OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	自動車生産工程における三次元視覚センサとその検査への応用に関する研究
Author(s)	小関, 修
Citation	大阪大学, 1993, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3070538
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

自動車生産工程における三次元視覚センサとその検査への応用に関する研究

小関　修

１９９３年5月

目　　次

第１章　序論 …… 1
1.1　生産工程における検査 …… 1
1.2　検査のための二次元，三次元視覚技術の現状 …… 2
1.3　三次元視覚技術の課題と本研究の目的 …… 2
1.4　本論文の構成 …… 3

第２章　三次元情報の検出方法 …… 4
2.1　三次元情報の検出方法の概要 …… 4
2.2　三次元視覚センサの基本検出方法 …… 7

第３章　スリット光走査型三次元視覚センサ …… 8
3.1　まえがき …… 8
3.2　センサの設計 …… 8
3.2.1　三次元座標検出法 …… 8
3.2.2　リアルタイム座標検出 …… 10
3.3　センサの構成 …… 11
3.3.1　全体構成 …… 11
3.3.2　撮像ヘッド …… 12
3.3.3　スリット光走査制御部 …… 12
3.3.4　信号処理部 …… 14
1）スリット光位置検出回路 …… 14
2）座標演算回路 …… 14
3.4　センサの性能と実験例 …… 15
3.4.1　センサの性能 …… 15
3.4.2　実験例 …… 18
3.5　まとめ …… 19

第４章　スリット光固定型三次元視覚センサ …… 21
4.1　まえがき …… 21
4.2　センサの設計 …… 22
4.2.1　三次元座標の高精度検出 …… 23
1）重心位置計算によるスリット光中心位置検出 …… 23
2）ルックアップテーブルによるレンズ歪補正 …… 24
4.2.2　三次元座標の高速検出 …… 26
1）専用ハードによる高速化 …… 26
2）パイプライン処理 …… 26
4.2.3　対象物の表面性状の影響の低減 …… 27
4.2.4　センサの小型・軽量化 …… 27
4.3　センサの構成 …… 27
4.3.1　撮像ヘッドの構成 …… 29

4.3.2 座標演算ボードの構成 …… 30
4.4 キャリブレーション …… 31
1) Z座標のキャリブレーション …… 33
2) Y座標のキャリブレーション …… 33
4.5 センサの性能 …… 34
4.5.1 座標測定精度 …… 34
4.5.2 総合性能 …… 35
4.6 まとめ …… 36

第5章 自動車エンジン部品の寸法検査 …… 37
5.1 まえがき …… 37
5.2 検査方式 …… 37
5.2.1 検査対象 …… 37
5.2.2 基本検査方式 …… 38
5.3 試作システム …… 41
5.3.1 十字スリット光型三次元視覚センサ …… 42
5.3.2 システム構成 …… 43
5.3.3 検査アルゴリズム …… 45
5.4 評価実験 …… 46
5.4.1 計測精度 …… 46
5.4.2 システム性能 …… 48
5.5 まとめ …… 48

第6章 自動車部品の異品検査 …… 49
6.1 まえがき …… 49
6.2 検査方式 …… 50
6.2.1 検査対象 …… 50
6.2.2 基本検査方式 …… 50
6.3 検査システム …… 52
6.3.1 三次元視覚センサ …… 52
6.3.2 システムの構成 …… 53
6.3.3 検査アルゴリズム …… 56
6.4 評価実験 …… 60
6.5 まとめ …… 61

第7章 自動車パネルの寸法検査 …… 62
7.1 まえがき …… 62
7.2 検査方式 …… 63
7.2.1 検査対象 …… 63
7.2.2 基本検査方式 …… 64
7.3 検査システム …… 67
7.3.1 システムの構成 …… 67

7.3.2 検査アルゴリズム …… 68
7.4 評価実験 …… 70
7.4.1 計測精精度 …… 70
7.4.2 システム性能 …… 73
7.5 まとめ …… 74

第８章 ICリードの外観検査 …… 75
8.1 まえがき …… 75
8.2 検査方式 …… 76
8.2.1 検査対象 …… 76
8.2.2 基本検査方式 …… 77
8.3 検査システム …… 80
8.3.1 三次元視覚センサ …… 80
8.3.2 システムの構成 …… 81
8.3.3 検査アルゴリズム …… 83
8.4 評価実験 …… 86
8.4.1 計測精度 …… 86
8.4.2 システム性能 …… 88
8.5 まとめ …… 89

第９章 結論 …… 90

謝辞 …… 93

参考文献 …… 94

著者発表の研究論文 …… 98

自動車生産工程における三次元視覚センサとその検査への応用に関する研究

小関　修

第1章　序論

1.1　生産工程における検査

自動車生産工程を始めとし，各種部品・製品の生産において検査は必須である[Narita 87]．検査を行うことで，不良品の排除や製品品質の確認を行うことができる．また，不良内容の分析から生産工程の改善を行うことができる．

このような検査は大別すると，

1)部品，製品の機能を測定器で計測するもの．

2)人間の目視，あるいは簡単な治具を併用した目視により，位置・寸法の確認や，異常パターンを検出するもの

に分けられる[Inokuchi 89]．前者は，人間にとっては苦手な作業であるが，機械にとっては得意なものである．後者は，適当なセンサがなかったり，現在のコンピュータにとっては苦手であるが，人間にとっては比較的容易な作業であるということで，人間に頼って行われてきたものである．後者の自動車生産工程における例としては，完成した自動車ボデーやボデーを構成しているパネルなどの寸法検査，それらに生じた傷などを調べる外観検査，シリンダヘッドやピストンなど主要部品の寸法や外観検査，組み付け工程において誤った部品が混入しないかを調べる異品検査，自動車ボデーや部品を識別するための文字認識・検査など多数ある．

しかし，これら検査が人間によって行われる場合，次にような問題点がある[Yachida 87]．

1)過酷な作業…目視検査は集中力を必要とする単純な繰り返し作業であるため，過酷な作業である．

2)検査基準のばらつき…人間の判断には常にあいまいさがつきまとっており，個人差，熟練度，そのときの気分などにより，検査基準が変動する．

3)ミスの発生…人間のもつ目視検査能力は非常に優れているが，反面，長時間の繰り返し作業を続けると，単調さや疲労から間違いを起こすことは避けられない．

4)目視の限界…ICリードの外観検査など対象物が小さくなると目視に限界がある．

5)熟練検査者の不足…これら，検査を行うには熟練が必要であるが，検査業務に長い期間従事する人が減少している．

これらの背景から，生産工程における目視検査の機械化・自動化が強く望まれている．このような検査の機械化・自動化には，純機械的な方法，光の反射などを利用する光学的方法，不可視部分の検査に適した超音波やX線による方法，テレビカメラなどで得た画像を処理する視覚技術による方法など各種ある．このうち，視覚技術を用いる方法は非接

触，非破壊で高速の検査が行える可能性があるため，期待は大きい．

1.2 検査のための二次元，三次元視覚技術の現状

視覚技術は大きくは二次元視覚技術と三次元視覚技術に分けられる．

二次元視覚技術は，テレビカメラで撮像した二次元画像を処理して各種の判断を行うもので，古くから活発に研究・開発が行われている．二次元視覚技術が適用できる対象物は，二次元形状（面状）の物体や三次元形状のものでも単一あるいは複数の方向から観測した二次元画像により必要な判断が行える物体である．この二次元視覚技術は生産工程での検査においてもこれまでに広く実用化されている．自動車の生産工程関連に限っても，各種メータ類の外観検査[Hattori 78]，[Lemke 83]や，エンジンバルブの組み付け検査[Perkins 80]，車体フレームの刻印文字認識[Nakano 88]など多数の実用例がある．

一方，生産工程の対象物には対象物の三次元情報（三次元座標）を直接検出して計測・検査を行うことが必要な三次元形状対象物が多数ある．対象物の三次元情報を視覚によって検出し，この情報を基づいて判断を行う技術を三次元視覚技術という．この三次元視覚技術は二次元視覚技術に比べると研究・開発の歴史が浅い．

三次元情報の検出手段の研究は，第2章で詳述するようにステレオ法を始め，光レーダ法，アクティブステレオ法など多数ある[Inokuchi 90]が，現在までのところ，スポット光を用いる変位計を除いては生産工程で使える実用性の高い三次元視覚センサは少ない．

一方，三次元情報に基づいた判断を行う研究は，これまでのところ，三次元対象物あるいはそれを含む情景の認識（三次元世界の理解）の研究が主体をなしており[Duda 79]，[Ohshima 83]，[Tomita 85a]，画像処理の一つの重要な研究分野を構築している[Tsuji 88]．これに対し，生産工程における検査など実用を意識した三次元視覚技術の研究は，前述した実用的な三次元視覚センサが入手できないこともあって少ない．このうち，電子部品関連の検査は三次元視覚技術の応用が先行して行われている分野である．これまでに角形電子部品の組み付け不良検査[Inagaki 86]，抵抗などの円筒形部品ほかの組み付け不良検査[Takagi 88]，電子部品のはんだ付け検査[Yoshimura 89]などの電子部品の検査や，電子機器の組み付けのためのコネクタとリード線の姿勢計測[Okada 85]，[Motizuki 85]などの研究例がある．しかし，まだ一部が実用化されているにすぎず多くは研究段階にある．さらに，自動車関連の生産工程においては三次元視覚技術の実用例は殆どない．

1.3 三次元視覚技術の課題と本研究の目的

三次元視覚技術を用いて，自動車生産工程における検査の機械化・自動化を進めるためには，まず，対象物の三次元情報を検出する実用的な三次元視覚センサが必要である．この三次元視覚センサに必要な機能としては，品質管理の観点から要求される計測精度を満たすことに加え，生産ラインのサイクルタイムに対応できる高速性，長期間の使用に対する高信頼性，汎用性を高めるための小型・軽量性などが必須項目として上げられる．

また，この三次元視覚センサを用いた各種の応用技術開発においては，各種のニーズに的確に対応するための三次元情報の処理技術の開発が必要である．

このような背景を踏まえて，本論文では，上記の仕様を満たす三次元視覚センサの開発から，このセンサを用いた自動車生産工程において必要とされる各種の三次元計測・検査

技術の開発まで一貫した研究を行うことを目的とする．

三次元視覚センサの開発においては，リアルタイムで対象物表面全体の三次元座標を検出することを目的としたスリット光走査型三次元視覚センサと，検査への適用を考慮して開発したスリット光固定型三次元視覚センサについて検討する．

応用技術の開発においては，自動車ボデーあるいはそれを構成するパネルの寸法検査に関する技術，シリンダヘッドやピストンヘッドなどの自動車部品の寸法検査に関する技術，各種部品の識別や異品検査に関する技術，そして自動車に搭載される電子機器に使用されるICの外観検査に関する技術について検討する．

1.4 本論文の構成

本論文は，自動車生産工程での三次元視覚技術を用いた検査についての研究の結果をまとめたものである．

第1章は序論で，生産工程における検査の現状と課題，三次元視覚技術の必要性と課題，およびこれを踏まえての本研究の意義と目的について述べた．

第2章では，現状の三次元情報の検出手段を概観し，本研究において開発する三次元視覚センサに用いる三次元座標の基本検出方法について検討する．

第3章では，対象物の表面全体についての三次元座標を高速に測定することを目的に開発したスリット光走査型の三次元視覚センサの原理，方式，構成および性能について述べる．

第4章では，自動車生産工程における検査への適用を前提に，高速，高精度，対象物の表面性状の影響の低減および小型・軽量を考慮して開発したスリット光固定型の三次元視覚センサの原理，方式，構成および性能について述べる．

第5章では，スリット光固定型三次元視覚センサをベースに開発した十字スリット光型三次元視覚センサとこれを用いて開発した自動車エンジン部品の突起や穴の寸法検査方法およびその有効性について述べる．

第6章では，スリット光固定型三次元視覚センサを用いて得た距離画像に，距離ゲーティングを行って自動車部品を識別し，異品検査を行う方法とその有効性について述べる．

第7章では，ロボットに取り付けたスリット光固定型三次元視覚センサにより，各種の断面形状を持つ自動車パネルの寸法検査を行う方法とその有効性について述べる．

第8章では，高分解能化を図ったスリット光固定型三次元視覚センサとテレビカメラを用いて開発したICリード外観検査方法とその有効性について述べる．

第9章は結論で，以上の研究結果をまとめ，今後の課題を述べる．

第2章　三次元情報の検出方法

前述したように，生産工程において三次元視覚技術を実用化していくためには，生産現場で使用できる実用的な三次元視覚センサの開発が必須である．そこで本章では，これまでに開発されている三次元情報の検出方法について概観し，本研究において開発する三次元視覚センサの基本検出方法について検討する．

2.1 三次元情報の検出方法の概要

視覚により三次元情報を検出する方法には，大別して受動型と能動型がある．ここで能動型というのは，三次元情報を検出するためになんらかの意味を持った光を対象物に投射する手法のことを言う．これに対し受動型は，対象物に対して通常の照明は行うにしても，三次元情報検出に関して意味のある光の投射を行わない手法のことを言う．**図2-1**はこれまでに開発されている視覚による三次元情報の検出方法を，受動型と能動型とでそれぞれ細分して示したものである[Inokuchi 90]．以下，この分類に従い，その概要を述べる．

2.1.1　受動型検出方法

受動型の検出方法には，ステレオ法，単眼視などがある．

1)　ステレオ法

ステレオ法[Ohta 84],[Kuno85],[Medioni 85][Tomita85b]は，人間の両眼のように，あるがままの世界をそのまま観測する受動的方法の代表で，その計測原理は三角測量法である．この方法では，二つの入力画像中において対応する二点を発見する必要があるが，このことは人間には簡単であるが，コンピュータにとっては，非常に困難な問題[Sato 85b]（対応点決定問題）である．この問題は，現在もステレオ法の最大の課題であるため，この方法が生産工程の検査など実用面において用いられることはきわめて少ない．

2)　単眼視

単眼視は，物体の大きさが既知であるとか，対象が既知の面上に載っているなどの拘束条件が成立するときに利用できる三次元情報の検出方法[Ohta 87]である．しかし，本来，生産工程などでは，あるべき形状からのずれや，未知の形状を測定しなければならないことから，この単眼視が検査に用いられることはない．

2.1.2　能動型検出方法

能動型検出方法は，**図2-1**に示すように，大別して，光レーダ法，アクテイブステレオ法，その他の方法に分けられる．

1)　光レーダ法

光レーダ法は対象物に投射した光の往復の飛行時間を計測する方法で，飛行時間測定法と位相差測定法がある．

◆飛行時間測定法

飛行時間測定法は，光パルスを投射し，このパルスが対象物で反射されて戻ってくるま

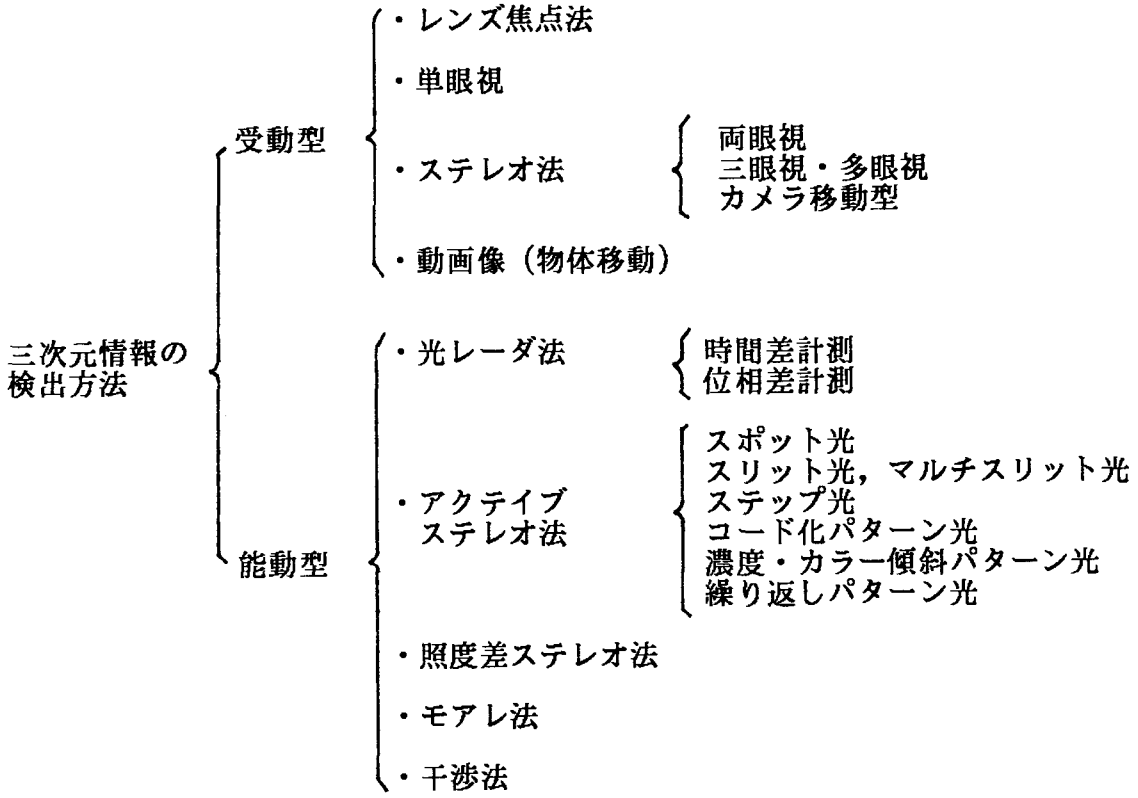


図2-1　三次元情報の検出方法

での時間を測定し距離を求める方法である．この方法においては，光の伝播速度が極めて高速であるため，短い距離を測定しようとすると非常に高度なデバイス技術（1mmの距離分解能を得るのに0.007ns.の時間分解能）が必要となる．このため，この方法は主に，測距儀として長距離の計測の用いられてきた．代表的な例として，米JPL(Jet Propulsion Laboratory)が開発したシステム[Lewis 77]がある．このシステムは128×128点の三次元情報を得るのに約3分を要し，精度も2cm程度と生産工程向けには粗い．また，Jarvisもこの方式によるロボット視覚を開発している[Jarvis 83]が，64×64点の三次元情報検出に4秒を要している．

