定の4カ所の回折光を検出するとともに、傷の面的な形状の幾何学的特徴量を用いて傷種と等級を自動判定している。また、米田ら[2-41]が開発した磁気ディスクサブストレート表面傷検査装置は、円環・ウェッジ型光検出器[2-42]を用いて傷面からの回折パターンの分布形状の特徴を効率よく検出し、特徴パラメータによる解析処理に基づき4種類の傷種を分離識別している。この他にも傷種の識別を目的とした検査装置が報告されている[2-43][2-44]。その多くは光回折法を用いており、回折パターンを検出する検出器の構造や配置、データ処理法を工夫することで傷種の識別を行っている[2-45][2-46]。

代表的な回折光パターン検出器の例を図2-11に示す。円環状ディテクターと四分割ディテクターは、回折パターンの非対称性や

パターンの広がり方向だけを検出する目的に用いられ、光回折パターンの二次元的な分布を検出することは出来ない。一方、円環・ウェッジ型ディテクターは、傷からの光回折パターンが回転対称であることから上半分に32個の円環状素子を、また、下半分に32個のウェッジ状素子を配置することで、光回折パターンの二次元分布を効率よく検出することができる。同ディテクターで得られるデータは、画像処理におけるX方向およびY方向の射影画像と同じと考えられ、回折パターンの分布の概略の特徴は捉えられる。しかし、分布形状が複雑な場合は、正確な分布を得ることは極めて困難である。



円環・ウェッジ型ディテクター 円環状ディテクター 四分割ディテクター

図2-11 代表的な回折光パターン検出器の例

具体的な例として、筆者らは、従来の光回折法を製品の外板としてよく使用されている圧延板材の表面傷検査に適用した。その結果、傷・欠陥を安定的に検出することが以外に難しいことが明らかとなった。すなわち、圧延板の場合、製造工程でローラによる圧延加工中に表面に圧延条痕と呼ばれる微小で規則正しい一種の線状傷が正常品においても必ず生成される。これに光回折法を適用した場合、検査面全面で圧延条痕による回折パターンが発生し、検出すべき

傷・欠陥と圧延条痕による回折光とが重なり合う現象を生ずる。しかし、既存の検出器の中で最もすぐれた円環・ウェッジ型検出器でも、回折光パターンの二次元構造を正確に検出することができないため、圧延条痕の中に混在する傷を的確に検出識別することは困難である。

そこで、圧延板材の製造ラインでは、圧延方向が既知であるから、検出器に圧延条痕による回折光を遮光するマスクをつけて傷検査を行っている。しかし、一般に圧延板を加工する場合、圧延条痕の向きは定まっていないので、マスクにより回折光の一部を遮光する方法は適用できない。したがって、放射状に発生する回折光パターンの詳細な構造を正確に検出可能な新しい検出器とそれに適した傷識別法の開発が早急に必要である。これに加えて、光回折法は、測定原理から明らかなように、検出が必要な傷の形状の中で、傷の深さに関する情報が得られないこと、被検体は平板やフィルムのように高さが一定で表面に凹凸のないものでなければならないこと、さらに欠け、割れなど大きな傷・欠陥は、エッジ以外では回折光が検出器に戻らないために検査ができないなどの問題点があり、それらの対策が求められている。

他方、平面以外の曲面を対象とした傷検査技術については、研究開発が進んでいないようである。その原因は、曲面の場合、照射したレーザ光はその点の面の傾きにより反射方向が変化するので、反射方向に合わせて受光部の位置を移動するなどの機構が必要であり、自動計測が困難になったり、測定に時間がかかる等の問題がある。また、光回折法に基づく検査システムは、図 2-11 に示すように、検出センサが大きく高価なため、機械部品等の傷検査には適していない。光沢性の低い部品に関しては、TVカメラで対象物表面の画像を取り込み、画像処理により傷検出が行われているが、曲面の場合、照明の当て方やカメラとの位置関係により、傷の検出性能が安定しない等の問題がある。

したがって、本論文では、機械部品に用いられる曲面は、機械加工の効率化を図るため、軸対象形状が主であることから、部品を回転させておいて、検査プローブを検査面に直角に設置して軸方向に移動しながら曲面の傷検査を行うシステムを提案する。

参考文献

- [2-1] 江尻：工業用画像処理、昭晃堂、p.137-166 (1988)
- [2-2] 岡田・麦田：画像処理用VMEボードの開発、第2回産業における画像センシングシンポジウム、p.95 (1987)
- [2-3] 佐藤・井口：液晶レジファインダ―液晶シャッタによる高速距離画像計測システム、信学論(D)、J71-D、7、p.1249 (1988)
- [2-4] 成瀬・野村・山本：スリット光による高精度距離・姿勢計測、信学論(D)、J69-D、12、p.1888 (1986)
- [2-5] 小郷・橋本・大平・桜井：ラインCCDを用いた精細画像抽出方式、信学論(C)、J65-C、p.958 (1982)
- [2-6] 肥塚・平岡・中島・稲垣：辞書学習機能を備えた一括画像入力形高速キー配列検査装置、電学論C、108、5、p.339 (1988)
- [2-7] 有賀・吉野・小郷・溝手・寺川：極座標方式ラインCCDカメラの検討、電学論C、109、5、p.394 (1989)
- [2-8] 谷田貝豊彦：応用光学光計測入門 丸善、p.118、(1988)
- [2-9] 吉澤徹：光三次元計測 新技術コミュニケーションズ、p.2、(1993)
- [2-10] 和田尚、平林次夫：画像計測、p.52、(1972)
- [2-11] G. E. Sommargem, Appl. Opt., 20, p.610, (1981)
- [2-12] 太田成賢：合焦点型非接触変位計による表面性状測定、光技術コンタクト、26、11、(1988)
- [2-13] 電気学会誌：三次元形状計測特集号、Vol.107-C、No.7、p.608-631 (1987)
- [2-14] 井口征士他：三次元画像計測、昭晃堂 p.80 (1990)
- [2-15] 荒木和男：高速三次元形状計測装置の試作、信学論 J71-D、10、p.2059-2068、(1988)
- [2-16] 成瀬央：スリット光投影法による高精度距離計測、信学論、J69-D、12、p.1888-1894、(1986)
- [2-17] 三好隆志他：非接触3-Dディジタル計測システムの開発研究、精密工学会会誌 56、6、p.1021、(1990)

- [2-18] 三好隆志他:三次元自由曲面の非接触形状測定センサの開発研究(第1報)光リング式センサの解析、精密工学会会誌 58、11、p.1886、(1992)
- [2-19] 三好隆志他:三次元自由曲面の非接触形状測定センサの開発研究(第2報)光リング式センサの特性、精密工学会会誌 58、12、p.2087、(1992)
- [2-20] 三好隆志他:三次元自由曲面の非接触形状測定センサの開発研究(第3報)光リング式3-D形状計測センサ、精密工学会会誌 61、2、p.258、(1995)
- [2-21] 型技術協会:金型加工形状の非接触式計測評価技術の研究開発報告書(1996)
- [2-22] 辻内順平他:高精度鏡面形状測定法 非球面測定を旨として、オプトロニクス社、(1994)
- [2-23] 青山英樹:法線と位置の連続検出型非接触プローブによる曲面の自律探査測定システムの試作開発、科学研究費成果報告書No.05555046、(1995)
- [2-24] 池内他: IEEE、Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, p.661, (1981)
- [2-25] 越川他: Proc. 6th Int. Joint Conf. Artificial Intelligence, p.493, (1979)
- [2-26] 中川泰夫、押田良忠、二宮隆典、佐々木英昭:スポット光走査方式光切断法によるはんだ付部の形状計測、計測自動制御学会論文、22、9、p.982-987、(1986)
- [2-27] A.C. Sanderson、 L.E. Weiss and S.K. Nayar: Structured Highlight Inspection of Specular Surfaces、 IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence、 PAMI-10-1、 p.44-55、 (1988)
- [2-28] Nayar S.K., Sanderson A.C., Weiss L.E. and Simon D.A.: Specular Surface inspection using structured highlight and Gaussian image、 IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine

- Intelligence, RA-6, 2, p.208-218, (1990)
- [2-29] 葉雄英他:符号化パターン光源の照明による鏡面物体の形状測定、第3回産業における画像センシング シンポジウム, p.6-10, (1988)
- [2-30] 西村拓一他:M配列を用いた鏡面物体の三次元計測、第7回産業における画像センシング シンポジウム, p.7-10, (1992)
- [2-31] 中野孔明、宇佐美幸彦、谷口喜久:自動車ボディにおける面品質定量評価・解析装置の開発、型技術、Vol.9, No.3, p.76, (1994)
- [2-32] 丸山豊史:薄鋼板きず検査法の変遷、日本機械学会誌、vol.86, no.772, p.243-249, (1983)
- [2-33] 丸谷洋二:目視検査の自動化技術、日刊工業新聞社、(1987)
- [2-34] 谷田貝豊彦:応用光学光計測入門、丸善、p.176-184, (1988)
- [2-35] 森村正直:センシングデバイス、技術資料センタ、(1986)
- [2-36] 目視検査の自動化特集号、電気学会論文誌 C, vol.107, no.8, p.703-728, (1987)
- [2-37] 田村進一:F Aのための画像処理技術、工学研究社、p.491-505, (1988)
- [2-38] 三井公之:最近の表面欠陥検査法、機械の研究, vol.40, no.3, p.362-368, (1988)
- [2-39] 深沢千秋他:知識工学応用表面検査装置 TOSPECTRON、東芝レビュー, vol.44, no.5, p.413-416, (1989)
- [2-40] 米田康司他:磁気ディスクサブストレート表面欠陥検査装置の開発、精密工学会誌, vol.56, no.3, p.479-484, (1990)
- [2-41] D.P.Casasent: Optical Information Processing, Springer, p.191, (1981)
- [2-42] B.R.Suresh et al.: "A real-time automated visual inspection system for hot steel slabs" IEEE, PAMI-5, No.6, p.563, (1983)
- [2-43] 河野嗣男:先端産業のための表面欠陥検査法、アイピーシー、

(1989)

[2-44] 錢場敬:画像処理装置を用いた各種オンライン表面検査装置、
画像ラボ、Vol.4 No.1~No.4, (1993)

[2-45] 相沢均他:ステンレス鋼板表面傷検査装置の開発、第1回産
業における画像センシング技術シンポジウム, p.29-34, (1986)

[2-46] 住江伸吾、西元善郎:ガラス基板表面のキズとほこりの識別、
電気学会論文誌C, vol.112, no.2, p.89-96, (1992)

第3章

複合イメージセンサカメラによる高精度寸法形状計測システムの開発

本章では、製品や部品等の二次元および三次元形状計測を高精度かつ効率よく行うために、形状の異なる二種類のイメージセンサ（エリアセンサとラインセンサ）を機能融合した新しい複合イメージセンサカメラを用いた寸法形状計測法を提案する。汎用の工業用カメラ（NTSC方式）を用いた画像処理システムは、縦横500画素程度（視野サイズの0.2%の精度）の解像度しかなく、生産工程で要求される0.1mmの精度で寸法や形状の計測を行おうとすると、わずか5cm平方の視野しか一度に取り込むことが出来ない。したがって現場で要求している50cm平方の視野の画像を0.1mmの精度で取り込むには、複数のカメラを用いるか、X-Yスライダなどでカメラを移動するしかなく、効率的な計測が困難となる。最近では、デジタルカメラやメガカメラと称する画素数の多い画像入力装置があるが、視野が縦横に数倍程度広がる一方で、データ量は縦横の画素数の積に比例して急激に増加するため、データ転送と解析処理に多大な時間を要する欠点がある。したがって、トレードオフの関係にある解像度とデータ処理量とのバランスを取りつつ、精度を保ちながら効率的な画像入力と画像処理が可能な画像計測処理システムの開発が求められている。

そこで、上記した問題点を解決し、実用的な画像計測技術を確立することを目標として、まず、二次元的な寸法形状計測の高精度化、効率化を目指し、ついで、三次元計測への拡張を目指した。

なお、ここで測定対象物の表面は粗面（拡散面）とする。開発の目標を以下に示す。

- 1) 二次元計測では、従来の画像計測法に比べ大幅な高精度化を可能にする。
- 2) 高精度化に伴うデータ処理量の急増と処理時間の増大を軽減する効率的なシステムとデータ処理法を開発する。
- 3) 三次元計測においては、コード化パターン投影法を用いた高精度・高能率形状計測法を実現する。
- 4) 画像入力・前処理部に独自の高速化回路を組み込んだ画像計測処理システムを開発試作し、画像処理の高速化を実現する。

3. 1 複合イメージセンサの開発の概要

高精度・高能率の画像入力法を確立することを目指して、従来、単独に使われているエリアセンサとラインセンサを光学的、機能的に一体化・複合化することで、高精度化と入力処理時間の短縮とデータ量の効率的な削減を同時に満足する新しい画像入力センサシステム（以下複合イメージセンサと記す）を開発した[3-1]。

提案する方式では、まず、画素分解能1mmのエリアセンサで対象物全体の画像を高速に撮り込み、エリア画像上で寸法形状計測に必要な領域を抽出する。ついで、抽出した領域内を画素分解能 0.1mmのラインセンサを機械的に回転移動走査して二次元画像を撮り込み、この部分的な高精度画像を用いて効率よく寸法形状計測を行う。

本方式と既存のラインセンサを機械走査する小郷ら[3-2]、有賀ら[3-3]の画像入力装置との相違点は、本方式ではエリアセンサでラインセンサの画像撮り込み領域を絞り込むことにより、画像入力時間の短縮と、形状計測に不用な領域のデータの切捨てにより処理の高速化、効率化を図ることと、汎用の画像処理システムに独自の前処理回路を組み込むことで専用の高価なプロセッサを用いることなく寸法形状計測の高速化を可能にした点にある[3-4]。

一方、機能面では、ラインセンサに並進走査機構だけでなく回転

機構を新たに設け、対象物の傾きや形状にセンサを適切な角度に合わせて画像入力することで効率的に時間短縮を図った点にある。

3. 2 複合イメージセンサカメラの開発

3. 2. 1 複合イメージセンサカメラの構成

開発した複合イメージセンサシステムの外観を図3-1に示す。本システムは、複合イメージセンサカメラと画像入力処理装置と画像解析装置により構成される。複合イメージセンサカメラは、受光部に形状の全く異なるエリアセンサ(縦横512画素)とラインセンサ(東芝製TCD106C、一次元5000画素)を用い、図3-2に示すような同一視野の画像を両センサ上に結像させる光学系を考案した。対象物は光学レンズ系 L_1 によって、ラインセンサの受光面に結像され、かつ光路途中の電動切り替え式のミラーMによってポリエステル製の白色半透明スクリーンS上にも結像される。スクリーン像は裏面から光学レンズ系 L_2 によってエリアセンサの受光面に縮小結像され、二つのセンサには同一視野の像が撮り込まれる。ミラーの代わりにハーフミラーを使用しても良いが、光量が半分以下に減少し、SN比が低下することから、ミラー切り替え方式を選択した。



図3-1 複合イメージセンサの外観

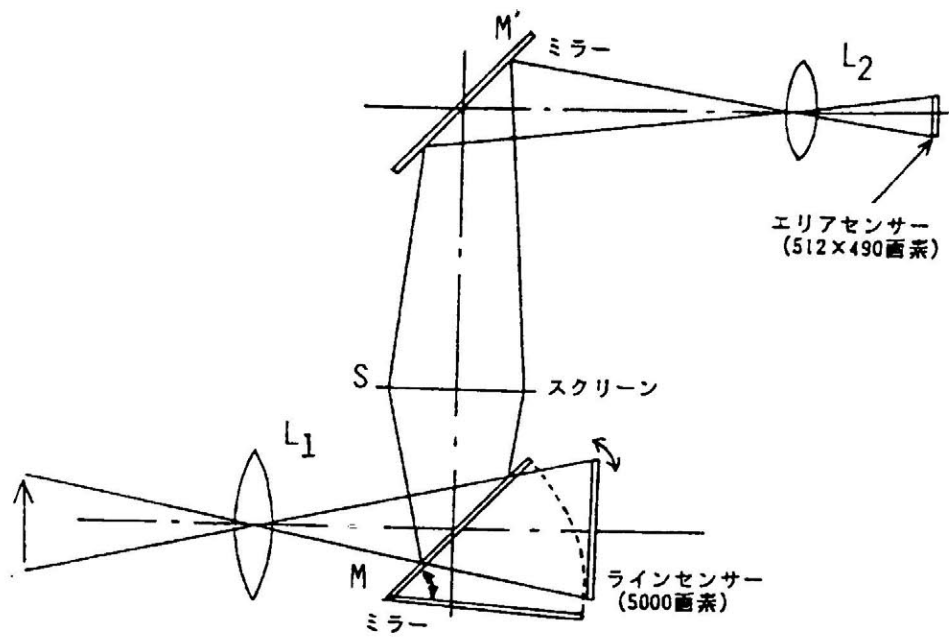


図 3 - 2 視覚検出部の光学系

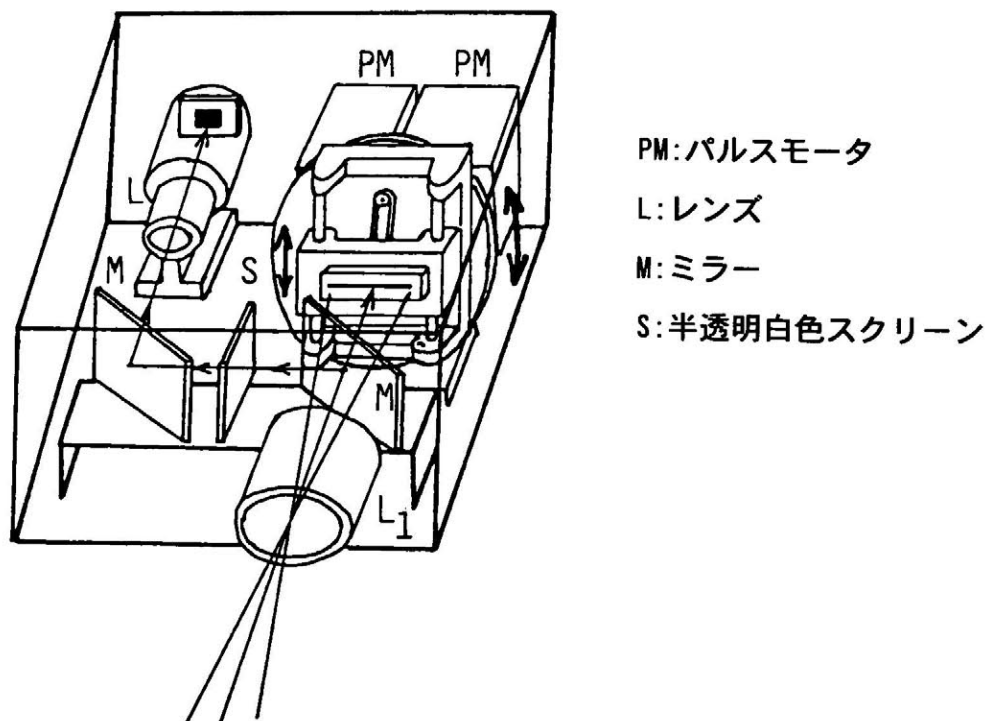


図 3 - 3 視覚検出部の構造

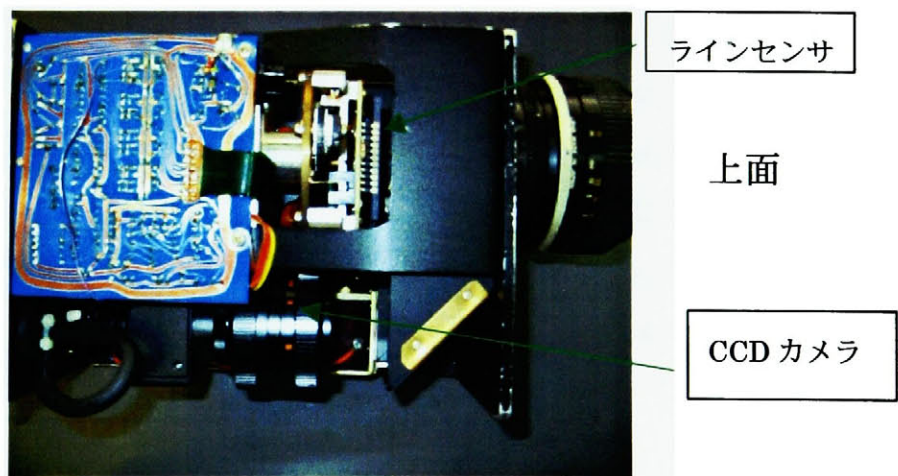
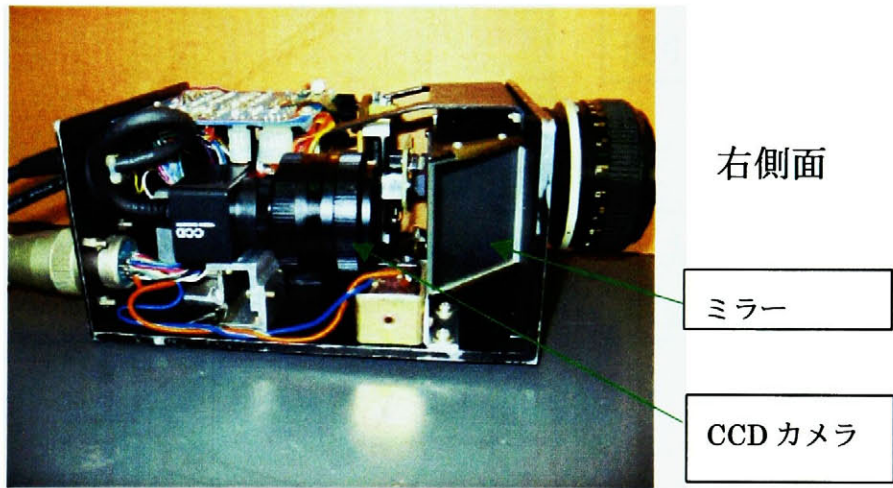
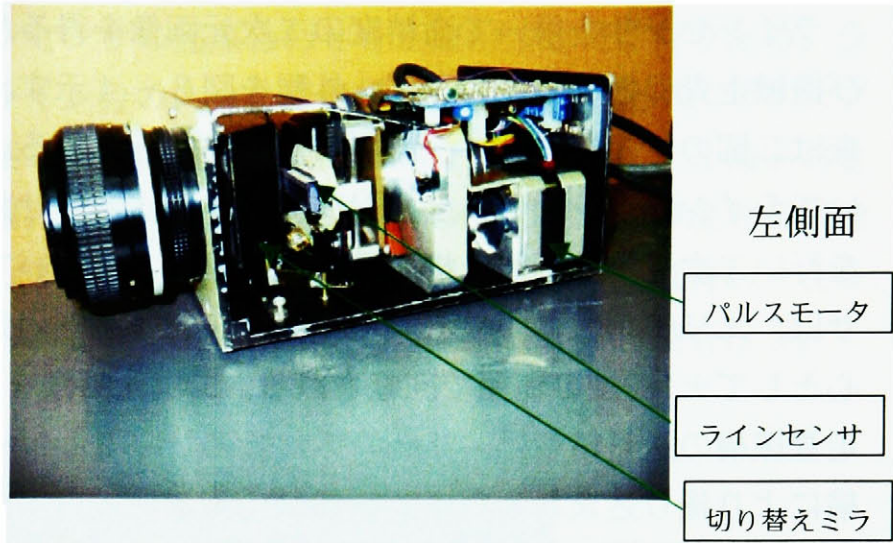


図 3 - 4 視覚検出部の外観

ラインセンサを用いて高精度の二次元画像を得るための回転および機械走査機構を図3-3に、外観を図3-4示す。回転と機械走査は二個のパルスモーターPMにより独立に行われる。回転機構を用いてラインセンサ軸の角度を対象物の姿勢に合わせた後、機械走査を行い二次元的な画像を撮り込む。図3-5において、ラインセンサは、エリア画像の中央画素（縦240画素、横256画素の位置）を中心として±180度の範囲で回転される。二次元画像を得るための機械走査機構の送り精度は、35mmの移動幅において±7μmである。同機構により撮り込まれるライン画像の7画素がエリア画像の1画素に対応する。

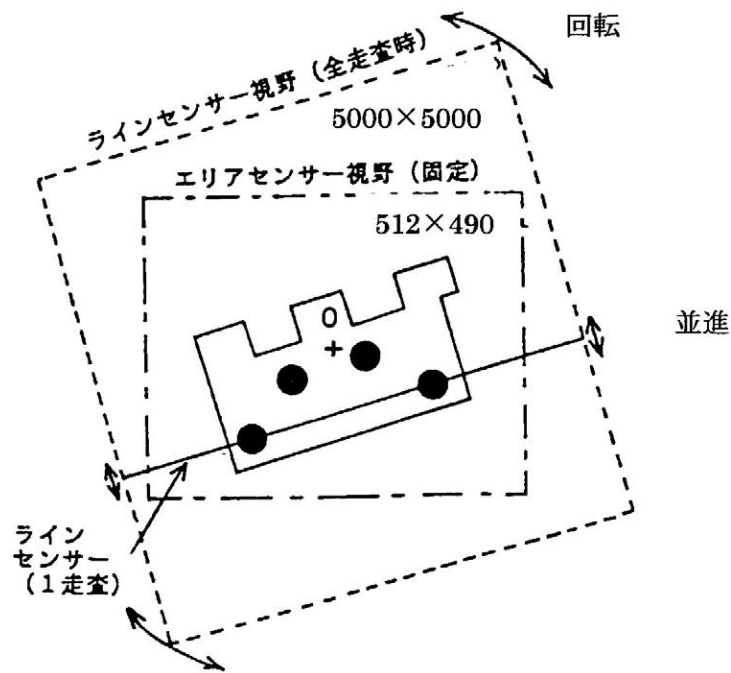


図3-5 エリア画像とライン画像の関係

他方、ラインセンサの焦点合わせを正確かつ簡便に行うため、ラインセンサ1ライン分のA-D変換後の出力信号画像が、ディスプレイに1秒周期で表示される。図3-6に、画面上部に8画素おきに間引いた画像、画面下部にセンサ中央の500画素の輝度分布画像をそれぞれ示している。ディスプレイを見ながら、焦点合わせとラインセンサ駆動周波数および光学レンズ系の絞りの調整を行う。

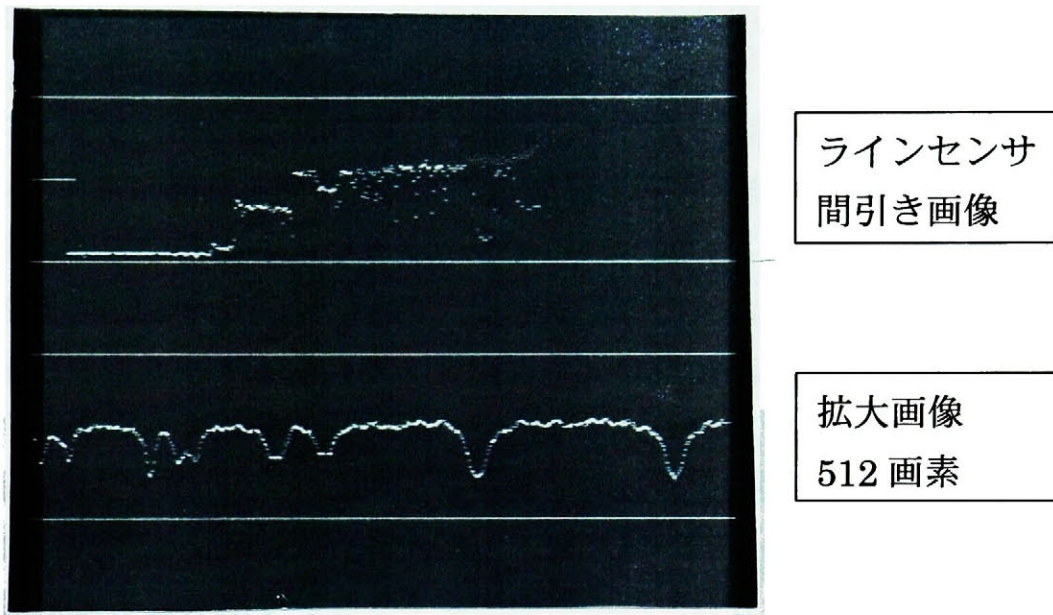


図3-6 ラインセンサ焦点合わせ画像

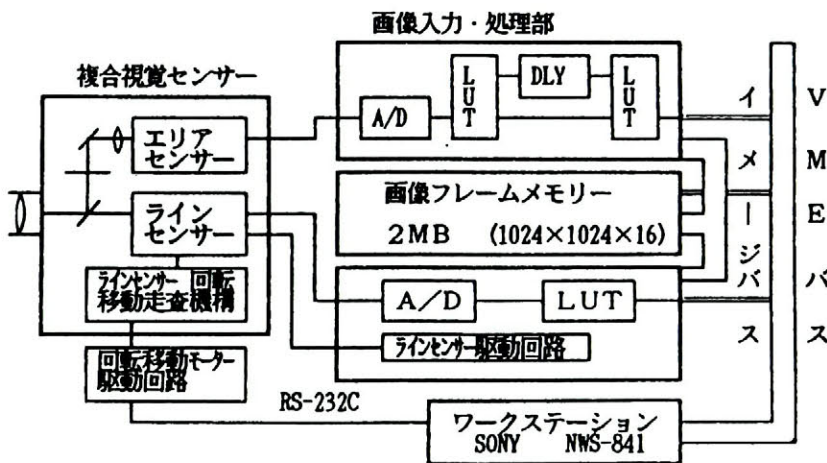


図3-7 画像入力・処理部の構成

3. 2. 2 画像入力・処理部の構成

画像入力・処理部の構成を図3-7に示す。画像入力部では、エリア画像から対象物の特徴を高速かつ効率よく抽出するため、二つの大容量のルックアップテーブル（以下LUTと記す）を直列に接続し、その間にディレイ回路を挿入した独自の前処理回路を考案した[3-4]。同回路により、二値化と微分処理、シェーディング補正と二値化処理等、二種類の異なる処理が1/30秒以内に行なわれる。画像メモリは2メガバイト（最大縦横1024画素×16ビット）の容量をもち、独自のアドレス指定方式により、画素構成の異なるエリア画像（縦横512画素）とライン画像（一次元5000画素）、ライン合成画像（縦横512画素から最大縦横1024画素）が同一画像メモリ内で自由に取り扱われる。他方、ラインセンサによる高密度の画像撮り込みと画像転送で多量のデータを扱うので、転送処理時間の短縮化を図る必要がある。画像の入力は図3-8に示すタイミングチャートにしたがって行われる。

ラインセンサは指定した駆動周波数（100KHz～2MHz）で駆動され、一定周期（=5000/駆動周波数、1MHzの場合、5msec）で電荷の蓄積と読み出しが繰り返し行われる。ラインセンサ出力ビデオ信号は、A-D変換後、イメージバス（42nsec/byte）を經由して1ライン5000画素分が画像メモリのバッファ領域（No.1またはNo.2）に交互に高速転送される。そして、片方のバッファ領域への画像転送中に、他方のバッファ領域の画像データ中の指定領域の画像データだけが、VMEバスライン（350nsec/byte）を經由して画像メモリ内のライン合成画像表示領域に転送される。このように二つのバスラインと二つのバッファメモリを用いて同時並列処理を行うことにより、データ処理時間は従来比3分の2に短縮された。

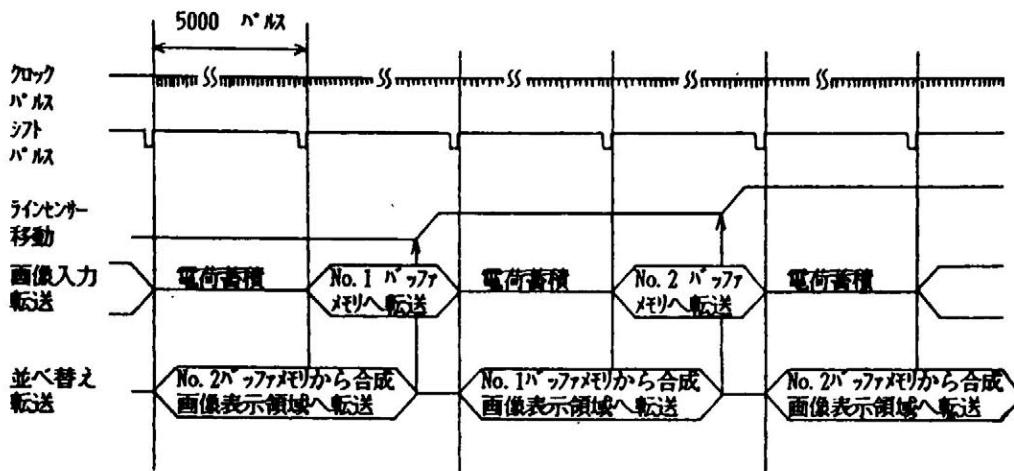


図 3 - 8 画像入力のタイミングチャート

3. 2. 3 画像入力ソフトウェアの構成

複合イメージセンサを用いて、寸法・形状計測を行うための画像入力法を以下に示す。

モード1は、対象物上の二点間の寸法計測を目的とする。エリア画像上の測定点を二箇所カーソルで指定すると、二点を結ぶ直線の傾きが計算され、ラインセンサ回転機構により、センサ軸はその角度と位置に設定される。そして測定点を中心とする縦128画素横256画素の矩形領域がラインセンサで撮り込まれ、図3-9に示す合成画像が2秒以内に得られる。この回転機構の機能により、測定点がエリア画面のどの様な角度と位置にあっても、測定時間は常に一定となる。同図中に表示されている数値(DIST)は、二点間の距離を画素数により示しており、換算係数0.1を掛けることによって実寸法が0.1mmの精度で求められる。

本方式によれば、既存のセンサ走査型カメラに比べ、はるかに効率よくかつ短時間に画像の入力処理が行え、さらに、データ量も必要最小限のため、解析処理時間も短縮される。

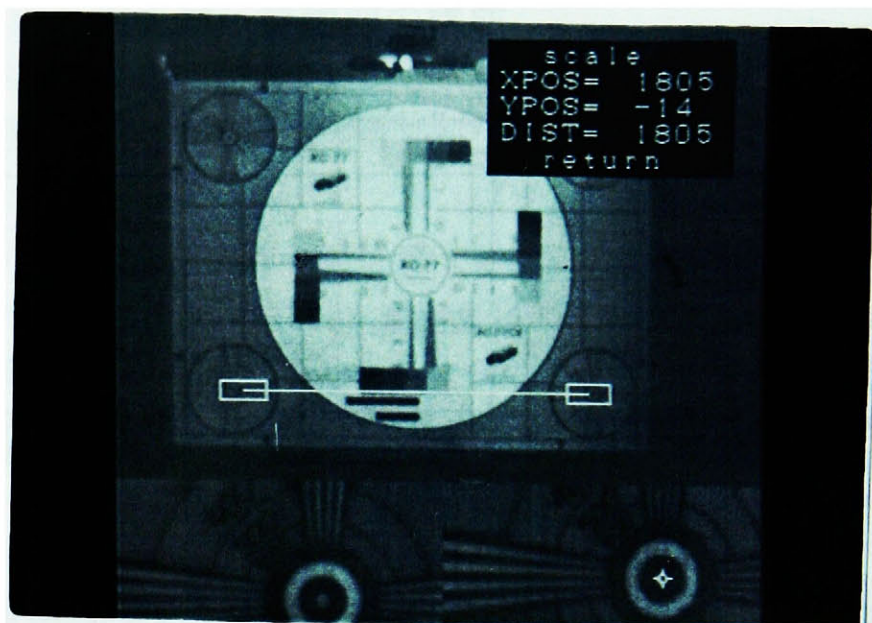
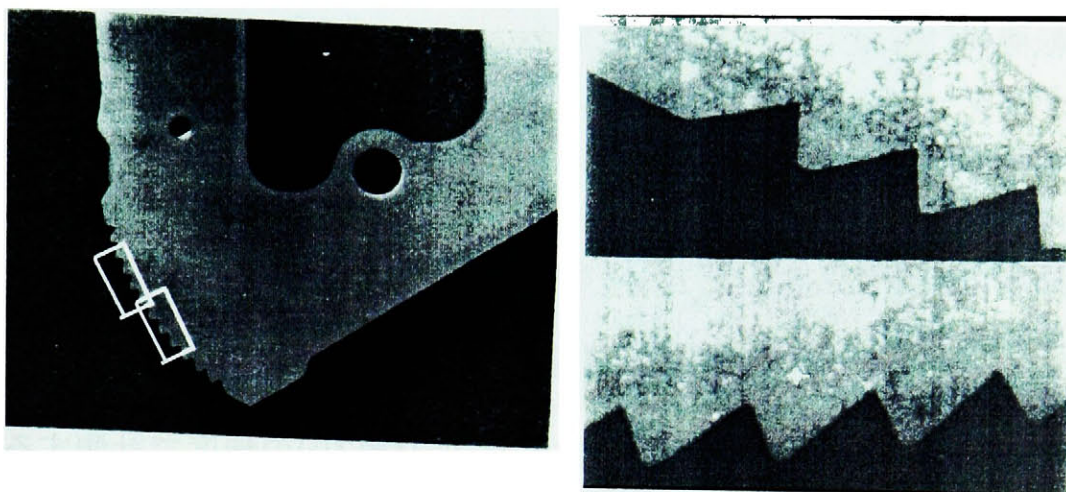


図3-9 ライン合成画像（モード1）

モード2は、寸法形状計測に必要な領域をエリア画像上の任意の場所に複数個指定し、それらの領域をラインセンサで精度よく撮り込み、部分的な高精度画像を用いて寸法・形状計測を行うことを目的とする。同時撮り込み領域数は最大25箇所までとし、ライン合成画像の大きさは、縦横512×480、512×1024、1024×512、1024×1024画素のいずれか一つを選択する。画像入力時間は、画面の大きさ、領域の数と位置によって異なるが、10秒以上要している。撮り込み矩形領域は、ライン合成画像を領域数で等分割した大きさに自動設定される。ライン合成画像にはエリア画像で指定した矩形領域の高精度撮り込み画像が指定した番号順に表示されている。各領域内の画素の座標値は、図3-5に示す縦横5000画素の座標空間におけるワールド座標値で示され、寸法形状の計測はその座標値にもとづいて行われる。

ここで、部品の寸法計測においては、同種の部品のあらかじめ指示された箇所の寸法を計測する例が多い。したがって、エリア画像において高精度撮り込み領域を毎回指定していると画像入力に時間

と手間がかかる。そこで、既知の部品については、高精度撮り込み領域の位置と測定パラメータをあらかじめ登録保存しておき、計測時には、部品の登録番号を指定すれば、読み取り領域が自動的に設定され、すぐに高精度画像の撮り込みを行うことができる。



エリア画像

ラインセンサ合成画像

図3-10 機械部品の歯型形状測定への適用例

自動車用機械部品の歯形形状検査への適用例を図3-10に示す。エリア画像において、ラインセンサによる高精度走査領域（白枠で表示した矩形領域）を設定する。右の画像がラインセンサで取り込んだ画像である。同画像を用いて、歯形の形状を0.1mmの精度で検査する。なお、歯形形状の画像処理による高精度検査法については、文献[3-5]に詳述している。

3. 2. 4 本システムの性能評価と機械部品への適用例

本システムのセンサ軸（副走査）方向の精度は、ラインセンサの画素の製作精度に依存する。一方、機械走査（主走査）方向の精度は、機械走査機構の機械的な精度（送り精度と平行度）に依存する。回転機構は機械走査中は固定されているので精度には影響しない。格子パターンを用いた性能試験の結果、画像の撮り込み誤差は、センサ軸方向では、1画素以内、機械走査方向では、±1画素であり、ほぼ良好な性能を示した。なお、使用する光学レンズによっては、画面周辺部に光学歪が発生し、精度低下の原因となる。

本システムの具体的な適用例として、機械部品の穴径の計測結果を示す。対象とする部品には直径の異なる多数の穴が開けられ、寸法検査では、各穴の直径と中心位置を0.1mm以内の精度で計測することが要求されている。測定精度と視野を考慮して、ライン合成画像の1画素が0.1mmに対応するようにセンサは設置されている。まず、対象部品の登録番号を指示すると登録済みの高精度撮り込み領域が自動設定される。しかし、領域登録時と実際の寸法計測時とでは、部品の傾きや位置が若干異なるので、計測領域と撮り込み領域がエリア画像上で一致するようラインセンサ回転移動機構を用いて位置の補正を行う。図3-11に示すように高精度読み取り領域（16箇所）が正しく設定された後、機械走査により指定領域の撮り込みが行われ、図3-12に示すライン合成画像が得られる。

LUT回路を用いてラインセンサ合成画像の二値化と境界抽出等の処理を行った後、穴の直径と中心位置の寸法計測が行われる。二値化処理においては、シェーディングの影響を除くため、各撮り込み領域毎にしきい値を設定する。この二値画像を用い、穴部の面積 S 、周囲長 L から穴径 D_m を計算し、円形度 $P (=4\pi S/L^2)$ によりチェックを行う。表3-1に、穴径と穴位置の計測結果の例を示す。No.3の穴径が設計値 D_a と明らかに異なっており加工ミスであることが判

明した。

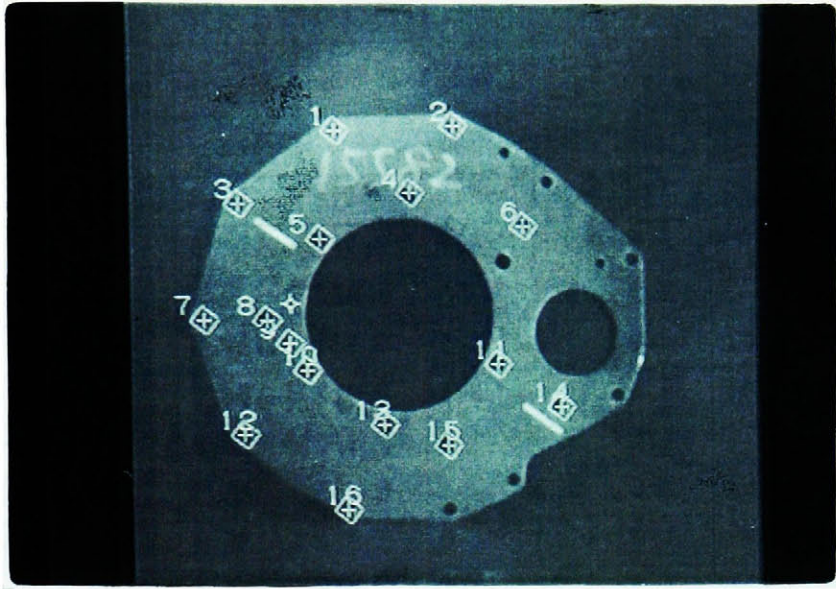


図3-11 エリアセンサ画像 (領域指定)

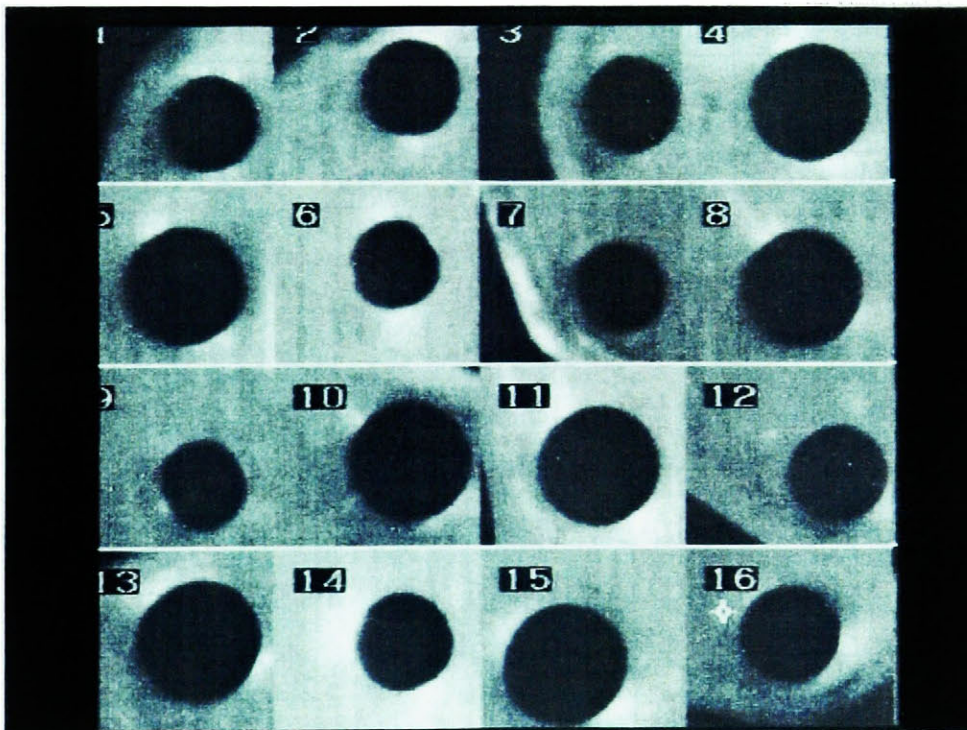


図3-12 ラインセンサ合成画像 (モード2)