◆位相差測定法

位相差測定法は，光の強度を正弦波状に振幅変調し，この光の投射波と反射波の位相差から飛行時間を測定する方法である．単発のパルスの帰還時間を測定する場合よりも，連続する波形全体を計測することから，前述の飛行時間測定法よりも精度の高い測定が期待できる．SRI（米スタンフォード研究所）で試作されたシステム[Nitzan 77]では，位相差を0.01° の精度で測定できる．この値は，距離で1mmとかなり高い精度であるが，この精度を得るために多数回の平均を行っており，128×128点の計測を行うのに，2時間を要している．

上述した光レーダ法は，光源と受光点が同軸上に存在している点で，アクテイブステレオ法など三角測量法において問題となる不可視領域（死角）がない優れた方法である．しかし，これまでに発表されたものは，精度や計測時間に課題があったり，特にシステムが

複雑であるため，その結果，高コストになるなど生産工程で使用するには問題が大きい．

2)　アクテイブステレオ法

ステレオ法における対応点決定の問題を解決するために，一方のカメラを光を投射する光源に置き換えたものがアクテイブステレオ法である．この方法には，投射する光の種類により，スポット光投影法，スリット光投影法，空間コード化パターン投影法などがある．

◆スポット光投影法

スポット光投影法は，レーザスポット光を投射して三角測量により三次元情報を検出する方法である．レーザビームを細く絞り，スポット径を小さくすることで通常照明下でも十分に明るい反射光が得られるため，高精度で安定な計測が行える[Ishi 74],[Ito 84]．この方法を用いたセンサは，いわゆるレーザ変位計として，多数市販されており，簡単な寸法計測や物体検出に実用されている．しかし，この方法を用いて，多数点の三次元情報を得ようとすると，スポット光を一次元あるいは二次元走査することが必要になる．このことは，計測時間が長くかかるという課題の外に，検査システムの構成を複雑にするという課題を生むため，自動車生産工程の検査においては適用が困難な場合がある．

◆スリット光投影法

スリット光投影法は，スリット光（光のシート）を対象物に投射し，その反射光をテレビカメラで撮像して三次元情報を検出しようとする方法である．この方法によればスリット光に沿った多数点の三次元座標を一度に得ることができるため，スポット光投影法に比べ，原理的により高速化した三次元情報の検出が可能である．また，このスリット光に沿った多数の三次元座標が得られることは，自動車ボデーの隙間や段差などの寸法検査には極めて有利である．さらに，スリット光の投射方向を少しづつ変化させながら反射スリット光画像を得ることで，対象物全体の三次元情報の高速検出が可能である．このスリット光投影法については，白井らの物体認識における先駆的研究[Shirai 72]を始め，これを発展させた大島らの一連の研究[Ohsima 73,80,82,83]，土井らの研究[Doi 74]などがある．しかし，これらの研究においては，物体認識のアルゴリズムに主眼が置かれており，三次元情報の高速検出の研究や，寸法検査などを意識した研究は殆ど行われていない．

◆コード化パターン投影法

コード化パターン投影法は，スリット光の代わりに複数枚のコード化されたストライプ状パターンを投射し，その反射光をテレビカメラで観測することで対象物全体の三次元情報を検出する方法である．この方法には，カラーパターン投影法[Yonezawa 78]，時系列符号化法[Ueda 81]などがある．後者においては，2^N本のスリット光を投射したのと同等の細かさの三次元情報をN枚のストライプパターン画像から得ることができ，スリット光投影法に比べ，より高速の三次元情報の検出が可能となる．特に，グレイコードを用いた時系列空間符号化法[Inkuchi 84],[Sato 85a]においては，液晶シャッタが用いられており，機械的パーツのない高速な三次元情報検出が実現されている．しかし，これらコード化パターンを用いた三次元視覚センサは，現状では，撮像装置の寸法が大きいことやそのメンテナンスの点から生産現場には適用しにくいという課題がある．

3)その他

その他の能動型の三次元情報計測方法には，モアレ法や干渉法がある．

◆モアレ法

モアレ法は，格子縞光を対象に投射し，格子スリットを通して画像入力することで，対象物の等高線パターンを得る方法であり[Takasaki 70],[Idesawa 77]．主に，人体計測の分野で用いられている．１回の参照光の投影で対象物の表面全体の三次元情報の計測が行えるので高速計測に適しているが，等高線の相対位置しか得られず，絶対的な三次元座標が得られないところに最大の課題がある．

◆干渉法

対象物からの反射光を基準光とを干渉させて得た干渉縞から三次元情報を得る方法であり，投射する光の波長オーダの距離分解能が得られる．このため，シリコンウエハなどの平面度測定など微細な計測には有用であるが，一般に除振などの配慮が必要で，本研究で対象とする自動車生産工程の検査には適用が難しい．

2.2 三次元視覚センサの基本検出方法

上述した各種の三次元情報の検出方法の現状と課題を踏まえ，本研究では，スリット光投影法を基本検出原理として三次元視覚センサを開発する．自動車生産工程における検査という観点から，スリット光投影法の利点を整理して示すと

1)アクテイブステレオ法であり，受動ステレオにおける対応点決定などの不確実さがない．

2)テレビカメラで得る画像には，一本のスリット画像が撮像されているのみであり，比較的簡単な電子回路により実時間の三次元情報検出が行える．また，スリット光を走査して対象物表面全体の三次元情報を得る場合も，同じ理由により実時間の三次元情報検出が比較的容易に行える．

3)スリット光に沿った多数点の三次元座標が検出できることは，自動車ボデーの隙間・段差などの寸法検査に極めて有利である．

4)スリット光を固定した撮像系であれば，可動部分のないシンプルな構造とできるため，実用上重要な長期信頼性に優れたセンサが実現できる．

などである．

以下，第３章，第４章において，スリット光投影法を用いて開発した三次元視覚センサについて述べる．

第3章　スリット光走査型三次元視覚センサ

本章では，三次元対象物の表面全体の三次元座標を高速に測定することを目的に開発したスリット光走査型三次元視覚センサについて論ずる．このセンサは，従来のスリット光走査型の三次元視覚センサでは不可能であったリアルタイムの座標検出を実現することをねらいとしている．リアルタイムの座標検出は，スリット光を連続走査し，この走査と同期して，専用ハードウエアにより座標演算を行うことで実現する．スリット光の1回の走査時間は490msecで，この走査期間内に49枚のスリット光画像を撮像し，この画像から48点×50点の三次元座標を検出する．試作したセンサは，センサから100cm離れた位置の約60cm×60cmの範囲の対称物の三次元座標を精度±2cmで検出できる．また，リアルタイムで距離画像の生成ができることも示す．

3.1　まえがき

生産工程における部品の組立てあるいは選別などの自動化においては，3次元対象物の全体形状（あるいは表面全体の三次元座標）をできるだけ高速に求めることが要望される．対象物の全体形状の高速計測には，第2章で述べたようにスリット光投影法が1つの有力な方法である．スリット光投影法は，これまで主に三次元対象物の認識アルゴリズムの研究のための，三次元座標の計測ツールとして使用されてきた．このため，計測の高速化を主体にした研究は少ない．ただ，大島ら報告の中に，計測時間を短縮するためのハードウエアについての記述がある［Ohshima 73］．このハードウエアは，汎用計算機を用いた三次元物体の認識装置の三次元座標入力部の一部分として開発されたものである．この座標入力部は，スリット光を決められた角度ごとに順次投射し，対象物全体の三次元座標を検出するものである．上記ハードウエアは，投射されたスリット光の対象物上の位置をテレビカメラの画像からリアルタイム検出するためのものである．しかし，スリット光を断続的に走査し，さらにスリット光位置からの三次元座標の算出にソフトウエアを用いているため，対象物全体の座標入力に数分の長い時間を要している．

そこで，スリット光投射法を用いて高速，特にリアルタイムで三次元座標検出を行うことをねらいに新しい三次元視覚センサ［Ozeki 85,86a］を試作した．このセンサは，スリット光を連続走査しながら，この走査と同期して，専用ハードウエアによりテレビカメラ出力の処理を行う．これにより，スリット光の走査の開始と同時に、三次元座標の計測を開始し、スリット光の走査が完了した時点に全ての計測を終了するリアルタイム計測を実現している．

ここでは，試作したこのセンサ（以下では，このセンサをスリット光走査型三次元視覚センサと呼ぶ）の設計、構成、性能について述べる．

3.2 センサの設計

3.2.1 三次元座標検出法

始めに、スリット光投影法の三次元座標の測定原理を図3-1により説明する．図の直交座標系において、テレビカメラのレンズ中心を座標原点Oに置き、このOからX軸上で距

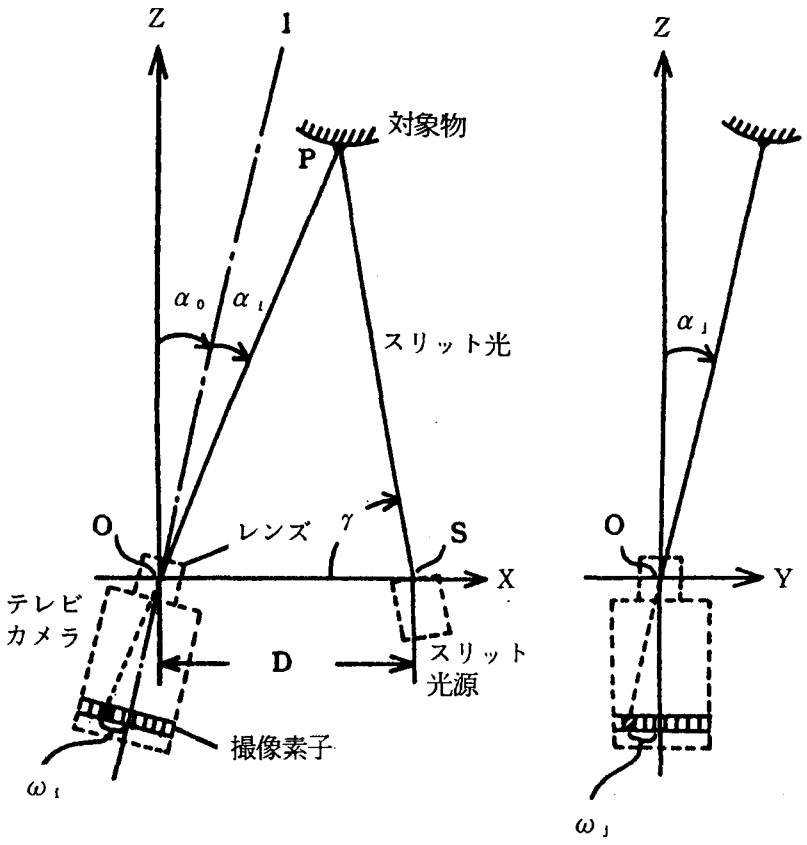


図3-1　スリット光投影法の座標測定原理

離D（基線長という）だけ離してスリット光源の出射点Sを設置する．この系において、光源から対象物にスリット光を投射したときの、対象物上の点Pの三次元座標について考える．

レンズ光軸1の傾きをα_0，スリット光の投射角度をγ、点Pで反射した光のレンズ中心Oへの入射角度をα_i，α_jとする．また，点Pの撮像素子上の位置（以下，スリット光位置という）をω_iとω_jとすると、点Pの三次元座標（X，Y，Z）は、レンズの収差がないとした場合、次式で表される．

$$X = D\tan(\alpha_0 + \alpha_i) / (\cot\gamma + \tan(\alpha_0 + \alpha_i)) \quad (3\text{-}1)$$

$$Y = D\tan\alpha_j / (\cot\gamma + \tan(\alpha_0 + \alpha_i)) \quad (3\text{-}2)$$

$$Z = D / ((\cot\gamma + \tan(\alpha_0 + \alpha_i)) \quad (3\text{-}3)$$

ただし、

$$\alpha_i = \tan^{-1} a_i\omega_i \quad (3\text{-}4)$$

$$\alpha_j = \tan^{-1} a_j\omega_j \quad (3\text{-}5)$$

$$ここで、a_j = b_3 / (b_1 + b_2\omega_i \sin\alpha_0) \quad (3\text{-}6)$$

である．(3-4) 式のa_iは、レンズの焦点距離と撮像素子の素子間隔などで決まる定数である．また、(3-5) 式のa_jは、(3-6)式に示すようにスリット光位置ω_iとレンズ光軸の傾き角α_0に関係する係数である(なお，b_1, b_2, b_3 は、レンズの焦点距離、撮像素子の素子間隔などで決まる定数)．

(3-1) ～(3-3) 式において、D，α_0は定数，α_iはω_iの関数，α_jはω_i，ω_jの関数

であるので、撮像素子上のスリット光位置ω_iとω_jおよびスリット光の投射角γを検出すれば、対象物上の点Pの三次元座標（X，Y，Z）を得ることができる．

対象物表面全体の三次元座標は、まず、スリット光によってできる対象物表面の光切断線上の各点の座標を求め、つぎに、投射角γを変えてスリット光を順次微小距離だけ移動させて各点の座標を演算し、この操作を対象物全体について行なうことで測定する．

3.2.2 リアルタイム座標検出

試作するセンサは，49画素（水平）×50画素（垂直），フレーム時間（1画面の撮像時間）10msecのテレビカメラを用いて設計する．また，スリット光を走査して測定する座標の点数は，このテレビカメラの画素数に対応させた水平方向48点（以下，X方向という）×垂直方向50点（以下，Y方向という）とする．

スリット光投影法を用いて，上記点数の三次元座標をリアルタイムに検出するために，このセンサではスリット光を高速に連続走査し，この走査と同期させて専用ハードウエアによる座標演算を実行する．

図3-2は，リアルタイムに三次元座標を検出するためのセンサの基本構成である．センサは，スリット光投射部とテレビカメラを含む撮像ヘッド，スリット光走査制御部および信号処理部で構成される．スリット光走査制御部の指令によって，スリット光は対象物上を490msecで走査される．この1回のスリット光走査の間に，テレビカメラが撮像した49枚の画像について信号処理部で実時間演算が行われ，対象物上の48点（X方向）×50点（Y方向）の三次元座標が検出される．座標検出に要する時間は，1点の検出に必要な時間が200μsecであるので，48点×50点全体で490msecとなる．