表3-1 穴径と穴位置の計測結果の例

No	面積	周長	Dm 実測	Da 図面	誤差	円形度	寸法La (図面)	寸法Lm (実測)	誤差
	画素数	画素数	(mm)	(mm)	(mm)	P	(mm)	(mm)	(mm)
1	2882	199	8.9	9.0	-0.1	0.915	90.4	90.5	0.1
2	2890	195	8.9	9.0	-0.1	0.955	172.6	172.7	0.1
3	2876	200	8.9	8.2	0.7	0.904	原点		
4	4366	242	10.9	11.0	-0.1	0.937	127.8	127.7	-0.1
5	4442	246	10.9	11.0	-0.1	0.922	64.0	63.9	-0.1
6	2178	172	7.6	7.6	0	0.925	216.8	216.8	0
7	2606	187	8.3	8.2	0.1	0.936	90.4	90.5	0.1
8	4496	246	11.0	11.0	0	0.934	88.4	88.3	-0.1
9	2260	173	7.9	8.0	-0.1	0.946	109.4	109.4	0
10	4578	249	11.1	11.0	0.1	0.928	133.4	133.5	0.1
11	4378	240	10.9	11.0	-0.1	0.955	227.3	227.2	-0.1
12	3090	207	9.1	9.0	0.1	0.906	171.8	171.9	0.1
13	4548	246	11.0	11.0	0	0.944	195.5	195.6	0.1
14	2538	188	8.2	8.2	0	0.902	283.2	283.1	-0.1
15	4520	245	11.0	11.0	0	0.946	236.2	236.3	0.1
16	3074	206	9.1	9.1	0	0.910	146.0	146.1	0.1

開発した複合イメージセンサを用いることで、画像入力から計測結果の出力までに要する時間は約30秒と、従来の手作業による直接測定に比較して、約3分の1に時間短縮された。また、手作業では測定しにくい穴の中心座標も正確かつ高速に測定できた。

以上に示した適用例から、従来の画像入力装置では計測が困難であった大きな対象物の位置決めや寸法形状計測が、本システムにより高精度かつ効率よく行えることが示され、本方式の寸法形状計測への有用性が確認された。

3. 3 適応的パターン光投影による高精度三次元形状計測

本節では、複合イメージセンサを三次元形状計測に適用し、形状計測精度の向上と効率化を図る。そのために、対象物の形状や抽出領域によって投影パターンを適応的に変えることで時間短縮を図った形状計測法と、空間コード化パターン光投影法に基づくパターン画像の特徴を有効に活用した物体形状認識法を提案する。

3. 3. 1 従来の三次元形状計測法

画像を利用した三次元形状計測は、ロボットビジョン、人体計測、三次元CAD等多方面において必要とされる技術であり、種々の手法が開発されている[3-6][3-7][3-8]。代表的な三次元形状計測法の例を表3-2に示す[3-9]。表3-2の手法の中から、全画素の三次元座標を最も高速かつ効率的に取得可能な符号化パターン光投影法にもとづく三次元物体形状計測法を選択した。パターン光投影法は、対象物体にいくつかの縞模様のパターン光を投影し、別角度に置いたTVカメラで物体表面に投影された縞パターンを撮影し、得られた画像から三角測量の原理に基づいて距離を計測し、形状計測を行う手法である。計測時間を短縮し、計測精度の向上、計測ミスをなくすため、パターンの投影法に様々な工夫が凝らされている。

表3-3に代表的なパターン光投影法の例を示す。①の方法は照度を連続的に変化させたグレースケール状の光を、②の方法は色が連続的に変化した虹状の光を投影する。これらの方法は、背景や物体表面の色や明るさの影響を受け易い欠点がある。③の方法には、スリット光の間隔あるいは縞の照度をM系列符号化したもの[3-10][3-11][3-12]、縞の太さを符号化したもの、縞にランダムな切れ目を入れたもの等があり、一枚の入力画像から対象物上に投影された多数の縞を同時に識別できる。しかし、この方法は、物体表面の形状が連続していなければ復号化ができず、輪郭付近や入り組んだ物

体は計測できない。④の方法は7種類程度の異なる縞パターン（空間コード化パターン）を次々に投影しながら画像を撮り込み、それらの画像を用いて各縞の識別を行うものである。従来は投影パターンの切り替えに時間を要していたが、佐藤ら[3-6]は、液晶シャッタを用いることでこの問題点を解決した。この手法は対象物の形状に全く左右されずに各縞を安定かつ容易に識別でき、上記した手法の中では最も実用性の高い方法である。吉沢ら[3-13]は位相シフト投影方式を、荒木ら[3-14]は、レーザスリット光を高速にON/OFF制御する投影方式をそれぞれ開発している。

表3-2 三次元形状計測法の例

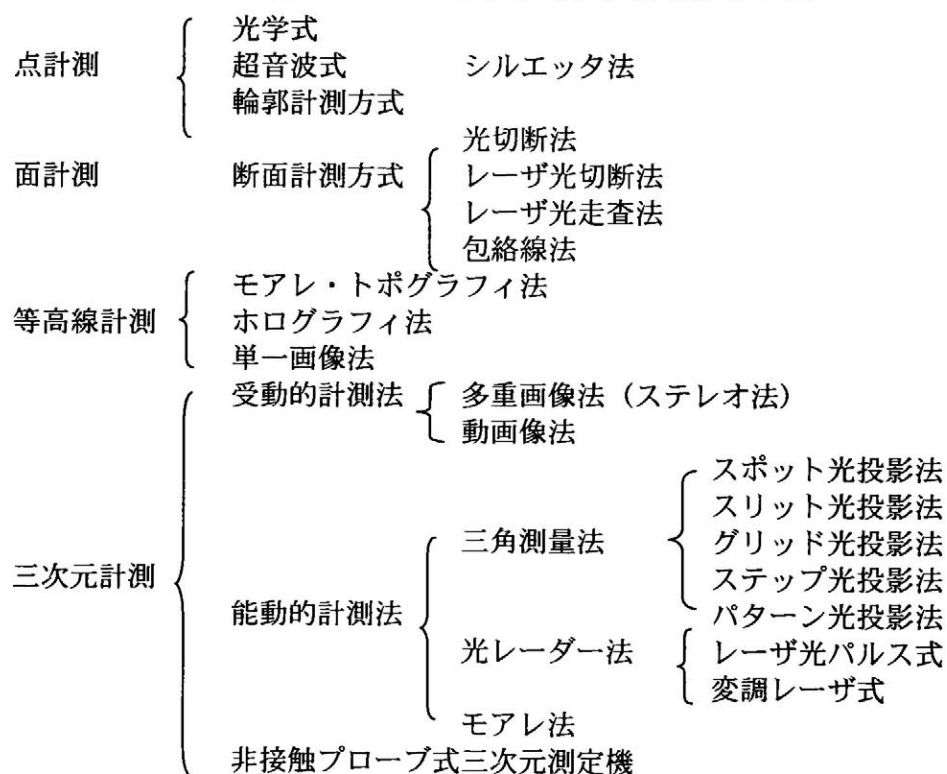


表3-3 パターン光投影法

- ① 濃度変調光投影法
- ② カラー変調光投影法
- ③ 符号化パターン投影法
- ④ 時系列パターン投影法

3. 3. 2 空間コード化パターン光投影法による形状計測

三次元形状計測には、空間コード化パターン光投影法を用いた [3-6]。同法は、電子的に任意の投影パターンを発生できるため他法に比べ計測時間が短く、対象物表面の色や模様、照明むら等の影響も受けにくいことと、複合イメージセンサの長所を最も有効に活用できる利点がある。システムの配置を図 3-13 に示す。パターンの投影には、256 本の縞パターンを電子的かつ任意に ON/OFF 制御する液晶シャッタを用いた。

測定では、グレーコードにもとづく 8 種類 16 通りの縞パターンを順次投影しながらエリアセンサで各パターンの画像を 8 枚撮り込む。8 枚の二値パターン画像を 1 枚の多値パターン画像に合成することによって、一本一本の縞パターンを分離識別することが可能になる。図 3-14 に示す座標系において、得られた画像に次式を適用することにより各画素の三次元座標値 (X, Y, Z) が求められる。

$$\begin{aligned} Z &= (Z_p + D \cdot \tan \theta) / (1 + \tan \delta \cdot \tan \theta) \\ X &= Z \cdot \tan \zeta, \quad Y = Z \cdot \tan \delta \quad (3-1) \\ \tan \zeta &= dx \cdot x_i / lc, \quad \tan \delta = dy \cdot y_i / lc \\ \theta &= \theta_0 + d\theta \cdot C_i \end{aligned}$$

ここで、 lc はレンズ主点と結像面との距離、 (x_i, y_i) は P 点に対応する画像上の位置、 dx, dy は 1 画素の実寸法、 θ_0 はコード値=0 の縞パターンが Z 軸となす角、 $d\theta$ は 1 パターン当りの角度変化量、 C_i は P 点の含まれるパターン値である。さらに、プロジェクタとカメラのレンズ主点位置を装置組立時に正確に合わせるのが困難なため、式(1)には、位置補正のため Z_p が加えてある。本システムの場合の各値は、エリアセンサでは、 $lc=58.71\text{mm}$ 、 $D=325\text{mm}$ 、 $Z_p=35\text{mm}$ 、 $\theta_0=79.75$ 、 $d\theta=0.155$ 、 $dx=dy=0.045\text{mm}$ 、ラインセンサでは、 $dx=dy=0.0065\text{mm}$ である。

light projector

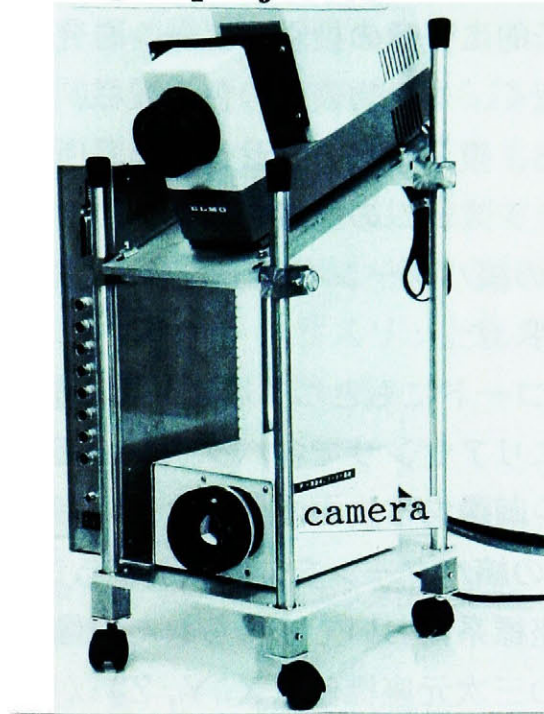


図 3 - 1 3 投影部の配置

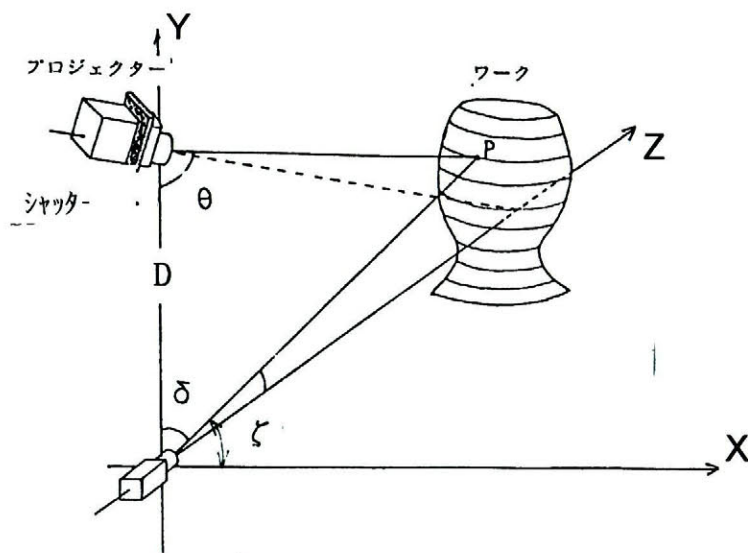


図 3 - 1 4 三次元座標系

3. 3. 3 画像入力変換処理の高速化のための 前処理回路と解析処理法の開発

空間コード化パターン光投影法を用いた三次元形状計測では、グレーコードにもとづく8種類16通りの縞パターンを投影し、16回画像を撮り込む必要がある。したがって、従来の画像処理装置を用いると、画像の入力と変換処理に10秒程度を要し、動きのある対象物の計測が困難となる欠点がある。井口ら[3-10]は、高速処理を実現するため、局所並列型画像プロセッサを用いて計測時間を3秒以内に短縮するとともに、パターン境界内挿処理も含めてハードウェア化した画像変換処理法を開発した。しかし、ハードロジックで構成されているため、柔軟性、拡張性に難があり、今以上の高速化は難しい。そこで、著者らは、上記した問題点の解決を図るため、前記した独自の前処理回路を用いた入力処理法を提案する[3-15][3-16]。図3-15に前処理回路の構成を示す。本回路の特徴は、入力16ビット、出力8ビット、容量64KバイトのLUTを2個直列に接続し、二つの大容量LUTの内容を適宜書換え、さらにゲート回路により入出力信号の制御を行うことにより、従来の前処理回路では困難な多種多様な変換処理を1/30秒で実行することができることにある。そのためLUTは256x256バイトの二次元配列構造にしてあり、従来の256x1バイトの一次元構造では実行できない画像間の演算処理をリアルタイムで実行できる。また、演算用の画像アキュムレータを必要としないため、画像メモリの任意の画素に対して上記した処理を行うことができる。

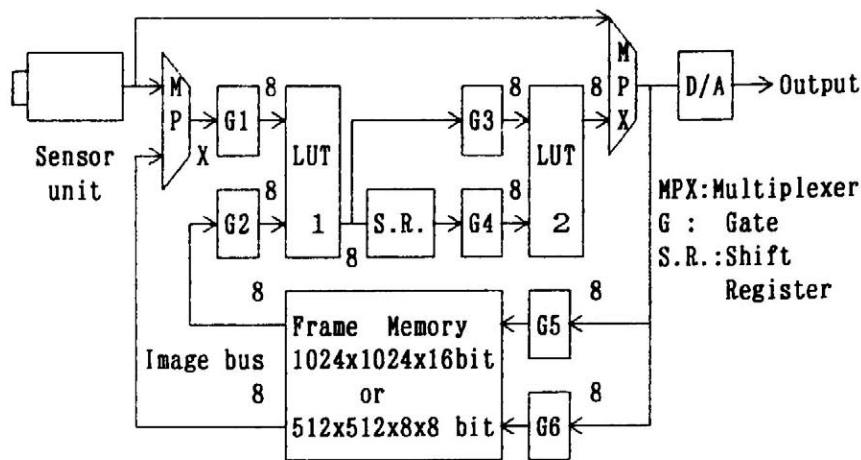


図 3 - 1 5 前処理回路の構成

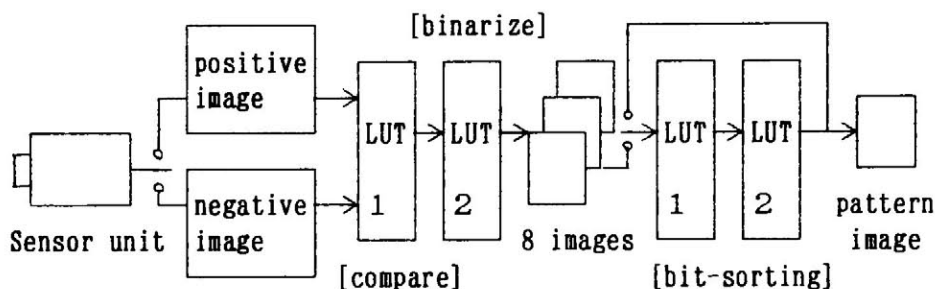


図 3 - 1 6 画像データの流れ (画像入力)

本回路を用いた空間コード化パターン光投影法による形状計測の高速化法を以下に示す。図 3 - 1 6 にパターン画像入力変換処理の流れを示す。まず、液晶シャッタによりポジパターンを発生し、ポジ画像を画像メモリに撮り込む。ついで、パターンを反転しネガ画像を入力する。ポジ画像とネガ画像の各画素毎の大小比較を行うため、LUT1 に変換用データを、LUT2 に二値化の閾値データを書き込む。その結果、従来の半分の処理時間で 8 枚の二値化画像が得られる。

8 枚の二値化画像を 1 枚の多値画像に変換する手順を図 3 - 1 7 に示す。論理積和を用いる従来法に比較すると処理時間は半分以下

に短縮される。本回路では、LUT1 と LUT2 の間にシフトレジスタが挿入してあり、これを併用することにより、特別なプロセッサを用いなくとも水平微分、輪郭抽出等の処理が実行できる。

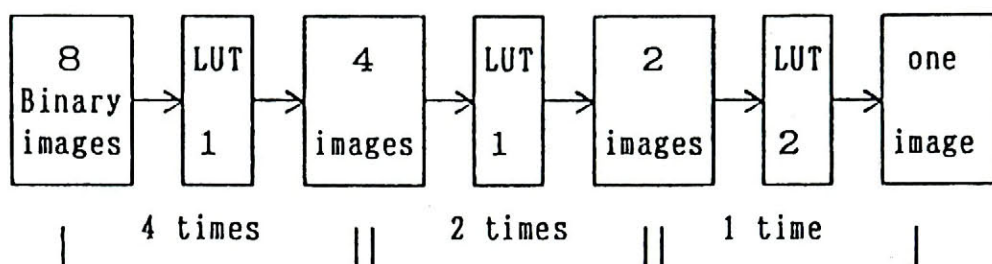


図 3 - 1 7 画像データの流れ (画像処理)

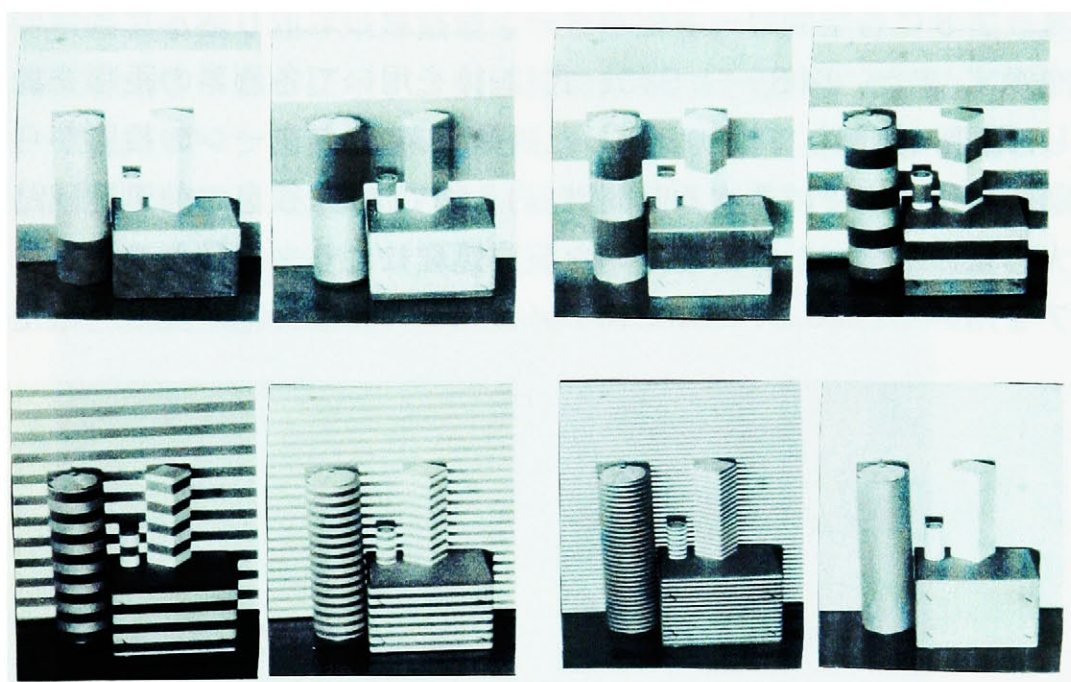


図 3 - 1 8 空間コード化パターン画像の撮りこみ例

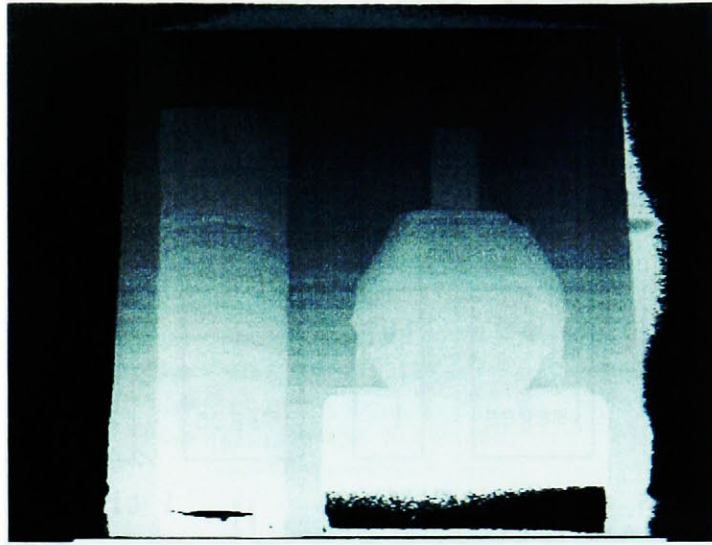


図3-19 距離画像の濃淡表示例

図3-18に各空間コード化パターンを投影して取り込んだ画像の例を示す。また、図3-19に、式(3-1)を用いて各画素の距離を計算し、距離に比例して濃淡表示した画像である。パターンの投影から距離画像作成までに要する時間は、約5秒である。独自の前処理回路と大容量の二つのLUTを用いた演算処理により、特殊なハードウェアを用いることなく従来比約1/2以下の時間短縮が実現された。

3. 3. 4 適応的に構造化したパターン光投影による 画像入力の効率化

空間コード化パターン投影法では、撮り込んだ画像から対象物の形状によって変形した縞パターンを一本ずつ分離識別するため、グレイコードに基づく8種類の縞パターンを順次投影しながら16回画像を撮り込む必要がある。したがって、ラインセンサを用いて高精度のパターン画像を撮り込む場合も同様の手順が必要となるため、画像の入力に数分以上の長時間を要することになる。そこで、計測時間の大幅な短縮を図るため、対象物の形状に応じて適応的に構造化した投影縞パターンを作成し投影する手法を提案する[3-17]。

計測対象物体の画像を図3-20に示す。同画像中にはラインセンサによる撮り込み矩形領域も示している。ラインセンサ撮り込み画像を図3-21に示す。両画像の解像度を比較するため、空間コード化パターン画像の最下位ビットのみを表示した画像を図3-22と図3-23に示す。なお、画像の倍率を合わせるため、図3-22に示すエリアセンサ入力画像は7倍拡大表示してある。

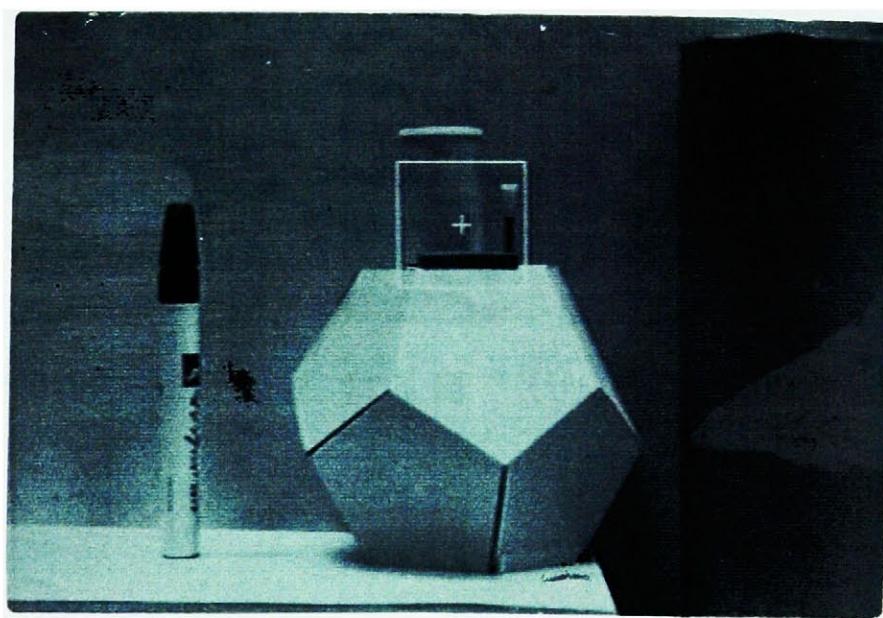


図3-20 対象画像の例（エリアセンサ画像）

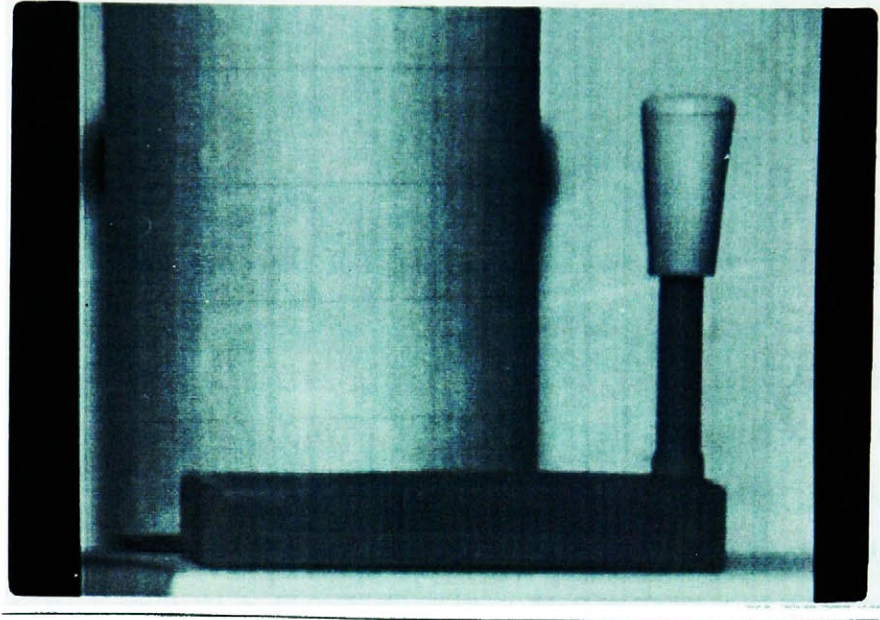


図 3-21 ラインセンサ入力画像

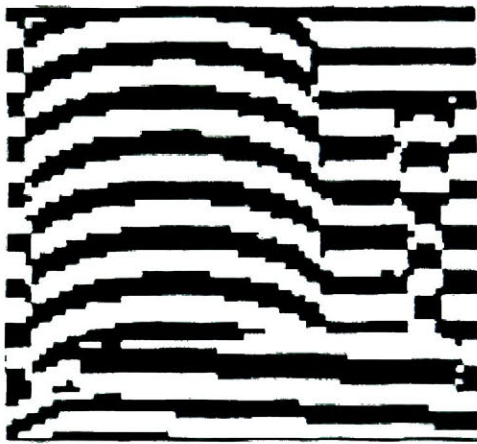


図 3-22 二値化画像(エッジセンサ)

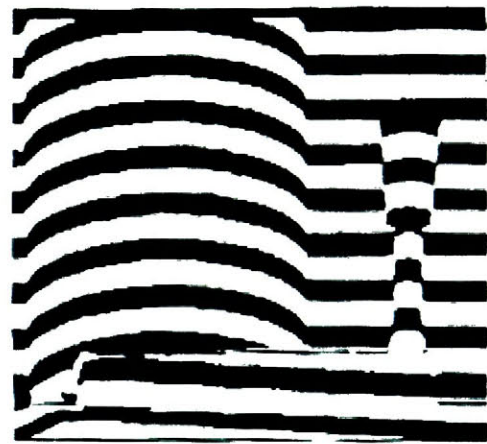


図 3-23 二値化画像(ラインセンサ)

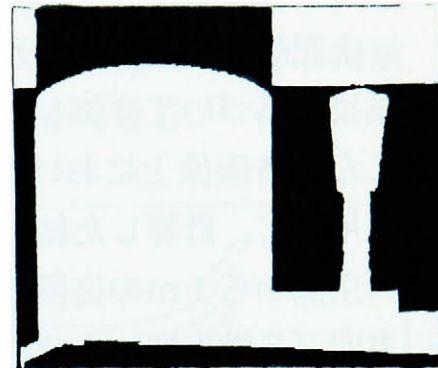
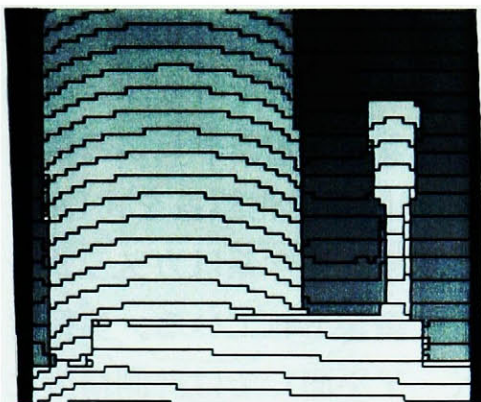


図 3-24 空間コード化画像

図 3-25 投影パターン画像

測定手順として、まずエリアセンサを用いて従来手法に基づいてパターン画像の撮り込みを約2秒で行う。図3-24に示す空間コード化パターン画像において、ラインセンサによる高精度撮り込み領域を設定した後、各領域内のコード値の隣接関係に基づき、各縞パターンを効率よく分離識別可能な投影パターンの組合せを探し、どのコード番号の液晶シャッタの開閉を行うかを決定し、図3-25の左に示す縞パターンを投影しラインセンサにより画像の撮り込みを行う。

以上、最小ピッチ縞パターン画像2枚（相補パターン画像）と図3-24と図3-25を重ね合わせるにより図3-23のラインセンサ画像のエッジ画素のコード値を求めることができた。その結果、パターンの投影回数は、3回で済み、大幅な時間短縮が可能になった。

3. 3. 5 形状計測結果と精度の検討

上記した装置の三次元形状計測精度を P. 47 の式(3-1)および実験結果に基づいて評価した。エリアセンサとラインセンサにより撮りこんだ各画像上における 1 画素あたりの空間量子化誤差を式(3-1)を用いて、計算した結果を図 3-26 に示す。光学系はカメラレンズ主点から 1 m の位置に焦点を結ぶように調整されている。奥行き方向 (Z 軸方向) とそれに直角な面 (X-Y 平面) では計測精度に違いがあるので、同図には各方向に対する精度が各々示してある。同図からラインセンサ入力画像を用いて形状計測を行った場合、エリアセンサ入力画像より 7 倍高い精度の計測が可能ながわかる。

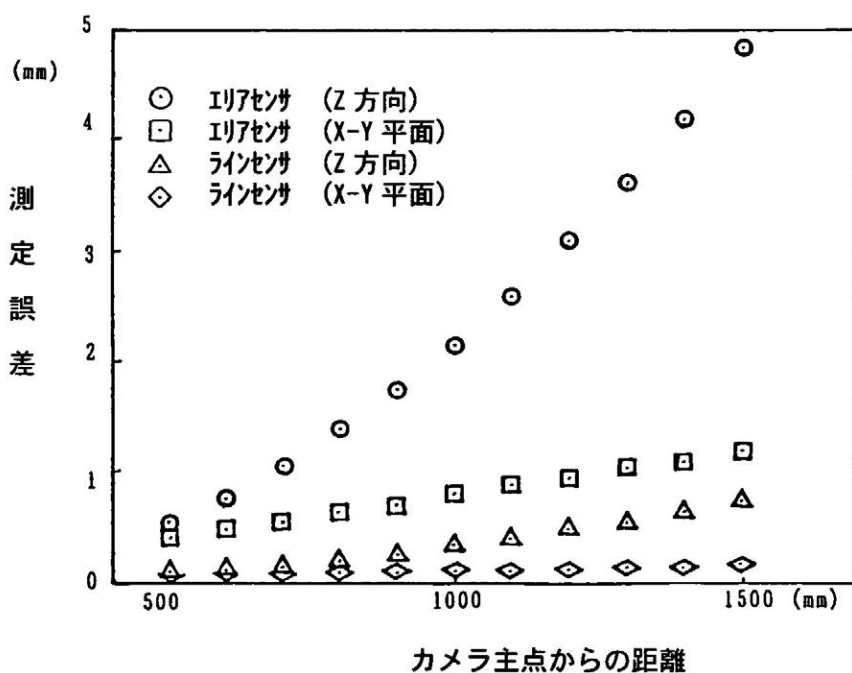


図 3-26 測定誤差結果の例

図 3-27 と図 3-28 は、空間コード化画像にもとづいて物体各点の三次元座標を算出し、別の視点から平行透視した物体表面の縞パターンエッジの線画画像を示している。また、両画像を用いた対象物

体の寸法計測結果を表 3 - 4 に示す。図 3-27 から、右側の細長い物体が円柱形であると認識することは困難である。これに対して、図 3-28 では、パターンエッジ画素は、明らかに弧を描いており、対象物体が円柱であることを容易に認識することができる。

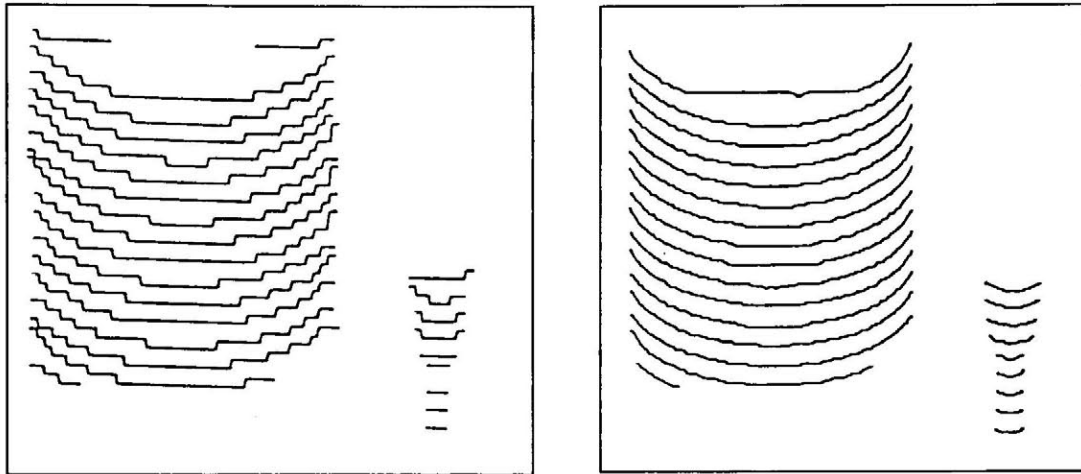


図 3-27 線画表示(エリアセンサ)

図 3-28 線画表示(ラインセンサ)

表 3-4 測定結果の例

	円柱(大)	円柱(小)
実測値	31.2 (mm)	3.15 (mm)
エリアセンサ	30.0 ± 0.79	3.16~3.95
ラインセンサ	30.9 ± 0.22	3.08~3.19

3. 3. 6 コード化パターン画像を用いた物体形状認識

空間コード化パターン画像からは画像上の各画素の三次元座標値は求まるが、ロボット等による組立作業に利用するには、画素間の接続関係を解析し目的とする対象物の形を認識しなければならない[3-18]。ここでは、コード化パターン画像の特徴を活用した形状認識法[3-19]を導いた。その場合、各縞パターンのエッジ画素が物体表面形状を正確に表現しているのので、以下ではエッジ画素について解析処理を行っている。エリアセンサにより撮り込んだコード化パターンエッジ画像を図3-29に示す。

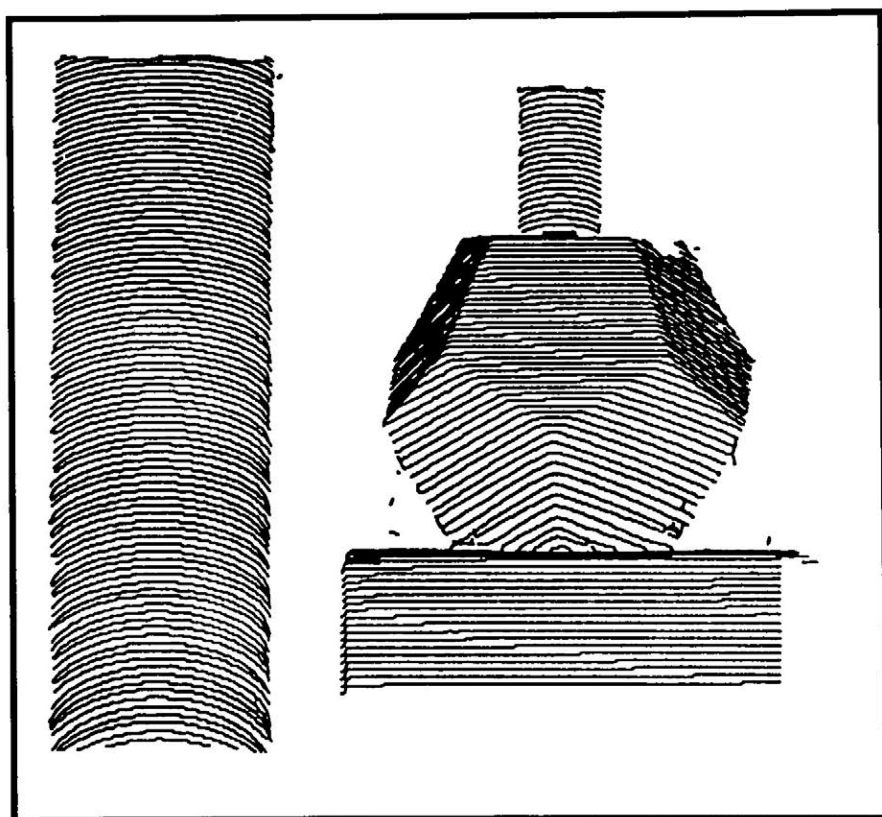


図3-29 パターンエッジ画像(エリアセンサ画像)

3. 3. 7 大局的領域分割

処理の効率化と時間短縮を図るため、図3-29のエリアセンサ入力画像において、距離ゲート法とコード値に基づくジャンプエッジ検出により大局的な領域分割を行い背景等の不要な領域を削除した[3-10]。図3-30に領域分割後の画像を示す。同図の場合、画像は大局的に5つの領域に分割されている。

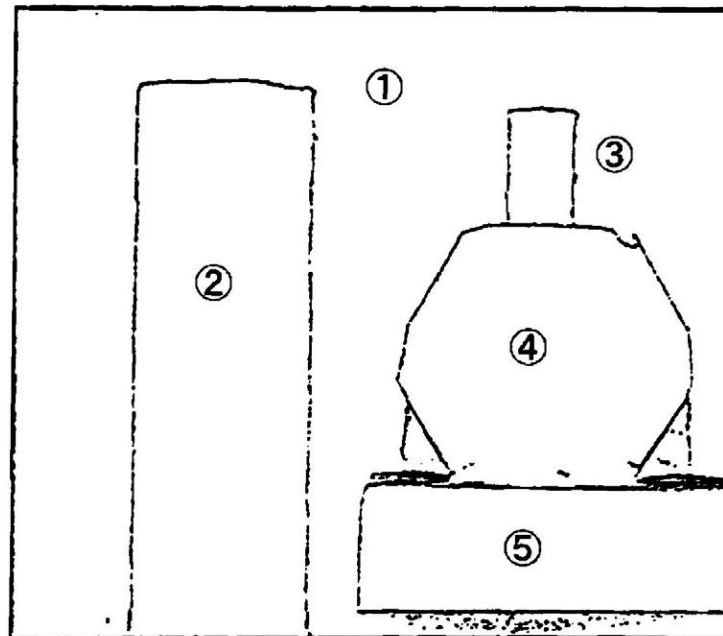


図3-30 領域分割画像

3. 3. 8 区分的直線近似法にもとづく パターンエッジ画素の直線近似

対象物の形のより詳細な解析を行うための前処理として、三次元に拡張した区分的直線近似法に基づき、各縞パターンエッジ画素を一定の評価基準に基づいて任意長の線分に置き換える。評価基準としては始点と終点画素を結ぶ直線と各画素との法線距離があらかじめ設定した閾値内に入る連続した画素列を一本の直線で置き換え、閾値を越える画素は新たな直線の始点として同様の処理を繰り返す。処理結果の一例を図3-31に示す。エッジ画素列は任意の長さの直線で近似され、直線の始点と終点の座標値のみで表現できるので、データ量は元の画像の1/30以下に削減される。上記した直線近似処理の利点は、画像内のノイズや孤立点や不要な画素の除去が同時に行われるため、従来別途行っているノイズ除去処理が不必要となることがある。

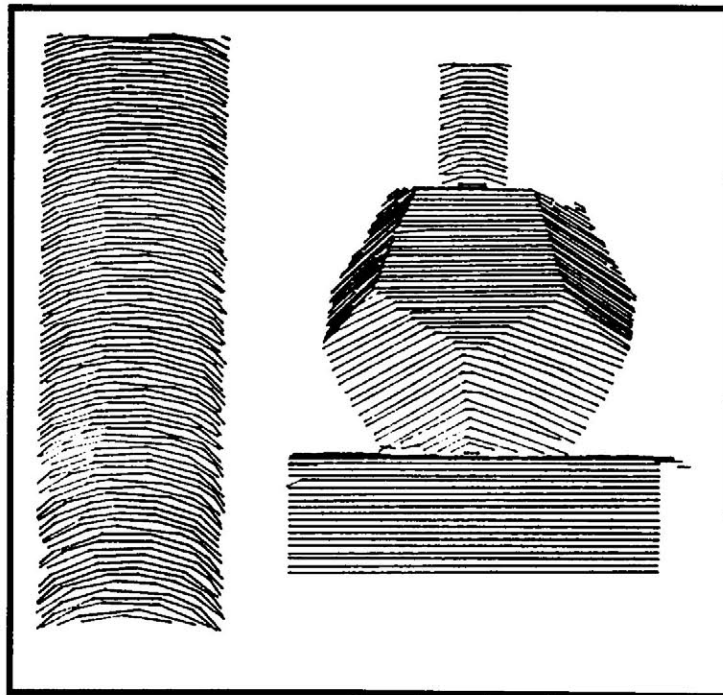


図3-31 区分的直線近似画像

3. 3. 9 勾配ヒストグラムにもとづく平面領域の領域分割

パターン画像の中から平面領域を抽出するには、平面を構成する直線群を分離識別する必要がある。ここでは、大局的に領域分割された各領域毎に直線の勾配ヒストグラムを求める。さらに、平面領域は勾配のほぼ等しい直線が局所的に多数集まって構成され、ヒストグラムにそのピークと谷が現れるので、ヒストグラムの分布形状にもとづいて、谷の位置を探し分割を行う。図3-30の領域②③④⑤のヒストグラムを図3-32に示す。同図から、領域④は5つの平面により構成されていることがわかる。一方、領域②③のヒストグラムの場合、明確な谷を分離することができず、対象物が平面だけで構成されていない可能性が高く、実際には円柱である。領域⑤は明らかに一つの平面である。大局的に領域分割した全ての領域の処理の結果、全部で6つの平面候補が抽出された。これらの領域が平面かどうかを判定するため、各領域に平面の式($Z=aX+bY+c$)を適用し回帰分析に基づく最小2乗法にもとづき各係数を算出する。得られた平面と各画素との距離にもとづいて精度評価を行う。

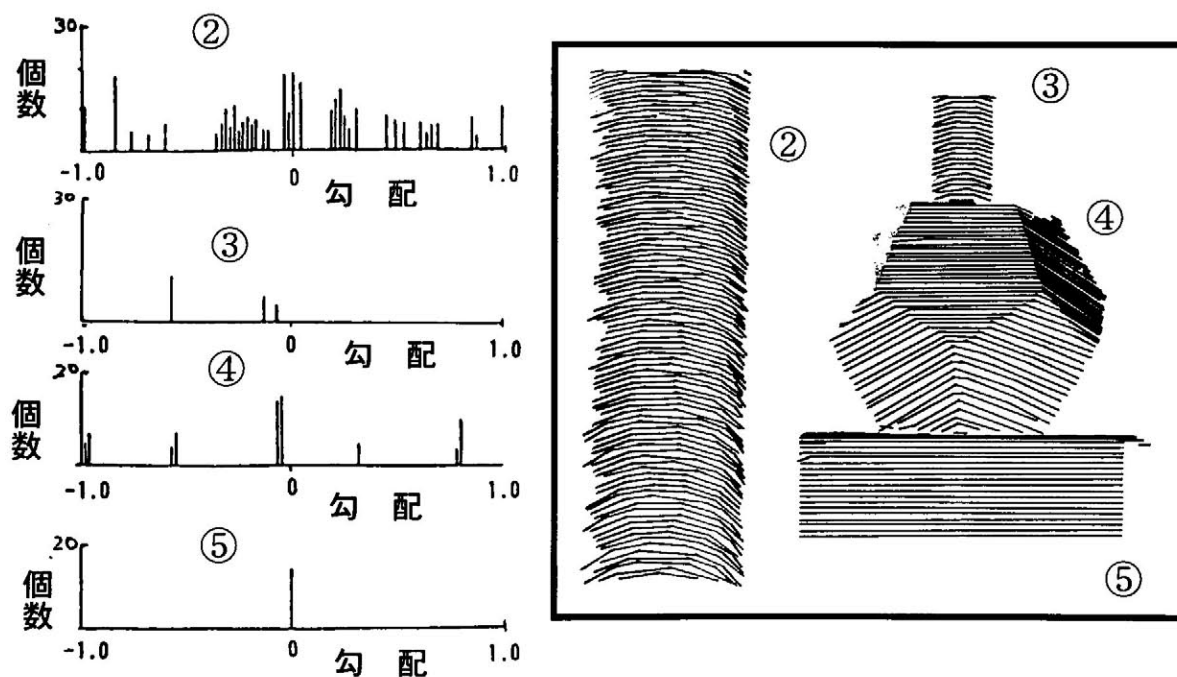


図3-32 各領域の勾配ヒストグラム

3. 3. 10 三次元形状計測の精度評価

上記処理手順に基づき得られた領域④に含まれる各平面の式は

1 $Z = 4.34x - 2.22y - 900.8(\text{mm})$

2 $Z = 0.04x - 0.45y - 865.6$

3 $Z = -2.47x - 1.27y - 628.7$

4 $Z = -0.60x + 0.61y - 811.0$

5 $Z = 0.02x - 0.07y - 862.2$

となった。各領域における平面の式と画素とのZ方向の距離の誤差ヒストグラムを図3-33に示す。同図から、エリアセンサ入力画像の場合、ほとんどの画素が図3-26に示す誤差範囲内に収まっていることがわかる。本システムにより求めた正12面体の1辺の長さの例は、直接測定値が50mmであるのに対して、50.1mmと51.2mmであり、ほぼ満足できる精度で三次元計測が行われていることが確認された。表3-5に多面体の計測結果を示す。

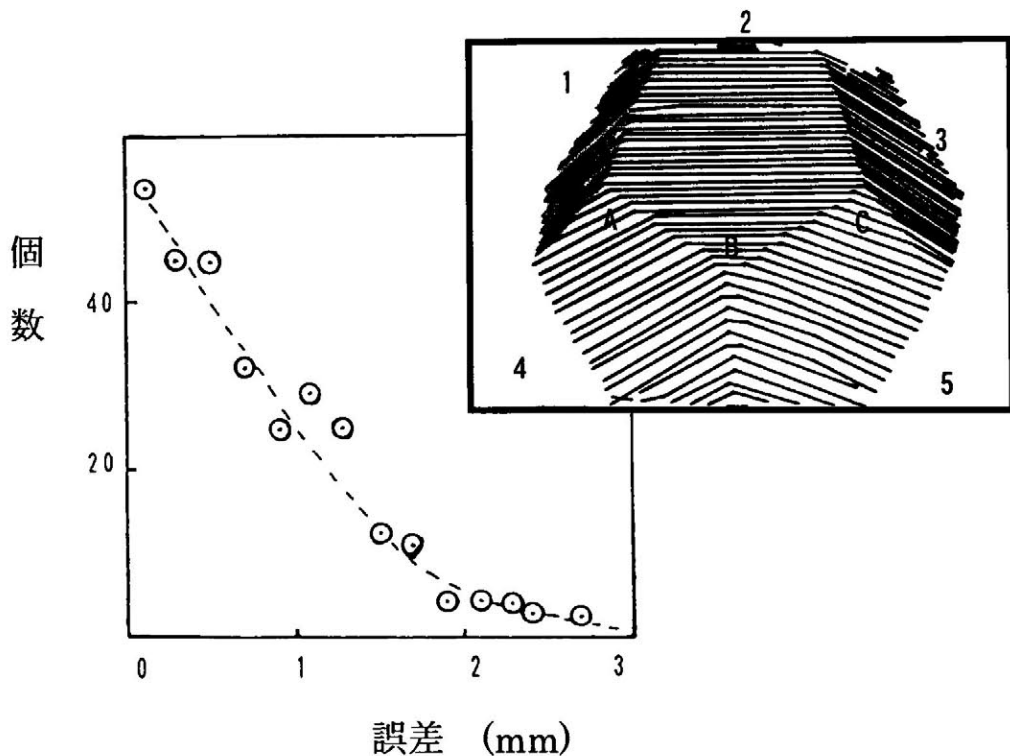


図3-33 誤差ヒストグラム

表 3 - 5 多面体の形状計測結果

頂点座標		(mm)	
A	(10.6, 5.9, -867.9)		
B	(50.1, -21.7, -854.0)		
C	(93.1, 4.2, -864.1)		

各平面の交差角		真値	63.4 (度)
平面1-2	66.7	平面2-3	62.8
平面1-3	62.0	平面2-4	63.7
平面1-4	65.2	平面2-5	60.6
平面1-5	63.3	平面3-4	63.4
平面4-5	61.7	平面3-5	63.9

コード化パターン投影法の特徴を活用した領域分割法を提案し、多面体計測に適用し、本手法に基づいて物体形状を認識できることを示した。また、三次元形状計測結果に基づいて計測精度の評価を行った。

3. 4 本章の総括と結論

本章では、製品や部品等の二次元および三次元形状計測を高精度かつ効率よく行うために、エリアセンサとラインセンサという形状の異なる二種類のイメージセンサを機能融合した複合イメージセンサカメラを用いた計測法について述べた。

従来の画像計測法では、広い視野を高精度に形状計測するには画素数の多い特殊なカメラを用いるしかなく、膨大な画像データの処理に多大な時間と高価な処理システムを必要とするなど極めて非効率的な計測法しかない。ここでは、新たに複合イメージセンサカメラを開発し、部品の二次元および三次元計測に適用し、有効性を明らかにした。得られた結論を以下に示す。

- 1) 二次元計測では、複合イメージセンサを用いることで、従来比7倍以上の高精度化を実現した。機械部品の穴径と穴位置計測に適用した結果、検査時間を従来法に比べ1/3以内に短縮できることを示した。
- 2) 高精度化に伴うデータ処理量の急増と処理時間の増大をバランスよく軽減する効率的な計測システムと画像データ処理法を開発した。
- 3) 画像入力・前処理部に独自の高速化回路を組み込んだ画像計測処理システムを開発試作し、画像処理の高速化を実現した。
- 4) 三次元計測においては、複合イメージセンサカメラとコード化パターン投影法を用いた高精度で効率の良い形状計測法を開発した。
- 5) コード化パターン投影法の特徴を活用した領域分割法を提案し、本手法に基づいて多面体の形状計測が可能であることを示した。

参考文献

- [3-1] 岡田三郎、住本哲宏、宮内秀和、山本秀樹:複合視覚センサによる高精度寸法・形状計測、電気学会論文誌、Vol.110-D No.3、p.212-217 (1990)
- [3-2] 小郷・橋本・大平・桜井:ラインCCDを用いた精細画像抽出方式、信学論(C)、J65-C、p.958 (1982)。
- [3-3] 有賀・吉野・小郷・溝手・寺川:極座標方式ラインCCDカメラの検討、電学論C、109、5、p.394 (1989)
- [3-4] 岡田三郎・麦田憲司:画像処理用VMEボードの開発、第2回産業における画像センシングシンポジウム、p.95 (1987)。
- [3-5] 岡田三郎、住本哲宏、宮内秀和、今出政明: 画像による機械部品の歯形角度検査の高精度化、中国工業技術試験所報告、Vol.34、p.63-68、(1990)
- [3-6] 佐藤宏介・井口征士:液晶レンジファインダ―液晶シャッターによる高速距離画像計測システム―、信学論(D)、J71-D、7、p.1249、(1988)。
- [3-7] 成瀬・野村・山本:スリット光による高精度距離・姿勢計測、信学論(D)、J69-D、12、p.1888、(1986)
- [3-8] 吉見隆他:複数光源レンジファインダシステム、PRU-89-61、p.23-28 (1989)
- [3-9] 電気学会誌 三次元形状計測特集号、Vol.107-C、No.7、p.608-631 (1987)
- [3-10] 井口征士他:三次元画像計測、昭晃堂 p.80 (1990)
- [3-11] 葉雄英他:M系列符号化投影法による3次元物体の計測、計測論文集 25-6、(1989)
- [3-12] 成瀬央:スリット光投影法による高精度距離計測、信学論、J69-D、12、p.1888-1894、(1986)
- [3-13] 吉沢徹他:精密工学会誌 JSPE-53-03、p.422-426(1987)
- [3-14] 荒木和男:高速三次元形状計測装置の試作、信学論 J71-D、10、p.2059-2068、(1988)

- [3-15] 岡田三郎、住本哲宏、宮内秀和、今出政明： Shape Inspection of 3-D Objects Using Time-coded pattern Projection and Newly Developed Sensor Systems、 MVA'90 International Workshop on Machine Vision Applications、 p.55-58、 (1990)
- [3-16] 岡田三郎、宮内秀和、今出政明、住本哲宏 “Accurate Shape Measurement and Recognition of 3-D Objects Using a Newly Developed Image Input System with Adaptively Structured Light Pattern Projection” 計測制御国際会議 I E C O N、 p.91、 (1991)
- [3-17] 岡田三郎、宮内秀和、今出政明、住本哲宏： 新しい画像入力システムと適応的に構造化したパターン光投影法に基づく高精度三次元形状計測と物体形状認識、電子情報通信学会技術研究報告、PRU91(20)、 p.65-70、 (1991)
- [3-18] 山本勉他： 機能モデルを用いた三次元物体認識、信学論、J74-D-II、 5、 p.601-609、 (1991)
- [3-19] 岡田三郎、宮内秀和、今出政明、住本哲宏： 立体形状認識のための画像情報処理、電子情報通信学会信学技法、EA91(30)、 p.43、 (1991)

第4章

同軸線形変位法による光沢性自由曲面の形状計測システムの開発

本章では、表面が光沢性自由曲面の製品や部品の三次元形状計測を安定かつ高精度に行うため、同軸線形変位法に基づく形状計測法を提案する。従来から用いられている三角測量法は、光沢性のある表面の形状計測では、反射光が受光器に入射すると測定困難となる、変位と出力の関係が直線関係でない、測定器と対象物の距離により精度が大幅に異なる等の問題点があり [4-1] [4-2] [4-3] [4-4] [4-5]、真下らは、受光部を工夫した光沢面の計測法を開発した [4-6] [4-7] [4-8]。しかし、上記した問題点をすべて解決することは困難であることから、従来の計測法に比べて多くの利点を有する三好ら [4-9] の同軸線形変位法に基づく新しい計測システムを研究開発する。研究開発の目標を以下に示す。

- 1) 金属面等の光沢面の非接触形状測定を可能にする
- 2) レーザ測定における精度低下の原因であるスペckルノイズの影響を効果的に低減する
- 3) 100mm 以上の測定範囲で、 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内の測定精度を達成する
- 4) 高速測定が可能でデータの信頼性、安定性を保証する
- 5) 小型軽量、低コストで取り扱い易いこと

4. 1 光沢面自由曲面の形状計測システムの開発と必要性

近年の工業製品は、表面が滑らかでかつ自由曲面で構成される意匠性を重視した複雑な形状が多く、加工後の寸法形状に対する精度要求も厳しさを増している。そのため、製品作りのベースとなる高品位の金型加工では、加工面への影響を考慮して、非接触計測センサに対するニーズが高い。しかし、現状の非接触光学式センサの多

くは、拡散光を用いた測定方式を採用しており、その場合、直接反射光の影響を受けやすいため、金属面を安定に測定することが困難である。本研究は、従来法の問題点の解決を図るため、三好ら [4-10] [4-11] の同軸線形変位法に基づく高速、高精度、広レンジの非接触光学式形状計測システムの実用化を目指す。

4. 2 形状計測センサの測定原理と課題

本研究では、同軸線形変位方式（光リング式）に基づく非接触形状計測センサシステムを研究開発する [4-12]。本方式は、測定面からの拡散光を検出する方式である。計測システムの測定原理を以下に示す。光学系の構成は図4-1に示すように、極めて簡単な構造である。すなわち、2枚の非球面凸レンズの間に円環状のスリット板をおき、光軸上の右側から入射したレーザ光は被測定物表面で反射し、その拡散光は対物レンズで集光した後、円環状スリット板の開口部を通過して、後方のレンズで集光し、結像面に円環状の光像を形成する。そこで、この光像を適当な受光器で撮り込み、その半径 R を計測することにより、対象物の形状を次式から求める。

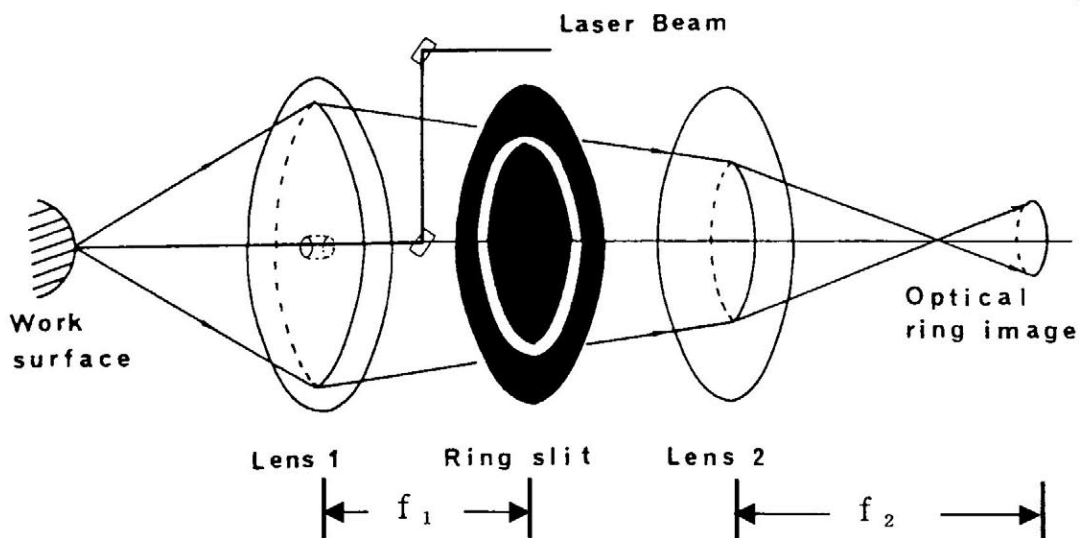


図4-1 光リング式の光学系の構成

$$Z = (f_1^2 / a f_2) \cdot R \quad (4-1)$$

ここで、 f_1 、 f_2 はレンズの焦点距離、 a は円環スリットの直径、 Z は変位である。装置の組立では、レンズ1と円環スリット板との間隔 f_1 とレンズ2と受光器との間隔 f_2 の位置決めと光軸合わせを精密に行えばよい。本方式の特徴として、計測目的に応じて、表4-1に示すように、測定範囲、測定精度を任意に設計することが可能である。

表4-1 光学パラメータと測定範囲・精度との関係

	レンズ1の焦点距離 f_1	レンズ2の焦点距離 f_2	円環スリットの直径 a	測定範囲	測定精度
①	20 mm	20 mm	20 mm	20 mm	$\pm 10 \mu\text{m}$
②	50 mm	50 mm	20 mm	50 mm	$\pm 25 \mu\text{m}$
③	50 mm	50 mm	10 mm	100 mm	$\pm 50 \mu\text{m}$
④	50 mm	50 mm	5 mm	200 mm	$\pm 100 \mu\text{m}$

本方式の特徴を以下に示す。

- ①被測定面の表面性状（反射率、粗さ等）の影響を受けにくい
- ②被測定面の形状（曲率、傾斜角など）の影響を受けにくい
- ③作動範囲が長く、測定範囲が広い
- ④レーザ光の入射軸と受光軸が同一のため、測定不能領域が狭い
- ⑤構造が簡単なため、装置化しやすく低コストで製作できる
- ⑥光像直径と変位の関係が線形のため、測定範囲全体で同じ精度で測定できる
- ⑦拡散光検出方式でありながら、直接反射光の影響を受けにくい。その理由は、測定面で反射した直接（鏡面）反射光のほとんどは、円環状スリット板の黒いマスク部分により光路を遮られて受光センサに入射しない。一方、円環状スリットを通過した直接反射光は、受

光面の円環状光像の一部となる。しかし、その部分の輝度が周囲より高くなるだけで、光像直径の測定にはほとんど影響を及ぼさない。

しかし、本方式には以下に示す問題点があり、実用化に至っていない。

- ①受光用検出器にエリアセンサ以外に適当なものがないため、その解像度により、測定範囲と測定精度に制限がある。
- ②円環状光像の直径の測定に時間を要する
- ③材料表面と円環状スリット板端面で発生するスペックルノイズの影響を受け、安定計測が困難であるとともに測定精度を低下させている。
- ④測定原理からレーザ光は真円であることが必要のため、現状では He-Ne レーザ等の大きな光源を用いており、小型軽量化のネックとなっている。

上記した問題点を解決するため、新たに一次元のラインセンサを回転させて光像の直径を効率よく測定する方法を考案した。図4-2に試作したプロトタイプの計測システムの構造を示す。

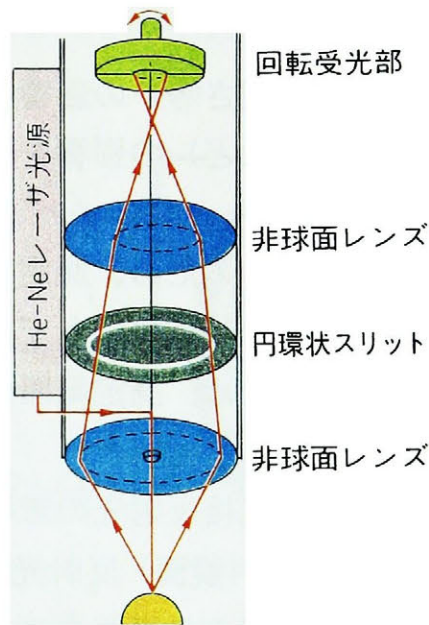


図4-2 試作したプロトタイプの計測システムの構造

4. 3 開発した形状計測システムの概要

上記したように、同軸線形方式に基づく非接触形状計測センサは、従来のセンサにない多くの特徴を有するが、未解決の問題点が残っているため、実用化に至っていない[4-13][4-14]。また、本方式の場合、測定精度と測定範囲は、円環状光像の直径を測定する受光器の性能に依存する。円環状光像の画像を取り込みには、二次元センサが用いられるが、現状のTVカメラは解像度が低い。ハイビジョン等の高密度センサを用いると、測定範囲を約3倍拡大できることになるが、非常に高価である上に、データ量が9倍程度に増え、処理に多大な時間がかかるなどの問題点の解決が困難と考えられる。したがって、効率的な計測法の開発が不可欠である。

本方式において、円環状光像は、光軸を中心として測定物までの距離に比例してその直径が変化する。したがって、ラインセンサを光軸を中心として回転させ、適当な回転角度毎に画像を取り込んで、その各画像から光像の円弧の位置を計測すれば、高精度、高速、効率的に円環直径を求めることが可能になる。すなわち、ラインセンサはエリアセンサに比べラインの画素数が500画素対5000画素と多い上に、回転させることで、データ量を大幅に低減できる。しかし、本方法を実現するには、ラインセンサを回転させる機構および回転中のラインセンサの外部制御法とセンサ出力の非接触伝送方法等の技術的な課題を解決する必要がある。しかし、これらの問題点を解決できれば、従来にないすぐれた性能を有する形状計測センサを提供することが可能となる。

4. 4 開発した形状計測センサ（プロトタイプ）

図4-3に開発試作した形状計測センサシステム[4-15]の構成を、図4-4にその写真を示す。基本的な構成は、3mW出力のHe-Neガラス管型レーザ光源、直径50mmの非球面レンズ2枚、円環状スリット板1枚と回転方式光像検出器である。

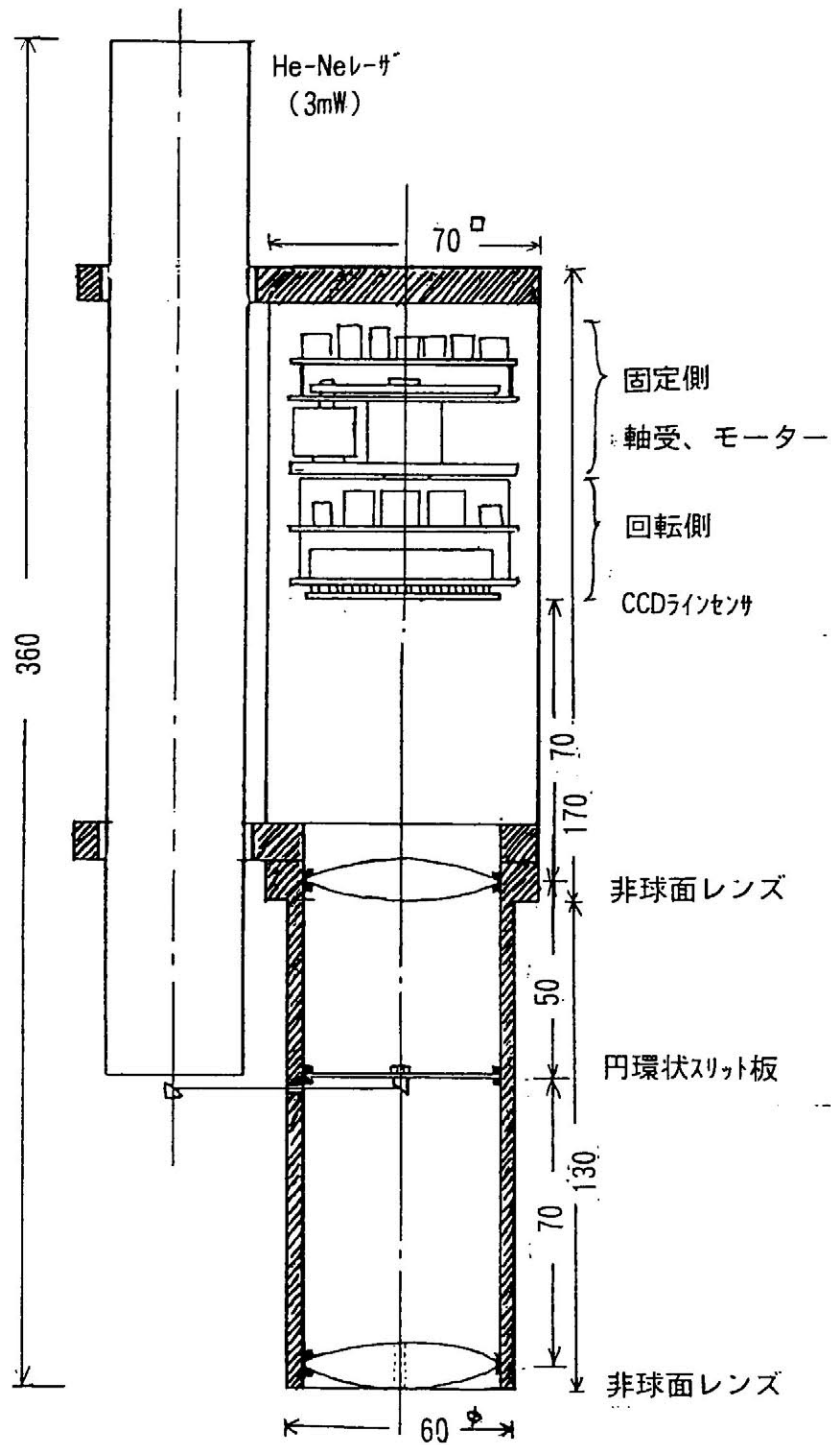


図4-3 形状計測センサシステムの構成

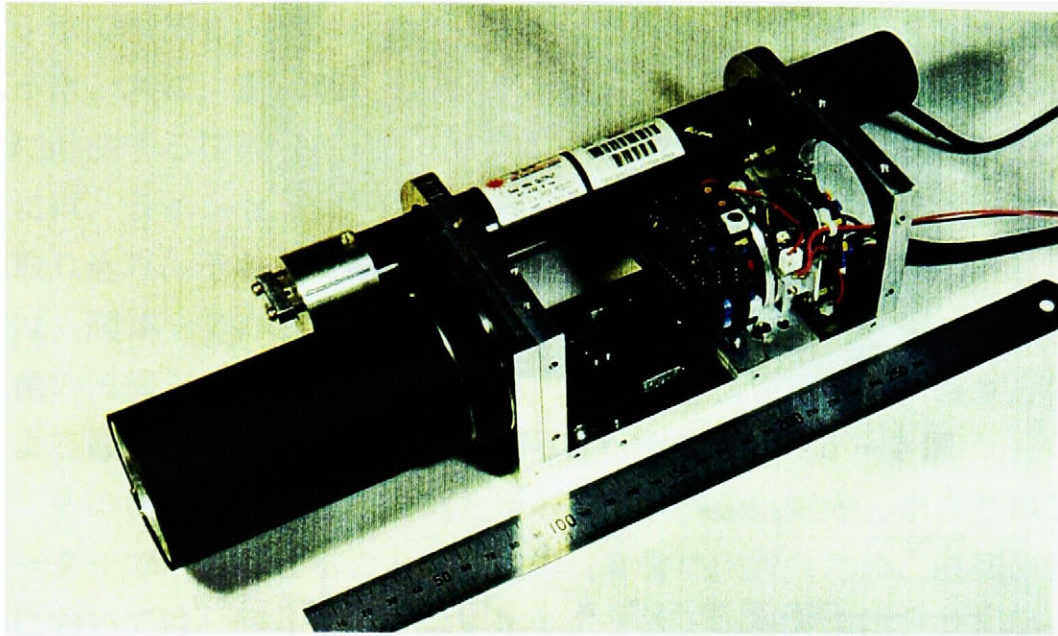


図4-4 形状計測センサシステムの写真

筆者らは、前記したように、検出センサにCCDラインセンサ（5340画素）を用い、これを一定角速度で回転させ、回転に同期して円環光像の一部を取り込み、これらの画像から光像の直径を計測するシステムを考案した。図4-5にラインセンサ回転部の外観を示す。

その中で、回転中のセンサからの信号の送受は、技術的に困難な部分であり、回転側から固定側にラインセンサ画像信号を送るとともに、回転側に電力の供給と制御信号を送る必要がある。種々の方式について検討した結果、本研究では、図4-6に示す回路により行い、画像の転送は、フォトカップラによる光伝送方式を開発した。その結果、回転側の回路には、スリップリングで電源電圧のみを供給するだけで、それ以外の信号線は必要としなくなり、信号の伝送に伴うノイズをほぼ完全に防止することが可能になった。

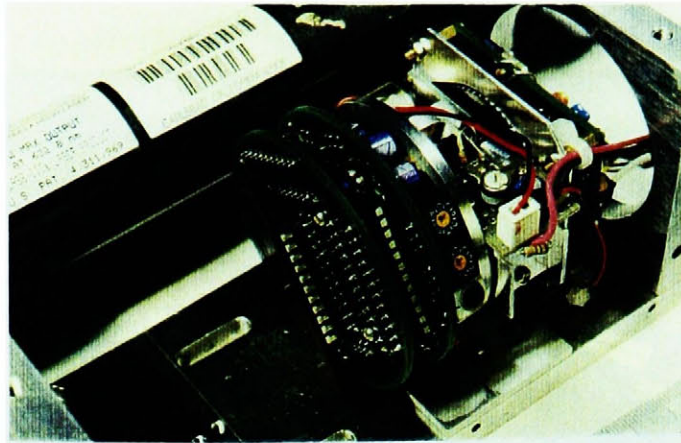


図 4-5 ラインセンサ回転部の外観

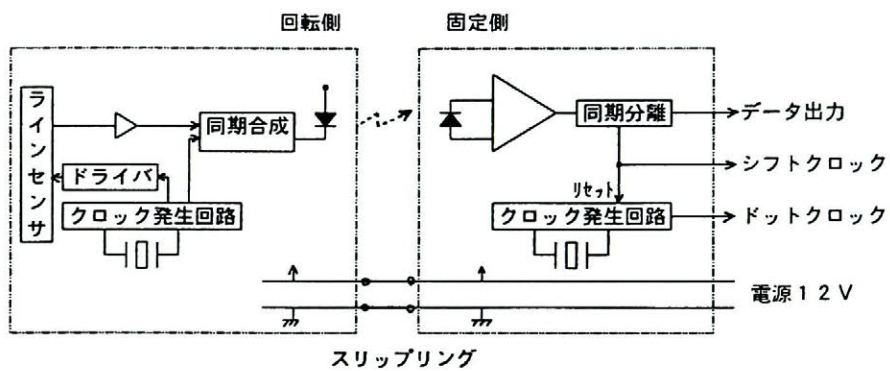


図 4-6 ラインセンサ制御及び画像伝送回路の構成

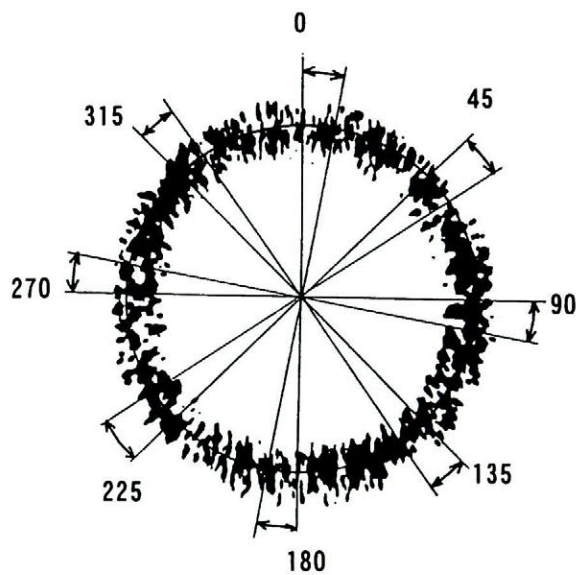


図 4-7 画像の取り込み角度

上記の回路を用いることにより、円環状光像を回転するラインセンサで検出し、その画像データを実時間に取り込むことが可能になった。次に、重要な問題は、円環状画像を用いて円環の直径を正確に計測する技術と手法の開発である。円環状光像の直径を計測するには、ラインセンサを回転しながら適当な回転角度で複数の画像を取り込み、それらの画像から円環状光像の位置を計測する。ここでは、図4-7に示すように、45度毎に画像を取り込み、円環状光像の円周上の8点の線画像から、光像の位置を計測し、逐次近似による最小自乗法により直径の計算を行った。

その場合、光学系の光軸とラインセンサの回転中心をミクロンオーダーで一致させることは技術的に非常に困難なため、直径の計算においては、図4-8に示すように光軸と回転中心は一致しないことを前提とした計算アルゴリズムを考案した。すなわち、あらかじめ、光軸と回転中心は、X軸及びY軸方向にずれていると仮定し、各ずれ量は未知とする。検出した画像から円環の位置を検出した後、直径を算出する最小自乗計算式に代入し、円環の直径と各ずれ量を推定する。計算初期段階では、ずれ量は不明のため、近似的に0とおく。1回目の最小自乗計算により、ずれ量と直径の第一次近似値が求められるので、その値を再び最小自乗計算式に代入し、ずれ量と直径の第二次近似値を求める。この計算を何回も繰り返し、ずれ量と直径の計算値が収束した段階で計算を終了し、その時の直径を計測値として採用する。この計算方式を用いることにより、装置組立における光軸とラインセンサの回転中心の位置をミクロンオーダーで合わせる必要がなくなり、装置の低コスト化が可能になるとともに校正に要する労力と時間を大幅に削減することが可能になった。

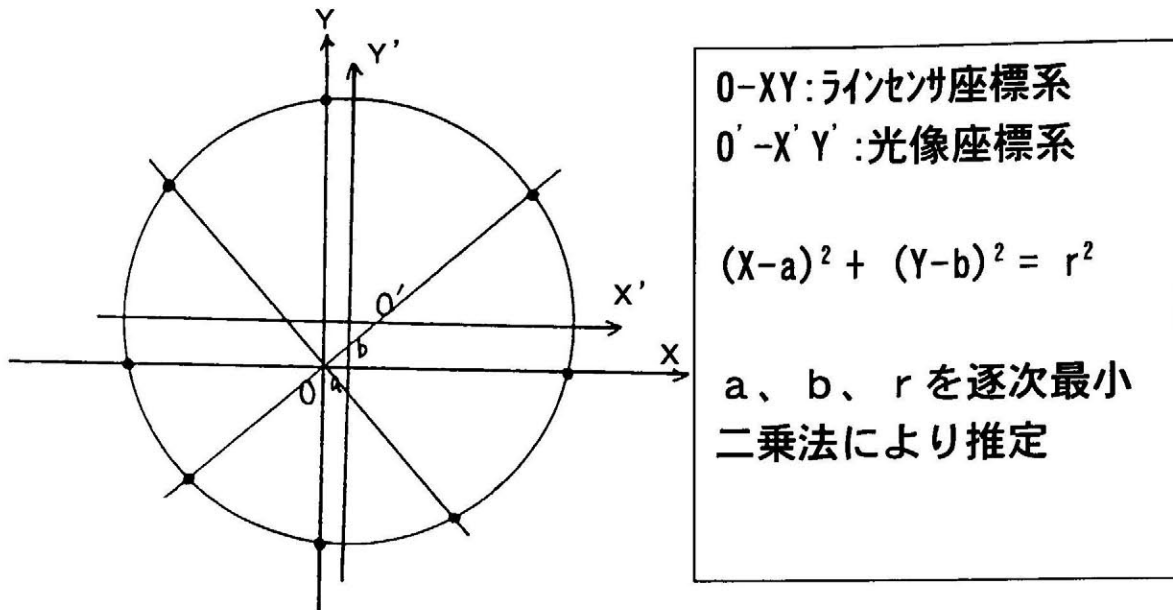
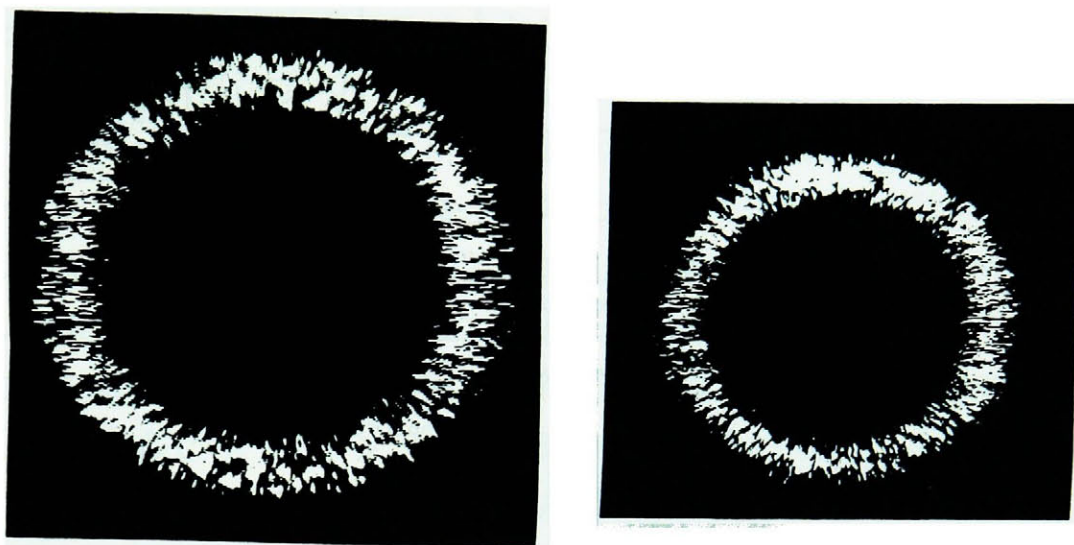


図4-8 円環状光像の直径の算出法

ラインセンサで円環状光像の直径を計測するための回路と算出方法を示したが、実際に結像面に結像される円環状光像は、様々な要因により劣化しており、そのままでは、光像の直径を正確に計測することは極めて困難である。まず、エリアセンサで検出した円環状光像の例を図4-9と図4-10に示す。同図には、対象物として金属板、紙の例が示されている。対象物の材質の相違による円環状光像の光強度分布に大きな違いはなく、むしろ、スペckルノイズと呼ばれる割れ目状の強度分布が見られる。スペckルノイズは、レーザ光のように指向性の強い光源を用いたときに生ずる現象で、測定精度低下の大きな原因である。スペckルノイズの発生原因は、物体表面及び、円環状スリット板の端面における光回折現象によるもので、レーザ光源を用いる場合、避けることが出来ない。したがって精度を向上し、安定的な計測を行うためには、何らかの方法でスペckルノイズを除去する必要がある。



金属板

紙

図4-9 エリアセンサによる円環状光像の画像例

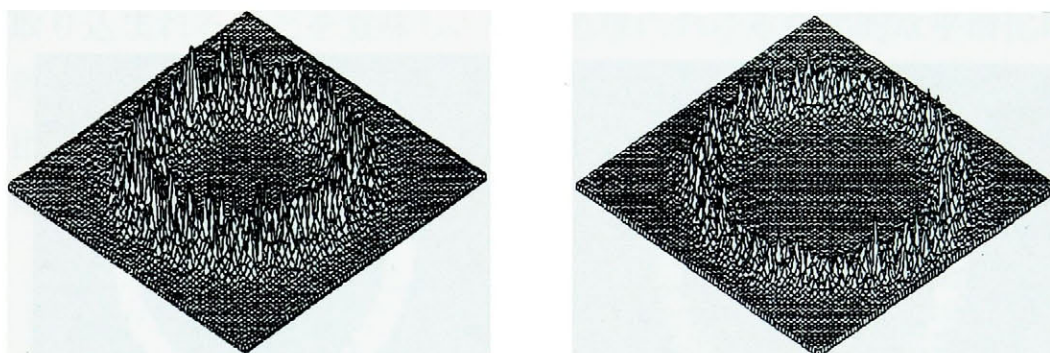


図4-10 エリアセンサによる円環状光像の三次元画像例

三好ら[4-11]は、図4-11に示すような回転拡散板を用いてスペckルノイズを低減している。しかし、装置が複雑化することに加え、図4-12に示すように同法でも依然としてスペckルノイズの影響は完全には除去されてなく、得られた光像画像にさらに平滑化処理を適用している。

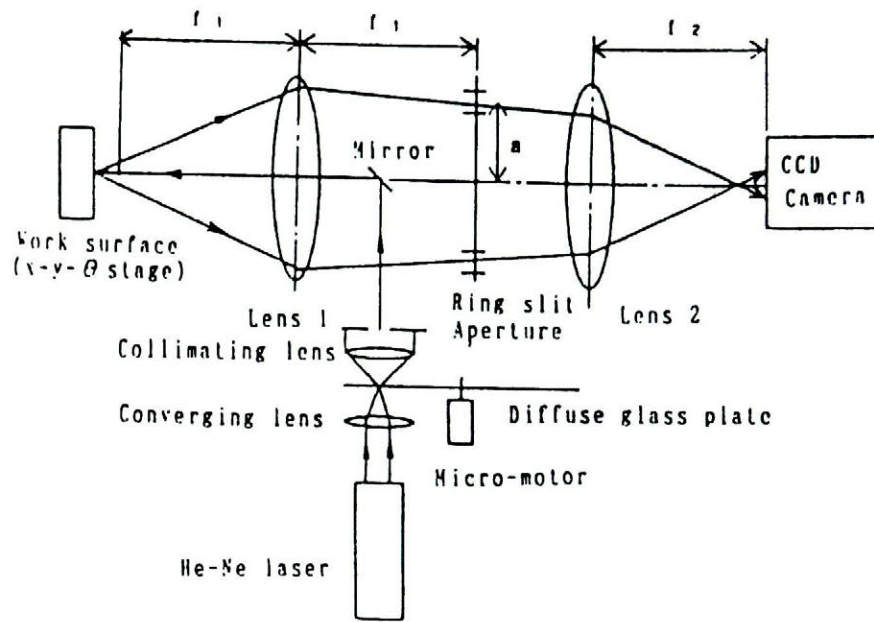


図 4 - 1 1 回転拡散板を用いたスペックルノイズ低減法
(三好ら [4-11])

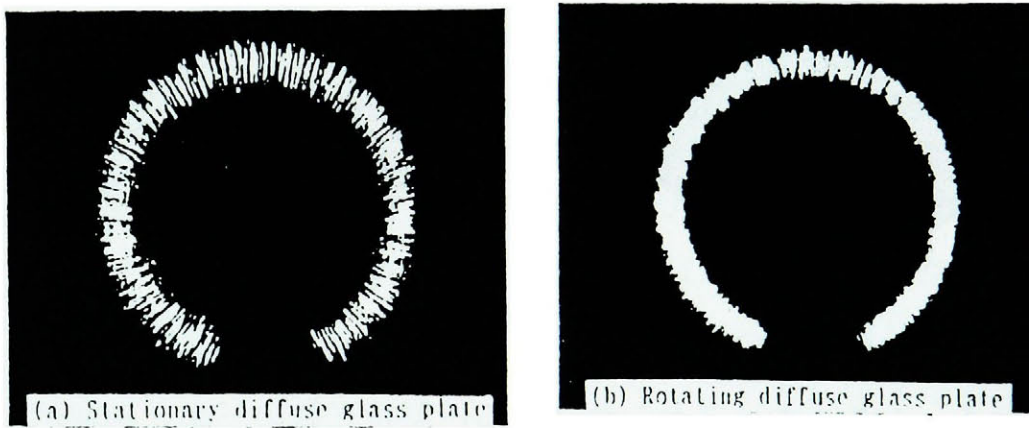


図 4 - 1 2 回転拡散板を用いたスペックルノイズ低減法
(三好ら [4-11])

本方式によるスペックルノイズの低減法を以下に示す。図4-9を観察すると、画像中のスペックルノイズは割れ目状の形をしており、その割れ目はすべて半径方向を向いているという特徴を有する。

ここで、ラインセンサを用いた画像の取り込み原理を示す。ラインセンサやエリアセンサでは、受光センサにある時間幅の間に入射した光を蓄積し、その間の全入射光量に比例した電気信号を画像として出力している。したがって、十分な光量を得るため、カメラにおける露光時間に相当する適当な時間幅の蓄積時間が必ず必要となる。本方式でも、ラインセンサで画像を取り込む場合、通常数ミリ秒の蓄積時間を設定している。その場合、ラインセンサが静止していれば、ぶれのない画像が得られるが、ラインセンサが回転している場合は、蓄積時間に相当する時間の間にラインセンサはある角度回転し、その間にセンサに入射した光が蓄積される。言い換えれば、蓄積時間に相当する回転角度範囲の円環状光像の円弧の領域の画像が取り込まれることを意味し、画像処理における空間的な平滑化に相当する処理を行うことと等価となる。その結果として、センサを静止した場合と回転した場合の画像の比較を図4-13と図4-14に示す。