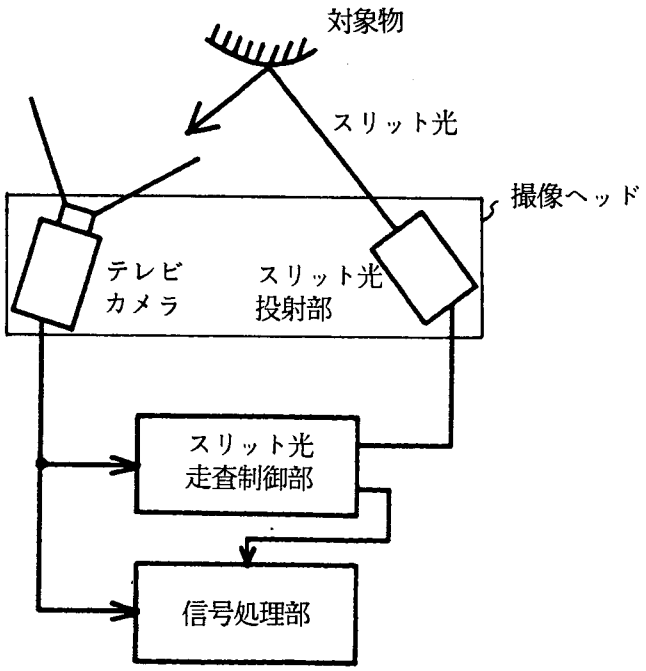


図3-2　三次元視覚センサの基本構成

3.3 センサの構成

3.3.1 全体構成

図3-3に試作したセンサの全体構成を，**図3-4**にセンサ各部の動作タイムチャートを示す．このセンサは，テレビカメラとスリット光投射部からなる撮像ヘッド，スリット光走査制御回路からなるスリット光走査制御部，スリット光位置検出回路と座標演算回路からなる信号処理部，およびマイクロコンピュータで構成されている．

テレビカメラはノーインターレース走査のもので，前述したように10msec（＝フレーム時間．ノーインターレース走査のため，垂直走査時間も10msec）で1回の撮像が行われる．この1回の撮像時間内に200μsecの周期で水平走査が50回行われ，それぞれの水平走査において，撮像素子の水平方向の49画素が2μsecの周期でサンプリングされる．

スリット光は，初期状態では投射角γ＝58°に固定されている．マイクロコンピュータから座標測定の命令が出力されると，スリット光はテレビカメラの垂直同期信号をトリガ信号として対象物上を投射角＝88°まで，所要時間490msecで走査される．

この1回のスリット光走査の間に，テレビカメラは49回の撮像を行う．1回の撮像が行われている間に，撮像素子上の垂直方向の50点のスリット光位置がスリット光位置検出回路で検出され，検出と同時にその点の座標が座標演算回路で計算される．この操作が1回のスリット光走査の間に49回繰り返され，その結果，対象物上の48点（X方向）×50点（Y方向）の三次元座標が検出される．

X方向の座標検出点数がテレビカメラの撮像回数49回に比べ1だけ少ないのは，第1フレームの信号は，スリット光が走査される以前の信号を含んでいるため計算に用いないからである．

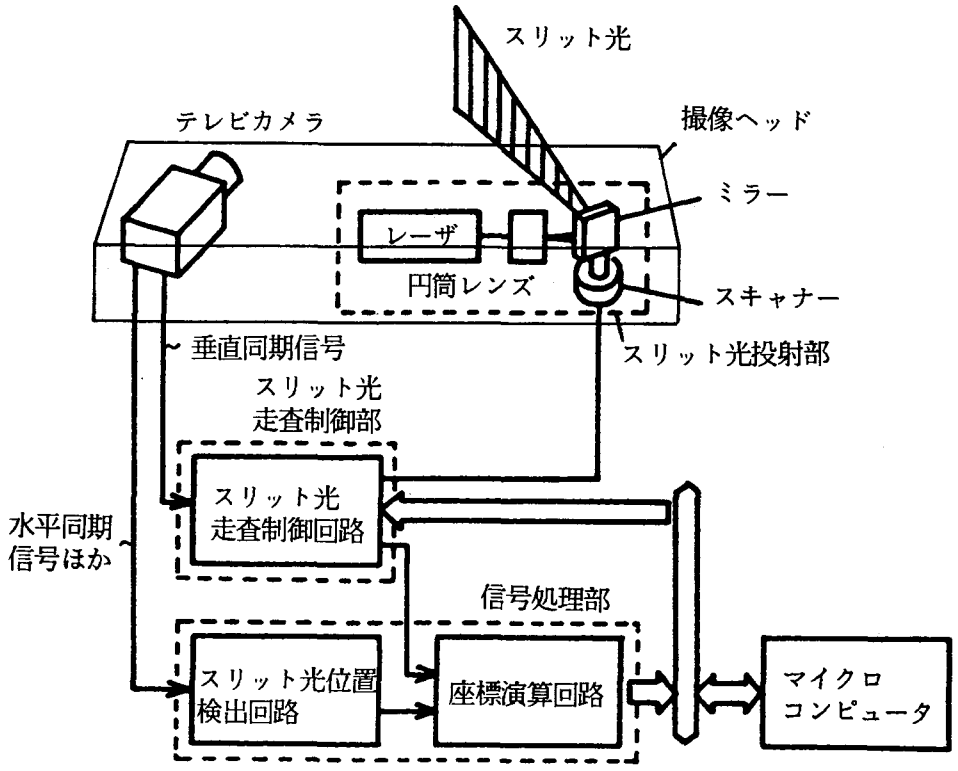


図3-3　三次元視覚センサの全体構成

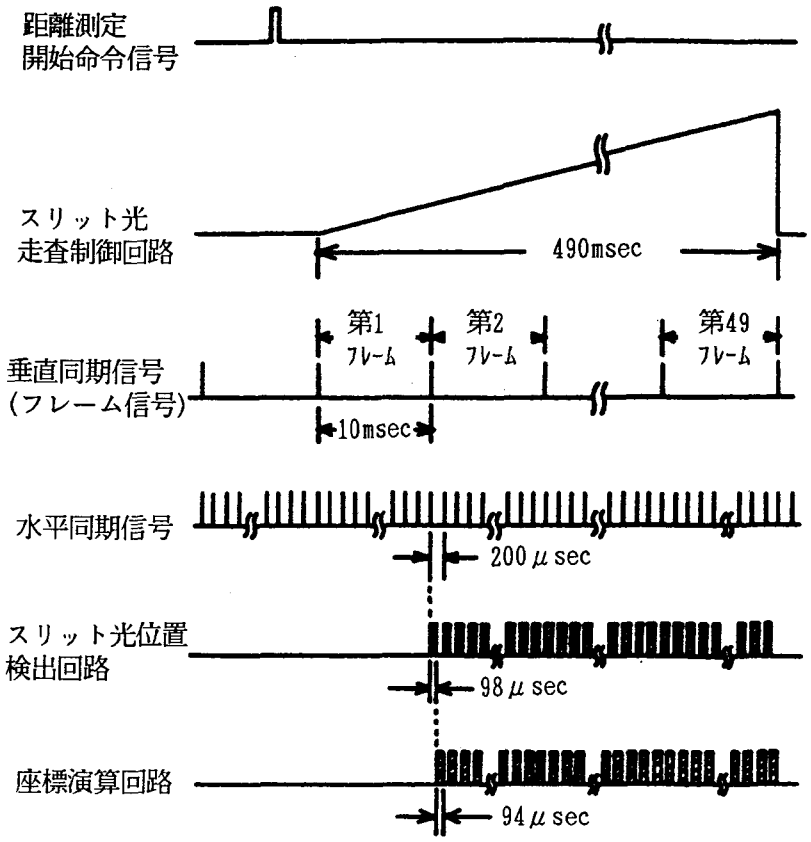


図3-4　三次元視覚センサの各回路の動作タイミング

図3-5は，試作センサの動作をフローチャートにまとめたものである．水平同期信号検出から座標演算までは200μsecで実行され，これが48回繰り返されて48点（X方向）×50点（Y方向）の三次元座標が検出される．

3.3.2　撮像ヘッド

図3-3に示すように，撮像ヘッドはスリット光投射部とテレビカメラで構成されている．スリット光投射部において，He-Neレーザのスポット光が円筒レンズで変換されてスリット光が作られる．このスリット光がガルバノメータスキャナに取り付けられたミラーにより反射され対象物に投射される．

この撮像ヘッドの基線長(図3-1参照)は56cm，レンズ光軸の傾き角α_0は12°である．また，式(3-4),(3-5)における定数ai, b_1, b_2, b_3は，それぞれ0.012, 0.10, 8.50, 0.10である．

3.3.3 スリット光走査制御部

図3-6に，スリット光走査制御部を構成するスリット光走査制御回路の回路図を示す．マイクロコンピュータからの座標検出開始信号でフリップフロップはリセットされる．テレビカメラから垂直同期信号が入るとフリップフロップはセットされ，その出力信号でガルバノメータスキャナーを駆動するためのランプ信号発生器が動作し，スリット光の走査が開始される．カウンタで垂直同期信号が49回数えられるとランプ信発生器が停止し，スリット光の走査は停止される．１回のスリット光の走査の所要時間は490msecである．

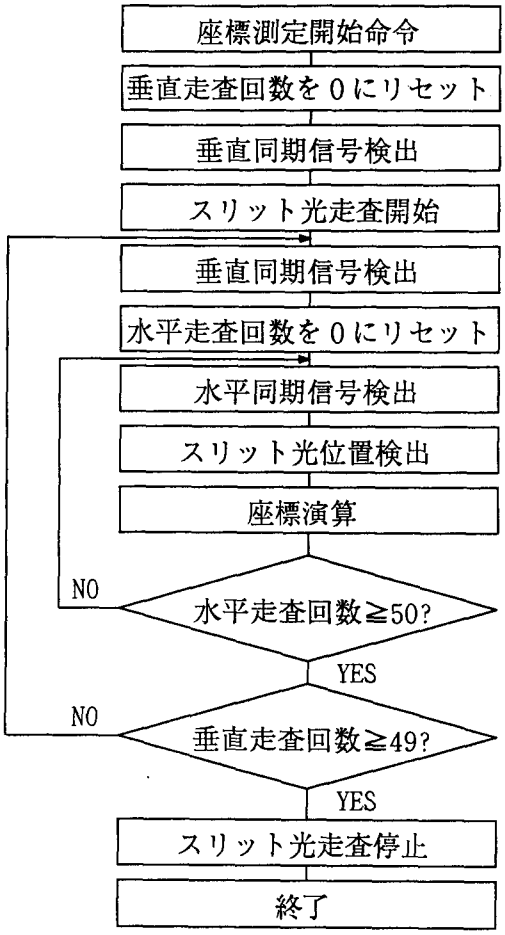


図3-5　三次元視覚センサの動作フロー

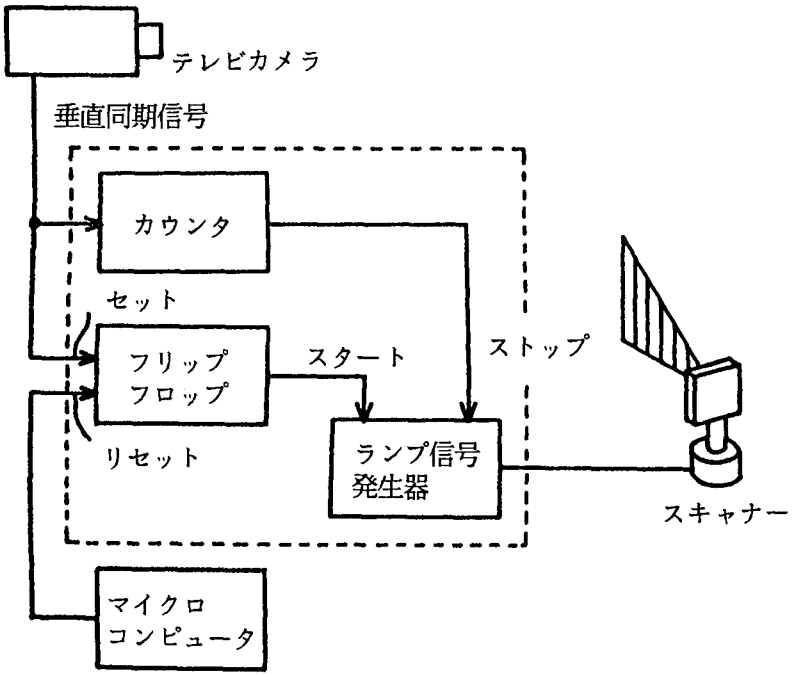


図3-6　スリット光走査制御回路

3.3.4 信号処理部

1) スリット光位置検出回路

図3-7に，スリット光位置検出回路を示す．この回路では，スリット光位置をS/Nよく得るために，テレビカメラの映像信号に含まれる雑音のレベルよりやや高い値（1.5～2倍の値）にしきい値が設定される．映像信号がこのしきい値を超えた瞬間に，テレビカメラのサンプリング信号を計数しているカウンタ１の計数内容がレジスタ１に記憶され水平方向のスリット光位置ω_iとして出力される．これと同時に，テレビカメラの水平同期信号を計数しているカウンタ２の計数内容がレジスタ２に記憶され垂直方向のスリット光位置ω_jとして出力される．１点のスリット光位置を検出する時間は，テレビカメラが水平方向の49画素をサンプリングする時間98μsecと帰線時間102μsecの和となり200μsecである．また，垂直方向に50点のスリット光位置を検出する時間は，200μsecの50倍の10msecである．

2) 座標演算回路

座標演算回路は，スリット光位置検出回路で得られたスリット光位置ω_i，ω_jに対応する三次元座標を，テレビカメラの帰線時間102μsec内に計算するための回路である．**図3-8**にその回路図を示す．この座標演算は座標演算用コントローラ（以下，コントローラという）にあらかじめ記憶されているプログラムに従って実行される．スリット光位置ω_i，ω_jが検出されると，スリット光位置検出回路からコントローラに座標演算のスタートパルスが入力され，コントローラに記憶されている制御信号が，乗除算器，ＲＡＭおよびスイッチ群に入力され前述の式(3-1)～(3-3)の演算が実行される．座標演算結果は，ＲＡＭに出力される．式(3-1)～(3-3)の演算プログラムのステップ数は188ステップである．こ

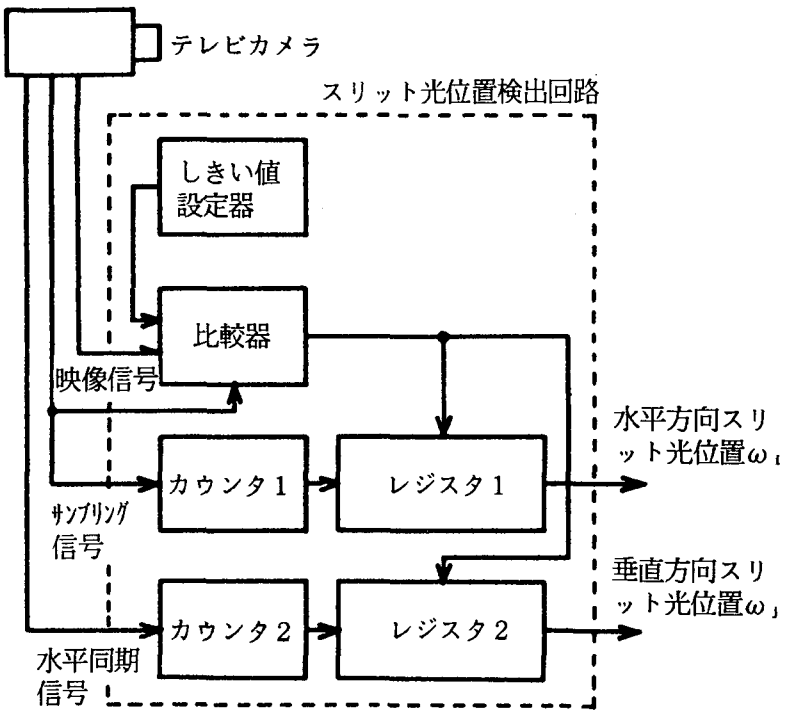


図3-7　スリット光位置検出回路

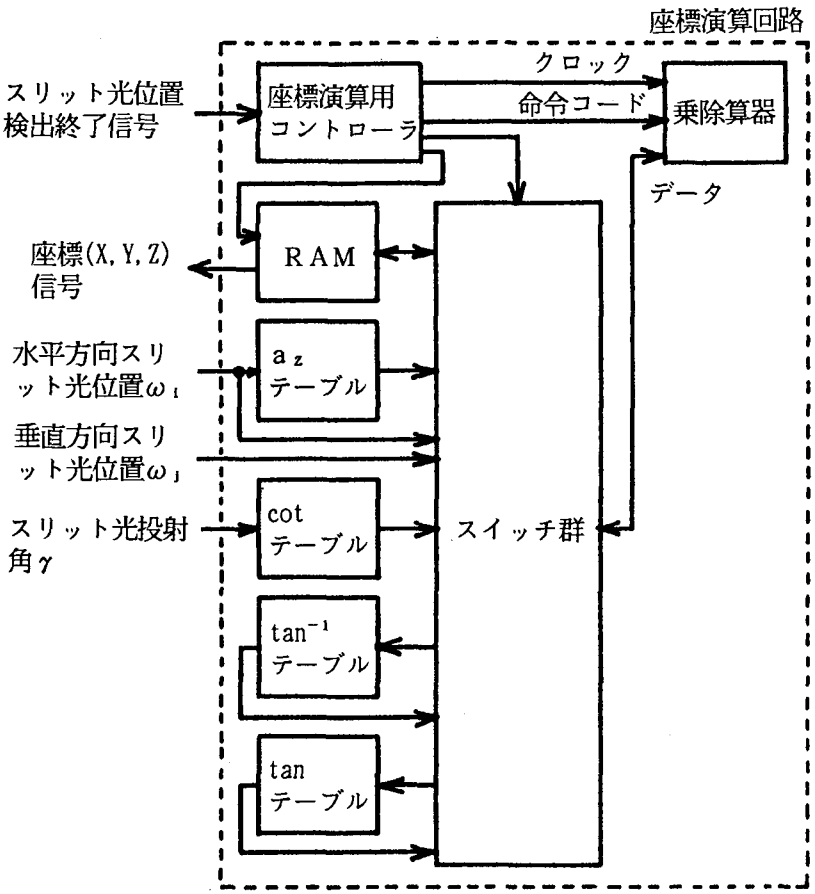


図3-8　座標演算回路

の演算に要する時間は，１ステップの処理時間が0.5μsecであるので，全部で94μsecである．上記コントローラと乗除算器には，専用IC（MMI社S516）を用いている．