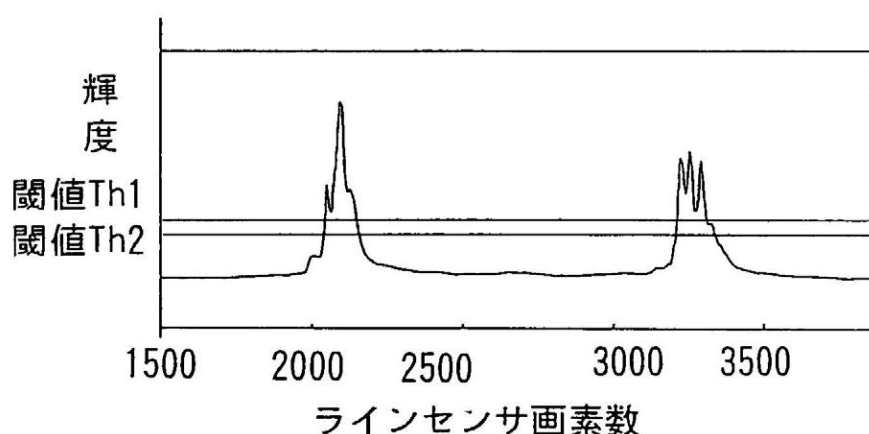


図4-13 静止状態におけるラインセンサにより検出した線画像の例

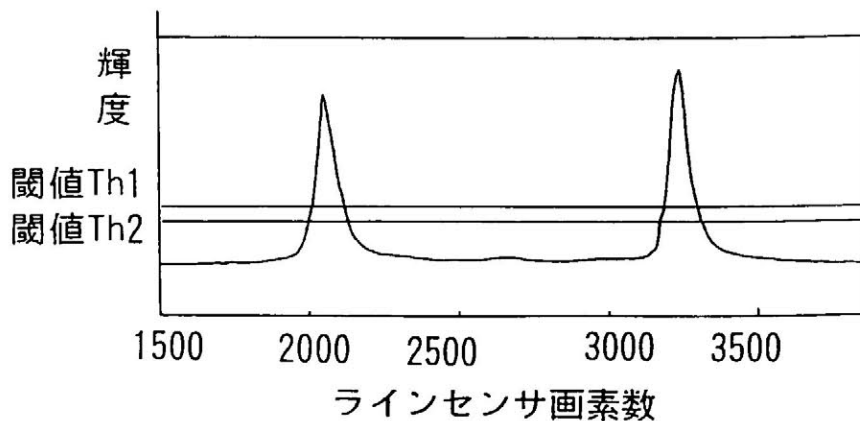
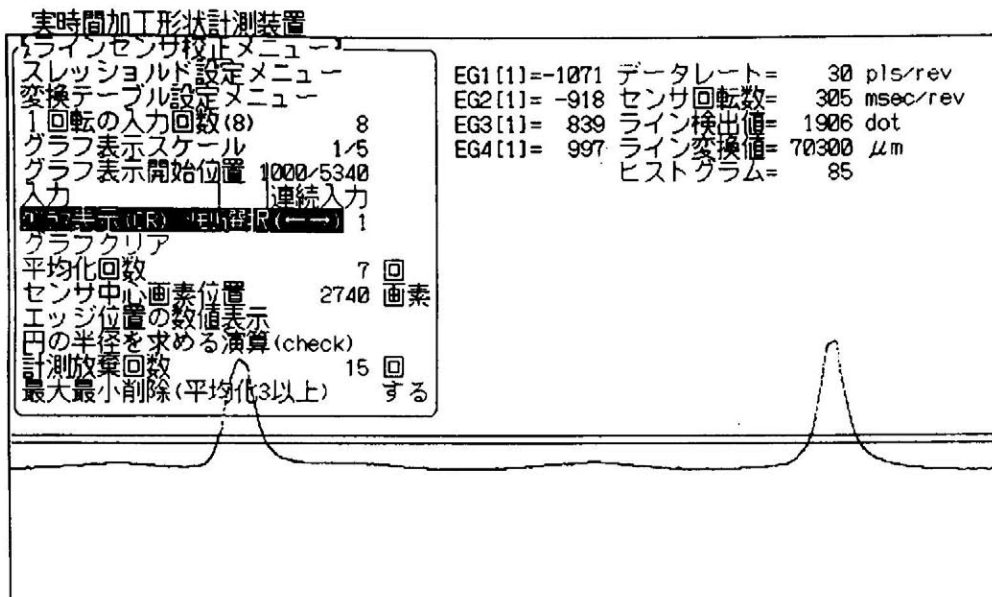


図4-14 回転状態におけるラインセンサにより検出した線画像の例

図4-13は、ラインセンサの回転を止めて静止状態で取り込んだ円環状光像の線画像である。一方、図4-14は、ラインセンサを回転しながら取り込んだ円環状光像の線画像である。両画像には明らかな違いがある。すなわち、静止時の画像は、スペックルの影響により光量分布に大きな変動があり、光像の直径を正確に求めることは極めて困難である。これに対して、回転中の画像では、光量分布は滑らかな曲線を示し、ピーク位置も鮮明で、重心を計算しなくても比較的簡単に光像の直径を求めることができる。

形状測定中の表示画面の例を図4-15に示す。また、図4-16に光像直径と変位の校正実験結果を示す。直径と変位とは160mmという広い測定範囲でほぼ直線関係を示すことが確認された。そこで、p.69の式(4-1)をそのまま適用した場合、図4-17に示すように測定範囲100mmで、誤差は $\pm 0.3\text{mm}$ 以内であった。この原因は、装置の組立誤差と光学レンズの収差等によると考えられる。しかし、誤差の傾向として、中央で-側、両端で+側の誤差を生じていることから、実験式として三次式を適用したところ、誤差は $\pm 0.1\text{mm}$ 以内に収まり、目標とする精度を満足することができた。



測定メニュー画像

図4-15 計測表示画面

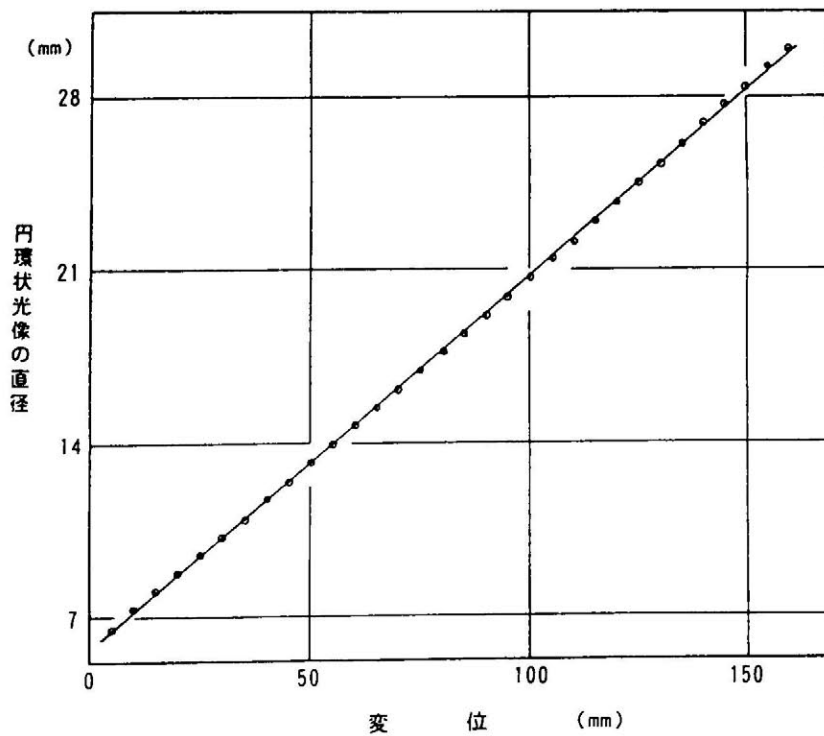


図4-16 光像直径と変位との関係

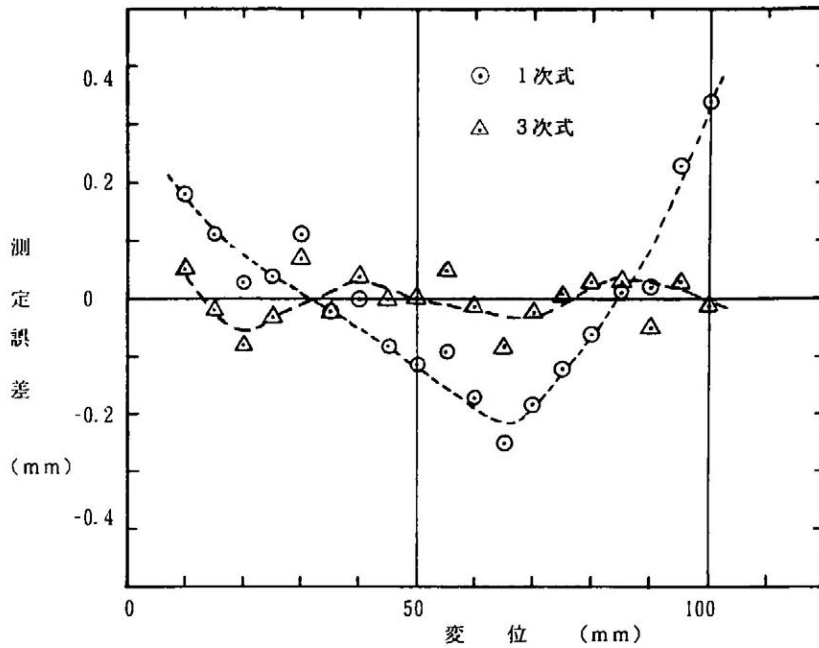


図4-17 校正式と誤差との関係

ラインセンサを回転する本方式の利点を以下に示す。

- ① エリアセンサに比べ、1ラインあたりの画素数が10倍以上多いため、広い測定範囲を、精度よく測定することができる。
- ② スペックルノイズを極めて効果的に低減できる。
- ③ 扱う画像量がエリアセンサに比べ極めて少ないため、計測時間を大幅に短縮でき、画像処理装置を必要としない。
- ④ 装置の構成が簡単のため、製作も容易であり、低コスト化が可能である。

受光器にエリアセンサを使用した場合との比較を表4-2に示す。なお、提案方式の場合、一点あたり連続で5回測定を行い、得られた光像直径の平均値を出力することでデータの信頼性と安定性を高めている。

表4-2 提案方式と従来方式との比較

	提案方式 (ラインセンサ)	従来方式 (エリアセンサ)
測定範囲	1 0 0 mm	2 0 mm
分解能	1/5000	1/500
測定精度	± 5 0 μ m	± 5 0 μ m
計測時間(1点あたり)	約 0.5 秒	約 5 秒
スペックル対策	センサ回転	拡散板

4. 5 形状計測センサ（改良タイプ）の小型軽量化の検討

プロトタイプの開発により、本方式に基づく形状計測センサを実現することができた。しかし、実用化を目指すには、光源にガラス管タイプのHe-Neレーザを用いているため、形状が大きい上に重量が重く、扱いにくい、壊れやすい、レーザの寿命（約2千時間）の問題や、計測時間のさらなる短縮と、測定精度の向上等を解決する必要がある。

そこで、装置の小型軽量化を図るため、光源をガラス管タイプのレーザ光源から半導体レーザへ置き換えることを検討した[4-16][4-17][4-18]。その場合、半導体レーザから発振されるレーザ光は、図4-18に示すように楕円形をしている。しかし、同軸線形方式では、丸いスポット状のレーザを被測定物に照射し、その散乱反射光をレンズ及び円環状のスリット板を介して、結像面に円環状光像として結像し、その直径から対象物までの距離を検出する。したがって、半導体レーザを用いた場合、スポット光が楕円のため、結像面に等輝度の光像を結像できない上に、光像の輪郭が不鮮明となり直径の測定精度が低下することや、指向性を生ずるなどの問題点があり、スポット光を楕円から真円形状に変換する機構が不可欠である。

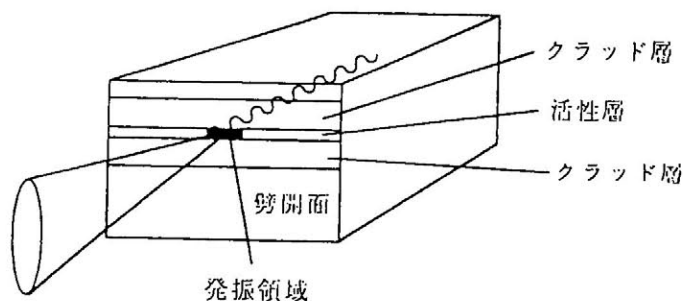


図4-18 半導体レーザ光のビーム形状

そこで、半導体ダイオードから発光される楕円状の光を真円に変換する手法として、以下に示す3つの方法を検討した。

- ①半導体ダイオードからのレーザ光をピンホールに通して真円化する方法。
- ②アナモルフィックプリズムペアを用いて光学的に真円化する方法。
- ③微小コア径の光ファイバを用いて真円化する方法。

①の方法は、最も簡便な方法であり、ピンホールの径を替えることで、種々の径のスポット光を発生できる。しかし、本センサで必要とする0.2mm程度のスポットに絞るためには、ピンホールを0.1mmよりさらに小さくする必要があり、ピンホールでの光のロスが大きすぎ、測定に必要な光量を確保することが出来ない。

②の方法は、高価な光学測定器等で用いられ、光のロス無しに真円状のスポット光が得られる。しかし、楕円状の光の短軸方向を光学的に拡大して直径を合わせるため、得られたスポット光の直径は約8mm程度と大きいため、コリメータレンズを用いても0.2mm以内の平行光に変換することができない。

③の方法が本研究で採用した方式で、半導体レーザダイオードからのレーザ光をコリメータレンズでコア径が4ミクロンの超微小光ファイバに入射し、光ファイバの出射側から出てきたレーザ光をコリメータレンズで平行光に変換する方式で、微小な光ファイバを通すことで真円状のスポット光が得られる。その場合、レーザ光を微小な光ファイバに入れ込む際の光のロスを小さくするため、光学機器メーカーの協力を得て、小型で光量ロスが小さく、出射したレーザ光を0.2mm以内の平行光に変換するコリメータレンズを含めた小型光学ユニットを製作した。また、シングルモード光ファイバを用いることで、出射端のコリメータレンズの収光性を高める工夫をした。

開発試作した形状計測センサ（光学系）の外観を図4-19に、構造を図4-20に示す。形状の小型軽量化を図るため、2枚の非球面凸レンズと円環状スリット板の外径を50mmから30mmに変更した。

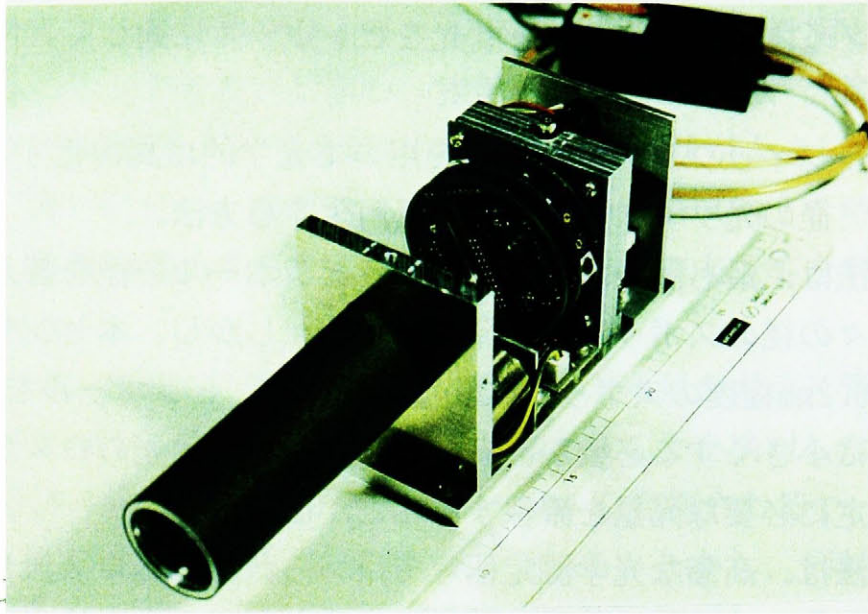


図4-19 本研究で開発した形状計測センサの外観

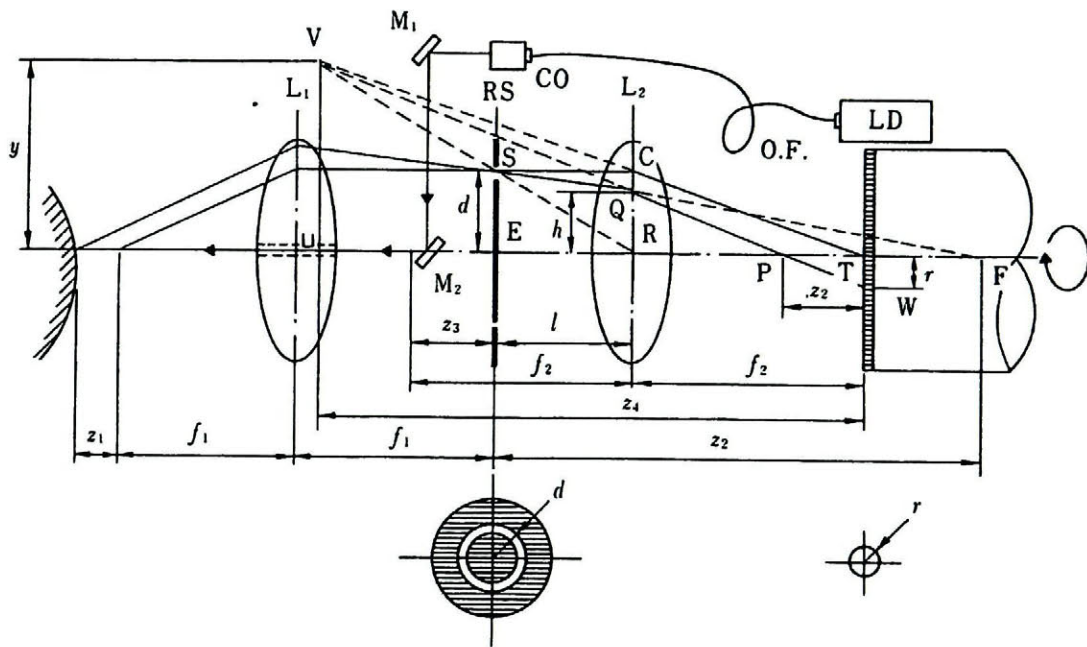


図4-20 形状計測センサの構造

本研究で開発した形状計測センサに用いた半導体レーザダイオードと光ファイバの仕様を以下に示す。また、シングルモードとマルチモードの光強度分布の相違を図4-21に示す。シングルモード光ファイバはコアの中での伝搬モードが一つしかないため、モード分散がなく、出射したレーザ光を細く絞り込むことが出来る利点がある。本センサの場合、レーザ光源の光出力が20mWに対して、出射端における光出力は、約5mWとなり、伝搬効率は25%となった。図4-22に使用した半導体レーザダイオードの動作特性の試験結果を示す。

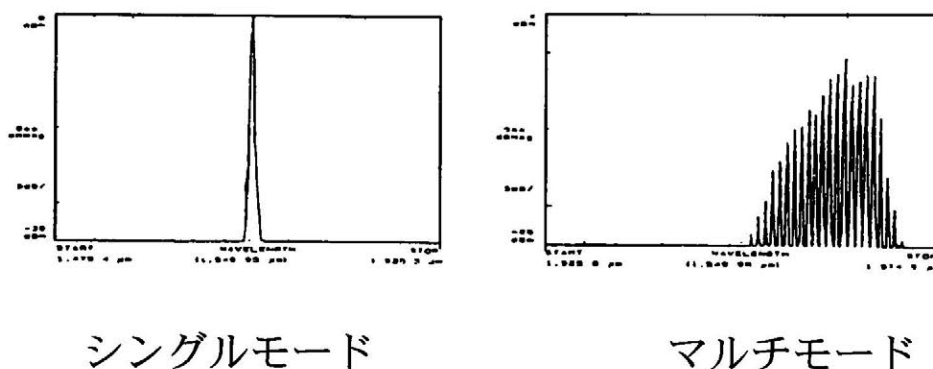


図4-21 シングルモードとマルチモードの光強度分布の相違

表4-3 半導体レーザおよび光ファイバの仕様

半導体レーザダイオード	
発振波長	685 nm
光出力	20 mW
構造	屈折率導波型
広がり角	$\theta_H=8$ 度、 $\theta_V=23$ 度
光ファイバ	
使用波長	630 nm
コア径	4 μ m
ファイバ径	125 μ m
モード	シングルモード

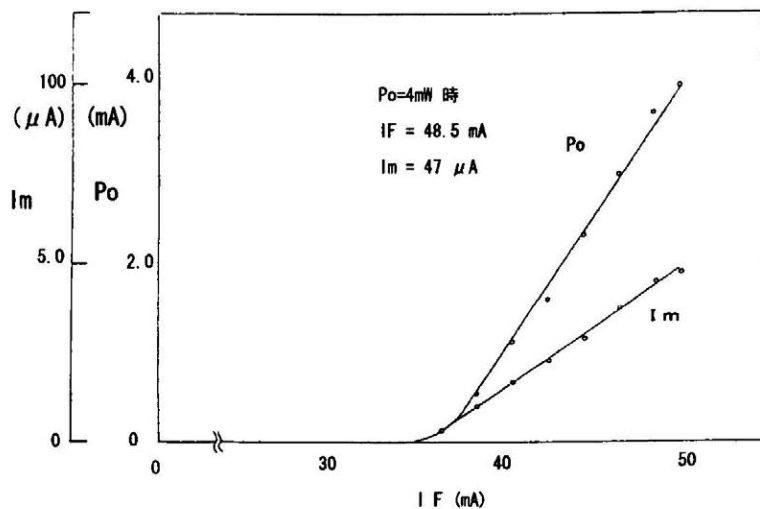


図4-22 半導体レーザーダイオードの動作特性の試験結果

プロトタイプと実用化タイプとの比較を表4-4に示す。

表4-4 プロトタイプと改良タイプとの比較

	プロトタイプ	改良タイプ
長さ	360mm	220mm
幅	100mm	50mm
高さ	60mm	60mm
レンズ直径	50mm	30mm
焦点距離	50mm	50mm
光源	He-Ne ガラス管	半導体LD
波長	632.8nm	680nm
長さ	272mm	20mm
直径	44mm	10mm
重量	0.4Kg	0.1Kg
重量	1.5Kg	0.9Kg
測定範囲	160mm	100mm
測定精度	±0.1mm	±0.1mm

プロトタイプと改良タイプの外観を図4-23と図4-24に示す。重量で40%減、容積で1/3以下に小型軽量化された。先端円筒部は直径55mmから35mmに細くなり、部品等との干渉による測定不能範囲を狭くすることができた。

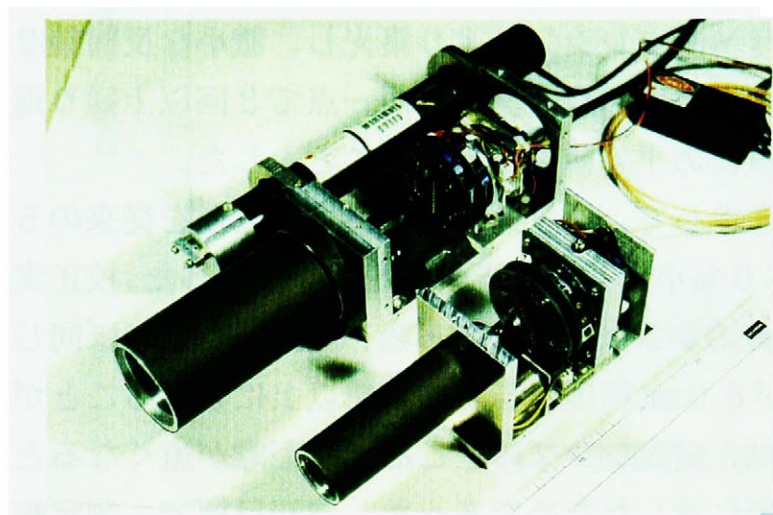


図4-23 プロトタイプと改良タイプの外観の相違

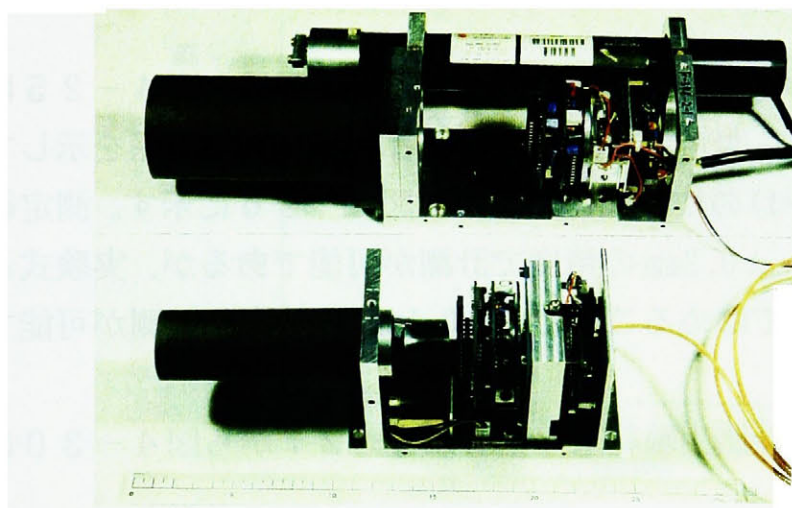


図4-24 プロトタイプと改良タイプの外観の相違

4. 6 開発した計測システムの性能評価

試作した計測センサをNC加工機に取り付け、基本的な性能実験を行った。実験では、焦点距離が50mmの対物レンズと集光レンズ、半径が5mmの円環状スリットを用いた。半導体レーザから発射したレーザ光は、光ファイバによりセンサ部に導かれ、光ファイバ出射端に取り付けたコリメータレンズにより集光し、微小な反射鏡2枚を介して対象物表面に照射した。測定は同一点で3回以上繰り返して行い、算出した直径の平均値を出力することとした。

装置の小型化を考慮して、コリメータレンズの直径を従来の50mmから30mmに60%小さくした光学系を設計試作した。校正実験の結果、直径50mmのレンズに比較すると、測定精度はほぼ同じであったが、測定幅が60mm程度と当初の予想以上に狭まることがわかった。この理由は、結像レンズのところ、距離が遠くなると反射光がレンズ周辺部に達したためであった。当初目標で、測定範囲は100mm以上を目指していたので、レンズを直径40mmのものに交換し再調整した結果、100mmの測定範囲を確保できることが確認された。

校正実験による変位と円環状光像の直径との関係を図4-25に示す。測定原理から明らかなように、両者はほぼ線形関係を示している。また、式(4-1)の校正式との誤差を図4-26に示す。測定範囲40mmにおいて、 $\pm 0.2\text{mm}$ の精度で計測が可能であるが、実験式として、三次式を当てはめることで、 $\pm 0.1\text{mm}$ の精度で計測が可能である。

本装置を用いた計測実験結果の例を図4-27から図4-30に示す。

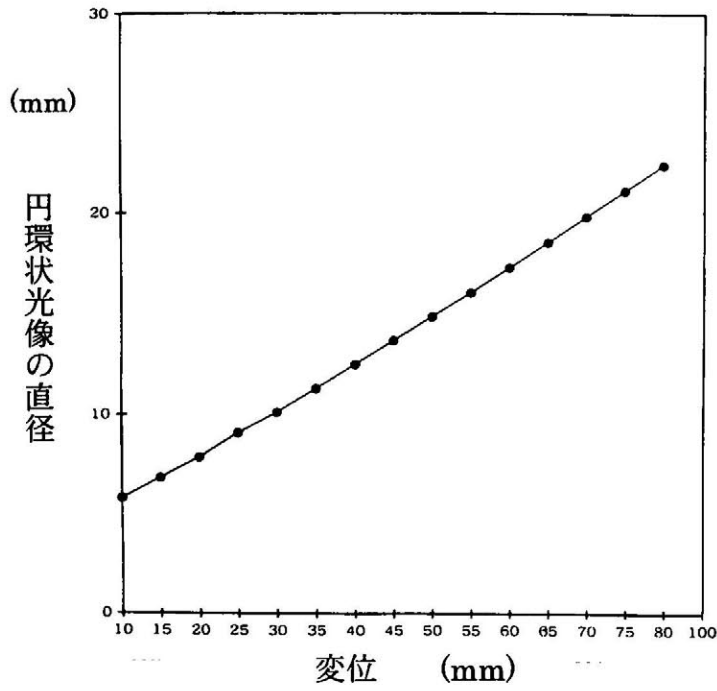


図4-25 変位と円環状光像の直径との関係

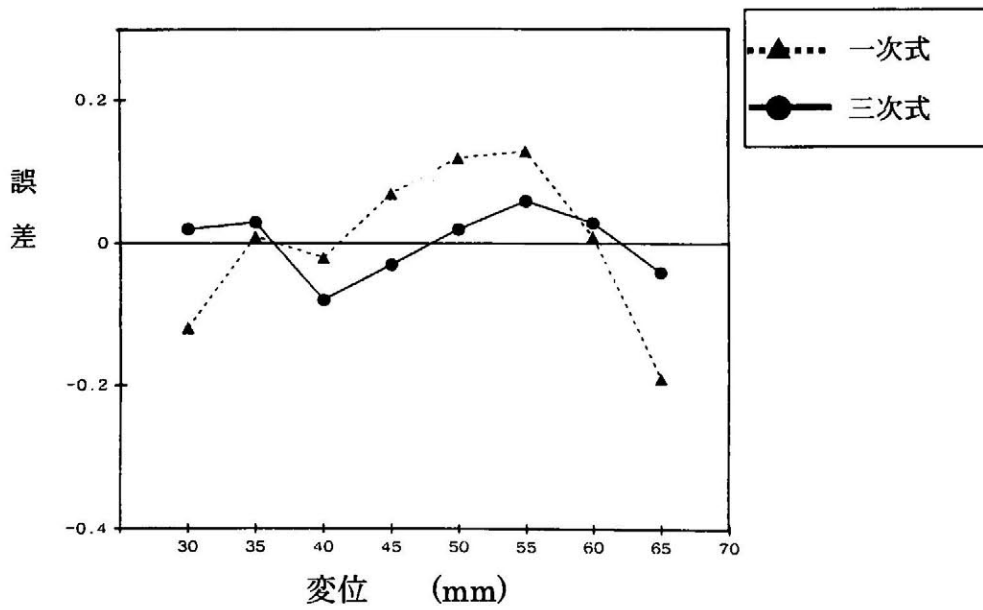


図4-26 校正式と誤差との関係

まず、図4-27に光沢性の強い曲面として、パソコン用マウスの形状計測結果を示す。三角測量法では、鏡面反射光が、受光器に入射する領域では、測定不能となるが、本方式では、鏡面反射光の影響を受けることなく安定して計測されていることがわかる。図4-28に角の測定結果を示す。角の部分では、傾斜角が大きく変わるが、その影響を全く受けてなく、傾斜面の計測が可能ながわかる。

次に、図2-29に段差近傍の測定結果を示す。同図から、段差の端から5度 ($=\tan^{-1}(0.8/13)$) の角度まで測定できることが示された。図2-30に細溝の計測結果を示す。幅が6mm、深さが34mmの溝では、三角測量法では、底面の測定は不可能であるのに対して、本方式では、底面中央部の形状を測定可能である。

以上のことから、光沢面や急形斜面の測定が可能、測定不能（死角）領域が小さいという同軸線形変位法の利点が明らかとなった。

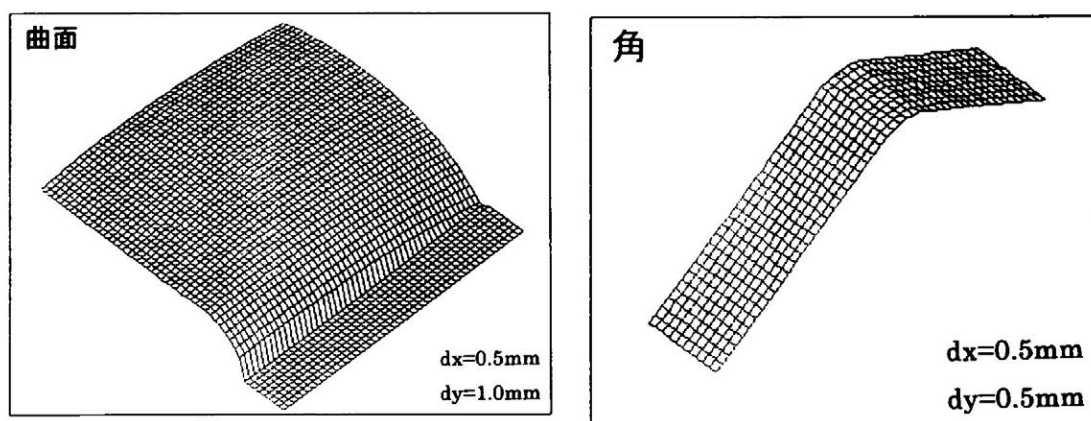


図4-27 測定結果の例（光沢面） 図4-28 測定結果の例（傾斜面）

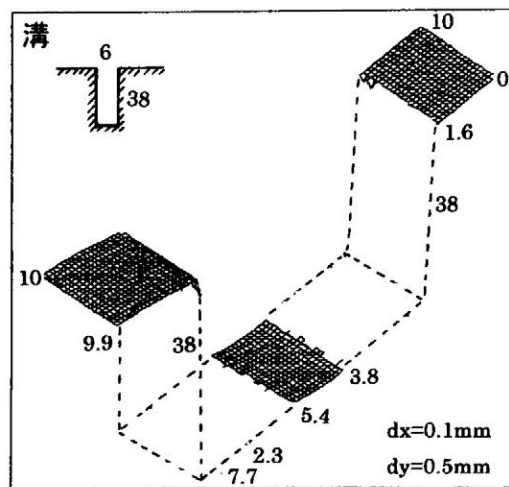
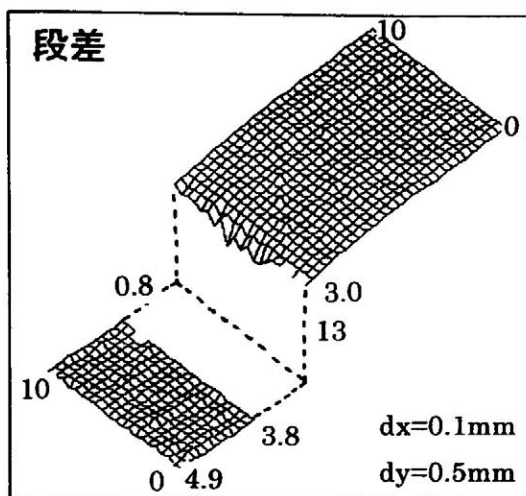


図 4-29 測定結果の例 (段差)

図 4-30 測定結果の例 (細溝)

4. 7 本章の総括と結論

本章では、金属面を有する金型等の表面形状を非接触かつ精度よく計測するため、同軸線形変位法に基づく形状計測システムを研究開発した。同法は従来広く用いられている三角測量法に比べ多くの利点を有しているが、受光センサに適当なものがなかったため、これまで実用化することが出来なかった。ここでは、ラインセンサを回転させる受光部を考案することで、精度を保ちつつ測定範囲を大幅に広げ、測定時間を短縮できることを明らかにし、実用化の目途をつけることができた。結論を以下に要約する。

- 1) 受光器にCCDラインセンサを用い、それを回転させる方式により、測定範囲 100mm 以上、測定精度 $\pm 0.1\text{mm}$ 、1点あたりの測定時間 0.5 秒以内を達成した。
- 2) 光源に半導体レーザダイオードを用い、さらに極小径の光ファイバによるレーザ光の真円化法により、測定精度、測定範囲を低下させることなく、計測センサの小型軽量化を実現した。
- 3) CCDラインセンサを回転させ、空間的な平均化処理を行うことで、レーザ計測における測定精度低下の要因であるスペックルノイズの影響を大幅に低減できることを示した。
- 4) 本方式は拡散光検出方式であるが、光沢性のある物体の形状計測においても、直接反射光の影響をうけることなく、安定して計測できることが明らかとなった。

参考文献

- [4-1] 谷田貝豊彦: 応用光学光計測入門 丸善、p.118、(1988)
- [4-2] 吉澤 徹: 光三次元計測 新技術コミュニケーションズ、p. 2、(1993)
- [4-3] 井口征士他: 三次元画像計測 昭晃堂、p.13、(1990)
- [4-4] 佐藤、井口: 電子情報通信学会 J68-D-3、p.369、(1985)
- [4-5] 青山英樹: 法線と位置の連続検出型非接触プローブによる曲面の自律探査測定システムの試作開発、科学研究費成果報告書 No.05555046、(1995)
- [4-6] 真下寛治他: 3次元自由曲面形状の光非接触測定装置、精密工学会会誌 59、7、p.1091、(1993)
- [4-7] 真下寛治他: 3次元自由曲面形状の光非接触測定装置 (第2報)、光検出器の受光領域の工夫と検出特性の改善、精密工学会会誌 60、9、p.1340、(1994)
- [4-8] 真下寛治他: 偏光を用いた三角測量法による3次元自由曲面の光非接触測定、精密工学会会誌 61、2、p.283、(1995)
- [4-9] 三好隆志他: 非接触3-Dデジタル計測システムの開発研究、精密工学会誌、56、p.1021、(1990)
- [4-10] 三好隆志他: 三次元自由曲面の非接触形状測定センサーの開発研究(第1報)光リング式センサの解析、精密工学会会誌 58、11、p.1886、(1992)
- [4-11] 三好隆志他: 三次元自由曲面の非接触形状測定センサーの開発研究(第2報)光リング式センサの特性、精密工学会会誌 58、12、p.2087、(1992)
- [4-12] 岡田三郎、今出政明、宮内秀和、三好隆志:同軸線形変位法による金型加工曲面の形状計測システムの開発、型技術、10、12、p.74、(1995)
- [4-13] 三好隆志他: 三次元自由曲面の非接触形状測定センサーの開発研究(第3報)光リング式3-D形状計測センサ、精密工学会会誌 61、2、p.258、(1995)

- [4-14] 型技術協会： 金型加工形状の非接触式計測評価技術の研究開発報告書(1996)
- [4-15] 岡田三郎、今出政明、宮内秀和： 高品位金型の非接触三次元形状計測システムの開発、第2回知能メカトロニクスワークショップ , p. 35-38, (1997)
- [4-16] 岡田三郎、今出政明、宮内秀和、三好隆志：“Non-contact 3D shape inspection based on optical ring imaging system”、International Symposium on Intelligent Systems SPIE、p. 58-65、(1996)
- [4-17] 岡田三郎、宮内、今出政明、三好隆志：“3-D Shape Measurement of Free-form Machined Surfaces by Optical Ring Imaging system”、IECON' 98国際シンポジウム、ドイツ ヴェーレン、24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society、p.1284-1289、(1998)
- [4-18] 三好隆志、岡田三郎：金型表面形状計測の最新技術、機械と工具、3、p.14-20、(1998)

第5章

光線追跡法による自由曲面の鏡面形状計測システムの開発

近年、製品の高品位化に伴い、家電製品をはじめ表面が鏡面の自由曲面で構成される製品が多くなり、製品設計や検査等では表面形状だけでなく曲面の品位（法線ベクトルまたは曲率）まで検査することが求められている。これまでに、鏡面物体の形状計測に関して、様々な計測法が提案されてきた[5-1][5-2]。A. C. Sandersonら[5-3]は対象を覆う点光源アレーを走査して、鏡面物体の形状復元を行っている。しかし、ハイライトの検出能力に左右され、広い視野を得るには特殊な照明装置が必要となる。S. K. Nayarら[5-4]は照度差サンプリング法を用いて、光沢性物体の形状および反射特性の復元法を示している。葉、西村ら[5-5][5-6]は、M系列符号化格子をもつ拡散面光源を用いた平面からなる鏡面物体の三次元計測法を示している。しかし、対象とする物体表面は平面で構成される多面体に限定され、自由曲面へは適用できない。これ以外にも、王ら[5-7]は二台のカメラを用いて、三宅らは[5-8]カメラを移動回転して鏡面の法線計測法を、村田ら[5-9]は、複数光源を用いた形状計測法を、馬場ら[5-10][5-11]は、スリット光を用いた柱状鏡面物体の形状計測法を、大槻ら[5-12]、小俣ら[5-13]はカメラを用いた表面反射特性の測定法を、それぞれ示している。しかし、拡散反射と異なり、鏡面反射の場合、反射光は反射点の位置とその点の面の傾きに依存するため、撮影された二次元画像と幾何学的なパラメータのみでは、反射点の位置を一意に求めることが出来ないこと等から、平面で構成される比較的単純な形状の鏡面体しか測定することができず、複雑な自由曲面の形状計測は困難である。

本研究では、まず、自由曲面で構成される鏡面物体の三次元形状

と法線ベクトルとを同時計測可能な非接触方式の新しい計測システムを提案する。測定原理は、コンピュータグラフィックスにおける光線追跡法に基づくもので、半導体レーザスポット光を測定面に対して垂直方向あるいは斜め方向から照射し、反射光線を回転式光位置検出センサにより空間上の異なる2点でその空間座標値を計測し、幾何学的に反射点の三次元座標と法線ベクトルとを同時に求める。開発の目標を以下に示す。

- 1) 自由曲面形状物体の三次元形状と法線ベクトルとを同時測定可能な計測システムを実現する。
- 2) 測定不能領域を可能な限り少なくする。
- 3) CADシステムへのデータの受け渡しを考慮して、格子点のデータを測定するように測定点の位置制御を行う。

5. 1 開発した鏡面計測システムの概要

本研究で開発試作した鏡面計測システム[5-14][5-15]のブロック図を図5-1に示す。光源には、半導体レーザ(670nm、10mW)を用い、ピンホールとコリメータレンズにより、直径0.5mmの円形の平行光に近いビーム光を被測定物表面に、まず垂直方向から照射する。鏡面物体の場合、ビーム光はスネルの法則に基づき、照射点の微小領域の面の傾きに従って反射する。そこで、図5-2に示すように、この反射光線を三次元空間内の異なる二点で検出すれば、反射光線は、二点の座標を通る直線の式で示され、この式と入射光の式から照射点の三次元座標値と法線ベクトルとを簡単な計算により求めることができる。

この原理を装置化するため、種々の方式の光検出器を検討した。測定条件としては、全方向の反射光を検出できること、短時間に測定できること、検出精度の高いことなどである。本研究で開発試作した鏡面計測装置の写真を図5-3に示す。

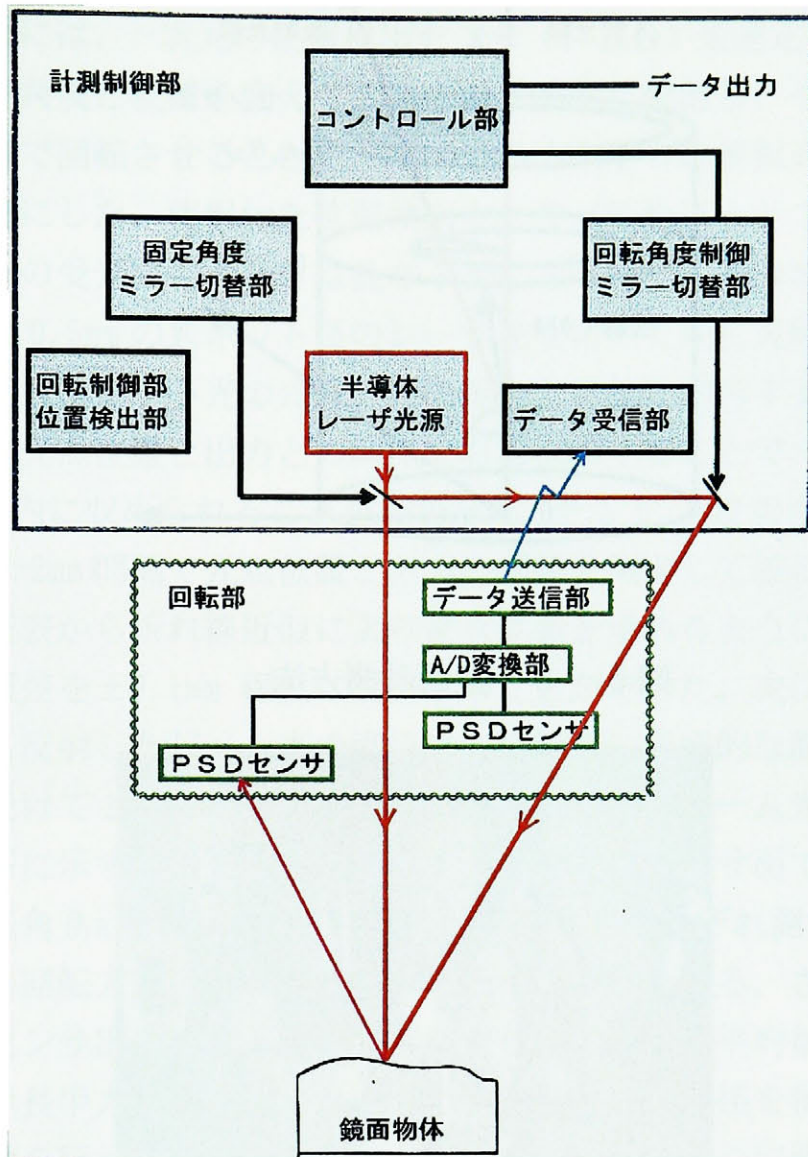


図5-1 鏡面計測システムのブロック図

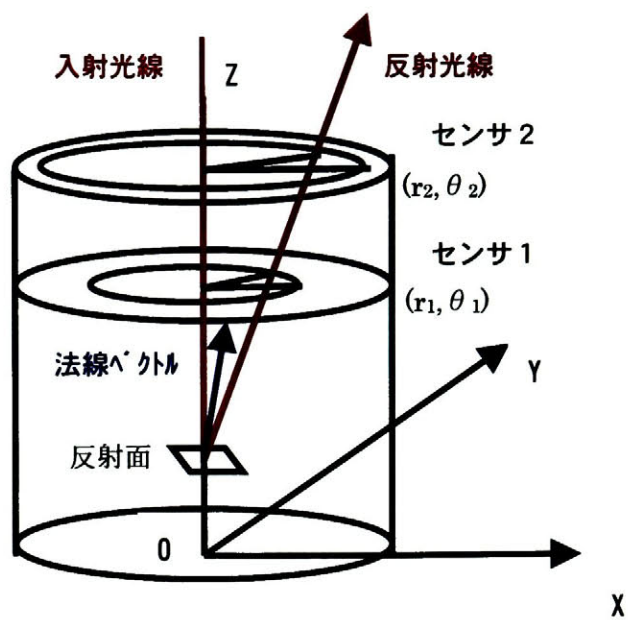


図 5 - 2 鏡面計測方法

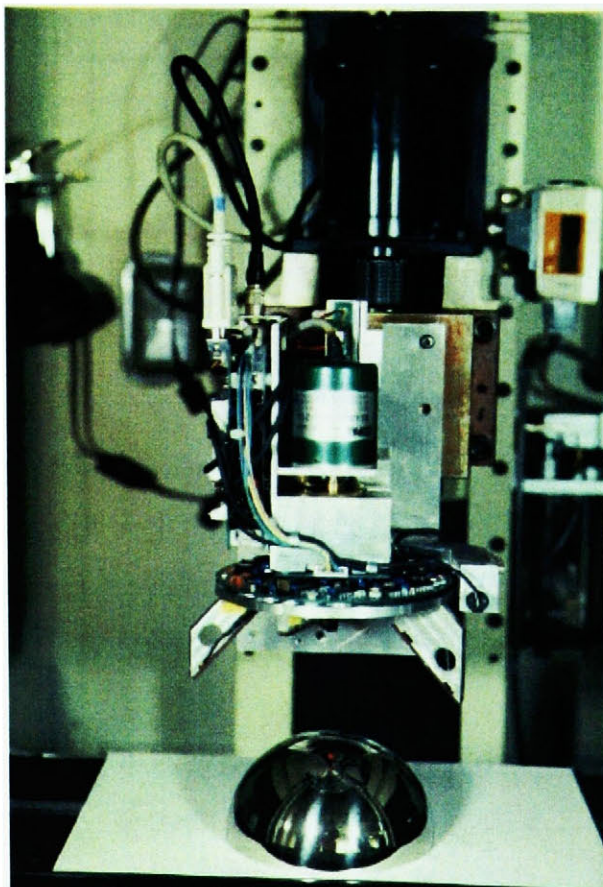


図 5 - 3 鏡面計測システムの外観写真

光検出器には、一次元の位置検出センサ（PSD）を選定し、4個のPSDを角度と位置を変えて2組ずつ空間的に配置し、それらを一定角速度で回転させることで、すべての方向からの反射光の位置検出を可能にした。使用した位置検出センサ（浜松フォトニクス製S3270-01）の受光面の大きさは長さ37mm、幅1mm、応答周波数は1KHzである。0.5mmのスポット径のレーザー光を用いて校正実験を行った結果、反射スポット光の光量分布の重心の位置に相当する出力値が得られ、光点位置と出力との関係を直線補間することで、誤差を±0.5mm以内に収められることがわかった。そこで、PSDの全スパンについて0.2mm間隔で光点位置と出力の関係を測定して校正表を作成し、校正表から折れ線近似により光点位置を求めるようにした結果、測定誤差を±0.1mm程度に改善することができた。次に、測定対象面から反射したビーム光の直径は、反射点の局所的な面の凹凸の影響を受けて1mmから5mm程度に変化するので、ビーム光の中心位置を以下に示す方法で求めた。まず、反射光をセンサ面で検出し始める回転角 θa と検出し終わる回転角度 θb をそれぞれ測定し、その中間値を回転方向の反射角度 $\theta (= (\theta a + \theta b) / 2)$ とする。さらに、その間のセンサ出力を0.1度間隔で測定し、それらの平均値を反射光のセンサ長手方向の位置 r とする。反射光のビーム径を種々変えて校正実験を行った結果、上記した方法でビームの中心位置が正確に求められることを確認した。

図5-4に位置検出センサを用いて形状と法線ベクトルとを計測する手法を示す。4個のセンサのうち、2個は回転軸に直角方向でかつ、Z軸方向に10mm高さを変えて取り付け、残りの2個は、回転軸に対して、45度の角度で、同様にZ軸方向に10mm高さを変えて取り付けられている。測定表面で反射した反射光線は、Z軸方向に10mm離れた2点で空間座標がそれぞれ測定される。しかし、同図において、中心軸から半径12mmの円内に反射光線が反射した場合は、位置センサの測定範囲外となるため、位置計測ができなくなる。そ

ここで、反射光がこの円内に入った場合は、ミラーを切り替えてレーザー光を斜め方向から照射する。垂直照射と斜め照射を切り替える方式により、設計上は、作動距離 10mm において、最大 30 度まで、作動距離 75mm において、最大 20 度までの反射光線を検出可能である。

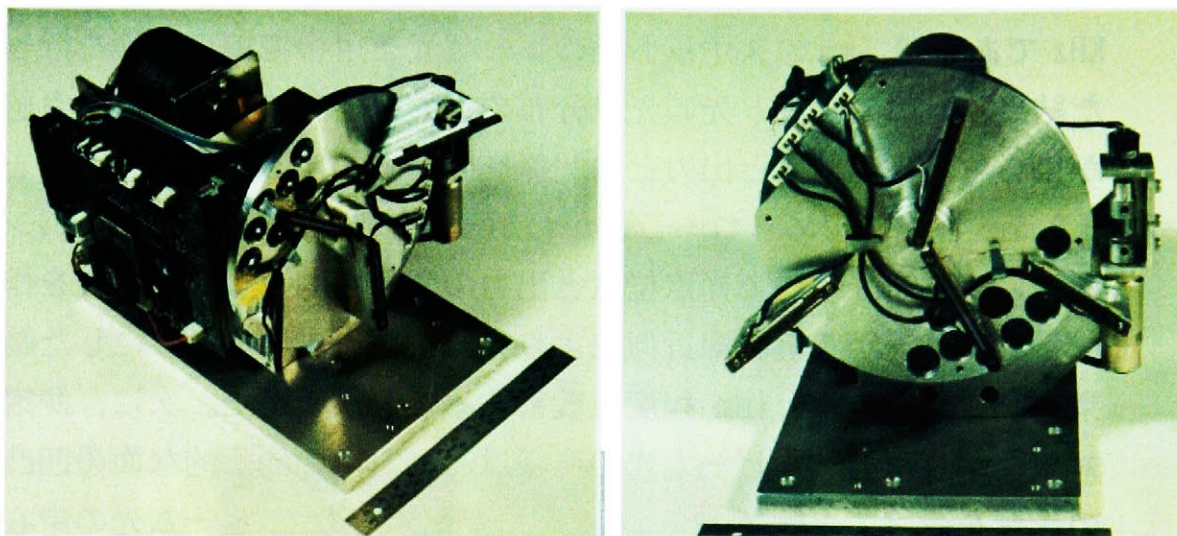


図 5 - 4 位置検出センサの配置

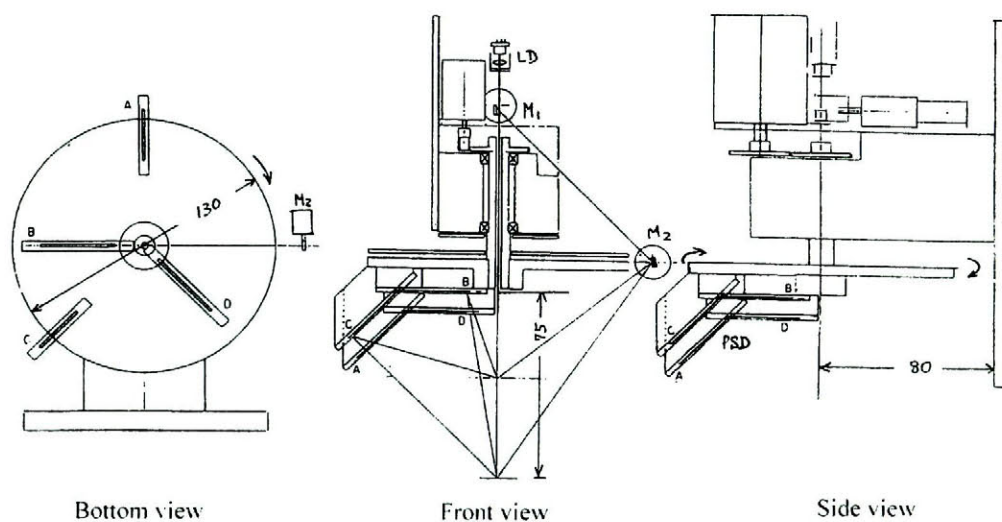


図 5 - 5 位置検出センサの配置

2組4個のPSDによる反射光線の位置測定法と直線の式の算出法を以下に示す。

反射光線が、2つのPSDのA、Bで検出された場合、反射点はA、Bを通る直線とZ軸との交点で、次式から求められる。

$$r_2 / (Z-d) = r_1 / Z$$

より、

$$z = d \cdot r_1 / (r_1 - r_2) \quad (5-1)$$

ここで $d=10\text{mm}$ である。

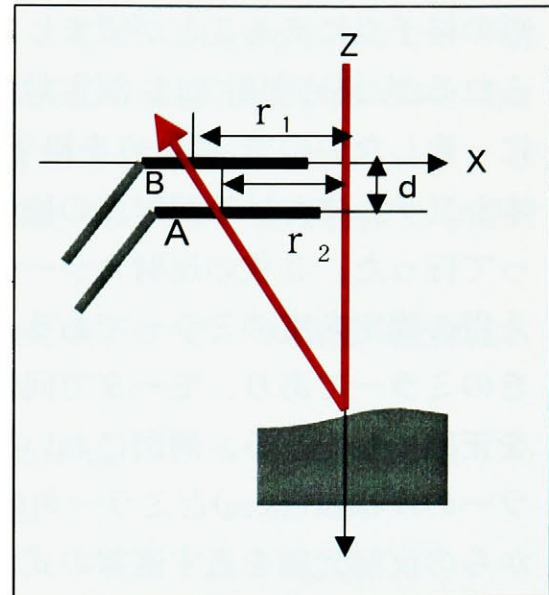


図 5-6 反射光の位置検出法

反射光線が、2つのPSDのC、Dで検出された場合、反射点は、C、Dを通る直線とZ軸との交点で、次式から求められる。

C、Dを通る直線がZ軸と交差する点の座標値は、次式から求められる。

$$(a + r_3 \cos \alpha) / z = (b + r_4 \cos \alpha) / (z - d)$$

より、

$$z = d \cdot (a + r_3 \cos \alpha) / (a - b + (r_3 - r_4) \cos \alpha) \quad (5-2)$$

ここで $\alpha=45$ 度である。

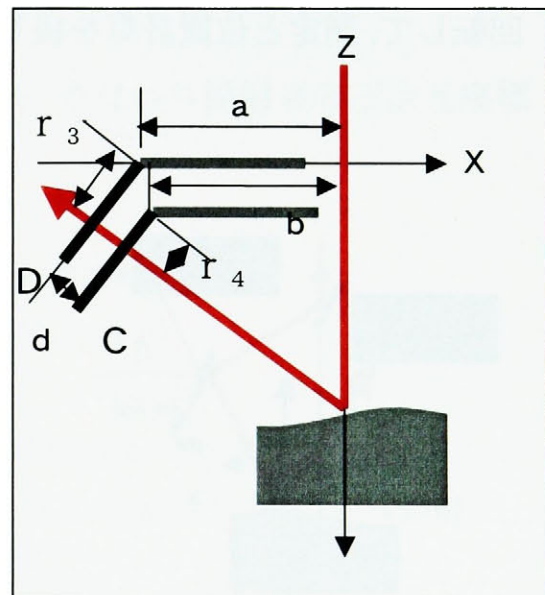


図 5-7 反射光の位置検出法
(5-2)

一方、測定した三次元位置データと法線ベクトルデータから、高品位の曲面形状を復元する場合、測定点は、 $X-Y$ 平面上では等間隔の格子点にあることが望ましい。垂直照射では格子点データが得られるが、斜め照射では、測定対象物の形状により、照射点は格子点に一致しないので、照射点を格子点に一致させる機構が必要となる。本システムにおける照射点の位置合わせは図5-8に示す手順によって行った。2枚の反射ミラーのうち、ミラーM1は、光路切り替え用の固定角度のミラーである。ミラーM2は、回転角制御機構付きのミラーであり、モータで回転し、ロータリーエンコーダで角度を正確に検出する。同図において、入射光線を表す直線の式は、ミラーの座標値 (x_0, z_0) とミラー角度 δ から求められる。被測定物表面からの反射光線を表す直線の式は、AとCまたはBとDの2組のPSDを用いて求められる。これら2つの直線の交点が鏡面物体上の測定点である。算出した交点の X 座標値が格子点に一致しない場合は、交点の X 座標値が Z 軸に一致するまで、ミラーM2を少しずつ回転して、測定と位置計算を繰り返し行う。

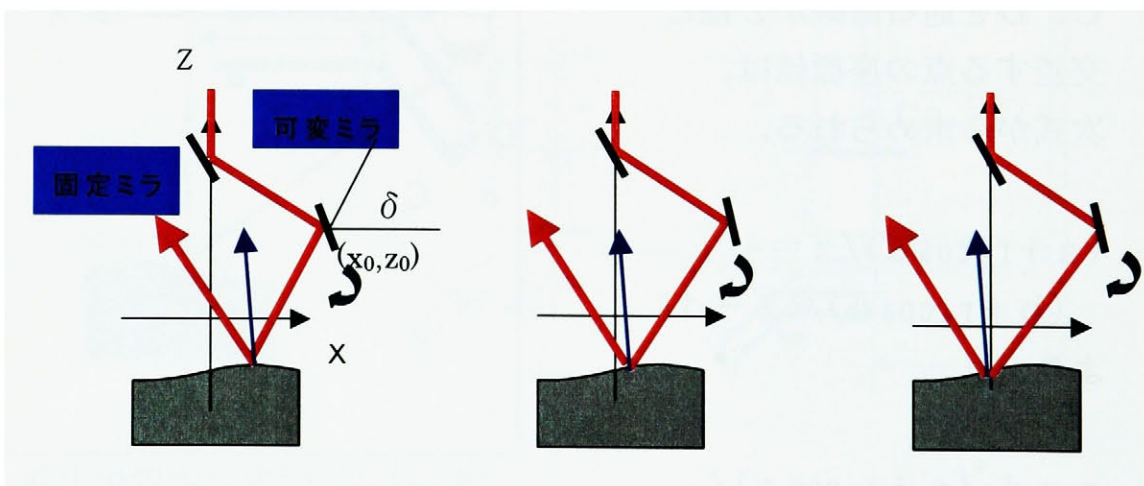


図5-8 斜め照射におけるミラー角度制御

図5-8において、反射角度を任意に可変可能なモーター駆動の回転ミラーM2はY軸に平行に取り付けられているので、入射光は、Y=0の平面上の直線で示される。ここで、回転角度 δ でレーザー光を反射すると、レーザー光は鏡面物体表面で反射し、空間内の2点を通る直線として測定される。各点の座標値をA (x_1, y_1, z_1)、B (x_2, y_2, z_2) とすると、入射光と反射光の交点が、鏡面物体上の照射点となる。

ここで、入射光は、Y=0の平面上にあるので、照射点の座標は、($X, 0, Z$)となる。

可変ミラーの回転中心の座標を($x_0, 0, z_0$)、ミラー角度を δ とすると、入射光の式は、次式で示される。

$$z - z_0 = (x - x_0) / \tan \delta \quad (5-3)$$

二点A、Bを通る反射光の式は、

$$(x - x_1) / (x_1 - x_2) = (y - y_1) / (y_1 - y_2) = (z - z_1) / (z_1 - z_2) \quad (5-4)$$

で示される。

したがって、式(5-3)と式(5-4)の交点、すなわち照射点の三次元座標($X, 0, Z$)は次式で示される。

$$Z = (z_0 \tan \delta - (x_1 - x_2) / (z_2 - z_1) \cdot z_1 + x_1 - x_0) / (\tan \delta - (x_2 - x_1) / (z_2 - z_1)) \quad (5-5)$$

$$X = ((z_0 - z_1 - x_0 / \tan \delta) / (z_2 - z_1) + x_1 / (x_2 - x_1)) / (1 / (x_2 - x_1) - 1 / ((z_2 - z_1) \cdot \tan \delta)) \quad (5-6)$$

式(5-4)において、Xの値が0にならない場合は、ミラーの角度 δ を変え、Xの値を計算し、Xの値が0に近づくまで回転ミラーの角度を調整する。Xの値が0に近づくように制御することで、格子点の三次元座標値が求められる。

5. 2 校正試験結果と性能評価

開発した鏡面計測システムの性能を明らかにするため、校正実験を行った。まず、光位置検出センサ（P S D）は照射位置と出力との関係はS字曲線を示すことが知られている。そこで、P S Dの出力補正を行うため、図5－9に示す装置構成で、校正実験を行った。測定基準位置（P S Dから75mmの距離）に平面鏡を取り付けた回転テーブルをおき、0度から20度の角度範囲において、反射光を4個の光位置検出センサで検出し、計算値と測定値との校正表を作成した。校正後、再び平面鏡を回転して、反射光を検出し、校正表により直線補正したデータと計算値とを比較した。

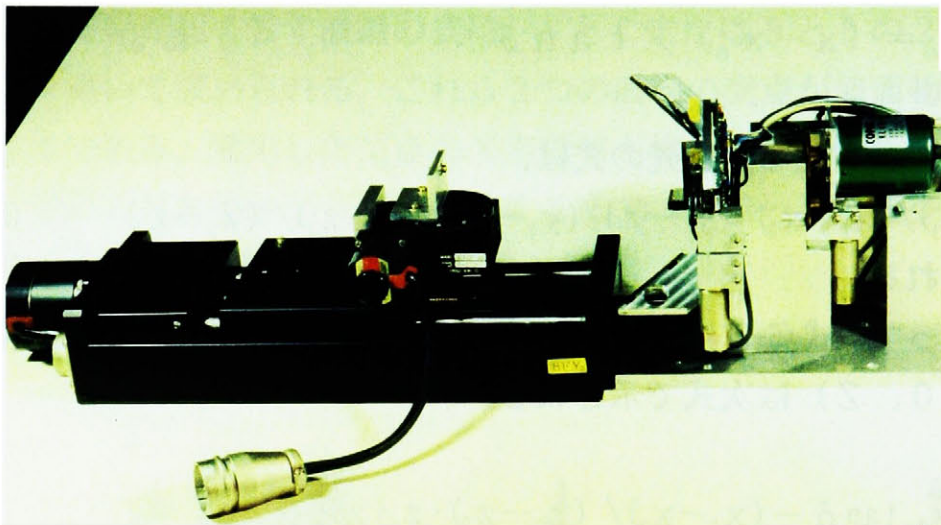


図5－9 校正実験の装置構成

校正実験結果の例を図5－10と図5－11に示す。図5－10にZ軸方向の位置誤差を示す。面が傾いて反射光の傾きが斜めになると、位置誤差は減少し、面が水平になり反射光線がZ軸に近づくにつれて位置誤差は増加する傾向が見られる。本システムでは、2組のP S DはそれぞれZ軸方向に10mm離して取り付けられ、2点の光点位置から直線の式を算出している。したがって、反射光線の

傾きがZ軸に近づくと、照射光線と反射光線との交点の計算精度が低下するからである。3度以内では、レーザ光は斜め照射に切り替わり、反射光線とZ軸との傾きが大きくなるため、測定誤差は減少する。

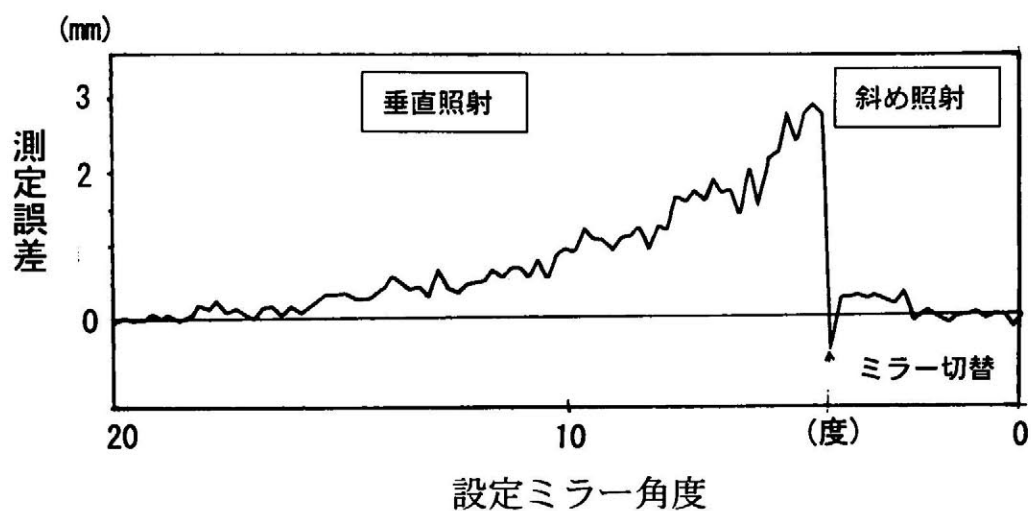


図5-10 Z軸方向の位置誤差

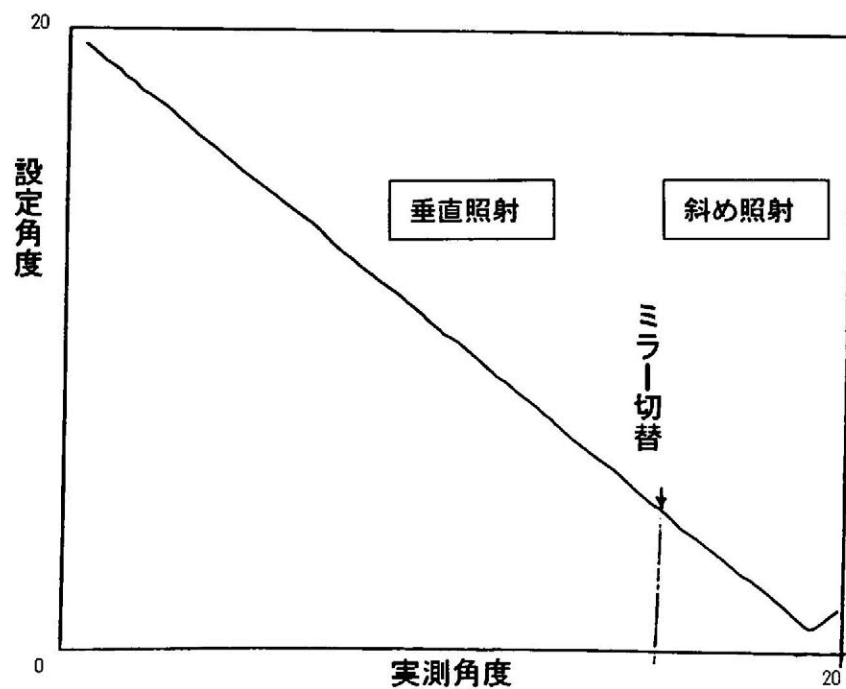


図5-11 ミラー設定角度とミラー実測角度との比較

一方、測定データから求めたミラーの実測角度とミラーの設定角度との関係は、図5-11に示すように、20度までの角度範囲で±1度以内の誤差で一致した。これに対して、測定点のZ軸方向の位置検出誤差は、最大で3mm程度であった。

表5-1に、開発した鏡面形状計測システムの性能を示す。

表5-1 開発した鏡面形状計測システムの性能

	測定範囲	測定精度
形状	75mm 以内	3mm 以内
角度	20度 以内	±1度 以内
計測時間	0.5秒／垂直照射 3秒／斜め照射	
光源	半導体レーザー光 680nm	
対象面	反射スポット光が見える 程度の鏡面	

5. 3 金属半球の測定実験結果

前記した校正試験結果に基づき、鏡面仕上げの金属半球の測定実験を行った。図5-12に測定実験の写真を示す。測定実験では、NC工作機械のヘッド部に計測システムを取り付け、テーブルをX、Y方向に一定間隔で移動しながら、形状と反射角の測定を行った。なお、傾斜角の大きいところでは、垂直方向からのレーザ照射により測定を行い、球の頂点近傍の傾斜角の小さいところは、斜め方向からのレーザ照射に自動的に切り替えて測定を行った。

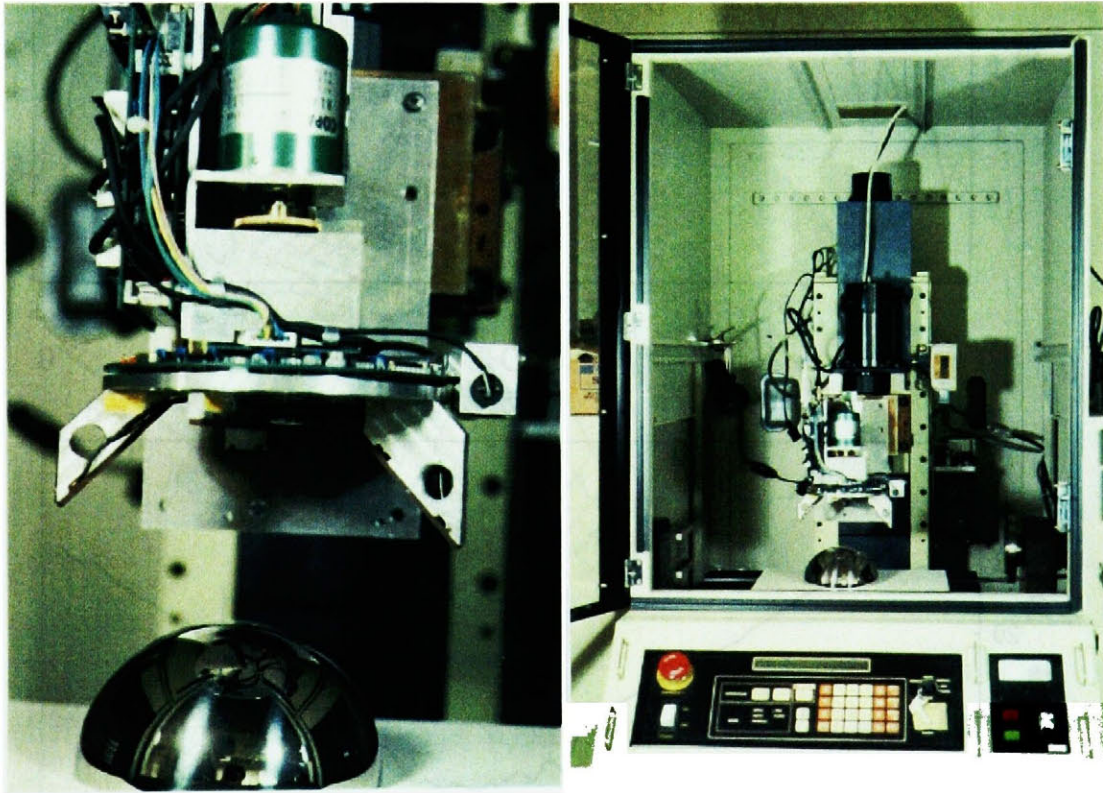


図5-12 金属半球の計測実験

測定実験結果の例を図5-13と図5-14に示す。測定は0.5mm 間隔で行った。まず、断面の表面形状測定は、図5-13に示すように、 $\pm 2\text{mm}$ のデータのばらつきを生じた。次に、反射角の測

定では、図5-14に示すように、垂直方向からのレーザ照射では、多少ばらつきはあるが、ほぼ正確に反射角の測定が行われている。しかし、斜め照射に切り替わった後は、角度の測定が多少ばらついている。この原因は、測定実験に用いた半球の仕上げ状態に問題があり、格子点への位置合わせがうまくできなかったためと考えられる。

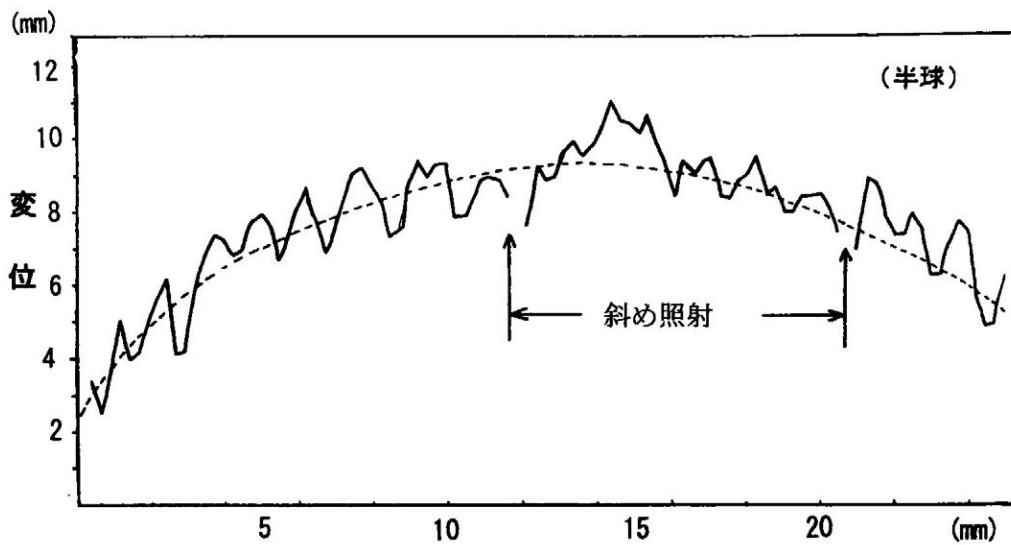


図5-13 金属半球の形状計測結果の例

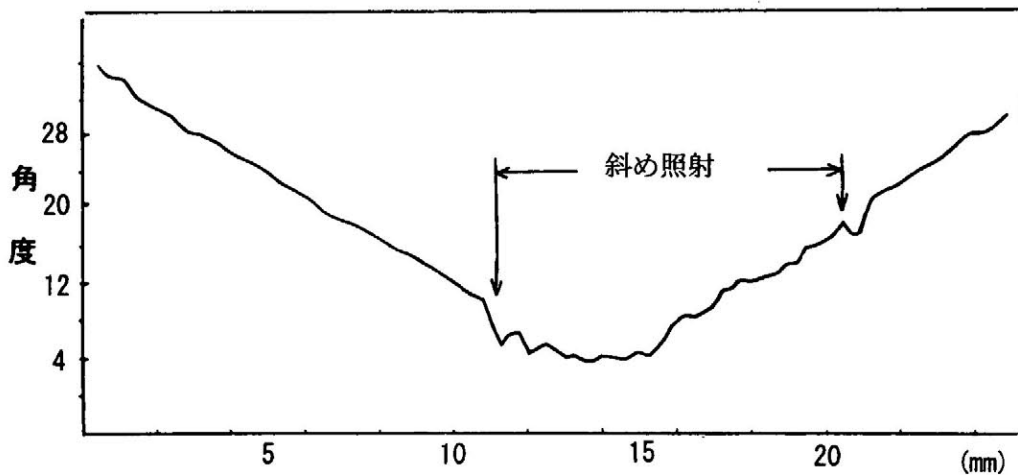


図5-14 金属半球の反射角度の計測結果の例

ついで、直径 120mm の半球の頂点を中心とし、X 方向、Y 方向に 60mm の範囲を 2mm 間隔で計測を行った。図 5-15 に形状計測結果を、図 5-16 に反射角の計測結果をそれぞれ示す。形状については、図 5-13 と同様に測定値にばらつきが見られ、2mm 程度の誤差がある。一方、反射角は、比較的滑らかで、 ± 2 度以内の誤差で測定されている。以上の結果から、本方式に基づいて測定した形状データと法線ベクトルとを併用して曲面の復元を行うことで、現状では、精度に問題があるものの、より高品位な鏡面形状を復元できるとの見通しが得られた。

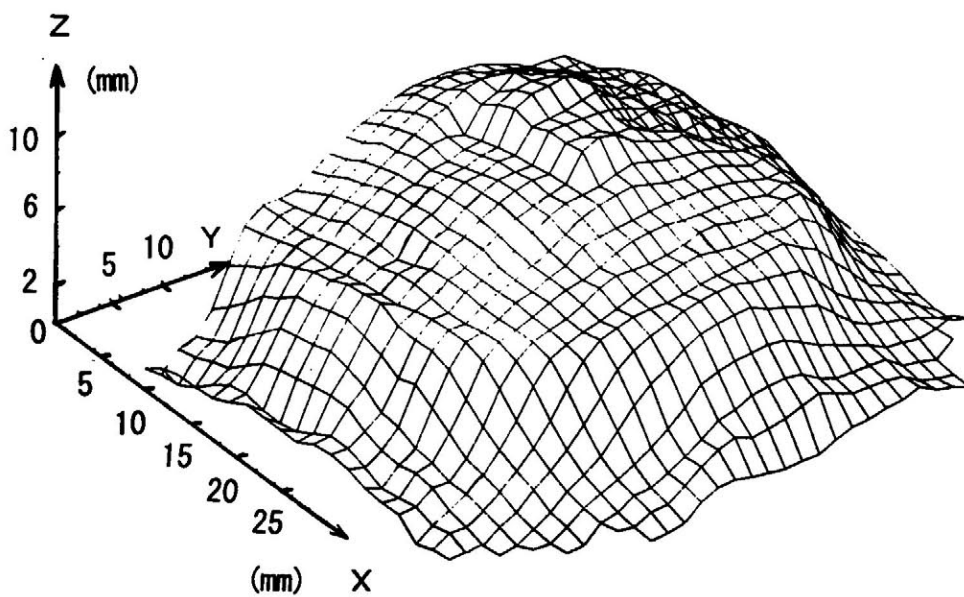


図 5-15 金属半球の形状計測結果の例

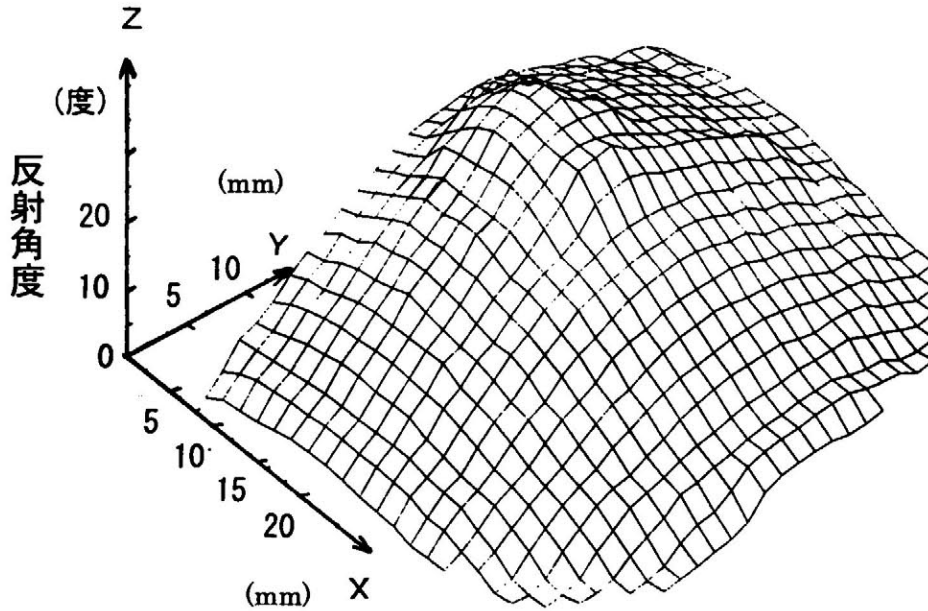


図5-16 金属半球の反射角度の計測結果の例

今後の課題としては、現状の計測時間は、垂直方向からのレーザー照射では、0.5秒であるが、斜め方向からのレーザー照射では、ミラーの角度を少しずつ変えてX軸の位置合わせを段階的に行うため、一点あたりの測定回数が多くなり、約3秒を要している。また、曲面に小さな凹凸がある場合は、うまく位置合わせ出来ない例もあるので、今後斜め照射における効率的な計測法について実験検討する必要がある。また、形状計測精度が3mmと大きいので、センサの配置（2組のPSDのZ方向の間隔）の変更と光点位置計測の改良による精度向上を検討している。

5. 4 本章の総括と結論

本章では、高品位な鏡面を対象とするコンピュータグラフィックスで用いられる光線追跡法に基づく計測システムを提案し開発試作した。従来、自由曲面でかつ表面が鏡面の場合、反射光の戻り方向が定まらないため、非接触光学的に計測することは困難である。ここでは、新しい測定方式を提案し、それにもとづいて鏡面の形状と法線ベクトルを同時に計測できることを明らかにした。以下に、結論を要約する。

- 1) 空間的に離れた位置に複数の一次元光位置検出センサ (PSD) を配置し、これを回転させることで、すべての方向からの反射光を検出する方式の自由曲面の鏡面形状計測システムを開発した。
- 2) ミラーによる光路自動切り替え方式により、全方向の反射光を受光可能な機構を明らかにした。
- 3) 本方式は、表面の形状だけでなく、反射点での法線ベクトルを同時に求めることができ、高品位の曲面の復元に有効であることを明らかにした。
- 4) 鏡面仕上げの金属半球を用いて本システムの性能評価を行った結果、最大 20 度までの法線ベクトルを ± 2 度以内の誤差で、表面形状を 3 mm 以内の誤差で同時に計測できることを明らかにした。

参 考 文 献

- [5-1] 辻内順平他：高精度鏡面形状測定法 非球面測定を目ざして、オプトロニクス社、(1994)
- [5-2] 山田朝治、横関俊介：モアレ縞・干渉縞応用計測法、コロナ社、(1996)
- [5-3] A.C. Sanderson, L.E. Weiss and S.K. Nayar: Structured Highlight Inspection of Specular Surfaces, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-10-1, p.44-55, (1988)
- [5-4] Nayar S.K., Sanderson A.C., Weiss L.E. and Simon D.A.: Specular Surface inspection using structured highlight and Gaussian image, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, RA-6, 2, p.208-218, (1990)
- [5-5] 葉雄英他：M系列符号化格子光源の照明による鏡面物体の測定、計測自動制御学会論文集、26, 2, p.123-128, (1990)
- [5-6] 西村拓一他：M配列を用いた鏡面物体の三次元計測、第7回産業における画像センシング シンポジウム, p.7-10, (1992)
- [5-7] 王増福他：鏡面物体の三次元計測、電子情報論文誌、D-2, Vol. J75-D-2, p.1177-1186, (1992)
- [5-8] 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、電子情報論文誌、D-2、 Vol. J81-D-2, no.7, p.1556-1563, (1998)
- [5-9] 村田昭雄、鄭経宇、深川義裕、安部憲広：複数の光源による鏡面反射物体の三次元形状獲得、電子情報論文誌、D-2、 Vol. J80-D-2, no.7, p.1659-1667, (1997)
- [5-10] 馬場充、小西忠孝、半田久志：スリット光投光法による柱状鏡面体の形状測定法、電子情報論文誌、D-2, Vol. J83-D-2, no.8, p.1773-1782, (2000)
- [5-11] 馬場充、大谷幸三、今井慎、半田久志：表面反射特性が未知な物体の3次元形状抽出可能なレンジファインダー、電子情報論

文誌、D-2, Vol. J85-D-2, no. 6, p.1025-1037 , (2002)

[5-12] 大槻正樹、三浦淳、佐藤幸男： 多方向測定による物体形状と表面反射特性の計測、電子情報論文誌、D-2, Vol. J76-D-2, no. 8, p. 1536-1543 , (1993)

[5-13] 小俣和子、斎藤英雄、小沢慎治： 光源の相対的回転による物体形状と表面反射特性の推定、電子情報論文誌、D-2, Vol. J83-D-2, no. 3, p. 927-937, (2000)

[5-14] 岡田三郎、今出政明、宮内秀和： 鏡面物体の表面形状と法線ベクトルの同時計測システムの開発、第3回画像センシングシンポジウム講演論文集、p. 319-322, (1997)

[5-15] 岡田三郎、今出政明、宮内秀和： “Development of simultaneous measurement of 3-D shapes and normal vectors for specular objects.” , J. of Robotics and Mechatronics Vol.11, No.2, p.112-116 , (1999)

第6章

レーザ光回折法による加工面の 微小傷・欠陥の検出識別

本章では、製品や部品表面の微小傷・欠陥の検出と傷種の識別を行うため、レーザ光回折法に基づく表面傷検査システムを提案する。工業製品や加工品表面の傷検査は、高品質の製品を安定生産する上で必要不可欠である。特に、近年の製造技術の急速な進歩に伴い、表面品質検査に対する要求は年々厳しさを増している。そのため、光学式、電磁式、超音波式等様々な検査技術が研究開発され[6-1][6-2]、とりわけ、光学式表面検査法は、非接触、高速、高精度、高信頼性等の点で他法よりすぐれ、回折、散乱、偏光等の光特有の性質を利用した検査システムが開発され生産ラインへ導入されてきた[6-3][6-4]。

一方、検査内容に関して、従来は、検査の高速化、自動化と微小な傷・欠陥の有無を正確かつ確実に検出する技術の開発が要求されている。最近では、傷の有無だけでなく傷種を識別して、その傷がいつどこで、どのような原因で付いたものかを分析し、設備の改善や品質向上に役立てることが求められるようになるなど、より付加価値の高い検査システムの開発が要求されている[6-5][6-6]。これまでに報告されている傷種識別が可能な検査システムとして、深沢ら[6-7]が開発した鋼板、樹脂板を対象とした表面傷検査装置は、レーザ光回折法を用い、傷種の違いが最も明瞭に現れる鏡面反射光周辺の特定の4カ所の回折光を検出するとともに、傷の面的な形状の幾何学的特徴量を用いて傷種と等級を自動判定している。また、米田ら[6-8]が開発した磁気ディスクサブストレート表面傷検査装置は、円環・ウェッジ型光検出器[6-9]を用いて傷面からの回折パターンの分布形状の特徴を効率よく検出し、特徴パラメータによる解析処理に基づき4種類の傷種を分離識別している。この他にも傷種の識別を目的とした検査装置がSureshら[6-10]、銭場ら[6-11]、相沢ら[6-12]、住江ら[6-13]により報告

されている。その多くは光回折法を用い、回折パターンを検出する検出器の構造や配置、データ処理法を工夫することで傷種の識別を行っている。

しかしながら、現状の傷検査装置の多くは、装置構成上の問題から対象面を平面に限定している。また、傷種の識別が可能な光回折パターン法においても、圧延痕や加工痕のある加工面の検査では、それらから発生する回折光を分離識別できないため、高精度の検査は困難であり、熟練作業員による目視検査に頼らざるを得ない。

本章の前半では、まず、傷種の識別精度の向上を図るため、多分割面状光検出器を用いて重なり合った傷を分離識別する検査システムを提案する[6-14][6-15][6-16][6-17][6-18]。