3.4 センサの性能と実験例

3.4.1 センサの性能

試作したセンサの性能を表3-1に示す．

このセンサの測定範囲は，図3-9に示すようにスリット光投射部よりテレビカメラ側がやや小さい底辺長をした台形となる．その大きさはセンサの測定ヘッドからＺ方向に70cmの距離で25.4cm（Ｘ方向）×40.7～43.6cm（Ｙ方向），100cmの距離で60.2cm（Ｘ方向）×55.3～62.3cm（Ｙ方向）である．測定範囲が台形となるのは，図3-1においてテレビカメラの光軸が傾きα_0を持つために，3.2.1で述べた計数a_2が水平方向のスリット光位置ω_1によって変化するためである．

上記測定範囲における座標測定精度は，Ｚ方向距離が100cmにおいて，Ｘ座標が±1.2cm，Ｙ座標が±1.8cm，Ｚ座標が±2cmである．この測定精度は図3-10の実験系において，ＸＹ平面に平行に立てた平坦なスクリーンを移動させて求めたものである．スクリーン全体には無反射紙が貼られており，測定点にのみ1cm四方の拡散反射紙が貼られている．測定点は，測定範囲である台形形状の４頂点とその中点および台形の中心点の９点である．Ｚ方向精度は，スクリーンを撮像ヘッドから97.5cmから100.5cmまで0.5cm間隔で移動させ，

表3-1　三次元視覚センサの性能

測定範囲	Z=100cmのとき 60.2cm（X）×55.3～62.8cm（Y） Z=70cmのとき 25.4cm（X）×40.7～43.6cm（Y）
測定精度	Z=100cmのとき ±1.2cm（X） ±1.8cm（Y） ±2.0cm（Z）
測定点数	48(X)×50(Y) 点
測定時間	490msec

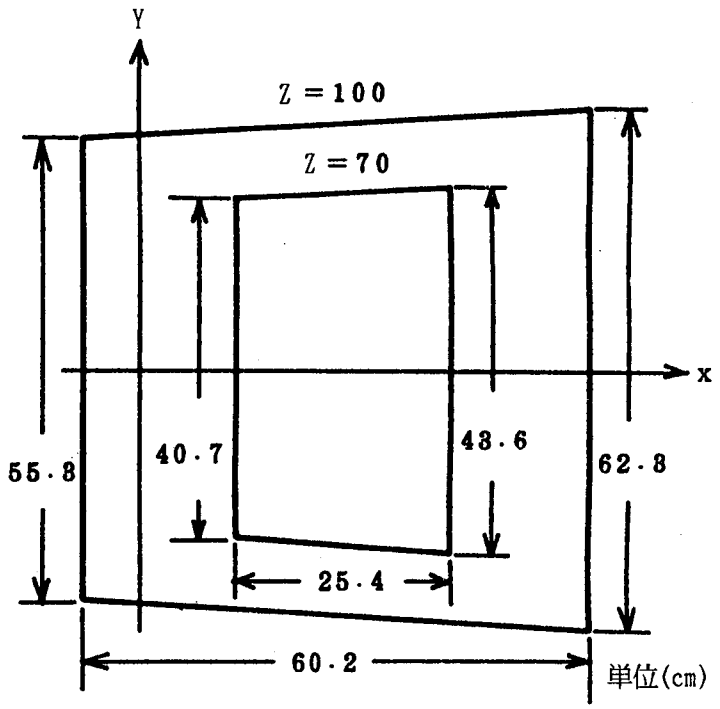


図3-9　三次元視覚センサの測定範囲

各距離における設定距離と測定値の差として求めた．図3-11はその実測結果である．これより±2cmの精度でZ座標が測定できることが分かる．また，X方向とY方向については，Z＝100cmにおいて，スクリーンをそれぞれの方向に0.5cm間隔で±3cm移動させて測定したものである．X座標，Y座標の測定精度は，それぞれ±1.2cm，±1.8cmであった．また，三次元座標の測定点数は48点（X方向）×50点（Y方向），測定時間は490msecである．

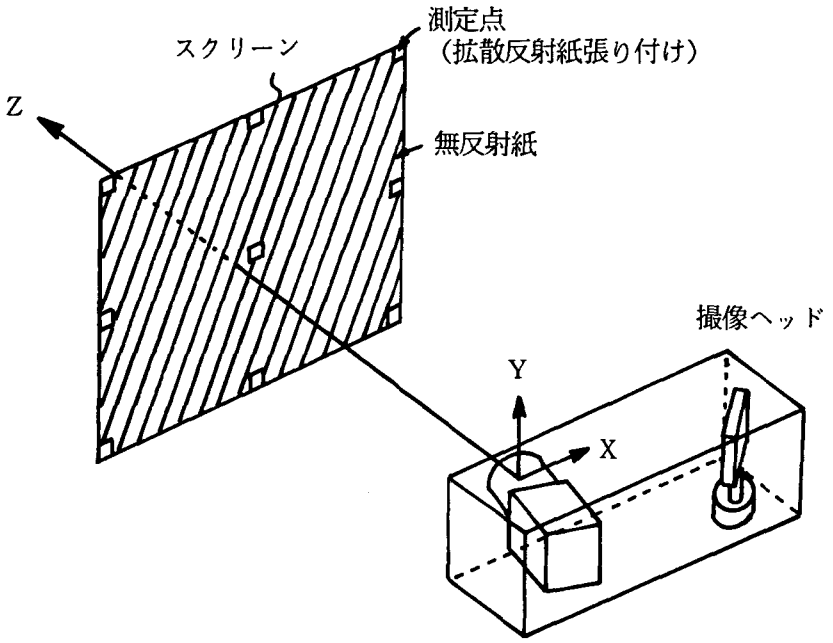


図3-10　精度測定のための実験系

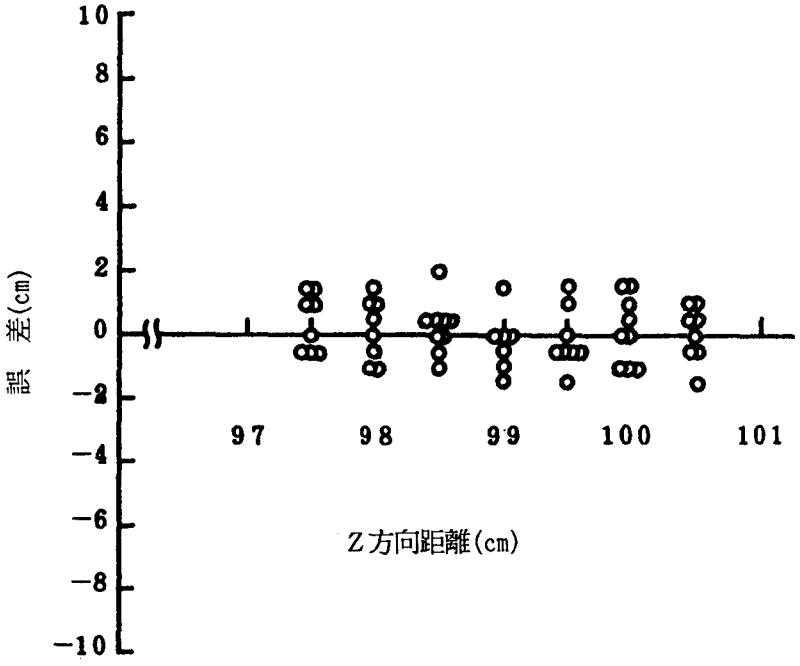


図3-11　三次元視覚センサの座標測定精度（Z座標）

3.4.2　実験例

試作したセンサの機能を確認するために，センサにより対象物の三次元座標を検出し，これを距離画像（奥行き方向距離を輝度で表した画像）化する実験を行った．

図3-12は，この実験のためのシステム構成である．このシステムは，前述の視覚センサと画像メモリおよびCRTデイスプレイで構成される．視覚センサで検出された三次元座標は，Z座標が輝度に変換されて画像メモリに記憶され，その結果がCRTデイスプレイに表示される．視覚センサと画像メモリはマイクロコンピュータのバスラインで直結されており，座標検出から輝度変換および画像メモリへの記憶を含めて１点の座標の処理はテレビ

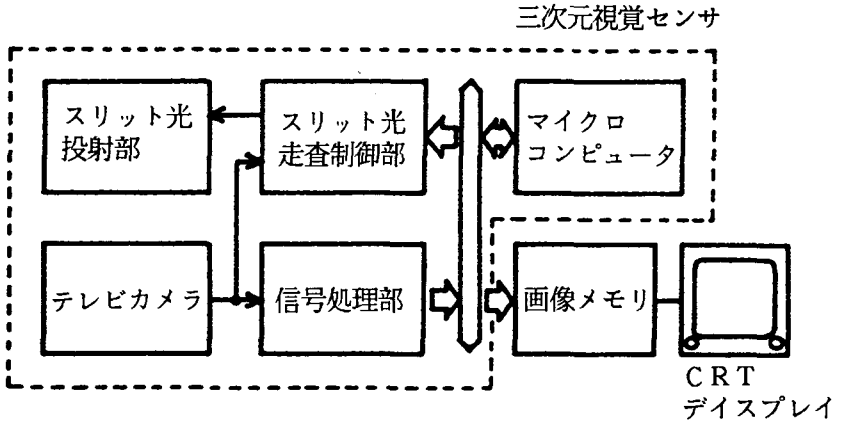


図3-12　距離画像化のための実験システムの構成

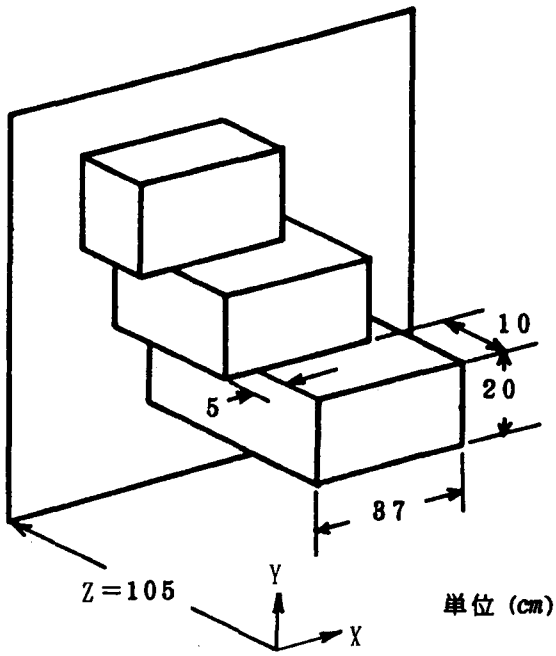


図3-13　距離画像化実験の対象物

カメラの水平走査時間の200μsec以内に行われる．

図3-13は，実験に用いた対象物である．対象物はスクリーンと図示した大きさの３個の発砲スチロール（Ｘ，Ｙの寸法は３個とも同一）の直方体の組合せである．

図3-14は，センサ前端から105cm離れた位置に，前記対象物のスクリーン面を設置したときの距離画像の検出結果である．この距離画像はスリット光の走査と同時にリアルタイムに検出・表示される．この距離画像は近い距離ほど明るい輝度で表示している．この実験から，試作したセンサによりリアルタイムで対象物の三次元座標が検出できることが確認できた．

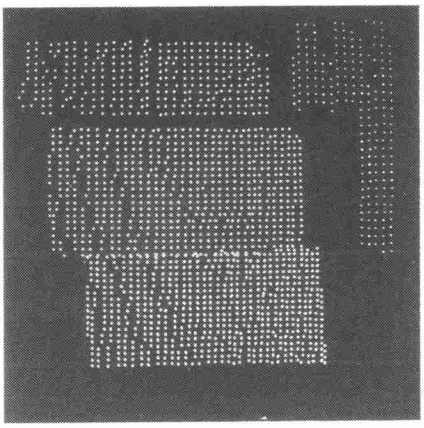


図3-14　検出された距離画像

3.5 まとめ

三次元対象物の表面全体の三次元座標をリアルタイムに検出することをねらいに，スリット光走査型三次元視覚センサを試作した．

従来のスリット光走査型三次元視覚センサではスリット光を非連続に走査し，かつ，必要な三角測量の計算をソフトウエアにより行っているため，リアルタイムの座標検出が不可能であった．

試作したセンサではこの課題を解決するために，スリット光を連続走査し，この走査と同期して，専用ハードウエアにより座標演算を行うことでリアルタイムの三次元座標検出を実現した．

このセンサではスリット光を490msecで連続走査し，この走査期間内に48点（Ｘ方向）×50点（Ｙ方向）の三次元座標を検出する．使用しているテレビカメラは，画素数49画素（水平）×50画素（垂直），フレーム時間10msecである．専用ハードウエアにより，テレビカメラが１画面を撮像する10msecの間に垂直方向の50点の座標を検出し，これをスリット光走査期間の490msecの間に49回繰り返すことで，上記点数の三次元座標をリアルタイムで検出する．

試作したセンサの測定範囲は，センサから100cm離れた位置で約60cm×60cmである．このときの測定精度は±2cm（Ｚ座標）である．

また，距離画像化実験を行い，このセンサによりリアルタイムで三次元座標検出が行え

ることを確認した．

このセンサの試作により，スリット光投射法を用いて，対象物全体の座標検出をリアルタイムに行えることを示した．今回の試作ではテレビカメラに画素数の少ないものを用いたが，300画素(水平)×250画素(垂直)，撮像時間1/60secのテレビカメラを用いれば，この方法により，300点（X方向）×250点（Y方向）の三次元座標を5secで検出できる三次元視覚センサが実現可能である．

第4章　スリット光固定型三次元視覚センサ

本章では，自動車の生産工程における検査への適用をねらいに，高速，高精度，対象物の表面性状の影響を受けにくい，そして小型・軽量を考慮して開発したスリット光固定型型三次元視覚センサについて論ずる．高精度化については，重心計算によるスリット光画像中心位置の検出とルックアップテーブルによるレンズ歪補正により，高速計測については，専用ハードウエアによるパイプライン処理によりその実現を図っている．また，表面性状の影響については，その反射率に応じてスリット光の投射強度が設定できるように，スリット光反射強度検出回路などを設け，さらに，半導体レーザと小型テレビカメラを用いた小型・軽量化と，可動部品を用いない構造により長期の信頼性確保を図っている．開発したセンサは，当初の目標を満足する性能を得ることができ，応用システム開発の強力なキーデバイスになると考えられる．

4.1　まえがき

自動車あるいは自動車部品の生産工程においては、三次元対象物の寸法や形状の非接触検査を行いたいという要望が非常に強い．このような検査には，例えば，自動車ボデーの建付け（ドアとドア間などの隙間と段差）[Ozeki 91a,92a][Wilson 85]やボデーを構成しているパネルの寸法の検査[Ozeki 92b]，あるいはエンジン部品などの長さや穴径などの検査がある[Levine 83] [Ozeki 91b]．

このような検査を非接触で行うための三次元視覚センサには，まず，その計測精度として±0.1mm程度が必要とされる場合が多い．自動車ボデーの場合でも，その全体は数mと大きいが，品質管理が行われる部位の寸法は数mmと小さく（例えば，ドアとドアの隙間の標準寸法は3mm前後），前述の計測精度が要求される．次に，製造ラインで使用するためには，生産性の点から計測の高速性が当然要求される．また，各種の対象物を検査するため，それらの表面性状に影響を受けないことも重要である．加えて，小型・軽量であることと長期的な信頼性の高いことも実使用では必須である．