本章の後半では、曲面を対象とした光回折法に基づく傷検査法として、円筒形状部品の内壁曲面および外曲面上の微小傷・欠陥の検出が可能な、レーザー光源と受光部とを一体化した小型軽量のプローブ型検出センサを考案し、自動車用油圧シリンダーや機械部品に適用してその有効性を明らかにする[6-19][6-20][6-21]。

6. 1 傷種の識別を目的とした複合型傷検査システムの開発

6. 1. 1 検査システムの開発目的と概要

検査システムの開発に当たっては、開発の目標を以下に示す。

- ① 圧延板材のように圧延条痕のある板材の傷検査を可能にすること、すなわち、複数の傷が重なり合っている場合でもそれらを分離識別できること、
- ② 検出可能な傷種の範囲を広げ、より多様な傷を検出識別できること、
- ③ 平板以外の形状の被検体の検査を可能にすること

そのため、新たに多分割面状回折光検出器を考案し、それにもとづく傷種の分離識別法を導く。さらに、測定原理の異なる光回折法と光切断法とを光学的に一体化し、両手法の長所は生かし、短所を補完し合うことで多様な傷を検出できるようにする。

6. 1. 2 複合型検査システムの構成

開発試作した複合型検査システム[6-14]の外観を図6-1に、光学系の構成を図6-2に示す。光回折法では、検査面へのレーザ光の入射角度が直角でないと正確な回折パターンを得ることができない。そこで、レーザスポット光(He-Ne、2mW)は、放物柱面鏡③の焦点位置に取り付けた振動ミラー②により横方向に一定周期で反射角度を変え(光走査)、装置を小型化するために挿入した平面鏡④で反射した後、放物柱面鏡で平行光にして幅200mmの被検体表面に対して直角に照射する。レーザスポット光の大きさはコリメータレンズにより可変する。検査面で反射回折したレーザ光は受光系側の放物柱面鏡と平面鏡により受光用光検出器上に集光される。受光器は回折光パターンの二次元分布を計測可能な構造となっている。一方、光切断法においては、検査面直上に、TVカメラを取り付けて被検体表面からのレーザ光の散乱光の画像を取り込み、三角測量法に基づいて表面形状を計測する。

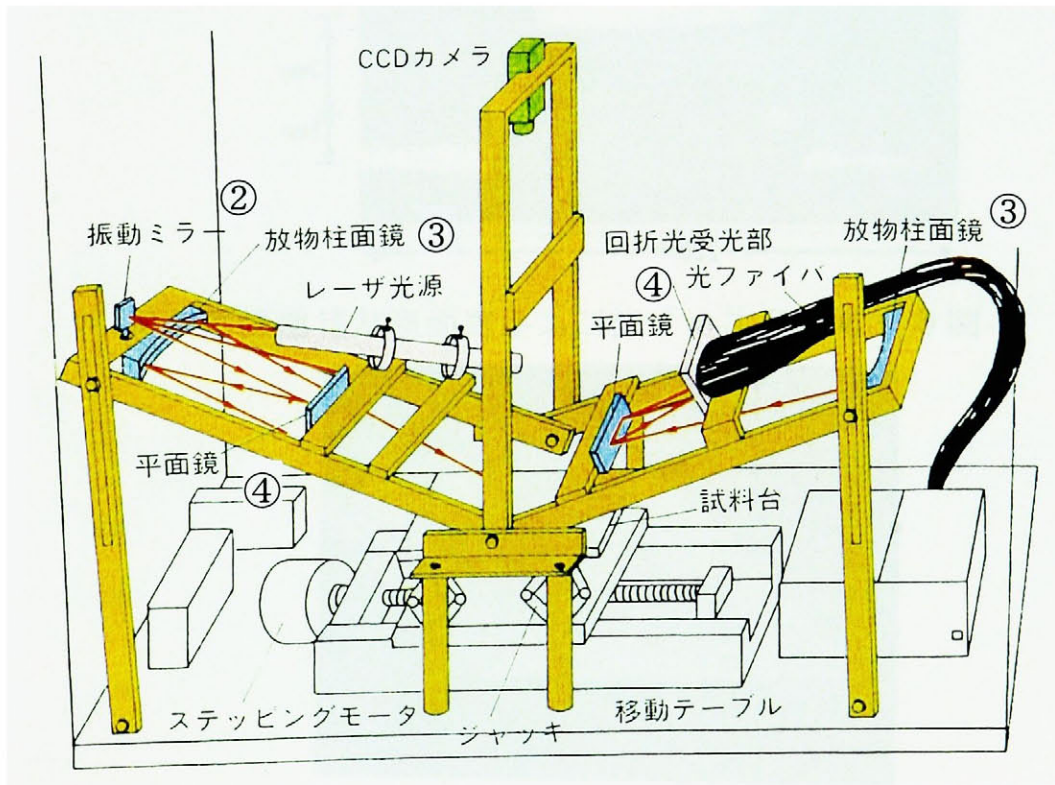


図6-1 複合型検査システムの外観

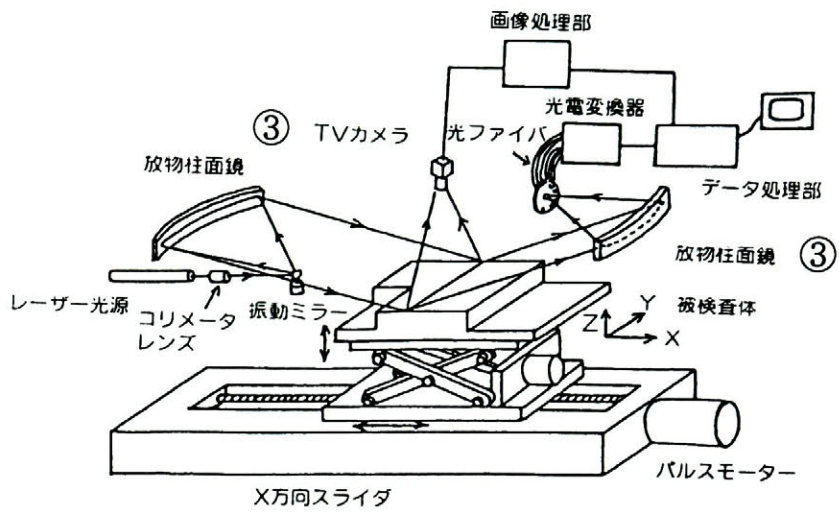


図 6 - 2 光学系の構成

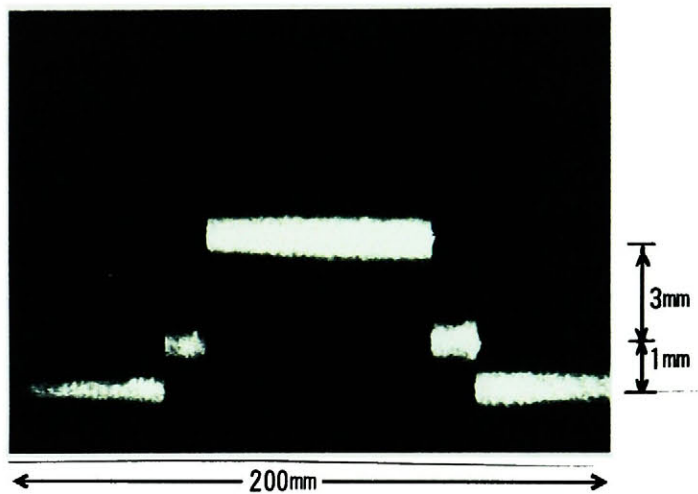


図 6 - 3 スポット光による表面形状計測画像の例

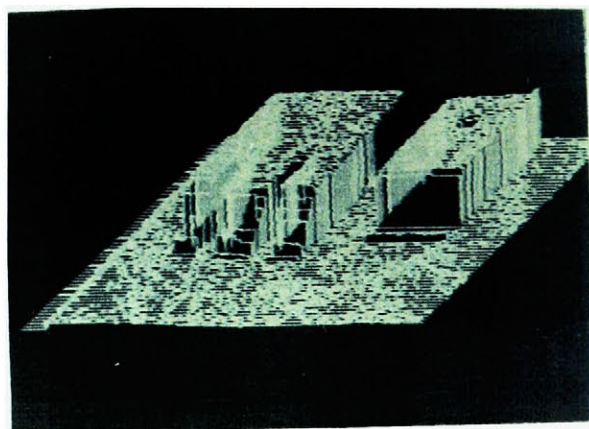


図 6 - 4 段差のある被検体の表面形状の三次元表示例

ここでは、ビデオ信号の同期信号と振動ミラーの振動周期を同期させる制御回路を製作し、スポット光を用いてスリット光源と同等の画像が取得できるようにして、同一光源を用いて傷検出と形状計測とを効率的に行えるようにした。さらに、高さ方向の精度を向上するため、TVカメラにはシリンダリカルレンズを取り付け、テーブル送り方向の倍率を横方向に対して約10倍高くした。図6-3に、光切断法により取り込んだ表面形状の検出画像の例を示す。検出画像に平滑化と細線化処理を適用し、その中心線を抽出した後、光回折法で検出が困難な傷の幅や深さと欠け割れなどの大きな傷を検出するとともに、図6-4に示すように被検体表面の三次元形状を計測する。

6. 1. 3 光回折パターンの分布形状と検出部の構造

傷面で発生するレーザ回折光パターンは、照射した面の微細構造のフーリエ変換像を表すことがよく知られている[6-6]。したがって、傷の種類によって、発生する回折光パターンは異なるため、回折光パターンの分布形状を正確に検出することができれば傷種の識別が可能となる。磁気ディスクサブストレートで発生するいくつかの傷を p. 24 に示す円環・ウェジ型ディテクター（WRD）で検出解析した例を示す[6-22]。

代表的な傷種として、押し込みと呼ばれる点状欠陥、スジ、スクラッチと呼ばれる線状傷、工具の送りマークである周期性欠陥の回折光パターンを図6-5に示す。健全部では、回折光の発生はない。点状欠陥は方向性がないため回折パターンは全方向に広がる。線状欠陥は、欠陥と直角方向に線状の回折パターンとなる。周期性欠陥は、線状のものが等間隔に並んだ状態のため、その回折パターンは点線状になる。

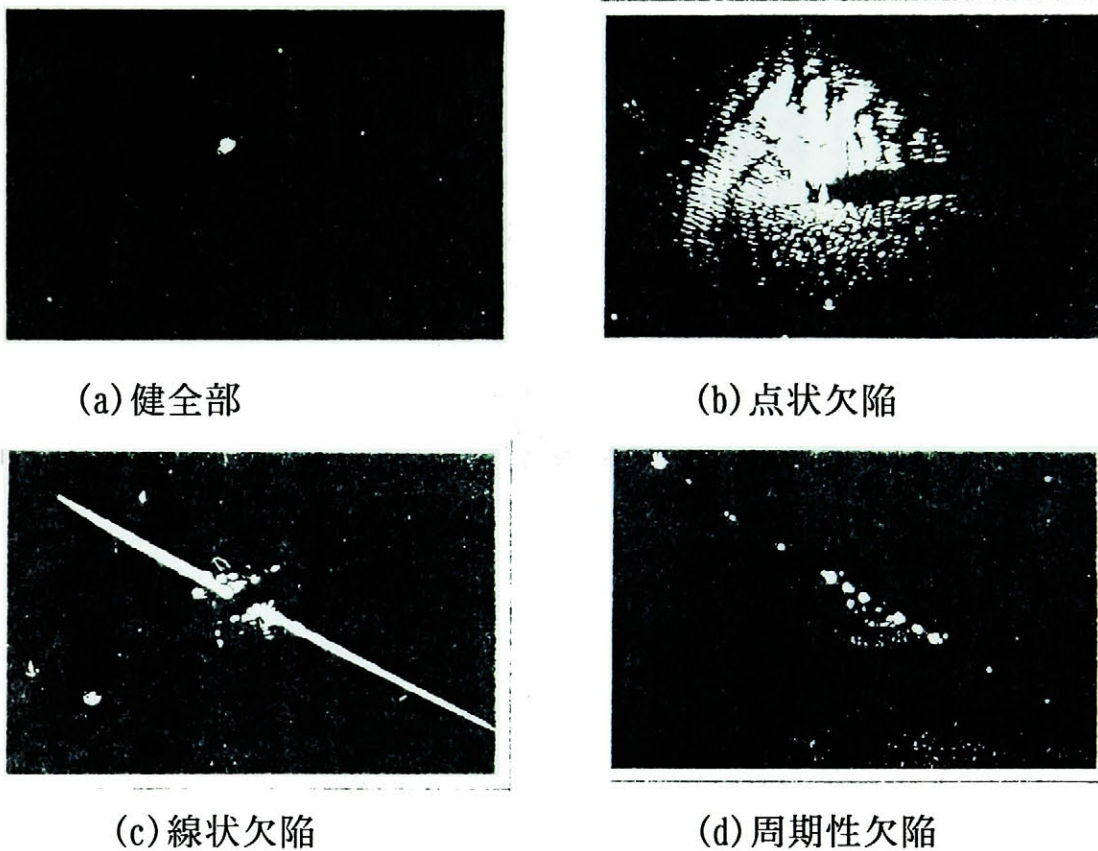


図6-5 代表的な傷のレーザ光回折パターン画像の例

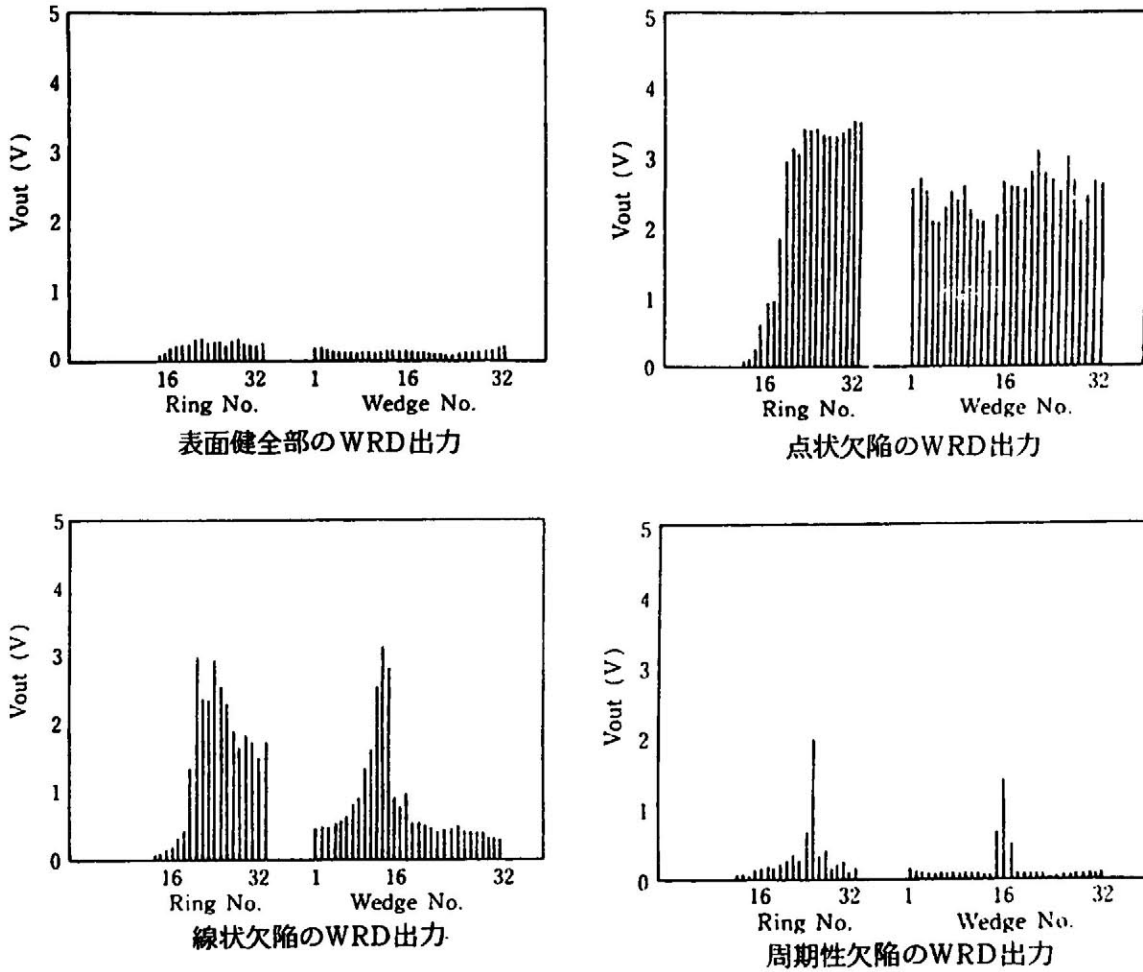


図6-6 WRDによる各種欠陥の計測例 (岩崎ら[6-22])

各種欠陥のWRD出力パターンを図6-6に示す。WRDの場合、ウェッジ状とリング状の2種類の形状のセンサにより、光回折パターンを検出するため、センサ出力パターンからもとの回折光パターンを完全には復元することはできない。図6-5に示すような1種類の単純な傷であれば、傷種の識別は比較的容易に行われる。

ところが、圧延材の表面に発生する傷では、圧延痕による回折光と傷による回折光とが重なるため、WRDでは、傷の分離識別が困難となる。そこで、筆者らは二次元的な光回折パターンを簡便に検出するため、図6-7および図6-8に示す多分割面状検出器を試作した。本方式における回折光パターンは直接反射光の周辺に軸対称でかつ放射状に発生するので、検出器の形状はそれに適した構造にする必要がある。したがって、検出部に

は、直径 0.5mm のプラスチック製光ファイバ約 3000 本を半円形に密に束ね、それを半径方向に 4 分割、円周方向に放射状に 12 分割し、中心を含め 4 の扇状のブロックに分割する。各ブロックは約 60 本のファイバ束で構成され、中心部と円周部ではその形状を変えて面積（光ファイバ本数）はすべて同じにする。一方、光ファイバ束の他端はブロック毎にひとまとめにして、回折光量測定用のフォトダイオードの受光面に導き、ブロック毎に光電変換する。ここでは、データ処理の高速化を図るため、光量があらかじめ設定した光量を超えた場合を 1、超えない場合を 0 に二値化処理した後、データ処理装置に取り込む。

試作した多分割面状検出器の場合、光ファイバを 60 本ずつ束ね、49 個のブロックに分割している。1 ブロックあたりの光ファイバの本数を変えることで分割数の増減や、各ブロックの形状を任意に変えることが可能である。図 6-9 に代表的な傷の回折パターン写真と多分割面状検出器で計測した光量分布を各ブロック毎に配置した LED で表示した例を示す。下図は、光検出器で測定し、二値化した後の回折光量を LED 表示したものである。上図の写真撮影した回折パターンの上半分と下図の多分割面状光検出器により検出した回折パターンとを比較すると重なり合った傷にまいても両者はよく一致している。

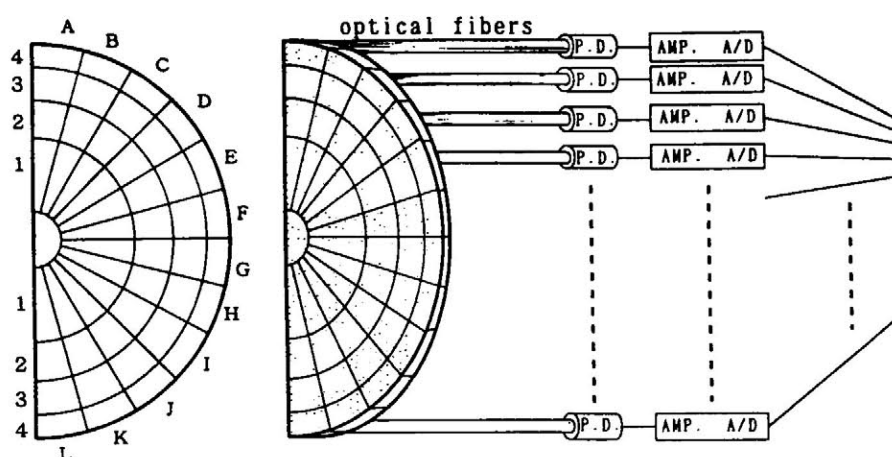


図 6-7 多分割面状検出器の構造

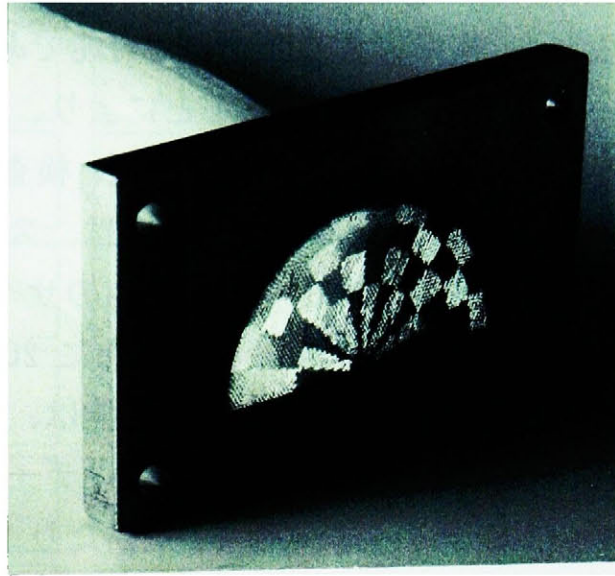
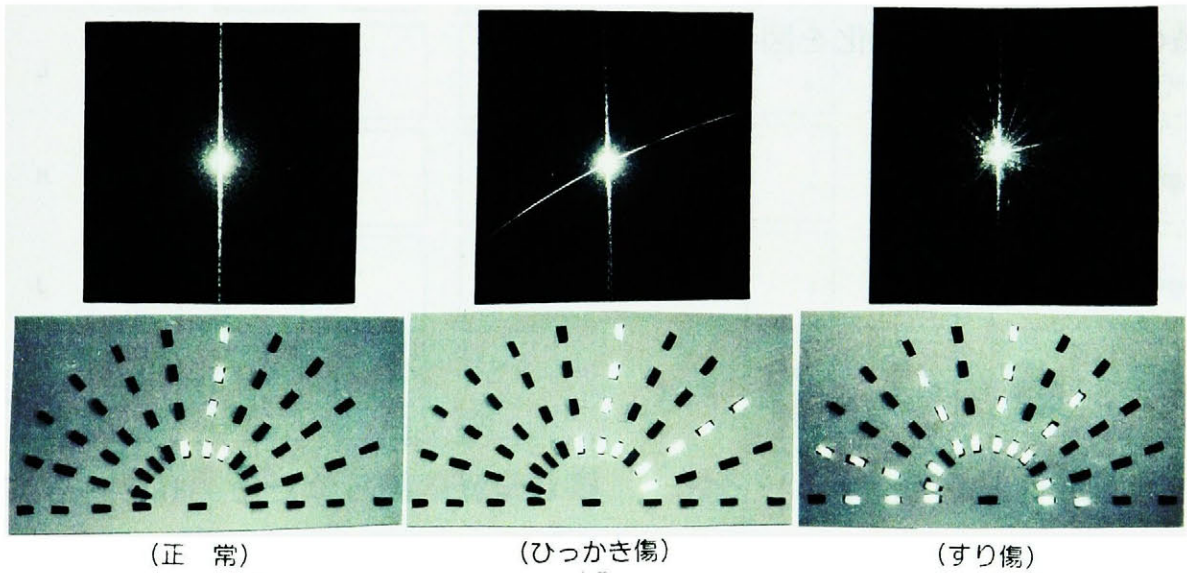


図6-8 多分割面状検出器の写真



(正 常)

(ひっかき傷)

(すり傷)

図6-9 傷種による回折パターンと試作検出器による測定例

6. 1. 4 検査システムの性能

本システムにより検査可能な被検体の寸法は、放物柱面鏡の幅と試料テーブルの移動長さに依存し、縦横最大 200mm まで可能である。検査間隔は、横方向は、振動ミラーの振り角を可変することにより、検査幅を画像処理装置の画素数(512 画素)で割った値となる。例えば、検査幅を最大の 200mm にした場合、測定間隔は 0.4mm となる。送り方向は、ステッピングモータの分解能により最小 10 μ m まで可変できる。検査点のサイズは、直径 0.6mm の円内である。一方、光切断法では、視野を横方向に 200mm に固定しているため、分解能は 0.4mm である。高さ方向の分解能は、シリンドリカルレンズにより約 10 倍拡大しているため、0.1mm である。データの入力時間は、縦横 100 点、合計 1 万点に対して、約 14 秒(1 点あたり 1.4msec)である。

図 6-10 に引っかき傷の試験片についての各ブロックの光量分布を、また、図 6-11 に擦り傷の試験片についての各ブロックの光量分布をそれぞれ示す。傷の種類と方向により、回折光の検出パターンに違いがあることがわかる。なお、傷種の識別の解析では、半径方向の 3 番目と 4 番目の 2 つのブロックの光量和を用い、適当な閾値により二値化することで傷種の解析処理の高速化を図った。

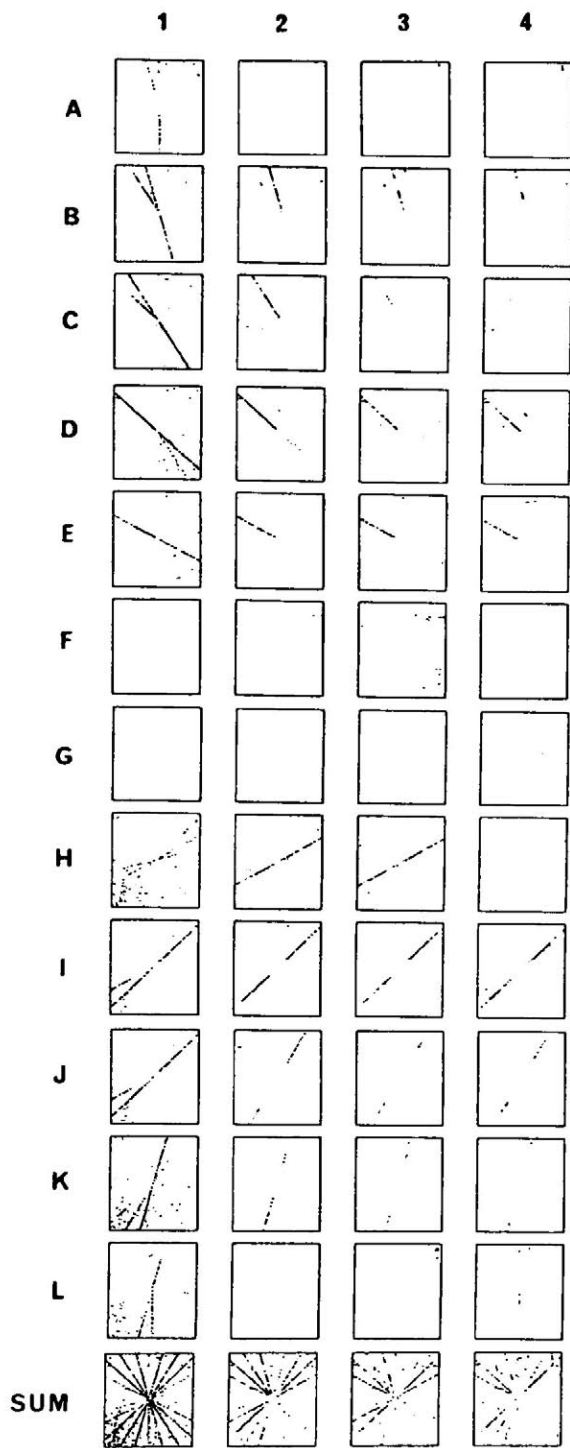


図6-10 引っかき傷の光量分布

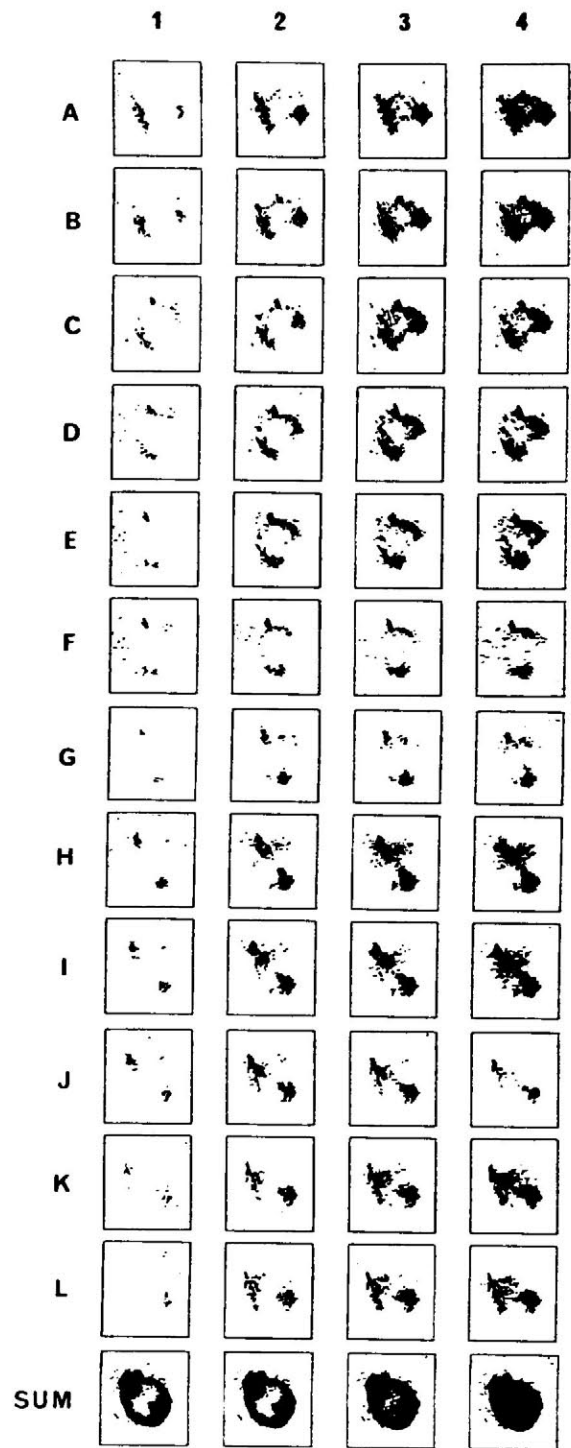


図6-11 すり傷の光量分布

6. 1. 5 本システムによる傷種識別の性能評価

試作した複合型検査システムによる傷種の分離識別性能を明らかにするため、人工的に傷を付けた圧延板材（アルミ板、ステンレス板、銅板）を用いて傷検出と傷種の識別実験を行った。被検体には、あらかじめ縦方向、横方向、斜め方向の4方向にカッターナイフで線状の引っかき傷が、さらに中央部にはやすりとサンドペーパーにより円形状のすり傷がつけてある。試料片の中央40mm平方を検査領域とし、0.4mm間隔で横方向には光走査、送り方向には機械走査を行った（計測点数は縦横100点、計1万点）。図6-12に多分割検出器により検出した回折光の計測結果を示す。円周方向に15度毎にAからLの12枚の画像が示され、各画像において、回折光があらかじめ設定した閾値を越えた画素が黒く表示されている。左側のスケッチ図は、人工的に付けた傷の概略の位置を示している。同図において、F、Gの2方向（角度）では、ほとんどすべての場所で回折光が検出されている。これが圧延板材に特有の圧延条痕による回折光である。一方、この2方向のデータを除外した残りの10方向の画像には、圧延条痕以外の傷により発生した回折光が示されている。但し、回折光の方向が圧延条痕と一致する傷については、本システムにおいても検出できない。

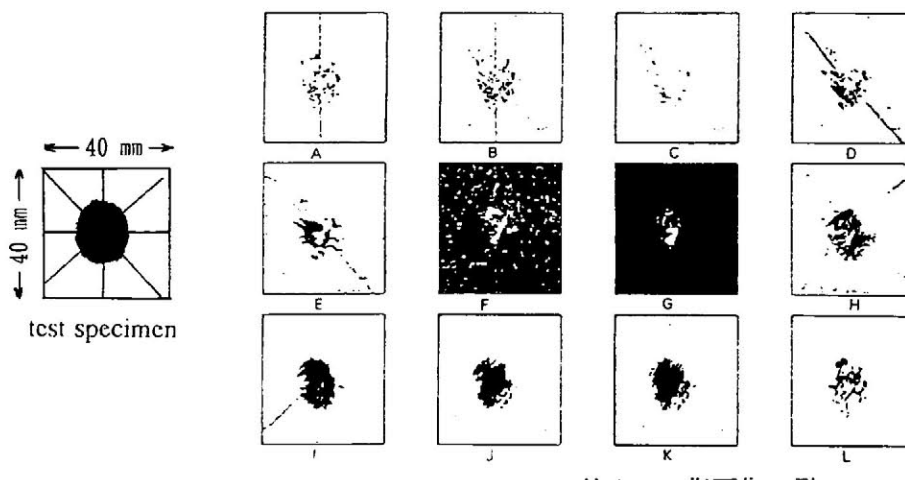


図6-12 多分割検出器により検出した回折光の計測結果

ここでは、まず、本検出器により検出された回折光パターンの分布（発生方向と数）に基づいて傷種の識別を行う。すなわち、図6-9に示すように、引っかき傷の回折光は圧延条痕を除くと一方向のみに、すり傷の回折光は種々の方向に多数発生しており、引っかき傷とすり傷とでは回折光パターンに明瞭な違いが見られる。そこで、回折光の発生方向の数が2方向以内または3方向以上という識別条件に基づいて識別処理を行う。ここで、本来は1方向で分けるところを2方向にした理由は、一本の回折光が検出器の隣接する2方向にまたがって入射する場合があるからである。処理結果の画像を図6-15と図6-16にそれぞれ示す。引っかき傷は図6-13に、すり傷は図6-14に主に分離識別されている。図中のSUM画像は全方向の画像を合成した画像である。

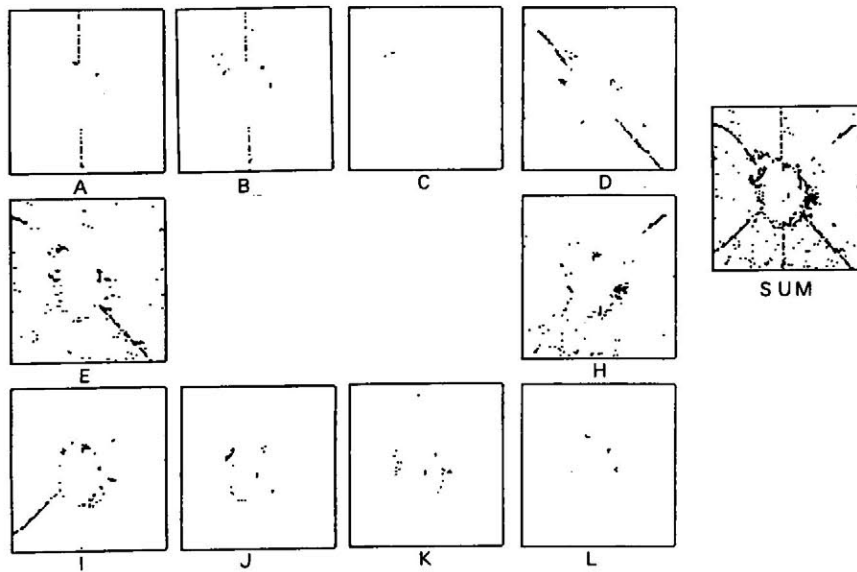


図6-13 回折光の発生方向の数が2方向以内の画像

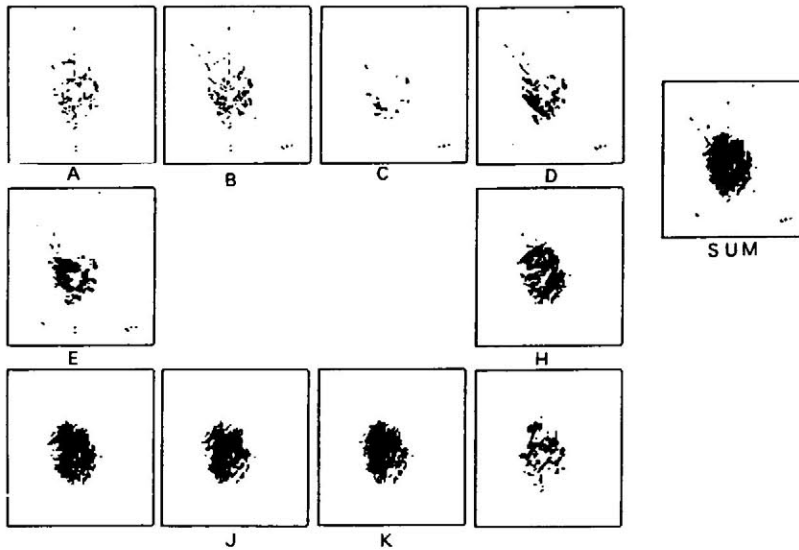


図6-14 回折光の発生方向の数が3方向以上の画像

次に、傷の面的な形状の特徴量解析に基づいてさらに傷種の識別を行う。従来は、傷の面的な形状の特徴量解析のみにより傷種の識別が行われてきたが、本手法では、回折パターンによる識別を行った後、特徴量解析を行うため、傷種の識別をより詳細に行うことができる。また、特徴量として傷の幅、長さ、面積などの簡単な特徴量だけでは、複雑な形状の傷の識別が困難なため、ここでは、周面比、等価慣性楕円の長短軸長比、外接円に対する面積密度の3つの特徴量を特に選んだ。これら3つの特徴量の値は傷の形状が円形になると1に、線状になると0に近づくという共通の特徴を持つ一方で、異なる特徴量の組み合わせで傷の形状を評価するため、形状の違いを正確に識別できる。

識別処理では、まず、ラベリング処理によりつながりあった画素をグループ化し、画素数が3個以上で、かつ上記した3つの特徴量が0.25以下の値をとる傷を線状傷の候補とみなし抽出する。この識別条件の値は実験から経験的に導いた値である。図6-15に識別した画像を示す。同図には識別条件を満たす線状の傷が抽出されてはいるが、同一の線状傷が隣接する2方向に分断したり、途切れている。この原因は、回折光が検出器の隣接する2方向にまたがって入射したことと、光電変換時の二値化によると考えられる。この問題を解決するため、図6-16に示すように、ま

ず、隣接する2方向毎の論理和画像を合成した後、解析を行う。その結果、図6-17に示すように分断した線状傷はほぼ一本の傷として識別され、方向毎に3本の線状傷が正しく分離識別されている。さらに、線状傷の主軸上にある同じ回折パターンを有する小さな傷を線状傷に加えることで、図6-18に示すように、線状傷の全容をほぼ検出できることがわかった。なお、各画像中の線状傷は、大きくは二つに分かれているが、回折パターンが同じであることに加えて同一直線上にあることから同じ原因により発生した傷の一部と容易に判断できる。また、図6-13の画像から線状の傷と点状の傷を取り除くことにより、図6-17に示すように従来法では識別できなかったすり傷の周辺に分布する塊状の傷の存在も明らかになった。以上に示す解析結果から、回折光の発生方向が2方向以下の傷に関して、回折光パターンの方向と傷の面的な形状の特徴量解析に基づく傷種の分離識別法が導かれた。

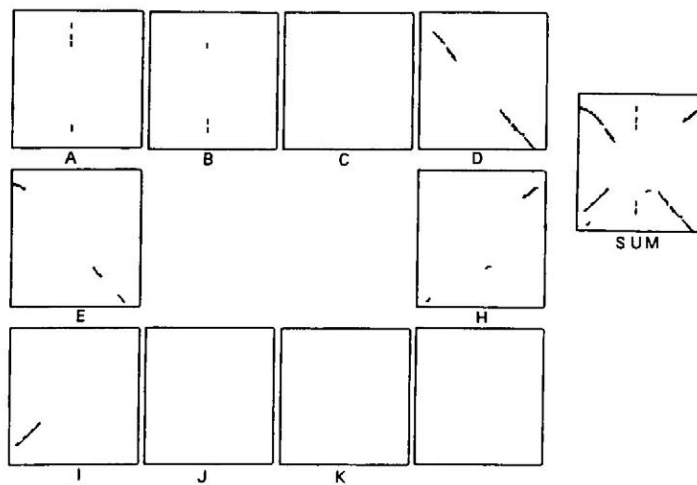


図6-15 傷の形状処理による線状傷の識別画像

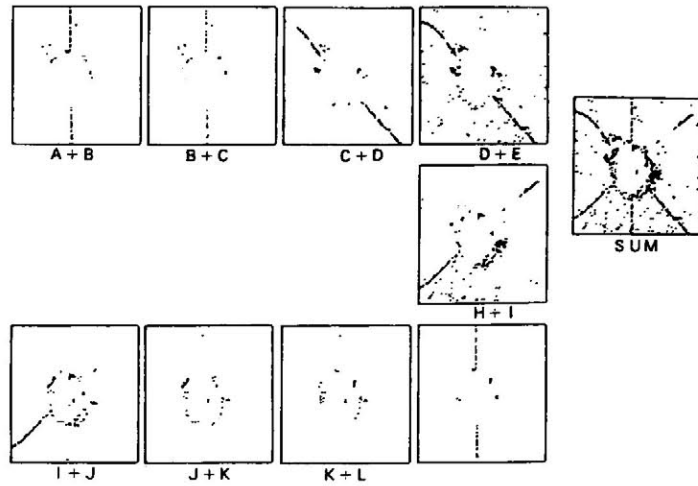


図6-16 隣接する2方向毎の論理和画像

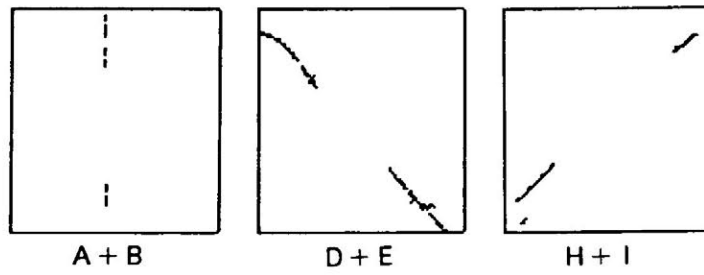


図6-17 線状傷を抽出した画像

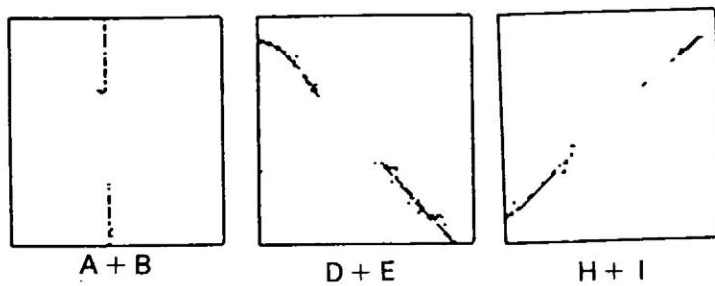


図6-18 線状傷に含まれる傷の抽出画像

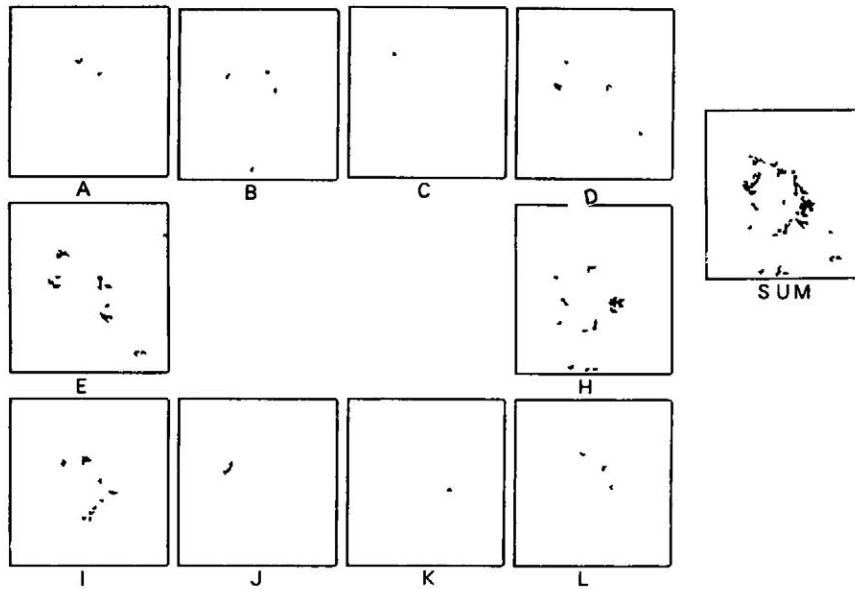


図 6 - 1 9 傷の形状処理による塊状傷の識別画像

次に、回折光の発生方向が 3 方向以上の傷の識別法を示す。図 6 - 1 4 には 3 方向以上の傷が各方向毎に示されているが、同じ回折パターンをもつ傷を同図から直接に分離識別することは困難である。したがって、まず、図 6 - 1 4 の 10 枚の二値画像を 10 ビット幅の一枚の多値画像に合成する。すなわち、A 方向を 0 ビット目、B 方向を 1 ビット目、…、L 方向を 10 ビット目に順に割り当てる。その結果、回折パターンは、0 から 1024 までの数値にそれぞれ置換されるので、各回折パターン毎にそのヒストグラムをとる。表 6 - 1 に、個数の多い順に 10 番目までの回折パターンとその個数を示す。ここでは、回折パターンの形がわかるようにパターンを二進数で示している。図 6 - 2 0 に、同じ回折パターンをもつ傷の識別画像を示す。