このような検査には，第3章で述べたスリット光を走査するタイプのセンサを含め対象物全体の三次元座標を検出するタイプのセンサ［Sato 85a］,[Ozeki 86a]では，センサの視野を対象物全体に設定するため計測精度が不十分であったり，センサが大型になるなど適用が難しい．また，スポット光投射型センサを用いて，自動車ボデーの全長、全幅などを測定した例［Samamoto 87］もあるが、センサの移動・位置決めに時間がかかるという課題がある．

これらに対し，固定したスリット光を投射して，対象物の一切断面を検出するタイプのセンサ（以下，このタイプのセンサをスリット光固定型三次元視覚センサという）は，その視野を寸法測定部位の大きさに設定することで，必要な精度を確保しやすいことや，構造が簡単で小型化しやすいため，自動車ボデーやパネルのように測定部位が広い範囲に分布している場合にも，センサをその部位にアクチェータで位置決めすることで測定が行えるなど適用範囲が広いと考えられる．さらに，一切断面に沿った多数の三次元座標データが得られることは，隙間や段差あるいは穴径などの寸法を得るのに極めて有利である．

スリット光固定型三次元視覚センサの開発例には，船舶用スクリュウの形状を測定する

[Livingston 87] ためのセンサ [Rioux 84] がある．これは，レーザスポット光をミラーで線状に走査するセンサで，死角が少ない特徴を持っている．しかし、可動部品である回転ミラーを持つため，長期の信頼性に課題があると考えられる．

そこで，上記の要求に対応するため，新しくスリット光固定型三次元視覚センサを開発した[Ozeki 87]．このセンサは，可動部品を持たない構造をしており，高精度で高速に三次元座標検出が行える．

以下では，このセンサの設計、構成、キャリブレーション，および性能について述べる

4.2 センサの設計

図4-1に開発したスリット光固定型三次元視覚センサの光学系を示す．この光学系は，第３章の図3-1で，スリット光の投射角度γを90°に固定した系に相当する（ただし，座標原点位置をスリット光源の出射点に変更している）．このとき，対象物上の点Ｐの三次元座標（Ｘ，Ｙ，Ｚ）は，次のように表される．

$$X = 0 \qquad (4\text{-}1)$$

$$Y = D \tan\alpha_j \,/\, \tan(\alpha_0 + \alpha_i) \qquad (4\text{-}2)$$

$$Z = D \,/\, \tan(\alpha_0 + \alpha_i) \qquad (4\text{-}3)$$

ただし，

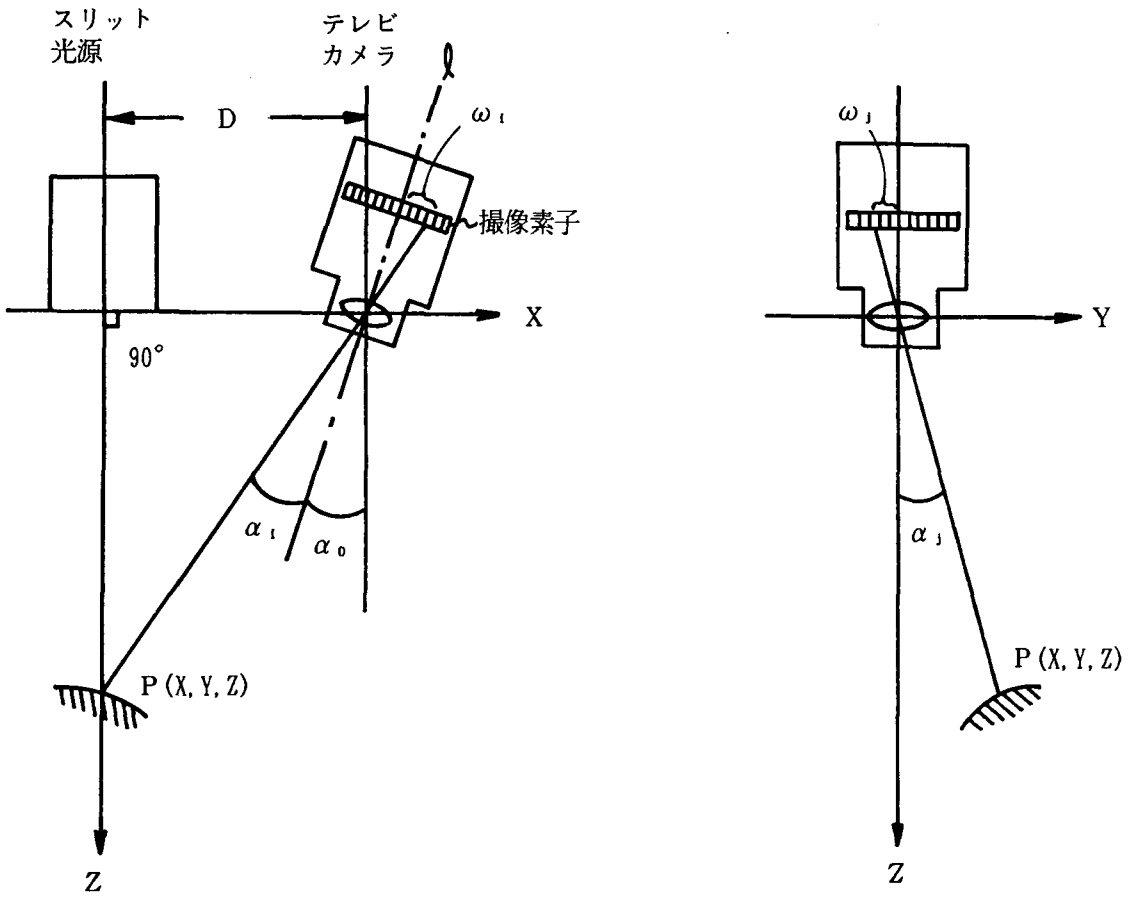


図4-1　スリット光固定型三次元視覚センサの光学系

$\alpha_i = \tan^{-1}\ \omega_i a_i$ (4-4)

$\alpha_j = \tan^{-1}\ \omega_j a_j$ (4-5)

ここで，Xが常にゼロとなるのは，スリット光平面をＹＺ平面に一致するように設定しているからである．工業用には，このような座標系が使い勝手がよい．この光学系において，三次元座標の高精度検出方法、高速検出方法、対象物の表面正常の影響の低減方法、および撮像ヘッドのコンパクト化について述べる[Ozeki 87]．

4.2.1　三次元座標の高精度検出

図4-2にテレビカメラで観測したスリット光画像を示す．この画像からの三次元座標の検出は、テレビカメラの水平走査線ごと（各ω_jごと）に、スリット光画像の中心位置を検出し、この値について三角測量計算を行なって求める．三次元座標を高精度に検出するには、このスリット光画像の中心位置を精度よく検出することが必要である．また、三角測量の計算において、テレビカメラのレンズ歪みについて対処することも高精度化に重要である．このセンサでは、この二点について以下のような設計を行い高精度を得るようにしている．

1）重心位置計算によるスリット光画像中心位置検出

図4-3は、スリット光画像の水平走査線に沿った輝度分布を示したものである．輝度分布は、この図のようにガウス分布に近い形となる．これは、後述するように、このセンサのスリット光源には半導体レーザを用いており、その発光パターンがガウス分布となるた

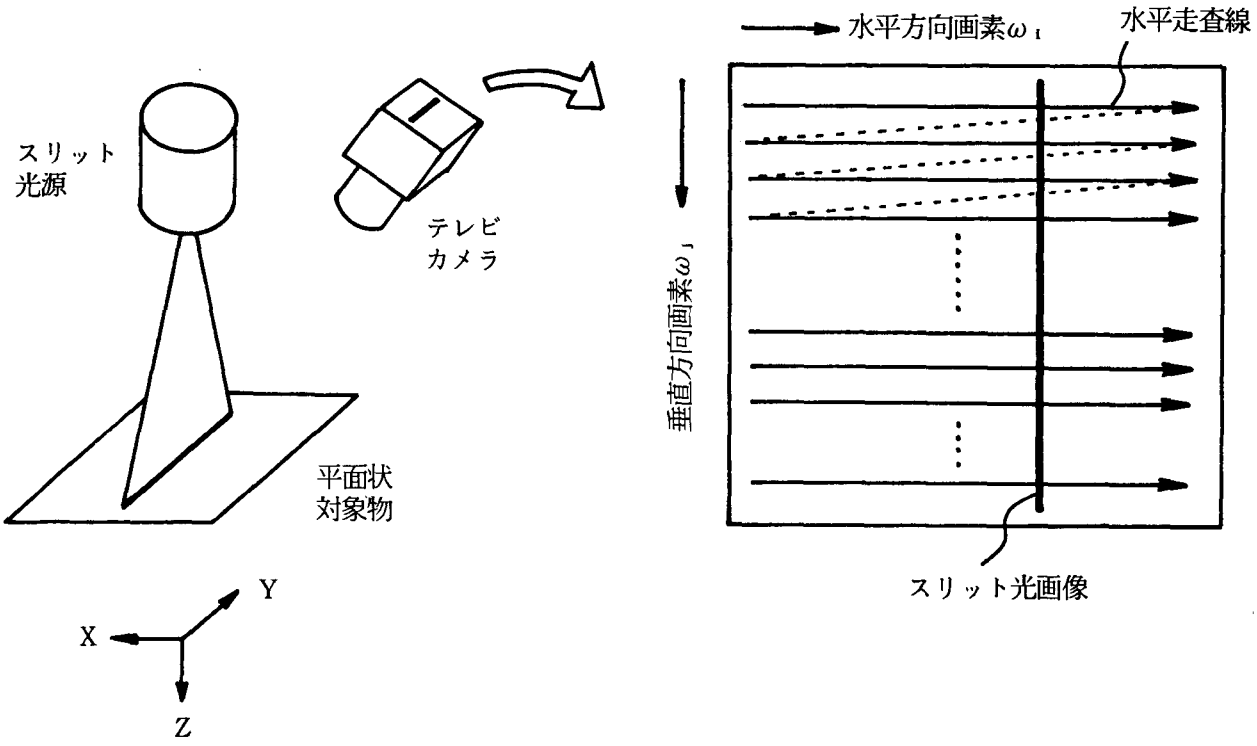


図4-2　テレビカメラで観測したスリット光画像

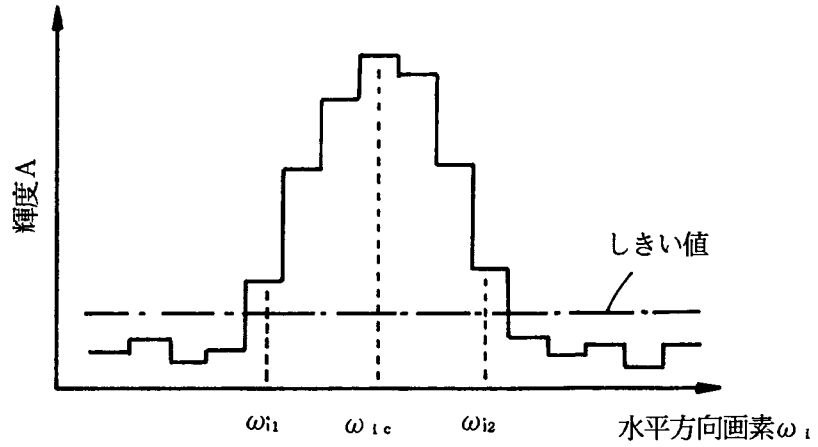


図4-3　スリット光画像の水平方向の輝度分布

めである．この図の横軸はテレビカメラの水平方向画素（ω_i）である．このような輝度分布について，その中心位置（ω_{ic}と表す）を求めるのに、しきい値を設けて輝度分布の両端の画素(ω_{i1}, ω_{i2})を求め，(4-6)式による単純平均を得たのでは、分解能は1/2 画素に制限されてしまい高精度の座標検出は難しい．

$$\omega_{ic} = (\omega_{i1}+\omega_{i2}) / 2 \qquad (4\text{-}6)$$

そこで、このセンサでは、しきい値を超える輝度信号について、(4-7)式に示す重心計算を行なって、サブピクセルの分解能で中心位置を得るようにしている．

$$\omega_{ic} = \sum_{\omega_i=\omega_{i1}}^{\omega_{i2}} (A \cdot \omega_i) \Big/ \sum_{\omega_i=\omega_{i1}}^{\omega_{i2}} A \qquad (4\text{-}7)$$

なお，ここで上記のしきい値は固定値としており，テレビカメラの輝度信号に含まれる雑音レベルよりやや大きな値（1.5～2倍の値）に設定している．

2) ルックアップテーブルによるレンズの歪み補正

テレビカメラに用いるレンズには、一般に歪曲収差などの歪みがある．**図4-4**は，この歪の様子を模式的に示したもので，平面状対象物について距離Zを変えて得たスリット光画像を表している．この図のようにレンズ歪があると，撮像素子の周辺部に結像されたスリット光画像に湾曲が生じる．このため，距離Zと水平方向画素ω_iの関係は，**図4-5**に示すように垂直方向画素ω_jの大きさに依存することになる（レンズ歪がなければ，式(4-3)に示すようにZとω_iの関係はω_jに依存しない）．そこで，この歪の影響を厳密に取り除くには，各ω_j毎にZとω_iの関係式を求めることが必要になる．しかし，後述するようにこのセンサでは，計算の高速化のために，ω_iからのZの算出はリードオンリーメモリ（ＲＯＭ）で構成したルックアップテーブルを用いる．このため，各ω_j毎にZとω_iの関係をテーブル化したのでは，ＲＯＭの容量が非常に大きくなり実用的ではない．

そこで，このセンサでは，必要なＲＯＭ容量とレンズ歪の大きさを考慮して，ω_jの大きさにより幾つかのグループを作り（例えば，ω_j：0～10，11～20……），このグループ毎にZとω_iの関係式を求め，これをルックアップテーブルに書き込むことでレンズ歪を実用上問題のない範囲まで補正するようにしている．

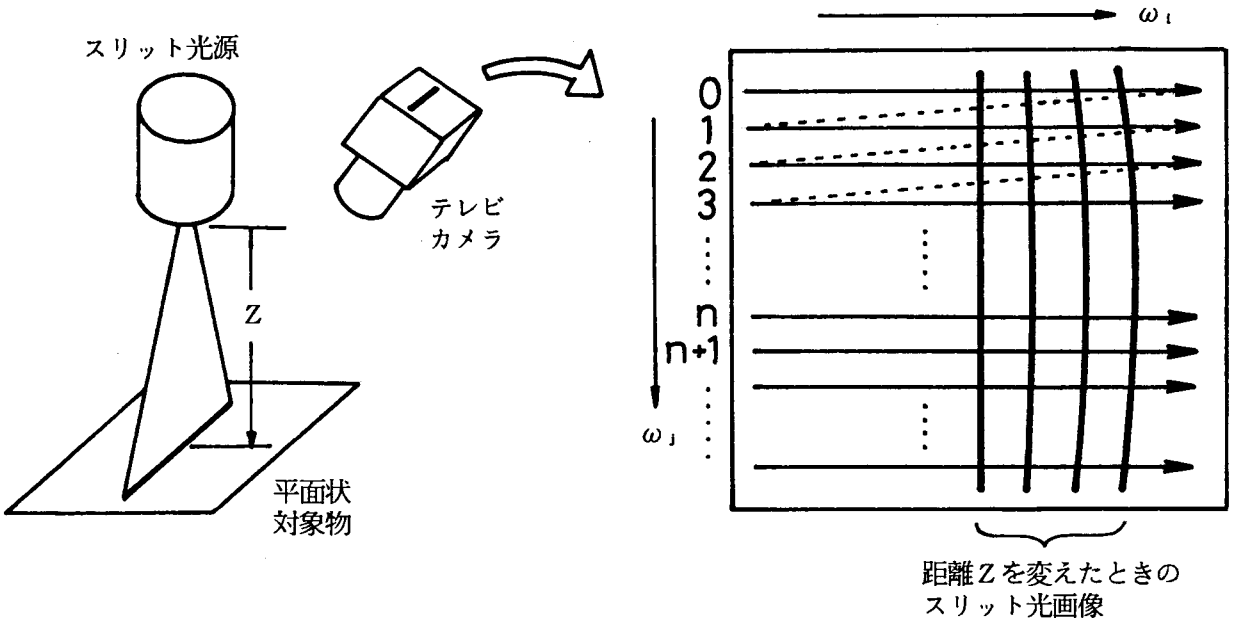


図4-4　レンズ歪があるときのスリット光画像

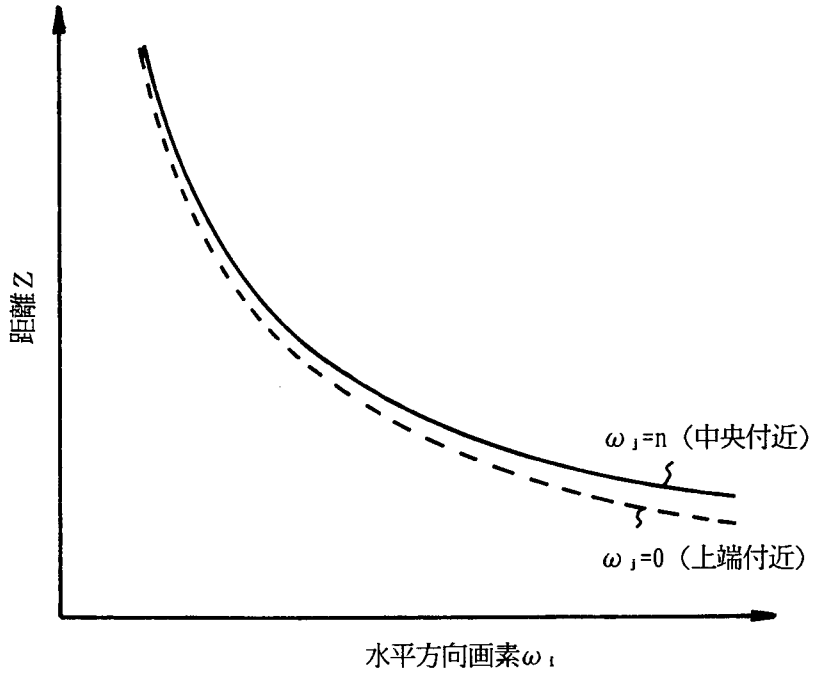


図4-5　レンズ歪があるときのZとω_iの関係

また，このレンズ歪は，Y座標とω_jの関係にも影響するため，Z座標の場合と同様にω_iをパラメタにしてYとω_jの関係式を求め，ルックアップテーブル化するようにしている．