従来識別法では SUM 画像までの識別しか行うことができなかったが、本手法の場合、回折パターンの相違に基づいて傷の分離識別が可能であることが示された。但し、分離識別された回折パターンと傷種との関係は必ずしも明確とは言えないので、今後、既知の傷種についてデータを蓄積して回折パターンとの関係を明らかにしていく必要がある。

表6-1 回折パターンของ Histogram

番号	回折パターン	個数	番号	回折パターン	個数
1	1 E 0	8 9	6	3 F 8	2 5
2	3 E 0	7 7	7	1 F 8	2 5
3	1 C 0	6 1	8	3 C 0	2 3
4	1 F 0	3 4	9	1 F B	1 4
5	3 F 0	2 9	1 0	1 6 0	1 4

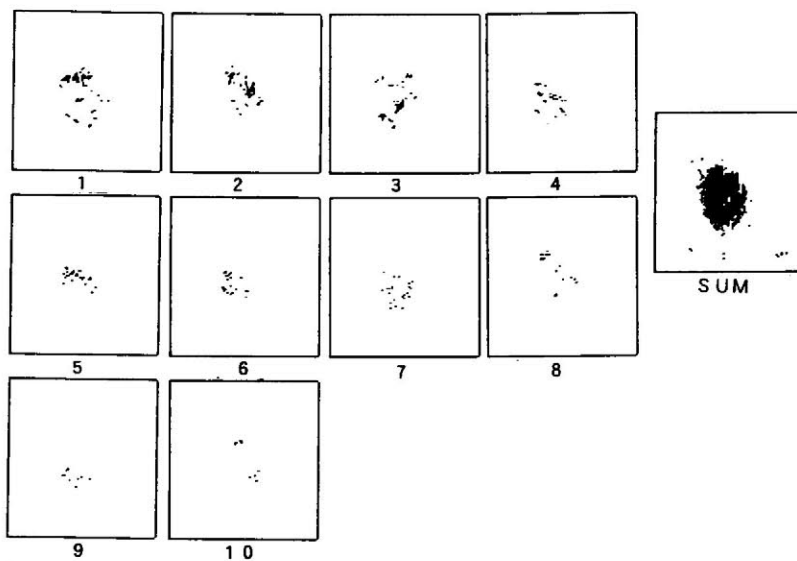


図6-20 同じ回折パターンをもつ傷の識別画像

以上に示したように、光回折法と光切断法を組み合わせ、さらに多分割面状検出器を用いて回折光パターンの解析処理を行うことで、従来法より、多種多様な傷の検出と傷種の分離識別が可能なが示された。なお、本システムでは、検査の高速化を図るため、光電変換後にデータを二値化し、回折光の光量分布に基づく解析は行っていない。この点に関しては、各ブロックの回折光量を多値データとして取り込めば、処理速度は遅くなるものの、さらに詳細な傷種の識別が可能である。

従来検査法では傷の分離識別が困難な圧延条痕を含む板材や、多種多様な傷を分離識別するため、光回折法と光切断法を組み合わせ、多分割面状検出器を用いた複合型の傷検査システムを提案し、以下のことを明らかにした。

- 1) 光回折法と光切断法とを装置として一体化することにより微小な傷から大きな傷欠陥まで多種多様な傷の検査が可能になった。
- 2) 光回折法では、光ファイバ束を用いた多分割面状検出器により、圧延条痕など種々の傷が重なり合った場合にも傷の検出と識別が可能なことを明らかにした。
- 3) 光切断法では、光回折法で検出が困難な大きな傷・欠陥を検出するとともに、被検体の三次元形状を計測して段差のある被検体へも光回折法が適用可能なことを示した。
- 4) 回折パターン of 構造（方向と数）および傷の面的な形状の特徴量解析に基づいて、多様な傷を系統的に分離識別する手法を導いた。

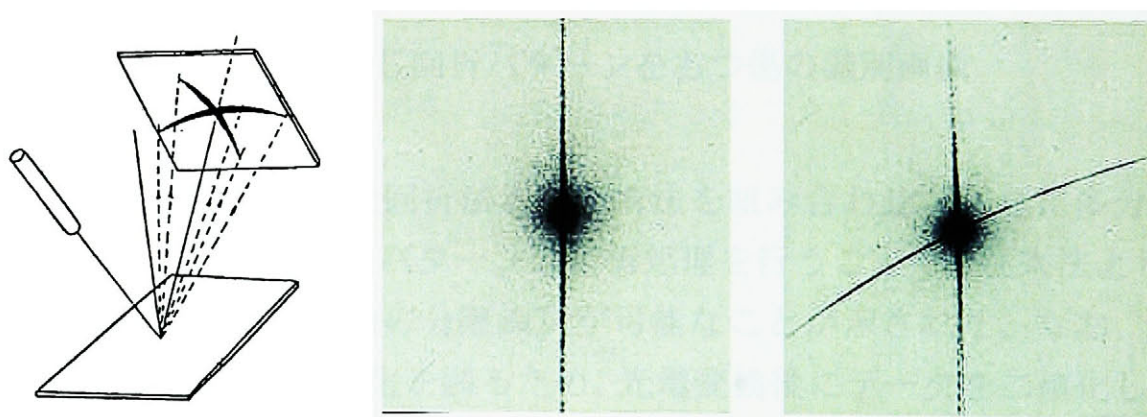
6. 2 円筒形状曲面を対象とした傷検査システムの開発

機械部品等では、製作の容易さから、円筒形状の曲面が多用される。具体的には、内面もしくは外面が円筒形状の部品が多い。そこで、円筒曲面を対象とした新しい微小傷・欠陥検査装置について、その構造と傷検出識別アルゴリズムを示した後、油圧シリンダの内面や円筒形状部品の外面の微小傷検査等への適用例を示し、本システムの有効性を評価する。

6. 2. 1 微小傷・欠陥検査装置の概要

光回折法は、図6-21に示すように、細く絞ったレーザ光を検査面に照射し、傷により発生した回折光をウェッジ・リング型センサやエリアセンサなどの特殊なディテクターで検出し、得られた回折光の二次元的な光量分布を解析し、様々な傷の識別判定を行う。しかし、検査対象面が曲面の場合、検査面の凹凸により反射方向が変動するので、反射光を検出センサの中心に安定的に入射することが難しい等の問題がある。

また、従来装置では、検出センサの形状が大きいため、レーザ光源と検出器とは適当な角度をつけ別々に設置していたため、シリンダーなどの管内壁面傷検査へは適用できなかった。



圧延板（傷のない場合） 圧延板（傷のある場合）

図 6-21 光回折法の原理と圧延板の回折パターン例

そこで、筆者らは、小口径の円筒形状部品への適用を可能にするため、レーザ光源と検出部とを一体化することで検出プローブの大幅な小型化を

図った。まず、光源には半導体レーザを用い、光電変換器は検出プローブから分離し、その間を光ファイバ（直径 0.5mm）で光学的に接続した。検出部の構造と外観を図 6 - 2 2 に示す。検出部外形は直径が 13mm の円筒形状で、その中心に開けた 3mm の穴を通して、光学的に真円化しかつ 0.2mm の大きさに絞ったレーザ光を検査面に照射する。傷面からは、直接反射光と回折光の二種類の異なる性質の光が戻ってくる。ここで、傷に対する応答が、直接反射光と回折光とで大きく異なることに注目し、直接反射光と回折光とを分離検出することを検討した。図 6 - 2 1 に示すように、直接反射光は、ビーム径の数倍程度の比較的狭い範囲にしか広がらないのに対して、回折光は、かなり広い範囲にまで広がっている。ここで、同図中の縦方向の回折光は、圧延痕による回折光で傷ではない。反射散乱したレーザ光を集光するため、光ファイバ束を、プローブの中心軸から直径 4mm と 8mm の二つの円周上に一列に並べて配置した。その結果、内側の光ファイバ束には、直接反射光と回折光とが入射するが、その光量の内訳は、95%以上が直接反射光で、回折光はわずかである。これに対して、外側の光ファイバ束には直接反射光は入射せず、光量は微弱であるが回折光のみが入射する。

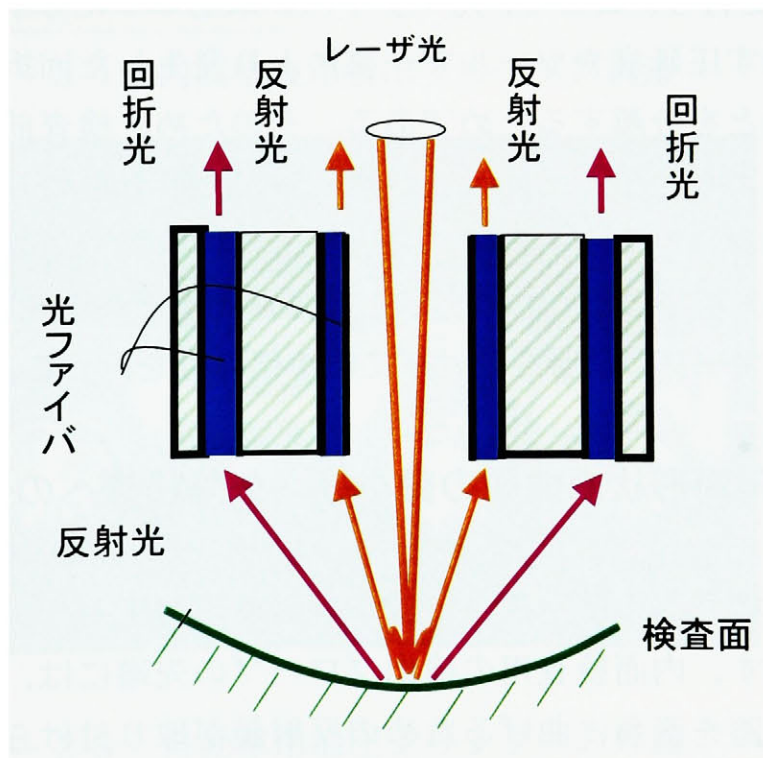


図 6 - 2 2 傷検出プローブの構造と外観

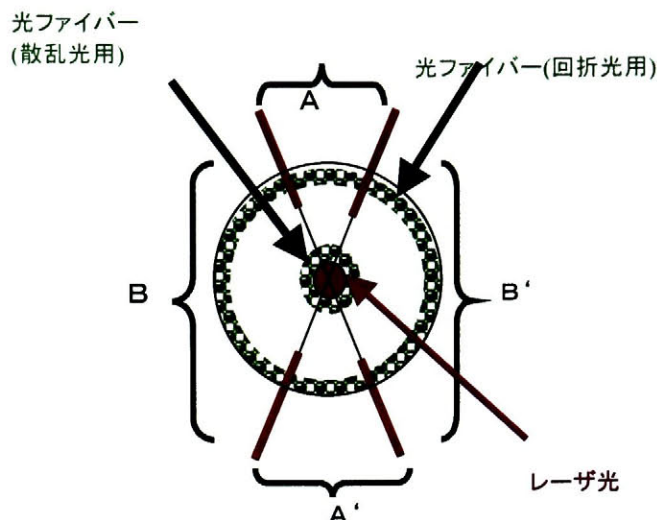


図6-23 光ファイバの分割方法

円環状に配置した光ファイバー束で集光した光は、光量測定用光検出器に導き、光量を測定する。まず、内側の直接反射光検出用光ファイバー束は、ひとまとめにして1個の光検出器で光量を測定する。外側の回折光検出用光ファイバー束は、図6-23に示すように、A、A'、B、B'の4つに分けた後、AとA'、BとB'をそれぞれまとめて、2個の光検出器に導き、光量測定を行う。ここで、光ファイバー束を二つに分割する目的は、図6-21に示す圧延痕やツールマークにより発生した回折光と傷により発生した回折光とを分離するためである。そのため、検査前に、圧延痕やツールマークにより発生した回折光がAとA'の部分にのみ入るように、プローブを位置合わせすることで、BとB'には、傷や欠陥により発生した回折光のみが入射することになり、この光量測定データを用いることで、圧延痕やツールマークの影響を受けずに微小傷検査を行うことができる。

6. 2. 2 円筒形状内曲面の微小傷・欠陥検査への適用

具体的な傷検査への適用例として、自動車用油圧シリンダーの内壁曲面の傷検査を示す。内面検査用の検出プローブの先端には、図6-24に示すように、光路を直角に曲げるための反射鏡が取り付けられている。図6-25に検査対象の例として、自動車用油圧シリンダーの外観を示す。

油圧シリンダーは、アルミニウム合金製で、車種毎に寸法形状が異なり、品種が多く、内径は15mmから50mmまで、長さは50mmから150mmまで様々である。図6-26に、内面検査用の微小傷・欠陥検出識別装置の外観を示す。試作した検査装置では、油圧シリンダを毎分1500回転程度の速度で回転させ、検査プローブを軸方向に移動する方式を用いた。傷検査は、半径方向、軸方向ともレーザー光のビーム径の0.2mm間隔で円筒部の全面について行った。データ数は、半径方向が360点、軸方向が750点で、総計270,000点である。

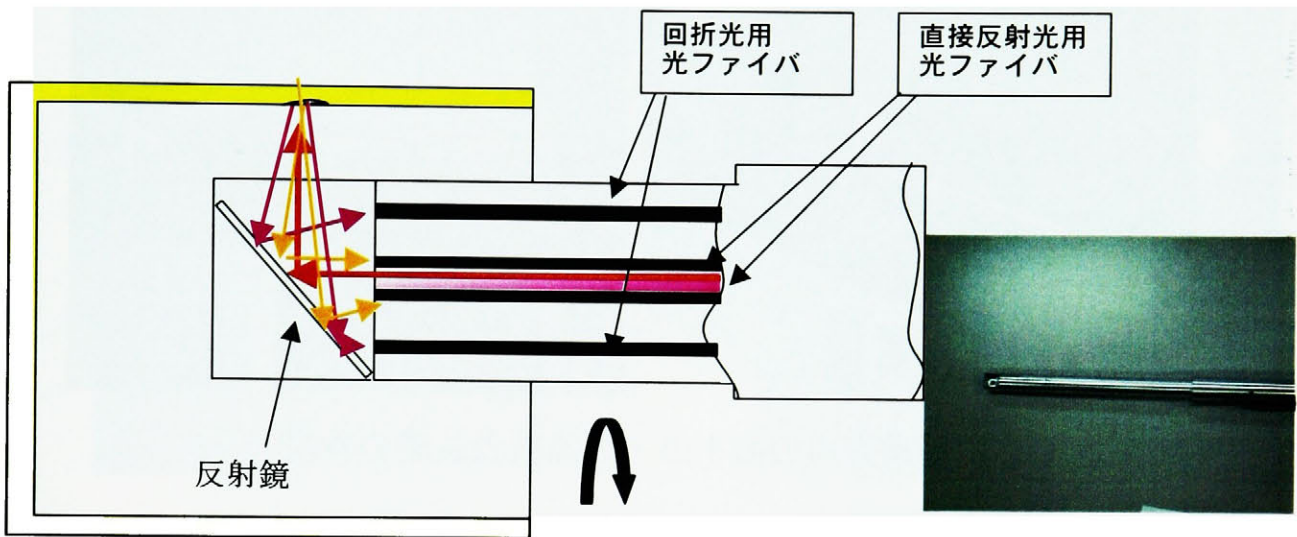


図6-24 内面検査用検出プローブの構造



図6-25 自動車用油圧シリンダーの外観

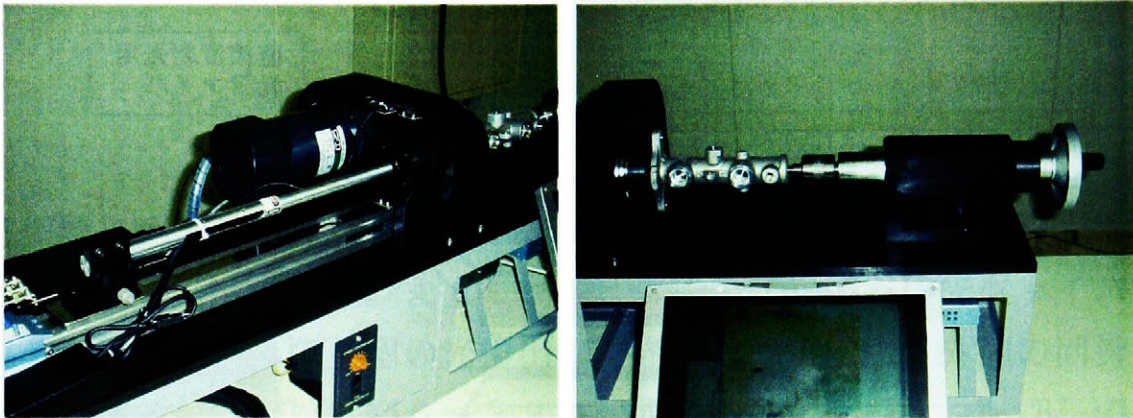
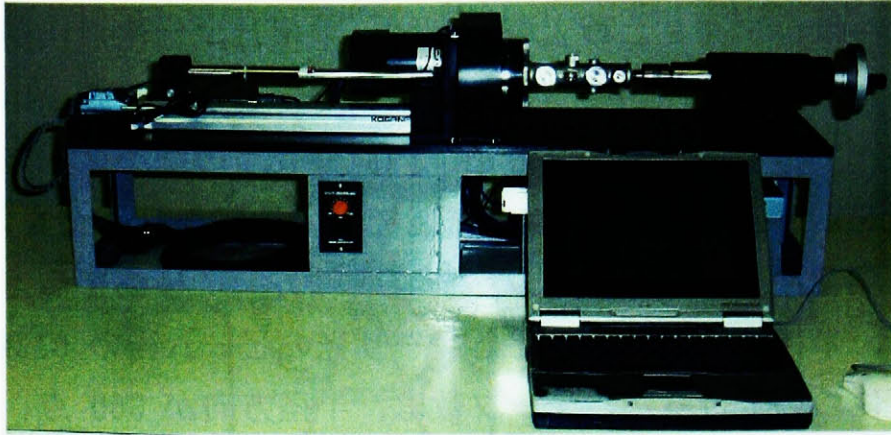
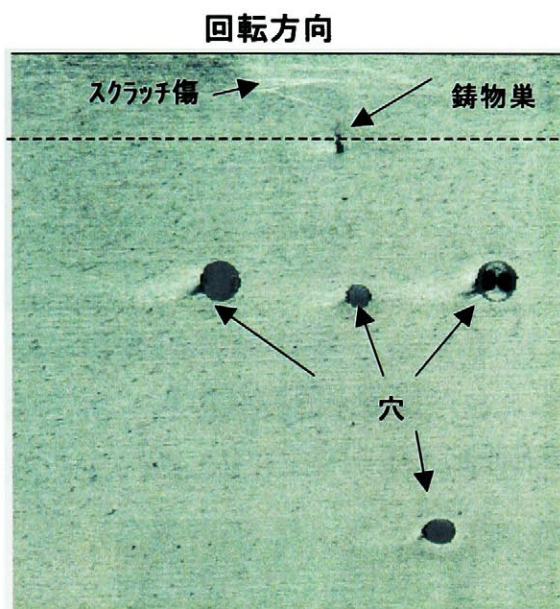
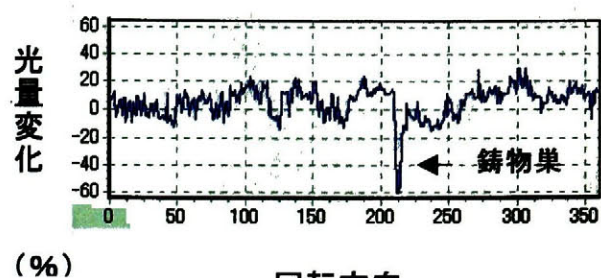
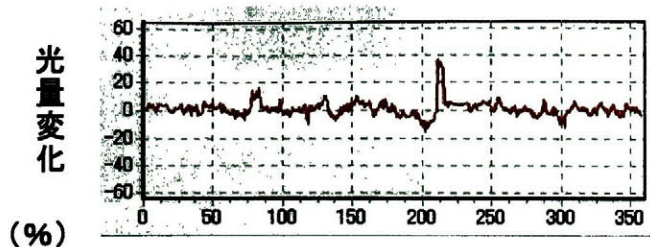


図6-26 内面検査用の微小傷・欠陥検査装置の外観

検査対象の傷の種類としては、鋳造工程で発生する鋳物巣や機械加工工程で発生する加工傷、研磨工程で発生する研磨傷など様々な傷がある。その中で、鋳物巣は、小さいものでは大きさが0.1mm程度しかなく、目視検査で見落としやすいが、見落としの許されない傷である。

鋳物巣の検査結果の例を図6-27に示す。両画像とも、円筒部を平面に展開表示し、横方向が回転方向、縦方向が軸方向に対応する。回折光画像と直接反射光画像とでは、検出可能な傷種に明らかな違いがある。回折光画像では、大小4つの穴以外に、画像上方に鋳物巣とスクラッチ傷とが検出され、直接反射光画像では、鋳物巣（穴）が検出されている。

一方、鋳物巣の部分の1回転分（360点）の光量分布を比較すると、回折光画像では、傷部で回折光が発生したため、光量が増加しているのに対して、直接反射光画像では傷による散乱のため、逆に光量が減少しており、傷に対する応答の違いは明らかである。

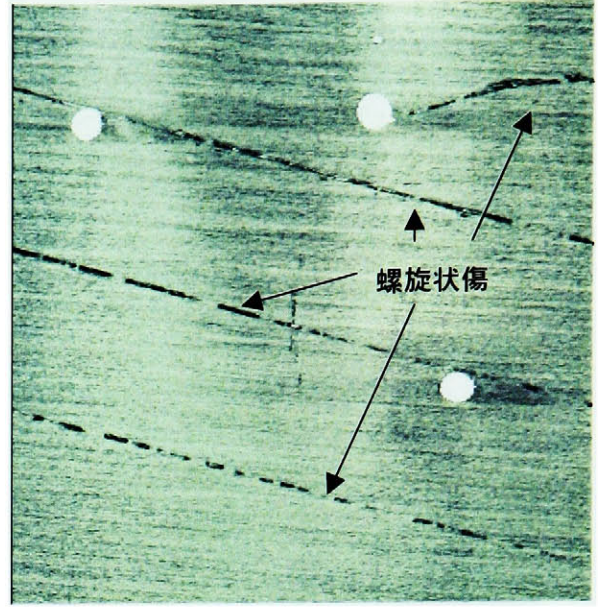


回折光画像

直接反射光画像

図6-27 傷検査画像の例

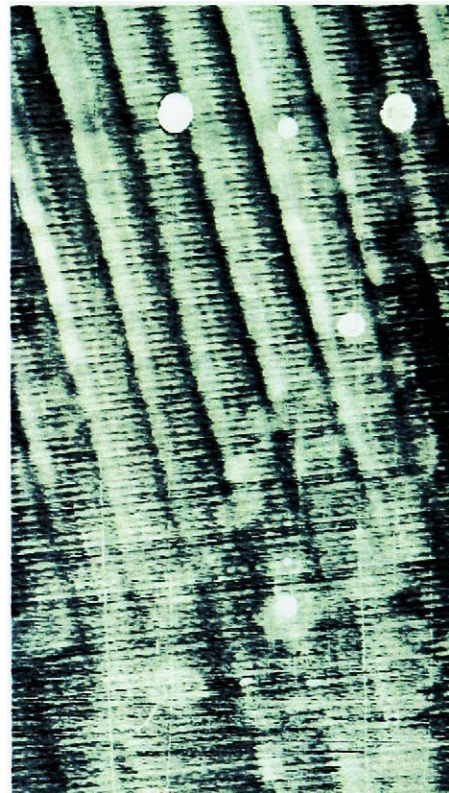
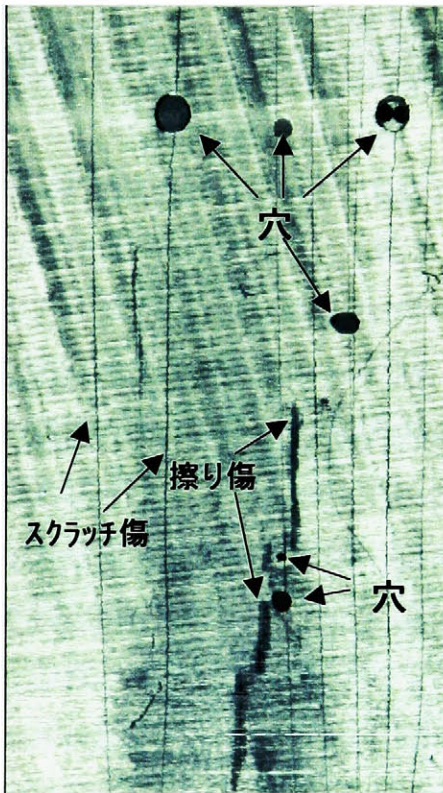
次に、他の加工傷の検査例を図6-28に示す。回折光画像では、スクラッチ傷が検出され、直接反射光画像では、螺旋状の傷がそれぞれ検出されている。この違いは、スクラッチ傷と螺旋状傷の断面形状の相違によるものである。すなわち、スクラッチ傷は、傷の大きさは小さいもののシャープなエッジを有するのに対して、螺旋状傷は、刃先が一部欠けた刃物を押し付けたことによる押し込み傷のため、丸みを帯びた形状であることに起因する。



回折光画像

直接反射光画像

図 6 - 2 8 傷検査画像の例



回折光画像

直接反射光画像

図 6 - 2 9 傷検出画像の例

図6-29には、口径、長さ、穴位置の異なる別の油圧シリンダーの研磨工程途中の傷検査画像の例を示す。光回折画像には、ヘアラインと呼ばれる非常に細かい傷と擦り傷が検出されている。一方、直接反射光画像では、細かい傷や擦り傷は検出されていないが、内面加工時の切削工具のツールマークが鮮明に検出されている。仕上げ工程では、研磨によりツールマークを完全に除去する必要があり、傷以外の目視検査の点検項目の一つになっている。したがって、同画像にもとづけば、表面の仕上げ状況の確認を高速かつ確実に行うことが可能である。

以上に示したように、本方式では、回折光と直接反射光とを分離して検出された二枚の検査画像を総合的に解析処理することで、従来検査法に比べはるかに多種多様な傷を高感度かつ高精度に検出できることが確認された。さらに、直接反射光画像には、表面の仕上げ状況に関する有用な情報が含まれていることが明らかとなった。

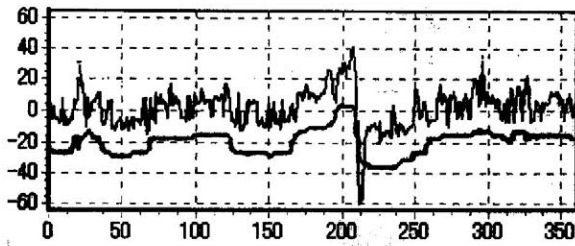
6. 2. 3 傷自動判定アルゴリズムの検討

製品や部品の傷検査では、微小な傷・欠陥を検出するとともにあらかじめ決められた判定基準にしたがって、良品と不良品を自動判定する技術が不可欠である。そこで、得られた二つの検査画像から、傷・欠陥を的確に自動識別・判定するアルゴリズムを検討する[6-22]。従来判定法では、傷のない正常な面での反射光量を基準とし、それに対してあらかじめ設定した閾値を越える場合を傷と判定している。しかしながら、同じ形状の部品であっても、表面の仕上げ状態、塗装や表面処理の状態により、受光光量はかなり変動することや、同一の部品でも、局所的な面粗さや光沢むらなどの影響を受けるため、固定閾値で傷の有無を判定するのは極めて困難なことから、浮動閾値に基づく傷判定法を検討した。浮動閾値を用いる場合、傷や種々のノイズ成分を含む光量データを解析処理して、閾値を設定する必要がある。したがって、傷判定精度を高くするには、光量データに含まれる大小様々な傷と、加工むら、光沢むらなど傷以外のノイズ成分とを効率よく分離識別可能なロバスト性のある判定アルゴリズムの確立が必要である。

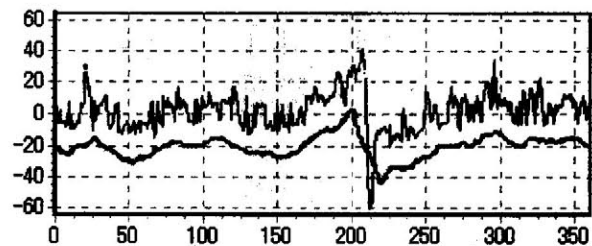
そこで、以下に示す浮動閾値決定法を提案する。まず、1回転分の光量データに、適切なデータ幅のフィルタリング処理を測定点毎に適用する。ついで、得られた各測定点のフィルター出力値に上下に独立したオフセット値を加減算して上限閾値と下限閾値に設定し、これらの上下限閾値を越えた場合を傷と判定する。したがって、適切な浮動閾値を設定するには、フィルタリング処理を行うフィルターの種類とデータ幅ならびにオフセット値の導出方法が極めて重要となる。

まず、フィルターにはメディアンフィルターと移動平均フィルターを選び、1回のフィルタリング処理を適用するデータ幅（個数）との関係と比較検討した。図6-30は、同じ光量データに対して、前記した二つのフィルターを適用し、データ幅を変えた場合の浮動閾値の相違を示している。まず、移動平均フィルターは、注目画素を中心とするデータ幅内の全データの平均値を出力するため、光量データの変動が大きい場合に有効である。

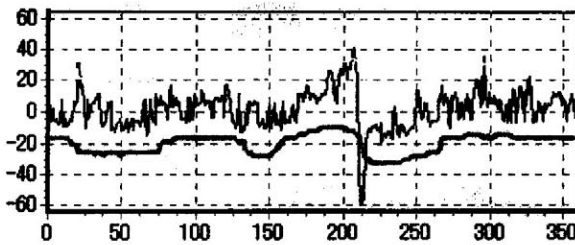
けれども、スクラッチ傷のようなインパルス状の微小傷を見落とす場合がある。これに対して、メディアンフィルターは、注目画素を中心とするデータ幅内に含まれる全データを大きい順に並べ、その中央の値を出力するため、インパルス状の微小傷検出には向いているものの、光量変動が大きい場合はフィルター出力値が不安定になりやすい。したがって、対象部品の表面状態に合わせ、光量変動の大きい直接反射光画像には、主に移動平均フィルターを、光量変動の小さい回折光画像には、主にメディアンフィルターを適用した。また、データ幅は80個を中心に、部品の仕上げ状況により50個から100個の範囲で調整した。



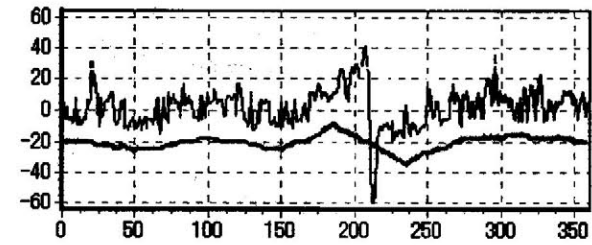
メディアンフィルター（データ幅20）



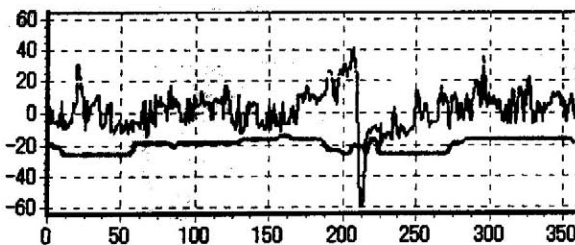
移動平均フィルター（データ幅20）



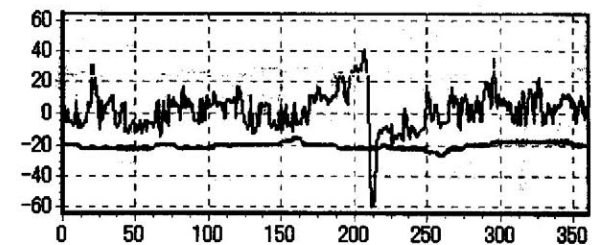
メディアンフィルター（データ幅50）



移動平均フィルター（データ幅50）



メディアンフィルター（データ幅100）



移動平均フィルター（データ幅100）

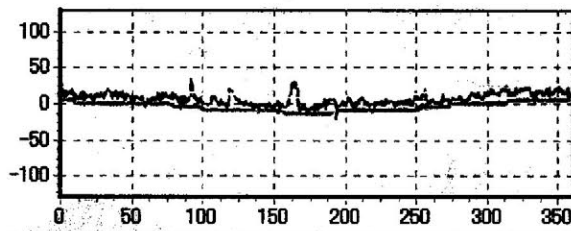
図6-30 フィルター幅と閾値との関係

一方、オフセット値は、良品と不良品との境界を決定する上で重要なパラメータである。従来は、多くのサンプルについて実験を行い、部品毎に判定精度が高くなるように試行錯誤的に設定していた。しかし、同じ部品でも、仕上げ状態や光沢むらなどの影響を受けるため、その都度オフセット値を微調整する必要があった。そこで、光量データの変動状況に合わせて、オフセット値を適応的かつ自動的に調整する手法を提案する。すなわち、1回転毎に、測定した光量データの統計分散値を計算し、以下の式により上限・下限オフセット値を算出し、傷判定の閾値を決定する。

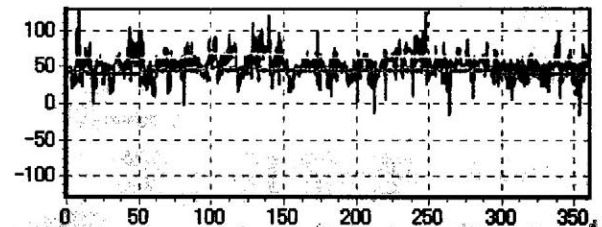
$$\text{上限・下限オフセット値} = \pm (\text{分散値} \times \text{係数} + \text{定数})$$

$$\text{閾値} = \text{フィルター出力値} + \text{上限・下限オフセット値}$$

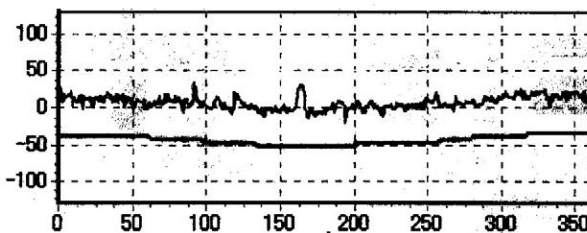
ここで、定数と係数の各値は、各部品毎に予備実験を行って適切な値を設定する。図6-31に、光沢度の異なる部品に固定オフセット値により閾値を設定した例を示す。固定したオフセット値では、光沢度の異なる部品の傷判定を適正に行うことができない。



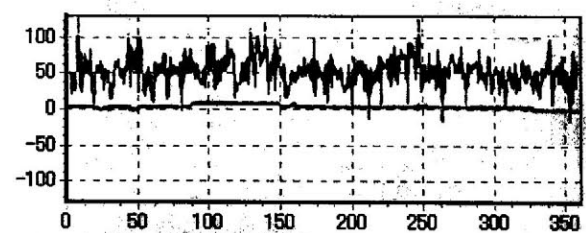
光沢度の低い部品(オフセット値 10)



光沢度の高い部品(オフセット値 10)



光沢度の低い部品(オフセット値 50)



光沢度の高い部品(オフセット値 50)

図6-31 従来法による傷判定結果の例

したがって、従来は、光沢度の低い部品では、オフセット値を 10 程度に、一方、光沢度の高い部品では、オフセット値を 50 程度に手動で微調整を行わなければならなかった。これに対して、本手法を適用した場合、図 6-32 に示すように、光量変動の統計分散値に比例してオフセット値が自動的に調整され、適正な閾値が設定されている。

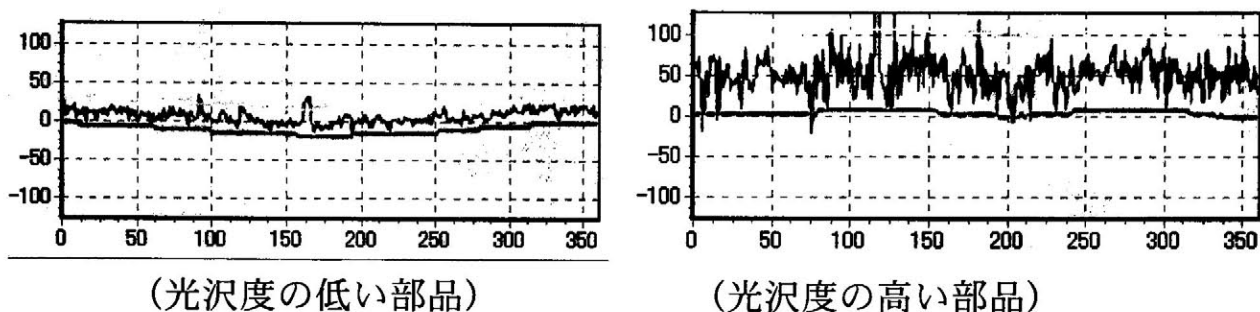
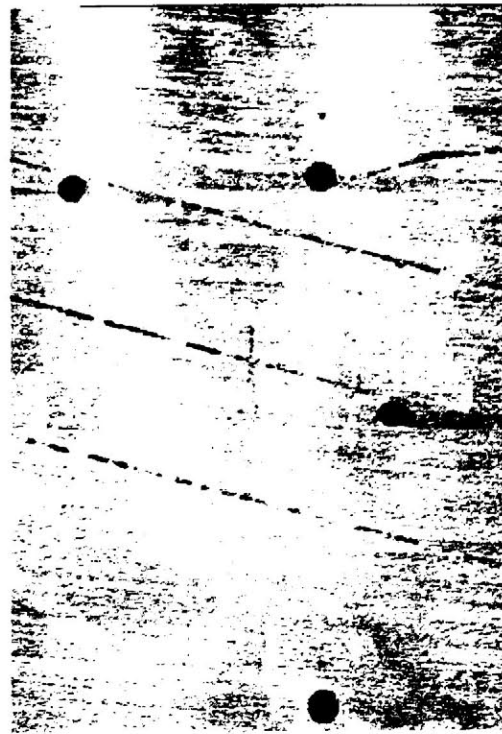
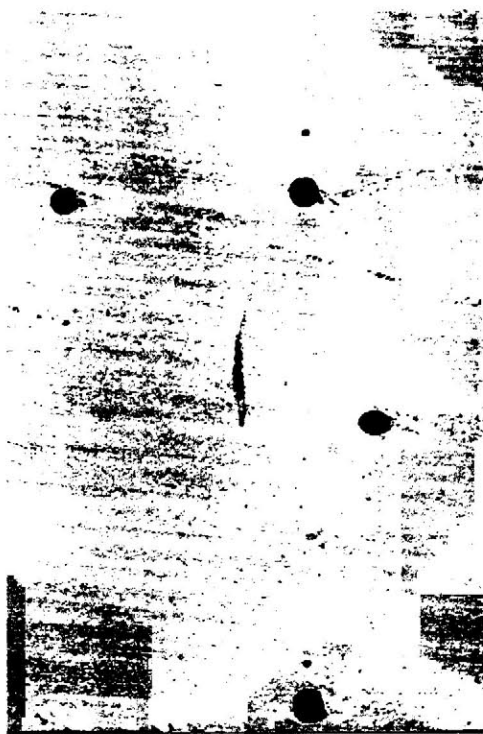


図 6-32 本手法による傷判定結果の例

図 6-32 の例では、予備実験結果に基づいて、定数=4.0、係数=2.0 に設定している。その結果、光沢度の低い部品では、オフセット値は 17.4 ($=6.7 \times 2.0 + 4.0$) に、光沢度の高い部品では、オフセット値は 49.6 ($=22.8 \times 2.0 + 4.0$) にそれぞれ自動的に調整され、本手法により傷判定を安定かつ適正に行えることが明らかとなった。

傷判定アルゴリズムに基づいて行った検査結果の例を図 6-33 に示す。図中の赤く表示した画素は、上限閾値を上回った画素、青く表示した画素は、下限閾値を下回った画素である。ここで、大小 6 つの円は、油を出し入れするための油穴であり、この部分では、レーザ光は、反射しないため、異常部分として表示される。画像中央のスクラッチ傷は、回折光画像で傷と判定され、一方、螺旋状の傷は、直接反射光画像で、傷と検出され、両画像を併用した判定結果は目視検査結果とよく一致した。

開発した方式では、このように、回折光画像と鏡面反射画像の二枚の画像を用い、さらに浮動閾値に基づく傷判定法により総合的に傷判定を行うことで、多種多様な傷を、従来法に比べ高感度かつ高精度に検出識別することが可能になった。



傷識別結果(回折光検出画像傷)

傷識別結果(直接反射光)

赤:上限閾値を越えた画素

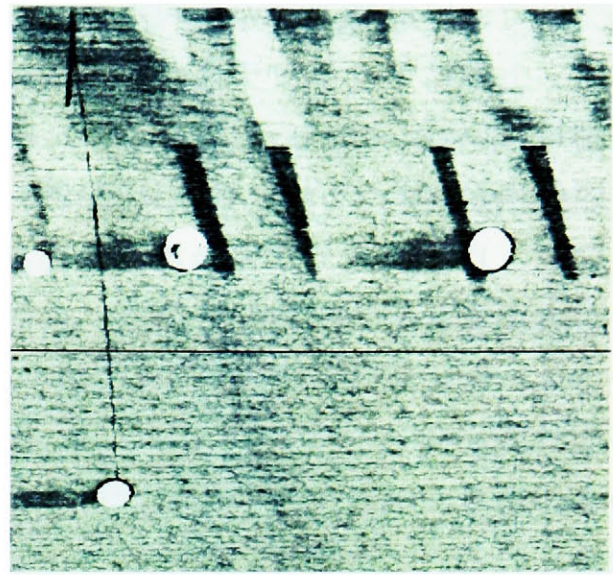
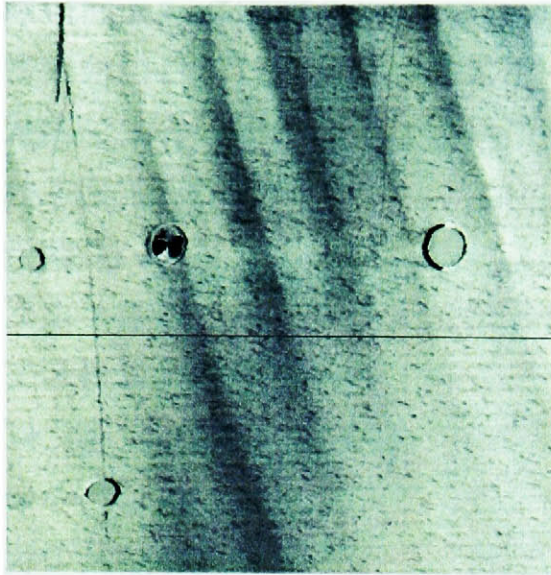
青:下限閾値を越えた画素

図6-33 傷判定結果の例

6. 2. 4 加工面の面品質評価の検討

開発した傷検査装置の性能を評価するため、種々の部品について、検出された回折光画像と直接反射光画像を併用して傷検出精度の向上化や傷の自動判定法の検討を進めてきたが、両画像には傷以外にも表面性状に関する様々な有用な情報が含まれていることから、ここでは、加工面の面品質評価への適用可能性について検討を加える。