4.2.2　三次元座標の高速検出

センサの実用化のためには，対象物の三次元座標をできるだけ高速に検出する必要がある．このため，このセンサでは，テレビカメラの水平走査時間内に1点の座標検出を行う，いわゆるリアルタイム計算を行って高速化を実現する．リアルタイム計算は，計算に時間がかかる部分の専用ハード化と，この専用ハードをパイプライン構成とすることでの見かけ上の計算時間の短縮により実現している．

1)専用ハード化による高速化

座標検出には，各水平走査線（すなわち，各垂直方向画素ω_j）毎に，$\Sigma(A\cdot\omega_i)$とΣAの積和計算，これらよりω_{ic}を求めるための$\Sigma(A\cdot\omega_i)/\Sigma A$の除算，および式(4-2)～(4-3)による$\omega_j$，$\omega_{ic}$からY，Zをもとめる三角測量計算を行う．

これらの内，$\Sigma(A\cdot\omega_i)$とΣAの積和計算はテレビカメラの水平走査方向の全画素（一般のテレビカメラの場合400～600画素）について計算する必要がある．このため，ソフトウエア処理では非常に時間がかかり，1水平走査時間内に，この計算を行うことは困難である．そこで，これらの計算はそれぞれの計算を水平走査時間内に行う専用ハードウエアを開発して対応する．

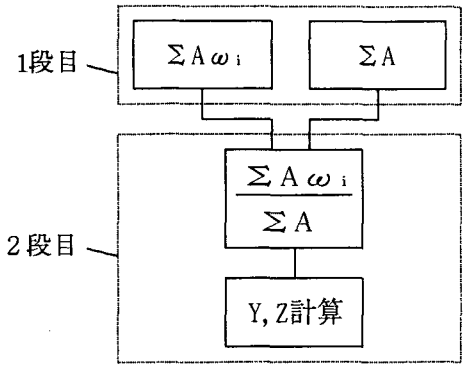
また，スリット光画像中心位置ω_{ic}からZ座標を（同時に，そのときの垂直方向画素ω_jからY座標）もとめる三角測量計算も計算時間がかかる．このため，このセンサでは，レンズ歪補正のところで述べたように，あらかじめω_iとZ，およびω_jとYの関係を求めておき，これをルックアップテーブル化しておく．ルックアップテーブルをＲＯＭにより構成することで，このＲＯＭにω_jとω_{ic}を与えれば，瞬間的（数100nsec）にY，Z座標が得られる．この時間はテレビカメラの水平走査時間（63.8μsec）に比べ極めて短い．

なお，$\Sigma(A\cdot\omega_i)$とΣAからω_{ic}を求める除算は，簡便な回路によるハードウエア化が難しいため，このセンサと接続するホストコンピュータの機能を利用してソフトウエア処理する．

2)パイプライン処理

前述したように，$\Sigma(A\cdot\omega_i)$とΣAの計算は専用ハードにより1水平走査時間で行われる．座標値を求めるには，この結果を用いた$\Sigma(A\cdot\omega_i)/\Sigma A$の除算とルックアップテーブルによるY，Zの計算が必要である．これらの計算を1水平走査時間で行うために，このセンサでは**図4-6**に示すような2段のパイプライン処理を行う．

まず，テレビカメラが$\omega_{j=n}$ラインを水平走査する時間($T\omega_{j=n}$)に，$\omega_{j=n}$ラインについて$\Sigma(A\cdot\omega_i)$とΣAの計算を行う．この結果を用い，次の水平走査時間($T\omega_{j=n+1}$)に，$\omega_{j=n}$ラインについての$\Sigma(A\cdot\omega_i)/\Sigma A$の計算とY，Zを求める計算を行い，これと同時に，$\omega_{j=n+1}$ラインについての$\Sigma(A\cdot\omega_i)$と$\Sigma A$の計算を行う．以下，このような計算を繰り返す．なお，ソフトウエア処理を行う$\Sigma(A\cdot\omega_i)/\Sigma A$の計算は，汎用のパーソナルコンピュータを用いれば，20μsec程度で実行でき，Y，Zの計算を含



処理項目＼水平走査時間	$T_{\omega_j=n-1}$	$T_{\omega_j=n}$	$T_{\omega_j=n+1}$
$\Sigma A\omega_i$, ΣA	$\omega_j=n-1$	$\omega_j=n$	$\omega_j=n+1$
$\Sigma A\omega_i / \Sigma A$, Y,Z計算	$\omega_j=n-2$	$\omega_j=n-1$	$\omega_j=n$

図4-6　パイプライン処理の方法

め，水平走査時間内に十分実行できる．このようなパイプライン処理により，見かけ上，1水平走査時間で1点の三次元座標が検出できる．

4.2.3　対象物の表面性状の影響の低減

光を投射して計測を行う場合，対象物の表面性状によらず良好な反射光が得られることが重要である．しかし，生産工程，特に，自動車関連では，普通鋼板，防錆鋼板，塗装鋼板，樹脂，ゴム，はんだ面な各種の表面性状の対象物がある．これらの表面性状は，拡散面に近いものから鏡面に近いものまであるため，その反射率や反射率の分布（偏り）が測定に影響を及ぼす場合がある．

そこで，このセンサでは，この影響を低減させるために，投射するスリット光の強度を制御する．この制御は，センサでスリット光に沿う各点の反射信号強度を検出し，この大きさが適切な値になるように投射強度を設定し直して，再投射することで行う．

4.2.4　センサの小型・軽量化

生産工程で三次元視覚センサを用いる場合，センサをロボットなどアクチェータに装着して用いることが多い．このような用い方に対応するには，センサを小型・軽量にする必要がある．開発したセンサでは，スリット光源と小型テレビカメラを小型きょう体に収納して撮像ヘッドとして一体化し，三次元座標計算のための専用ハードウエアを，別のプリントボードに実装することで，センサの小型・軽量化を図っている．

4.3　センサの構成

上記の設計に基づき三次元視覚センサを開発した．このセンサの全体構成を図4-7に示す．センサはスリット光の投射と反射光の撮像を行う撮像ヘッドと，テレビカメラの出力信号について座標計算を行う座標演算ボードからなる．撮像ヘッドはスリット光源とテレビカメラにより構成されている．座標演算ボードは，A/D変換器，スリット光画像の中心位置を精度良く検出するためのスリット光画像中心位置検出回路（重心計算回路），得られた中心位置に対応する座標値を高速に出力する座標ルックアップテーブル，対象物の表面性状の影響を受けにくくするためのスリット光投射強度設定回路とスリット光反射強度検出回路および，検出された座標値と反射強度を記憶するメモリ，およびホストコンピュ

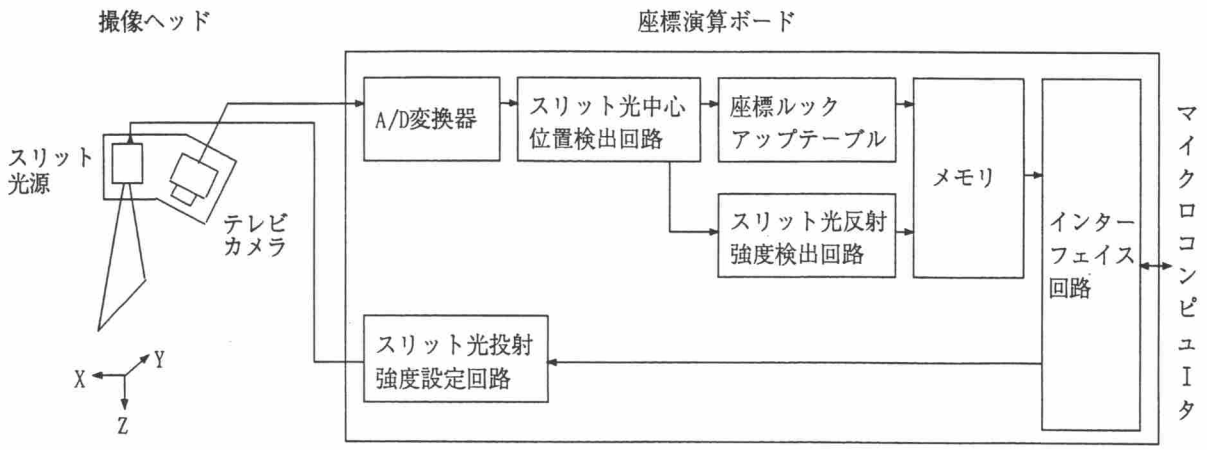


図4-7　三次元視覚センサの全体構成

ータとのインターフェイス回路からなる．

図4-8に，このセンサの外観写真を示す．座標演算ボードは，マルチバスボード2枚に収められている．以下，撮像ヘッドと座標演算ボードに分けて構成と動作を詳しく述べる．

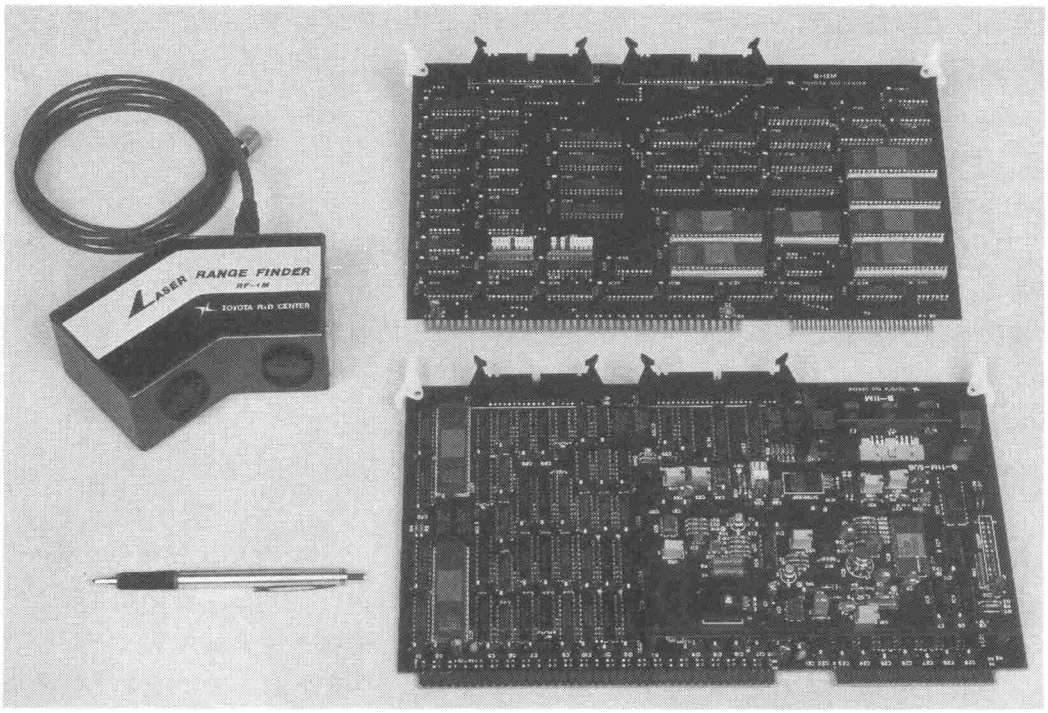


図4-8　三次元視覚センサの外観

4.3.1　撮像ヘッドの構成

図4-9に撮像ヘッドの詳細構成を示す．撮像ヘッドは，小型テレビカメラ，スリット光源，スリット光源用ドライバなどで構成され，これらがアルミニウム製ケースに収納されている．ケースの端面には，センサの座標原点を与えるための取付け基準面が設けられている．

スリット光は，半導体レーザのスポット光をコリメートレンズで平行光にした後，２個の円筒レンズで光束を広げるようにして得ている．半導体レーザの波長は，工場照明の影響を受けないように近赤外の830nmに選んでいる．この近赤外光は目視できないため，可

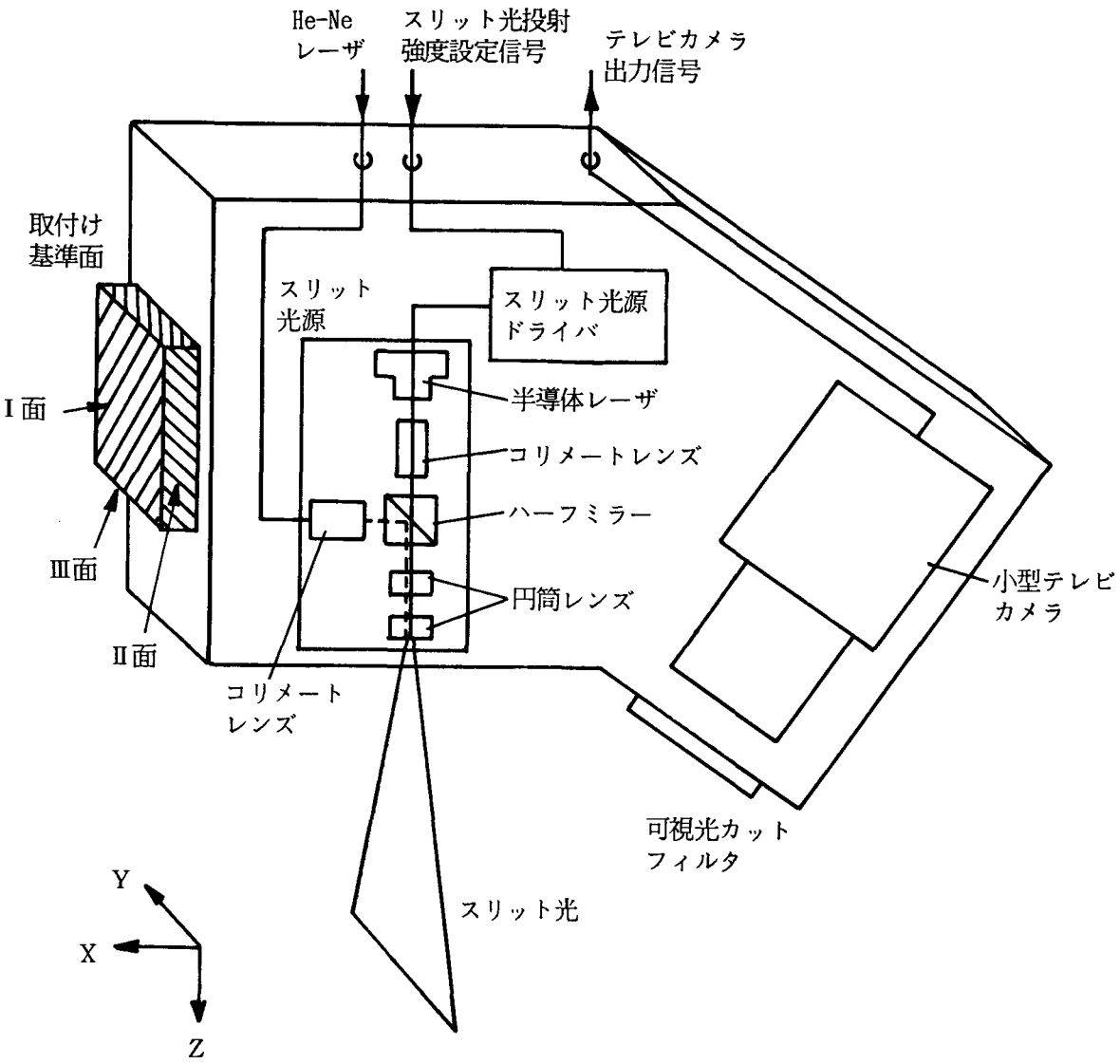


図4-9　撮像ヘッドの詳細構成

視のHe-Neレーザ光をハーフミラーを通して近赤外レーザ光に重畳させることで，スリット光の投射位置を示すようにしている． スリット光源には，スリット光源ドライバを経由して投射強度の制御信号が加えられる．

反射光を撮像するためのテレビカメラはヘッド分離型テレビカメラで，その撮像素子は384画素（水平）×484画素（垂直）のCCDである．CCDのクロック周波数は7.5MHzである．テレビカメラの前面には，可視光を遮断するための光学フィルタが取り付けられている．

取付け基準面は，センサが出力するＸ，Ｙ，Ｚ座標の原点を決めるためのものである．この基準面は，図のＩ面がＹＺ面に，Ⅱ面がＺＸ面に，そしてⅢ面がＸＹ面に平行に作られており，それぞれ，Ｘ，Ｙ，Ｚ座標の原点を決める基準になる．

4.3.2 座標演算ボードの構成

図4-10に座標演算ボードの詳細構成を示す．スリット光画像中心位置検出回路，座標ルックアップテーブル，スリット光反射強度検出回路，およびスリット光投射強度検出回路は，図のような回路要素から構成されている．以下，この構成におけるボードの動作につ

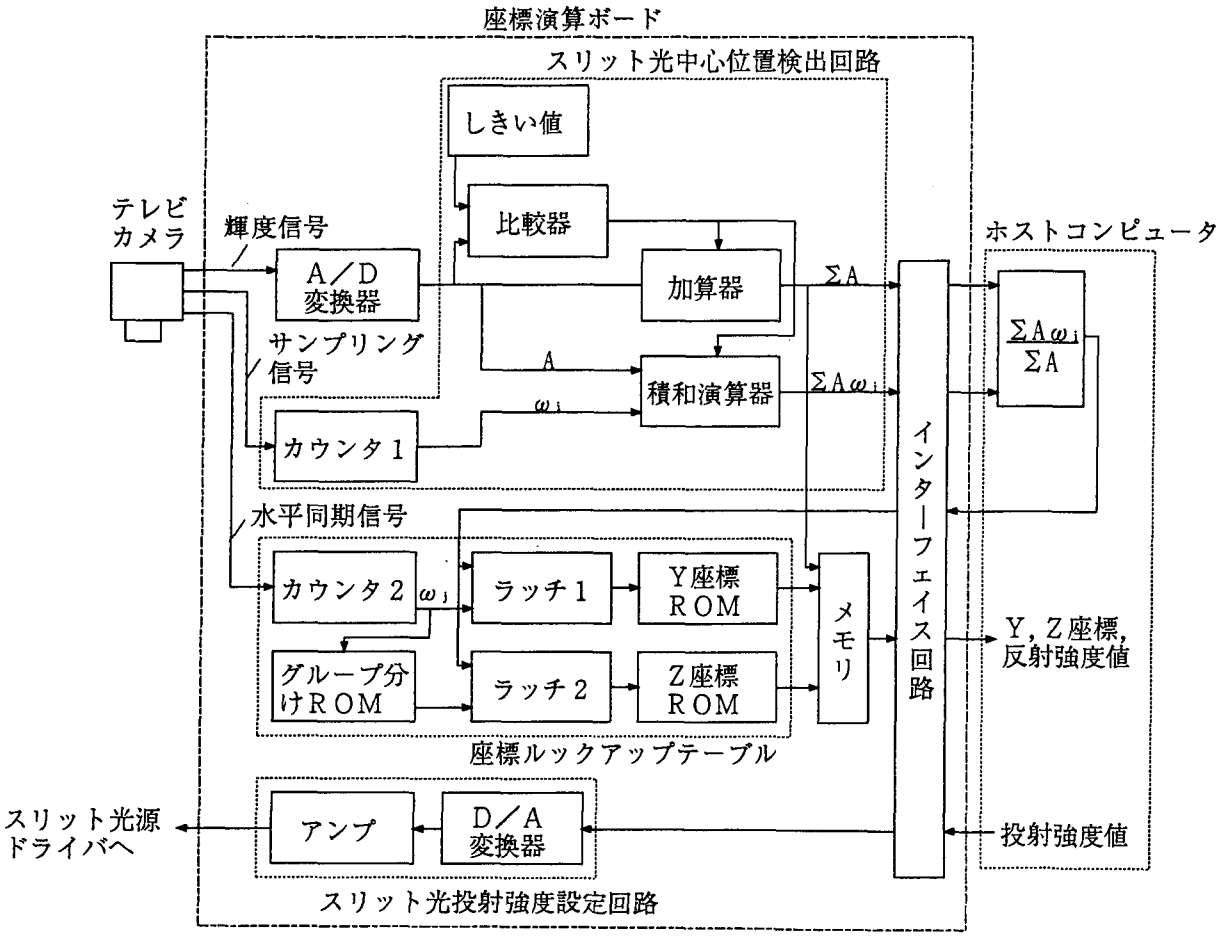


図4-10　座標演算ボードの詳細構成

いて説明する．まず，

①A/D変換された輝度信号が比較器でしきい値と比較され，高輝度部分が抽出される．この高輝度信号について，加算器で加算（ΣA）が行われる．一方，テレビカメラのクロック（7.5MHz）をカウンタ1で計数して水平方向画素のアドレス（ω_i）を作り，これと高輝度信号との積和（Σ（A・ωi））を積和演算器で求める．ΣAとΣ（A・ω_i）の計算は，いずれもクロックに同期して水平走査時間(63.5μsec)内に実時間で行われる．

②水平走査が終了すると，計算されたΣAとΣ（A・ω_i）がホストコンピュータに読み込まれ，ソフトウエア処理によりΣ（A・ω_i）／ ΣAの除算（＝ω_{ic}の計算）が行われる．この結果がボード上のラッチ1，2に書き込まれる．これらのラッチの出力はY，Z座標ルックアップテーブル用のROMに入力される．このROMへは，テレビカメラの水平同期信号をカウンタ2により計数して得た垂直方向画素のアドレス（ω_j）が同時に入力されており，このω_{ic}とω_jに対応したY，Z座標がROMから読み出され，この値がメモリに記録される．このメモリには，反射信号強度として上述のΣAも同時に記憶される．上記のΣAとΣ（A・ω_i）のホストコンピュータへの読み込みから，結果のメモリへの書き込みまでは，1水平走査時間内に行われる．

以上の①，②計算がパイプライン処理され，1点の座標が1水平走査時間で検出される．このパイプライン処理が，各水平走査ライン数（＝垂直方向画素数，今回の場合484）だけ繰り返し行われ，この結果，スリット光1本分（今回の場合484点）のY，Z座標が1フレーム時間内に検出される．

スリット光投射強度設定回路は，ホストコンピュータからの設定値に対応したアナログ電圧をD/Aコンバータで生成し，これをスリット光源ドライバに供給する．この電圧を常時出力すれば，スリット光は連続投射となり，パルス的に出力すればパルススリット光投射となる．

4.4 キャリブレーション

テレビカメラを用い三角測量で三次元座標を求める場合，得られた画像と実際の三次元座標の関係を求めることをキャリブレーションという．開発したセンサの場合，この関係は式(4-2),(4-3)で与えられるが，この式の中には，レンズの焦点距離や光学系の幾何学的配置などで決まる定数，いわゆるカメラパラメタ（式(4-2),(4-3)におけるD，αo,ai,aj）が含まれている．キャリブレーションのために，既知寸法の三次元対象物を測定して，このカメラパラメタを計算する方法[Ueshiba 91]もあるが，今回開発したセンサではレンズ歪の補正まで行うため，このようなカメラパラメタを求める方法では正確なキャリブレーションを行うのが難しい．

そこでここでは，**図4-11**に示すように高精度（±1μm）で移動できる2軸ステージにスクリーン（表面は，拡散反射面）を取り付けたキャリブレーションシステムを製作し，実際にスクリーンが置かれた位置とその時のスリット光画像の位置関係を求め，これをルックアップテーブルに記憶させるようにした．この方法によれば，レンズ歪を含めたキャリブレーションが行え，高精度なセンサが実現できる．**図4-12**にこのキャリブレーションシステムの外観写真を示す．

以下，Y座標，Z座標のキャリブレーション方法を述べる．

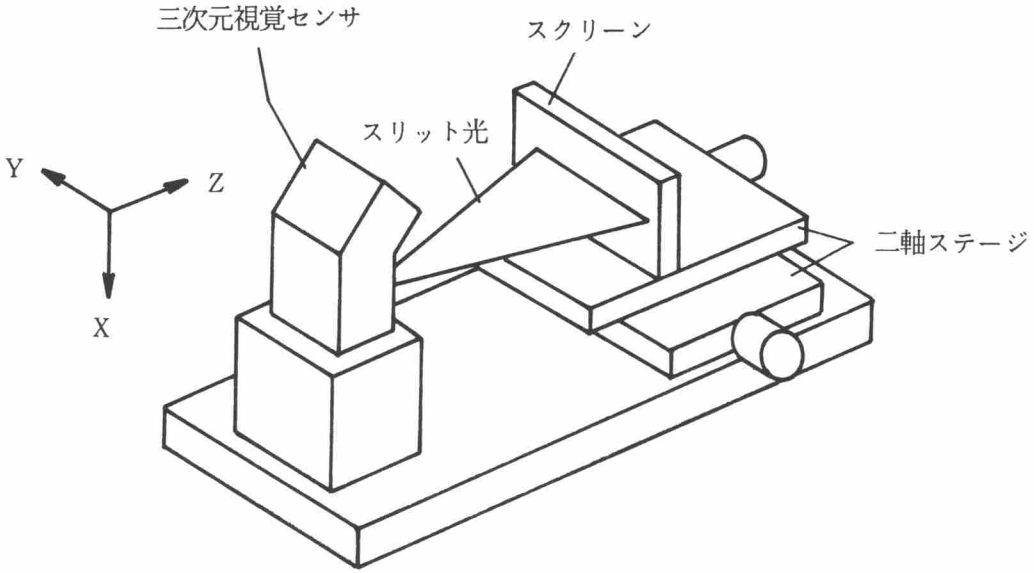


図4-11　三次元視覚センサのためのキャリブレーションシステム

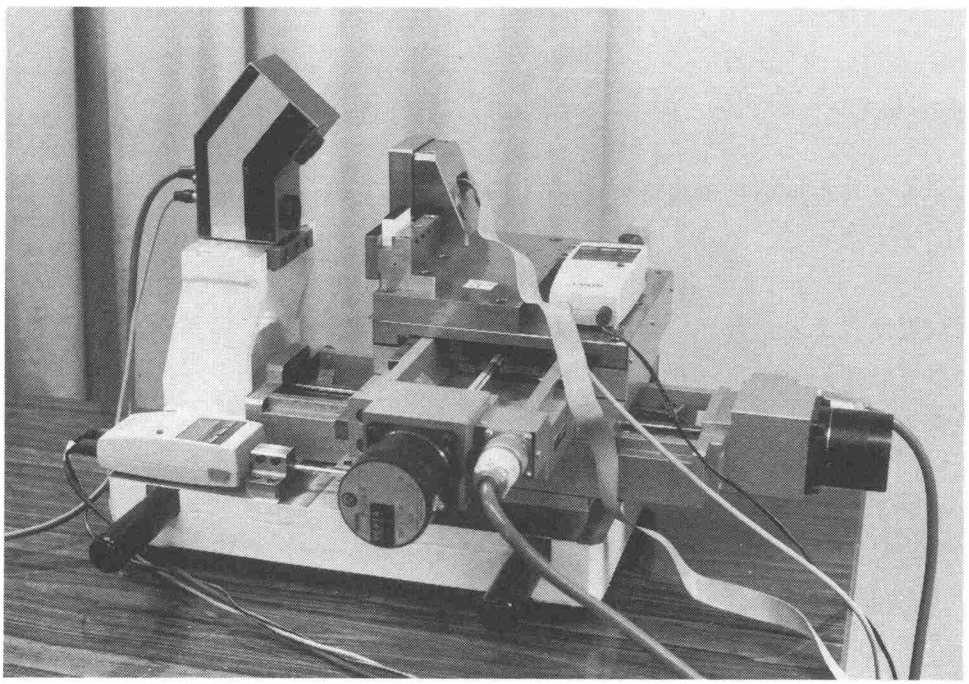


図4-12　キャリブレーションシステムの外観

4.4.1　Z座標のキャリブレーション

図4-13にZ座標のキャリブレーション方法を示す．同図(a)は，キャリブレーションシステムを上から見た図である．この図で，取付け基準面のⅢ面から距離Zにスクリーンを置く．このスクリーンをZ方向に決められたピッチ（1mm程度）で移動させ，各Zにおけるスリット光画像上のω_{ic}（同図(b)）をω_jのグループごとに計算する．得られたZとω_{ic}の関係について，最小二乗法で三次または四次の近似式を求め，これをキャリブレーションカーブとして，ルックアップテーブルのＲＯＭに記憶させる．

4.4.2　Y座標のキャリブレーション

図4-14にY座標のキャリブレーション方法を示す．同図(a)で，Z軸から距離Yにスクリーンの端を置く（Z軸は取り付け基準面のⅡ面と並行で，Ⅱ面から決められた距離のところに定義している）．スクリーンをY方向に決められたピッチで移動させ，各Yにおける

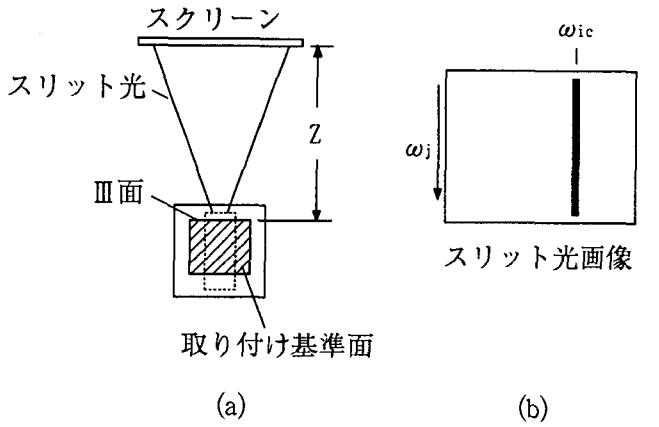


図4-13　Z座標のキャリブレーション方法

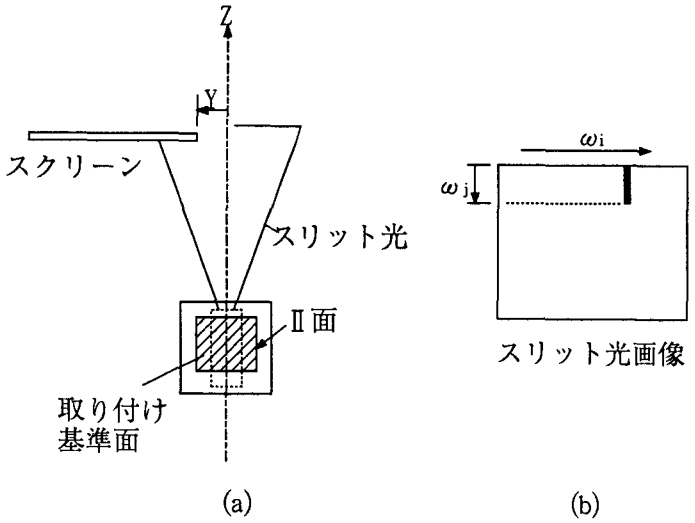


図4-14　Y座標のキャリブレーション方法

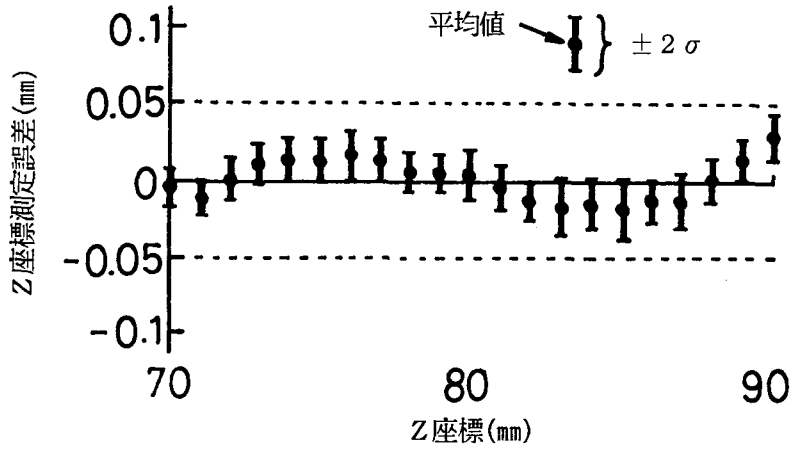
スリット光画像上のω_1（同図(b)）を求める．得られたYとω_1の関係について，最小二乗法で直線近似（Y方向については，レンズ歪の影響は小さく，直線近似で実用上問題ない）を行う．これを距離Zを変えて繰り返し行い，キャリブレーションカーブを得る．