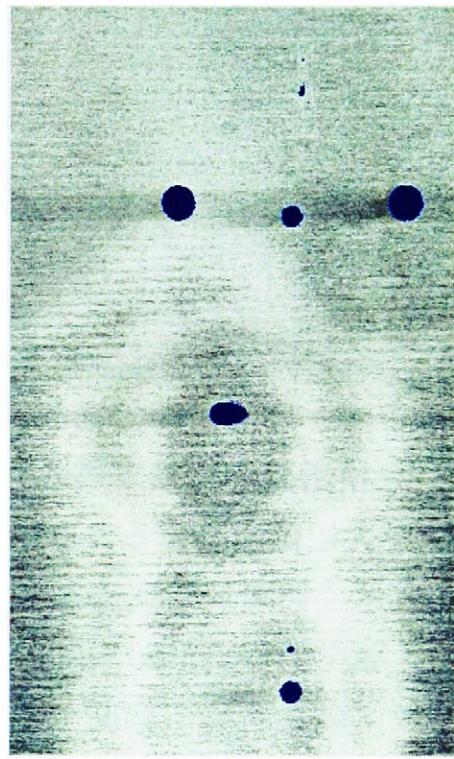
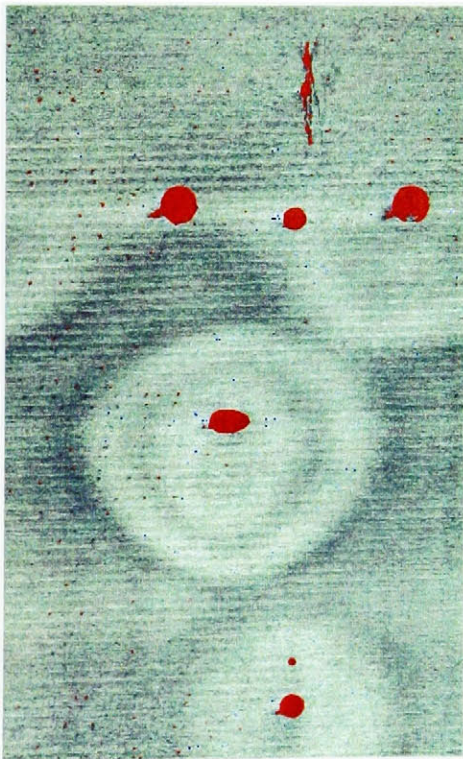
図6-34に、油圧シリンダーの検査画像の例を示す。回折光画像、直接反射光画像とも、画像の左上から下に向けて、スクラッチ傷が検出されている。さらに、直接反射光画像では、画像の上半分に明らかに異常な量分布が現れている。目視検査で確認した結果、その部分では研磨加工が不十分なため、ツールマークが完全に除去されてなく、不良品であることが明らかとなった。



光回折画像

直接反射光画像

図 6 - 3 4 傷検出画像の例 (未加工部品)



光回折画像

直接反射光画像

図 6 - 3 5 傷検出画像の例 (研磨加工部品)

ついで、研磨加工品の傷判定画像の例を図6-35に示す。光回折画像では、上部にスクラッチ傷が検出され、不良品と判定され、目視検査と判定結果は一致している。ところが、内面には広い範囲に円形および縞状の濃淡模様が現れている。この現象は、本システムにより初めて確認されたもので、目視検査では完全に見過ごされていた。同画像に基づいて該当部分の表面を詳細に調査した結果、良品の範疇に入るものの、研磨がまだ十分でないと判断された。従来の研磨工程では、同じロットの部品に対して、研磨時間を同じにしている。しかし、部品により表面の仕上げ状態にばらつきがあり、図6-35に示すような研磨が不十分な部品が生じたものと考えられる。このように、本検査法は、傷だけでなく加工面の品質の現場における簡便かつ定性的な評価法として利用可能であることが明らかとなった。本法を用いて加工面の定量的な品質評価を行うには、加工面性状（表面粗さ、平坦度、光沢度）との対応関係をさらに検討する必要がある。

本方式は、上記したように、回折光と直接反射光とを分離して検出することで、微小な傷から表面の凹凸まで多様な傷を高精度かつ高速に自動検査できるとともに、目視検査では困難な表面の仕上げ状況まで検査できるなどの多くの利点を有している。さらに、自動車用油圧シリンダーは、車種により口径、長さの異なる多くの品種が大量に製造され、従来の検査装置では、各口径毎に、装置を用意するか、検出部を交換するなどの前工程が必要であった。しかし、本方式の場合、口径が、検出プローブの外径（1.3mm）より大きく、回転可能であれば、口径や長さに関係なく、同一の検査装置を用い、検出器を交換することなく検査が可能であり、検査に要する人手と時間を大幅に削減することが可能である。

6. 2. 5 円筒形状外曲面傷・欠陥検査への適用

機械部品等の円筒形状外曲面の傷・欠陥検査への適用例を示す[6-21]。基本的な構成は、検出プローブの取り付け方法以外は、内面検査装置と同様である。図6-36に外曲面検査装置の外観を示す。

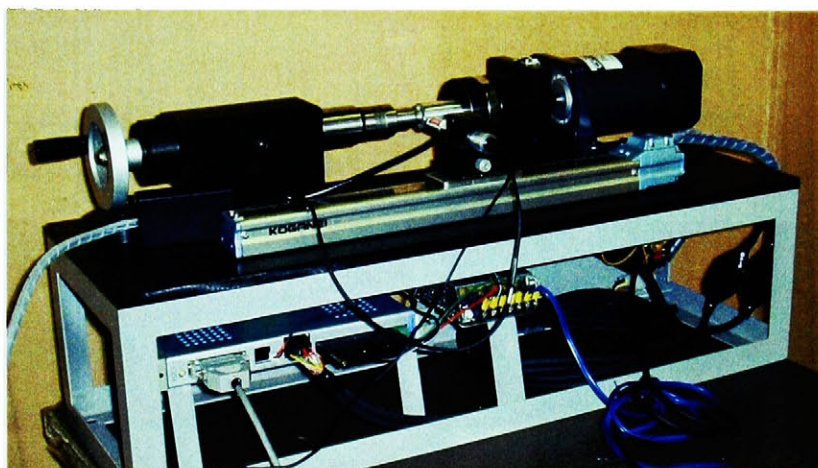
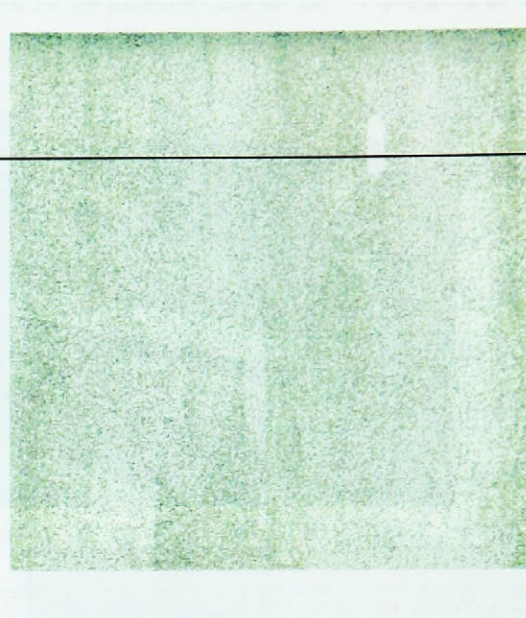
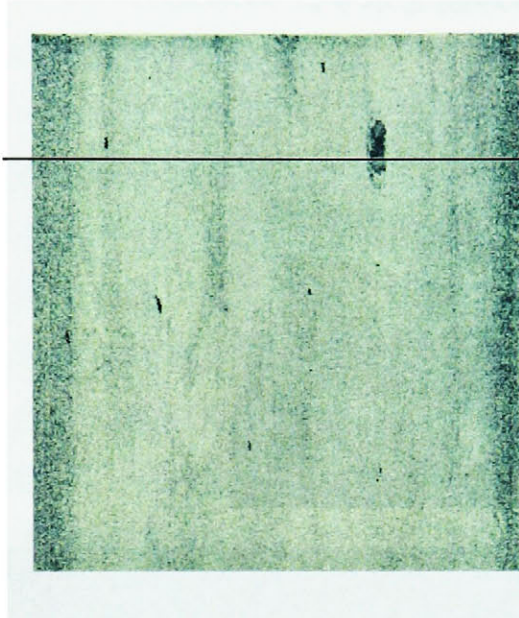
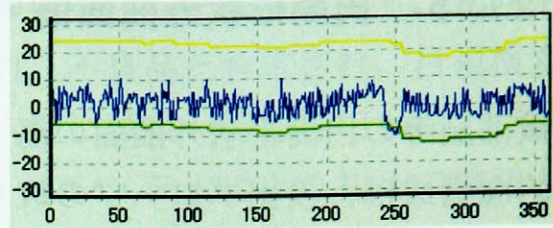
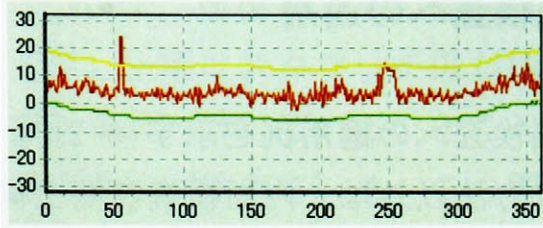


図6-36 外曲面検査装置の外観

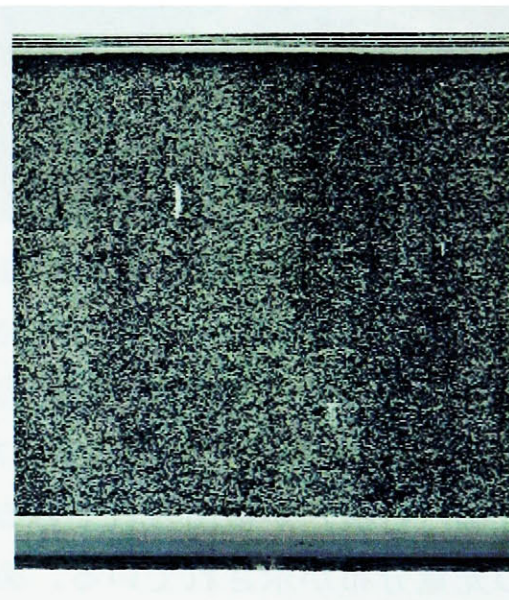
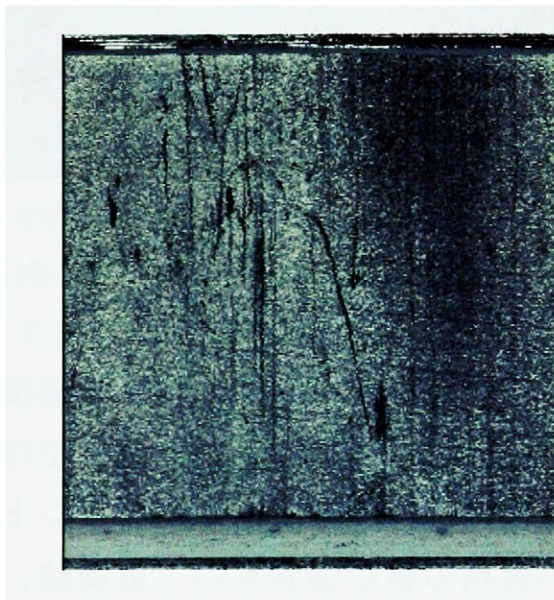
図6-37に、円筒状機械部品の外面検査画像例を示す。回折光画像では、目視検査で見落とししやすい微小な傷が検出され、直接反射光画像では、大きな傷（打痕）が検出されている。同図には、実線で示したライン上の断面の光量分布が示されている。図中の黄色の線が傷判定の上限閾値、緑色の線が下限閾値を示している。図6-38に、アルミニウム製円筒状機械部品の例を示す。回折光画像では、多数の微小な傷が検出され、直接反射光画像では、その中の大きな傷がいくつか検出されている。



回折光画像

直接反射光画像

図 6 - 3 7 円筒形状機械部品の外面検査



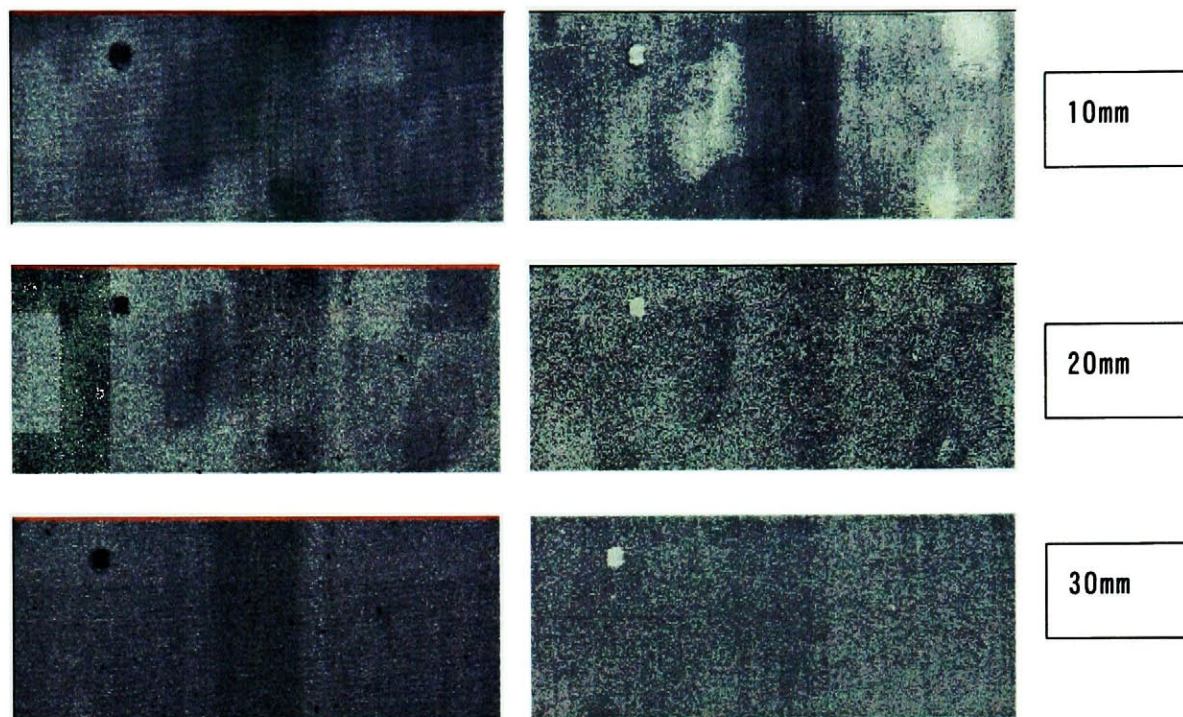
回折光画像

直接反射光画像

図 6 - 3 8 円筒形状機械部品の外面検査

開発した傷検査装置の性能を評価するため、検出プローブと検査面との間隔と検出感度との関係を検討した。

図6-39に検査面とプローブとの間隔が10mm、20mm、30mmの検査画像を示す。



回折光画像

直接反射光画像

図6-39 プローブ間隔による検出感度の相違

光回折画像では、間隔20mm以上で、微小な傷を感度よく検出している。しかし、間隔10mmでは、回折光が十分に広がらず外側の光ファイバー束にまで届かないため微小な傷は検出されていない。一方、直接反射光では、間隔10mmで、表面の微細な状況が検出されているのに対して、間隔20mm以上では、平坦な画像になり、検出感度も低下している。

以上の結果から、回折光と直接反射光とでは、検査面との間隔が異なっており、光回折では、間隔を20mm以上に、直接反射光では、間隔10mm程度にするのが適切であることが明らかとなった。そこで、プローブの先端を図6-40に示すように、内側と外側の光ファイバの端面をそれぞれ任意に位置決めできるように、二重構造でかつスライド機構にするとともに、

微弱な回折光を効率よく集光するため、プローブの先端に円筒状の反射ガイドを取り付けた。

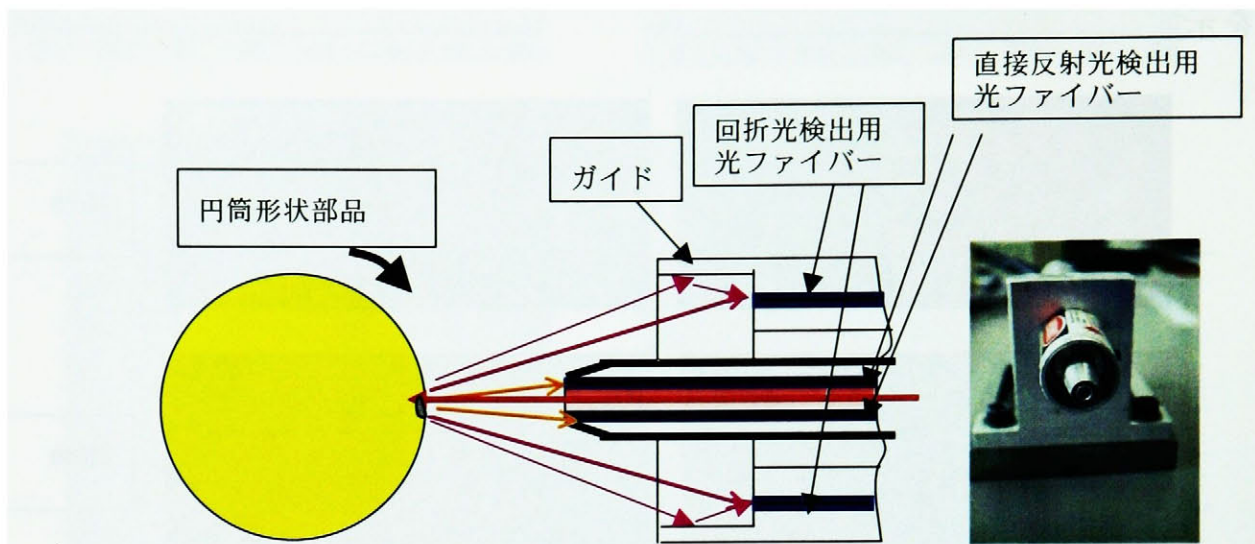


図6-40 プローブ先端部の形状

上記したプローブ先端形状の改造により、内側と外側の光ファイバの端面をそれぞれ適正な間隔に位置決めすることが可能になり、検出感度を安定に保つことが可能となった。

図6-41に、表面が鏡面に近い光沢度の高い機械部品の例を示す。黒い部分が黒皮残りと呼ばれる欠陥部である。図6-42に示すように、回折光画像、直接反射光画像とも欠陥部を明瞭に検出し、さらに、直接反射光画像では、画像右上に、回折光画像には見られない異常部分が検出されている。これは、回折光画像の方が細かい傷の検出感度は優れるというこれまでの検査結果と矛盾している。

そこで、該当部分を詳しく観察したところ、部品同士がぶつかりあって擦れることによりその部分の光沢度が低下していることが判明した。したがって、表面には傷によるエッジがないため、回折光は発生せず、回折光画像で検出されない。一方、直接反射光は、光沢の落ちた部分で、反射光が散乱し光量が低下するので、異常部分として検出されたと考えられる。

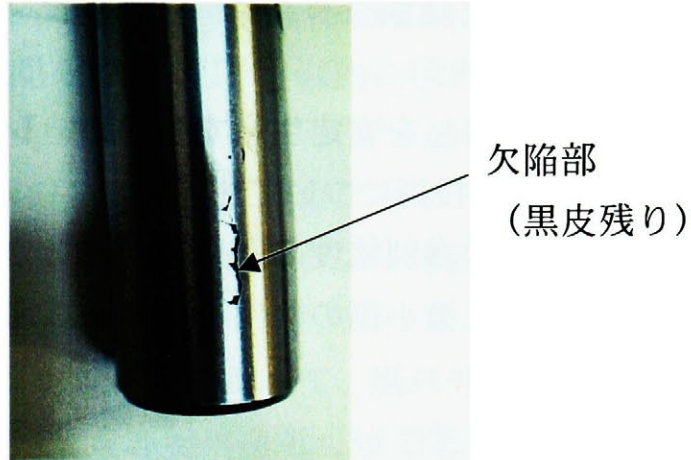
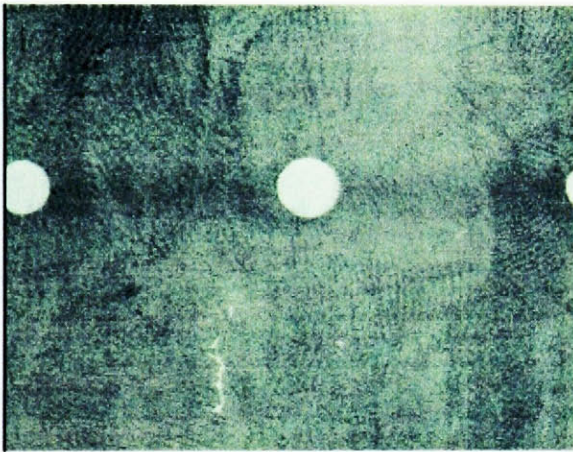
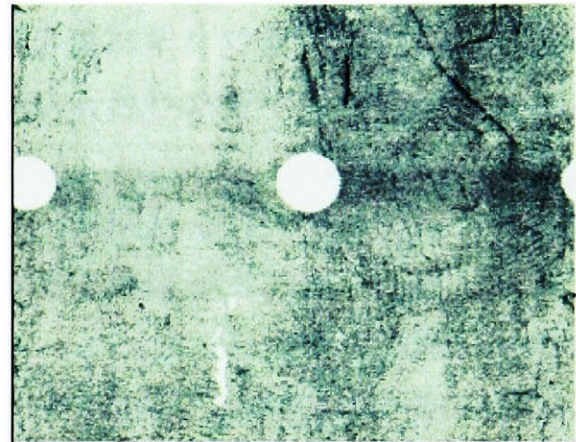


図6-41 鏡面の機械部品の外観



回折光画像



直接反射光画像

図6-42 円筒形状機械部品の外面検査

以上に示した検査結果から、回折光画像と直接反射光画像の二枚の検査画像を併用して、傷判定を総合的に行うことで、光沢面から鏡面まで光沢度の異なる種々の表面品質の部品に関して、ピンホールやスクラッチ傷のような微小傷から、打痕や表面の凹凸等の大きな傷まで、多種多様な傷を高精度かつ安定的に検出できることが明らかとなった。

6. 3 本章の総括と結論

本章では、高品質の製品を安定生産するため、レーザ光回折法に基づく微小傷・欠陥の検出識別技術について述べた。

章の前半では、傷種の識別精度の向上を図るため、新たに考案した多分割面状光検出器を用いた微小傷の検出と傷種の識別法を提案し、以下のことを明らかにした。

- 1) 光回折法と光切断法とを装置として一体化することにより微小な傷から大きな傷欠陥まで多種多様な傷の検査が可能になった。
- 2) 光回折法では、光ファイバ束を用いた多分割面状検出器により、圧延条痕など種々の傷が重なり合った場合にも傷の検出と識別が可能なることを明らかにした。
- 3) 光切断法では、光回折法で検出が困難な大きな傷・欠陥を検出するとともに、被検体の三次元形状を計測して段差のある被検体へも光回折法を適用可能なことを示した。
- 4) 回折パターンの構造（方向と数）および傷の面的な形状の特徴量解析に基づいて、多様な傷を系統的に分離識別する手法を導いた。

章の後半では、円筒形状部品の内壁曲面および外曲面上の微小傷・欠陥を検出するため、レーザ光源と受光部とを一体化した小型軽量のプローブ型検出センサを考案し、自動車用油圧シリンダーや機械部品に適用しその有効性を明らかにした。以下に結論を要約する。

- 5) 光学的に真円化したレーザ光と光ファイバーとを組み込んだ小径検査プローブを特徴とする円筒形状内壁曲面上の微小傷・欠陥の検査システムを開発した。
- 6) レーザスポット光を検査面に照射し、そのまわりに二重円周上に配列した光ファイバーにより、検査面からの回折光と直接反射光とを分離検出する構造により、微小な傷から表面の凹凸まで多様な傷を検出することが可能になった。

- 7) 自動車用油圧シリンダーの内面検査に適用した結果、0.1mm 以上の微小傷・欠陥を傷判定時間を含めて10秒以内に検査できることを明らかにした。
- 8) 光量データの変動状況に合わせて、オフセット値を適応的かつ自動的に調整する浮動閾値に基づく傷判定アルゴリズムにより、傷判定精度を向上した。
- 9) 回折光画像と直接反射光画像に関して、傷以外の表面性状との関係を検討した結果、加工面の品質評価へ適用可能であることが明らかとなった。

参考文献

- [6-1] 丸谷洋二：目視検査の自動化技術，日刊工業新聞社，(1987)
- [6-2] 谷田貝豊彦：応用光学光計測入門，丸善， p.176-184，(1988)
- [6-3] 丸山豊史：薄鋼板きず検査法の変遷，日本機械学会誌，vol.86， no.772， p.243-249， (1983)
- [6-4] 目視検査の自動化特集号、電気学会論文誌 C， vol.107， no.8， p.703-728， (1987)
- [6-5] 三井公之：最近の表面欠陥検査法、機械の研究， vol.40， no.3， p.362-368， (1988)
- [6-6] 河野嗣男：先端産業のための表面欠陥検査法，アイピーシー、(1989)
- [6-7] 深沢千秋他：知識工学応用表面検査装置 TOSPECTRON， 東芝レビュー， vol.44， no.5， p.413-416， (1989)
- [6-8] 米田康司他：磁気ディスクサブストレート表面欠陥検査装置の開発、精密工学会誌、 vol.56， no.3， p.479-484， (1990)
- [6-9] D.P.Casasent: Optical Information Processing, Springer, p.191, (1981)
- [6-10] B.R.Suresh et al.:"A real-time automated visual inspection system for hot steel slabs" IEEE, PAMI-5, No.6, p.563, (1983)
- [6-11] 銭場敬：画像処理装置を用いた各種オンライン表面検査装置、画像ラボ, Vol.4 No.1~No.4, (1993)
- [6-12] 相沢均他：ステンレス鋼板表面傷検査装置の開発、第1回産業における画像センシング技術シンポジウム、 p.29-34， (1986)
- [6-13] 住江伸吾、西元善郎：ガラス基板表面のキズとほこりの識別、電気学会論文誌C, vol.112, no.2, p.89-96, (1992)
- [6-14] 岡田三郎他：レーザ光回折パターン検出法による加工面の欠陥傷種の識別、産業における画像センシング技術シンポジウム、 p.55-60， (1992)
- [6-15] 岡田三郎、今出政明、宮内秀和、高畠一哉「複合形検査システムによる傷・欠陥の検出と傷種の識別」、電子情報通信学会信学技報，IE93(35) p.41-48、(1993)

- [6-16] 岡田三郎、今出、宮内：傷種識別機能を有する複合型傷検査システム電気学会論文集、電子情報システム部門誌、Vol.115-C, No. 3, p. 452-459, (1995)
- [6-17] 岡田三郎、今出政明、宮内秀和： “Detection and Discrimination of Surface Defects on Work pieces Based on LASER Diffraction Pattern Analyzing Method” , IAPR Workshop on Machine Vision Application, MVA' 92, p. 425-428, (1992)
- [6-18] 岡田三郎、今出政明、宮内秀和： “Discrimination of Surface Defects by Analyzing Spatial Diffraction Pattern of Laser Beam” , 1994 JAPAN- U.S.A. Symposium on flexible automation, p. 559-56, (1994)
- [6-19] 岡田三郎、今出政明、宮内秀和：光回折法による高精度微小傷・欠陥検出識別装置の開発、第7回画像センシングシンポジウム、p. 95-100, (2001)
- [6-20] 岡田三郎、今出政明、宮内秀和： “Development of Highly Accurate Inspection System for Cylindrical Aluminum Casts with Microscopic Defects” , Proceeding of International Conference on Control, Automation and Systems, Korea, p. 258-261, (2001)
- [6-21] 岡田三郎、今出政明、宮内秀和： “Detection and discrimination of small defects and cracks on curved surface of cylindrical parts” , Proceeding of 2002 Japan-USA symposium on flexible automation, Japan, p. 1009-1012, (2002)
- [6-22] 岩崎全良他：微小欠陥の検出と欠陥種類の識別、第1回産業における画像センシングシンポジウム、p. 327, (1980)
- [6-23] 岡田三郎、宮内秀和、今出政明、住本哲宏：レーザ光回折法による円筒形状内壁曲面上の微小傷・欠陥検査装置の開発、精密工学会論文誌（投稿中）

第7章 結 論

本論文は、高品位の自由曲面の形状計測において、イメージセンシングによる形状計測で生じる問題点、すなわち、高精度化とデータ処理量とを両立可能な複合イメージセンサを用いた効率的な形状計測法、レーザ光の特徴を活用した光沢面、鏡面を対象とした自由曲面形状計測法、曲面上の微小傷欠陥の検出識別法について述べた。

工業製品などの三次元形状計測においては、対象物表面の光学的な性質が、測定に多大な影響を与える。計測する側から、表面は、大別すると、粗面（拡散面）、光沢面、鏡面の3種類に分類することが出来る。その違いは、直接反射光と散乱光との強度の比率に関係がある。粗面では、入射光のほとんどすべてが拡散光となり、直接（鏡面）反射光はほとんどない。光沢面では、直接反射光の強度が強まり、逆に拡散光は弱くなる。鏡面では、直接反射光がほとんどを占め、拡散光はわずかとなる。ここで、直接反射光と拡散光の反射形態が全く異なることから、両方の光を同時に計測可能な測定法はない。したがって、従来の測定法は、拡散光検出方式か直接光検出方式のいずれかに分類される。その場合、拡散光検出方式では、直接反射光は、測定の大きな障害となるので、その影響を低減する対策が不可欠である。以上のことから、本論文では、高品位の加工面形状をレーザ光源を用いたイメージセンシングにより計測する技術の確立を目指している。さらに、近年、表面の品質に対する要求が高まり、微小な傷欠陥の検査精度の向上が求められていることから、レーザ光回折法に基づく微小傷欠陥の検出識別法についても明らかにする。

本論文は、以下のようにまとめることができる。

7.1 緒論「本研究の背景と目的、本論文の概要」(第1章)

本研究の位置付けを明確にするため、本研究がおかれている技術的背景を述べた上で、本研究が解決すべき課題について整理して述べた。

また、本論文の各章の概要について、全体の構成と流れを示しながら説明した。

7.2 自由曲面計測に関する従来の研究と問題点(第2章)

自由曲面計測に関する従来の研究について、計測方式と問題点について整理を行った。

7.2.1 イメージセンシングによる寸法形状計測の現状と問題点

曲面計測では、まず、イメージセンシングによる寸法形状に関する問題点について述べる。

近年、イメージセンシング技術の生産工程への導入には目ざましいものがあり、自動化、省力化の有力な決め手として注目されている。しかしながら、現在用いられている工業用カメラを用いた画像処理システムの標準的な解像度は縦横500画素程度(視野サイズの0.2%の精度)が主流であり、生産工程で要求される0.1mmの精度で寸法や形状の計測を行おうとすると、視野サイズは5cm平方と狭く、現場で必要とされる50cm平方の視野の画像を一度に撮り込むことは困難である。したがって、カメラあるいは対象物を精密に移動する装置が必要となり、画像計測の長所である高速性、機動性が失われてしまう。この問題点を解決する方法としては、画像入力・処理装置の解像度(画素数)を上げることが最も望ましいが、装置が特殊で高価なものになる上、高解像度化に伴いデータ量が急増し、処理速度が著しく低下することや多量のデータを高速処理するためにシステムが大型化、複雑化、高価格化する等の問題が新たに発生する。

精度の向上を図る方法として、画素補間、内挿、関数当てはめな

どの画像処理手法が提案されている。しかし、広い視野に対して0.1mmの検出精度を安定的に得ることは困難である。この他にも、精度を向上しかつ画像入力処理の効率化を図ったインテリジェント機能を有する画像入力センサの開発が行われている。極座標方式のカメラは、ラインセンサの角度を変えながら画像入力を行い、画面の中央付近の解像度を周辺部より数倍高め、画素数を増加させずに精度の改善を図っている。しかし極座標系のため、座標変換と画素補間処理が必要なこと、場所により精度が異なる等の点から、寸法・形状計測には適しているとは言い難い。

上記したように、現状では、大きな物体を対象とする高精度で汎用的な画像入力センサに適当なものがなく、高精度位置決め、寸法計測用途に画像計測法を導入する上での障害となっている。

7.2.2 イメージセンシングによる光沢性自由曲面計測の現状と問題点

近年の工業製品は、製品の高品位化と質感を向上させるため、光沢性のある自由曲面が多用されており、それに対応した計測技術が求められている。計測法としては、接触式と非接触式に大別されるが、それぞれに長所と短所があり、用途により使い分けられているのが現状である。

接触式は、球形プローブを対象面にそって倣わせる計測法であるが、先端はある大きさの球形となっており、その径より小さい凹凸形状は測定できない。また、正確な座標を得るためには、プローブ補正が不可欠である。また、プローブで表面を倣うため、測定速度が遅いなどの問題点があるが、サブミクロンの高い計測精度を有している。

一方、非接触式は、対象物に触れないため、傷や痕跡が残らない、測定点の正確な座標が得られる、高速測定が可能である。その反面、測定面の表面の影響を受けやすいなどの欠点がある。

レーザを用いた非接触計測では、対象面が光沢面であるか鏡面で

あるかにより、測定方法を変える必要がある。すなわち、一般的な光計測法では、細く絞ったレーザスポット光を対象面に当て、その反射散乱光（拡散光）を検出する。これに対して、対象面が鏡面の場合、反射散乱光はほとんどなく直接反射光のみとなる。そのため、反射散乱光を用いる測定法は適用できない。したがって、鏡面以外の面は、拡散光と直接反射光との比率により、拡散光が支配的な場合を拡散面（粗面）、直接反射光が支配的な場合を光沢面に分けて最適な計測法をそれぞれ適用する必要がある。

拡散光を利用しかつ直接反射光の影響を受けにくい形状計測センサとして、同軸線形変位方式（光リング式）が最近注目されている。同方式は、三角測量法などに比べ以下の長所を持っている。

- ①被測定面の表面性状（材質、反射率、粗さ、傷等）の影響を受けにくい
- ②被測定面の形状（曲率、傾斜角など）の影響を受けにくい
- ③作動範囲が長く、測定範囲が広い
- ④レーザ光の入射軸と受光軸が同一のため、測定不能領域が狭い
- ⑤構造が簡単のため、装置化しやすく低コストで製作できる
- ⑥光像直径と変位の関係が線形のため、測定範囲全体で同じ精度で測定できる

しかしながら、実用化するにはいくつかの解決すべき課題がある。

- ①受光用検出器にエリアセンサ以外に適切なものがないため、その解像度により、測定範囲と測定精度に制限がある。
- ②円環状光像の直径の測定に時間を要するため、測定に時間がかかる
- ③材料表面と円環状スリット板端面で発生するスペckルノイズの影響を受け、安定計測が困難であるとともに測定精度を低下させている。
- ④測定原理からレーザ光は真円であることが必要なため、現状ではHe-Ne レーザ等の大きな光源を用いており、小型軽量化のネックと

なっている。

7.2.3 イメージセンシングによる鏡面自由曲面計測の現状と問題点

近年、製品の高品位化に伴い、家電製品をはじめ表面が鏡面の自由曲面で構成される製品が多くなり、製品設計や検査等では表面形状だけでなく曲面の品位（法線ベクトルまたは曲率）まで検査することが求められている。また、コンピュータビジョン、ロボットビジョンの分野においても、拡散反射物体だけでなく、鏡面物体を対象とする機会が多くなり、鏡面計測技術を確立することで、その適用範囲が広がるなど多くの波及効果が期待される。その場合、鏡面物体では、形状復元において表面形状だけでなく、曲率や法線ベクトルが測定されれば、高品位の形状復元が実現可能なことから、両者を同時に測定するシステムの開発が望まれている。しかし、現状では、非接触方式で任意形状の鏡面物体の形状と法線ベクトルとを同時測定可能な装置はみあたらず、新しい計測技術の研究開発が産業界から求められている。

これまでに、鏡面物体の形状計測に関して、様々な計測法が提案されてきた。しかし、拡散反射と異なり、鏡面反射の場合、反射光は反射点の位置と面の傾きにより決まるため、撮影された二次元画像と幾何学的なパラメータのみでは、反射点の位置を一意に求めることが出来ないこと等から、平面で構成される比較的単純な形状の鏡面体しか測定することができず、複雑な自由曲面の形状計測は困難である。

7.2.4 加工面の微小傷・欠陥計測に関する従来の研究と問題点

工業製品や加工品表面の傷検査は、高品質の製品を安定供給する上で必要不可欠である。特に、近年の製造技術の急速な進歩に伴い、表面品質検査に対する要求は年々厳しさを増している。そのため、光学式、電磁式、超音波式等様々な検査技術が研究開発され、中で

も、光学式表面検査法は、非接触、高速、高精度、高信頼性等の点で他法よりすぐれ、回折、散乱、偏光等の光特有の性質を利用した検査システムが次々と考案され生産ラインへ導入されてきた。また、検査内容に関しても、最近では、傷の有無だけでなく傷種を識別して、その傷がどのような原因で付いたものかを分析し、設備の改善や品質向上に役立てることが求められるようになり、付加価値の高い検査システムの開発が要求されるようになった。これまでに報告されている傷種識別が可能な検査システムとして、深沢らが開発した鋼板、樹脂板を対象とした表面傷検査装置は、レーザ光回折法を用い、傷種の違いが最も明瞭に現れる直接反射光周辺の特定の4カ所の回折光を検出するとともに、傷の面的な形状の幾何学的特徴量を用いて傷種と等級を自動判定している。また、米田らが開発した磁気ディスクサブストレート表面傷検査装置は、円環・ウェッジ型光検出器を用いて傷面からの回折パターンの分布形状の特徴を効率よく検出し、特徴パラメータによる解析処理に基づき4種類の傷種を分離識別している。この他にも傷種の識別を目的とした検査装置が報告されているが、その多くが光回折法を用いており、回折パターンを検出する検出器の構造や配置、データ処理法を工夫することで傷種の識別を行っている。しかし、既存の検出器の中で最もすぐれた円環・ウェッジ型検出器でさえも、放射状に発生する回折パターンの構造を正確に検出することができないため、重なり合った傷を分離識別することが困難である。

これに加えて、光回折法は、測定原理から明らかなように、検出が必要な傷の形状の中で、傷の深さに関する情報が得られないこと、被検体は平板やフィルムのように高さが一定で表面に凹凸のないものでなければならないこと、欠け、割れなど大きな傷・欠陥は、エッジ以外では回折光が検出器に戻らないため検査ができないことなどの問題点があり、それらの対策が求められている。

7.3 複合イメージセンサカメラによる高精度寸法形状計測システムの開発 (第3章)

本章では、画像を用いた高精度かつ効率的な寸法形状計測法として複合イメージセンサを用いた計測法を提案した。従来の画像計測法では、高精度な形状計測を行うためには画素数の多い特殊なカメラを用いるしかなく、膨大な画像データの処理に多大な時間と高価な処理システムを必要とするなど極めて非効率的な計測法しかない。そこで、従来単独に用いられている二次元のエリアセンサと一次元のラインセンサとを機能的に一体化した複合イメージセンサを提案した。

- 1) 二次元計測では、複合イメージセンサを用いることで、従来比7倍以上の高精度化を実現した。機械部品の穴径と穴位置計測に適用した結果、検査時間を従来法に比べ1/3以内に短縮できることを示した。
- 2) 高精度化に伴うデータ処理量の急増と処理時間の増大をバランスよく軽減する効率的な計測システムと画像データ処理法を実現した。
- 3) 画像入力・前処理部に独自の高速化回路を組み込んだ画像計測処理システムを開発試作し、画像処理の高速化を実現した。
- 4) 三次元計測においては、複合イメージセンサカメラとコード化パターン投影法を用いた高精度・高能率形状計測法を実現した。
- 5) コード化パターン投影法の特徴を活用した領域分割法を提案し、本手法に基づいて多面体の形状計測が可能なことを示した。

7.4 同軸線形変位法による光沢性自由曲面の形状計測システムの開発 (第4章)

本章では、機械加工面のように光沢性の高い加工曲面の形状計測法として、同軸線形変位法に基づく計測システムを提案した。同法

は従来広く用いられている三角測量法に比べ多くの利点を有しているが、受光センサに適当なものがないため、実用化することが出来なかった。ここでは、ラインセンサを回転する受光部を考案することで、精度を保ちつつかつ測定範囲を大幅に広げ、測定時間を短縮できることを明らかにし、実用化の目途をつけることができた。

- 1) 受光器にCCDラインセンサを用い、それを回転させる方式により、測定範囲 100mm 以上、測定精度 ± 0.1 mm、1点あたりの測定時間 0.5 秒以内を達成した。
- 2) 半導体レーザダイオードからの楕円状のレーザ光を極小径の光ファイバに通すレーザ光の真円化法により、測定精度を低下させることなく、計測センサの小型軽量化を実現した。
- 3) CCDラインセンサを回転させ、空間的な平均化処理を行うことで、レーザ計測における測定精度低下の要因であるスペックルノイズの影響を大幅に低減できることを示した。
- 4) 本方式は拡散光検出方式であるが、光沢性のある物体の形状計測においても、直接反射光の影響をうけることなく、安定して計測できることが明らかとなった。

7.5 光線追跡法による自由曲面の鏡面形状計測システムの開発 (第5章)

本章では、高品位な鏡面を対象とするコンピュータグラフィックスで用いられる光線追跡法に基づく計測システムを提案し開発試作した。従来、自由曲面でかつ表面が鏡面の場合、反射光の戻り方向が定まらないため、非接触光学的に計測することは極めて困難であり、装置化されたものはない。ここでは、新しい測定方式を提案し、それにもとづいて鏡面が計測できることを明らかにした。以下に、結論を要約する。

- 1) 空間的に離れた位置に複数の一次元光位置検出センサ (P S D) を配置し、これを回転させることで、すべての方向からの反射光を検出する方式の自由曲面の鏡面形状計測システムを開発した。
- 2) ミラーによる光路自動切り替え方式により、全方向の反射光を受光可能な機構を明らかにした。
- 3) 本方式は、表面の形状だけでなく、反射点での法線ベクトルを同時に求めることができ、高品位の曲面の復元に有効であることを明らかにした。
- 4) 鏡面仕上げの金属半球を用いて本システムの性能評価を行った結果、最大 20 度までの法線ベクトルを±2度以内の誤差で、表面形状を 3mm 以内の誤差で同時に計測できることを明らかにした。

7.6 レーザ光回折法による加工面の微小傷・欠陥の検出識別 (第6章)

本章では、高品質の製品を安定生産するため、レーザ光回折法に基づく微小傷・欠陥の検出識別技術について述べた。

章の前半では、傷種の識別精度の向上を図るため、多分割面状光検出器を用いた微小傷の検出と傷種の識別法を提案し、以下のことを明らかにした。

- 1) 光回折法と光切断法とを装置として一体化することにより微小な傷から大きな傷欠陥まで多種多様な傷の検査が可能になった。
- 2) 光回折法では、光ファイバ束を用いた多分割面状検出器により、圧延条痕など種々の傷が重なり合った場合にも傷の検出と識別が可能なことを明らかにした。
- 3) 光切断法では、光回折法で検出が困難な大きな傷・欠陥を検出するとともに、被検体の三次元形状を計測して段差のある被検体へも光回折法が適用可能なことを示した。
- 4) 回折パターンの構造 (方向と数) および傷の面的な形状の特徴

量解析に基づいて、多様な傷を系統的に分離識別する手法を導いた。

章の後半では、円筒形状部品の内壁曲面および外曲面上の微小傷・欠陥を検出するため、レーザ光源と受光部とを一体化した小型軽量のプローブ型検出センサを考案し、自動車用油圧シリンダーや機械部品に適用しその有効性を明らかにした。以下に結論を要約する。

- 5) 光学的に真円化したレーザ光と光ファイバーとを組み込んだ小型検査プローブを特徴とする円筒形状内壁曲面上の微小傷・欠陥の検査システムを開発した。
- 6) レーザスポット光を検査面に照射し、そのまわりに二重円周上に配列した光ファイバーにより、検査面からの回折光と直接反射光とを分離検出する構造により、微小な傷から表面の凹凸まで多様な傷を検出することが可能になった。
- 7) 自動車用油圧シリンダーの内面検査に適用した結果、0.1mm 以上の微小傷・欠陥を傷判定時間を含めて 10 秒以内に検査できることを明らかにした。
- 8) 光量データの変動状況に合わせて、オフセット値を適応的かつ自動的に調整する浮動閾値に基づく傷判定アルゴリズムにより、傷判定精度を向上した。
- 9) 回折光画像と直接反射光画像に関して、傷以外の表面性状との関係を検討した結果、加工面の品質評価へ適用可能であることが明らかとなった。