4.5 センサの性能

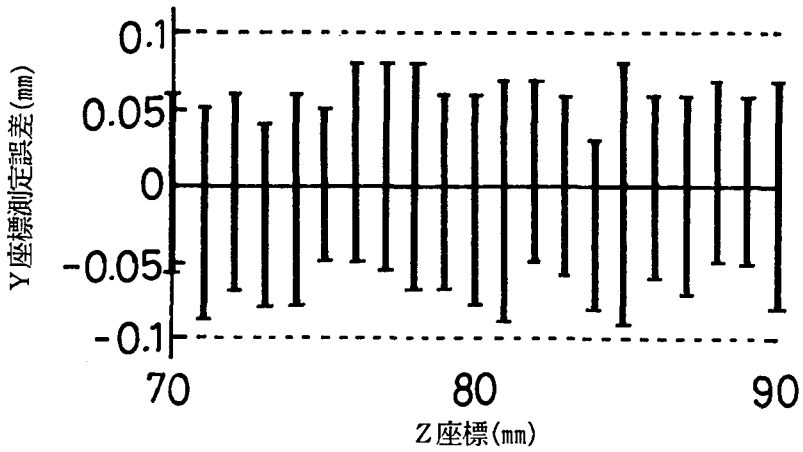
4.5.1 座標測定精度

座標測定精度は，キャリブレーションに用いたシステムを用い，実験により求めた．

Z座標精度については，1つのZ方向距離において，10回の座標測定を繰り返して4840個の座標データ(1回あたりのデータ点数は撮像素子の垂直方向画素数に相当する484点)を求め，これの真値との差の「平均値$\pm 2\sigma$」を誤差として求めた．Z方向距離は70mmから90mmまでとし，その間を1mm間隔で設定した．**図4-15(a)**にその結果を示す．これより，



(a) Z座標測定精度



(b) Y座標測定精度

図4-15　三次元視覚センサの座標測定精度

±0.05mmの誤差でZ座標の測定が行えることが分かる．

Y方向精度については，1つのZ方向距離において，スクリーン端を1mm間隔で-15mmから＋15mmまで移動させて真値との「差」を求め，この操作を10回繰り返して得られる310個の「差」データについてのプラス側，マイナス側最大値を誤差として求めた．Z方向距離は，Z座標精度と同様に70mmから90mmまでとし，その間を1mm間隔で設定した．**図4-15(b)**にその結果を示す．これより，Y座標の測定精度は，±0.09mmであることがわかる．これらの結果は，このセンサの設計目標である精度±0.01mmを満足している．

4.5.2 総合性能

表4-1に開発したセンサの性能をまとめて示す．動作距離は，測定ヘッドの取付け基準面のⅢ面から80mm，測定範囲は，この80mmの距離においてY方向30mm，Z方向±10mm である．測定点数は484点である．測定精度は，拡散反射面を対象としたときで，Y方向について±0.09mm，Z方向について±0.05mmmmである．測定時間は，1点について水平走査時間の63.5μsec，484点について1フレーム時間の33.3msecである．

撮像ヘッドの寸法は150mm×110mm×55mmとコンパクトである．また重量は690gと軽く，ロボットなどアクチェータに容易に取り付けることができる．さらに，撮像ヘッドは可動部品を一切用いておらず，長期的信頼性も高いと考えられる．

動作距離	80mm(Z)
測定範囲	30mm(Y) × ±10mm(Z)
測定点数	484点(Y)
測定精度	±0.09mm(Y), ±0.05mm(Z)
測定時間	33.3msec/484点
寸　　法	150mm(W) × 110mm(H) × 55mm(D)
重　　量	690g

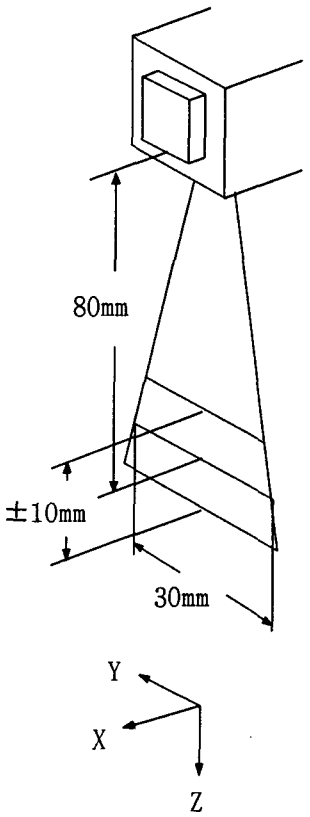


表4-1　三次元視覚センサの性能

4.6 まとめ

工業用，特に自動車関連の生産工程における三次元対象物の寸法や形状の検査を目的にスリット光固定型三次元視覚センサ開発した．

このセンサの開発にあたっては，高精度（±0.1mm），高速，対象物の表面性状の影響を受けにくいこと，さらに，小型・軽量であることと長期的な信頼性の高いことをねらいとした．

高精度については，重心計算によるスリット光画像中心位置の検出とルックアップテーブルによるレンズ歪補正を行った．高速化については，専用ハードウエアによるパイプライン処理により実時間計測を可能とした．対象物の表面性状の影響については，その反射率に応じてスリット光の投射強度が設定できるように，スリット光反射強度検出回路と，スリット光投射強度設定回路を設けた．さらに，小型・軽量・高信頼性化については，半導体レーザと小型カメラを用いた小型・軽量の撮像ヘッドの実現と，可動部品を用いない構造による長期の信頼性確保を図った．

精度を保証するためのキャリブレーションは，高精度移動ステージを用いて，測定範囲内で実際の距離（座標）とスリット光像画像との関係を調べることで行った．これにより，レンズ歪の補正を含めたキャリブレーションが行えた．

開発したセンサは，当初の目標を満足する性能が得られ，応用システム開発の強力なキーデバイスになると考えられる．

第5章　自動車エンジン部品の寸法検査

本章では，第4章で述べたスリット光固定型三次元視覚センサをベースに開発した十字スリット光型三次元視覚センサを用い，自動車エンジン部品の円筒状の凸部や凹部（以下、単に突起、穴と呼ぶ）の寸法を自動検査する方法とその有効性について論ずる．この方法は，突起や穴の全体形状を計測する代わりに，突起や穴に十字スリット光を投射してそれらの特徴的部位の三次元座標を得，その値から突起や穴の傾き，太さおよび非対称性を高速に検査する方法である．この方法を用いた試作システムによる評価実験では，目標を満たす精度，時間で検査が行えることが確認され，開発した十字スリット光型三次元視覚センサと検査方法の有効性が示された．

5.1　まえがき

自動車生産工程の検査の自動化の要望の1つに，自動車のエンジン部品の突起や穴の寸法検査がある．これは，製作された自動車部品の突起や穴の傾き，太さや非対称性を抜取りで検査するものである．現状，この検査は，突起や穴の三次元形状を表す特徴的部位の寸法を専門の検査員がノギスや特殊なゲージを用いて計測することで行われている．この計測は，熟練を要し，かつ長い時間を要するためその自動化と高速化が望まれている．

寸法計測を目的とした三次元形状計測の報告には，スポット光センサやスリット光投影型センサをアクチェータにより移動させて計測する方法がある[Saeki 86]．前者の代表例として，小島氏[Kozima 87]は5自由度のアクチェータにスポット光センサを装着し，ＣＡＤデータを用いることで倣い計測を行っている．後者の例としては，Livingstone 氏らが同期走査型の三次元視覚センサ[Rioux 84]を用いて，直径16フィートの船舶用プロペラの三次元形状を計測している[Livingstone 87]．しかし，これらの方法は形状計測に多くの時間を要することから，前述の寸法の自動検査には必ずしも適したものではない．

突起や穴を持つ部品の寸法検査には，検査時間などを考えるとスリット光を直交して用いた三次元視覚センサ（以下，十字スリット光型三次元視覚センサと呼ぶ）を用いるのが最も適した方法と考えられる．十字スリット光型三次元視覚センサに関しては、二宮氏ら[Ninomiya 87a]や高木氏ら[Takagi 87]の報告があるが，このセンサは電子部品の姿勢検出用に開発されたもので、上述の目的に適用できるものではない．

提案する方法は，この種の検査のために開発した十字スリット光型三次元視覚センサを用い，エンジン用自動車部品の突起や穴の三次元寸法を検査する方式[Ozeki 91b]である．この方式は対象物体に十字スリット光を投射し，画像処理によって反射スリット光画像から特徴ある部位を自動的に見つけ，これを基に，必要とする突起，穴の寸法を自動検査するものである．

5.2　検査方式

5.2.1 検査対象

検査すべき対象はアルミ鋳物製の自動車用エンジン用部品で，そこには円筒形状をした突起や穴が多数ある．エンジン部品の大きさは、600mm ×200mm ×100mm で、突起や穴の

大きさは平均直径16～20mmφ、高さ（深さ）12mm程度である．

図5-1はこの部品の代表的な突起や穴の形状を示したものである．これらの断面は台形形状をしていて、その上端と下端は円弧の一部となっている．生産工程での抜き取り検査は、突起や穴の全体形状を計測する代わりに、その特徴ある部位の寸法を測定する．これは，突起や穴の形状変化が鋳型の位置ずれや湯回りの過不足によって生じ，その形状が大幅に変化することはないため，突起や穴の形状を規定している特徴的部位の寸法により全体形状を代表できるためである．図5-1の例では円弧の開始点や終了点などがこの特徴的部位に相当する．

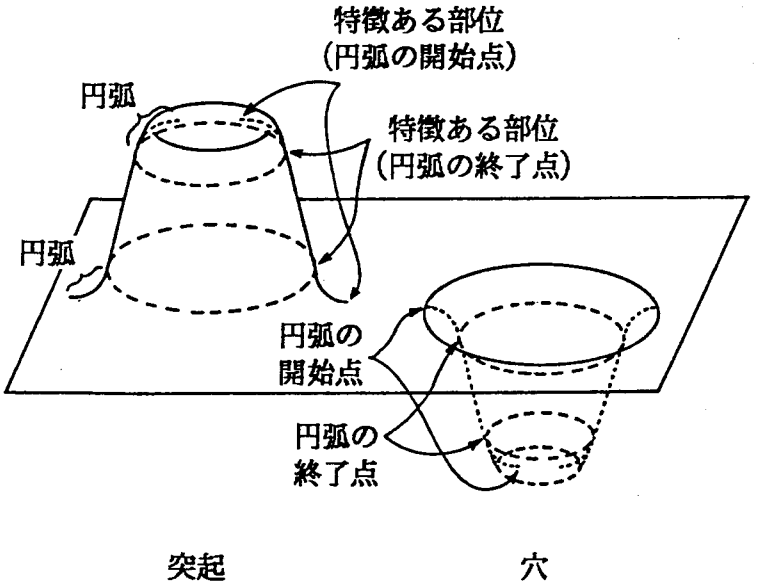


図5-1　自動車部品の代表的な突起や穴の形状

5.2.2 基本検査方式

考案した検査方式は、検査すべき突起や穴に十字スリット光を投射して得た交差する2本の反射スリット光画像から4個の円弧の終了点（以下，計測点という）を自動的に検出し，その検出した4点の計測点を最小の誤差で通るように近似して得た内接円の直径や中心位置により対称物の三次元的な寸法を検査する方法である．

図5-2は、突起や穴に十字スリット光を投射したときの反射スリット光を示したものである．同図(a),(b) のように反射スリット光が途切れないで得られる場合と同図(a')のように側面部の傾斜が急で反射スリット光の一部が途切れる場合がある．いづれの場合も、計測点Ⅰ（Ⅰa, Ⅰb, Ⅰc, Ⅰd）および計測点Ⅱ（Ⅱa, Ⅱb, Ⅱc, Ⅱd）は検出できるので，計測点Ⅰ，Ⅱの各4点に内接する円は求めることができる．

図5-3はその寸法検査の方法である．まず、十字スリット光を突起や穴に投射し，それらの上端、下端においてそれぞれ4点の計測点（円弧の終了点）を同時に検出する．この

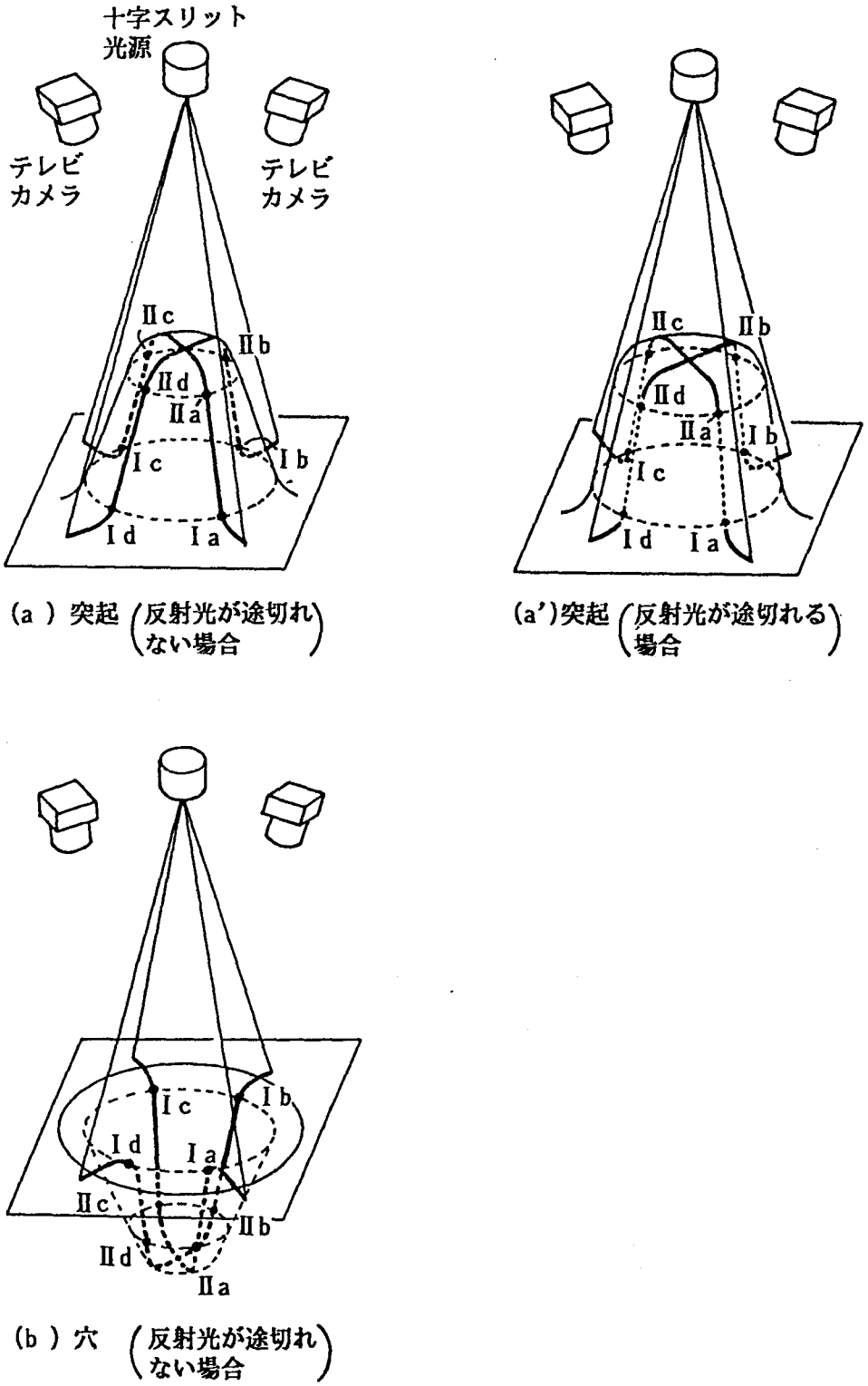


図5-2　突起や穴への十字スリット光投射と反射スリット光

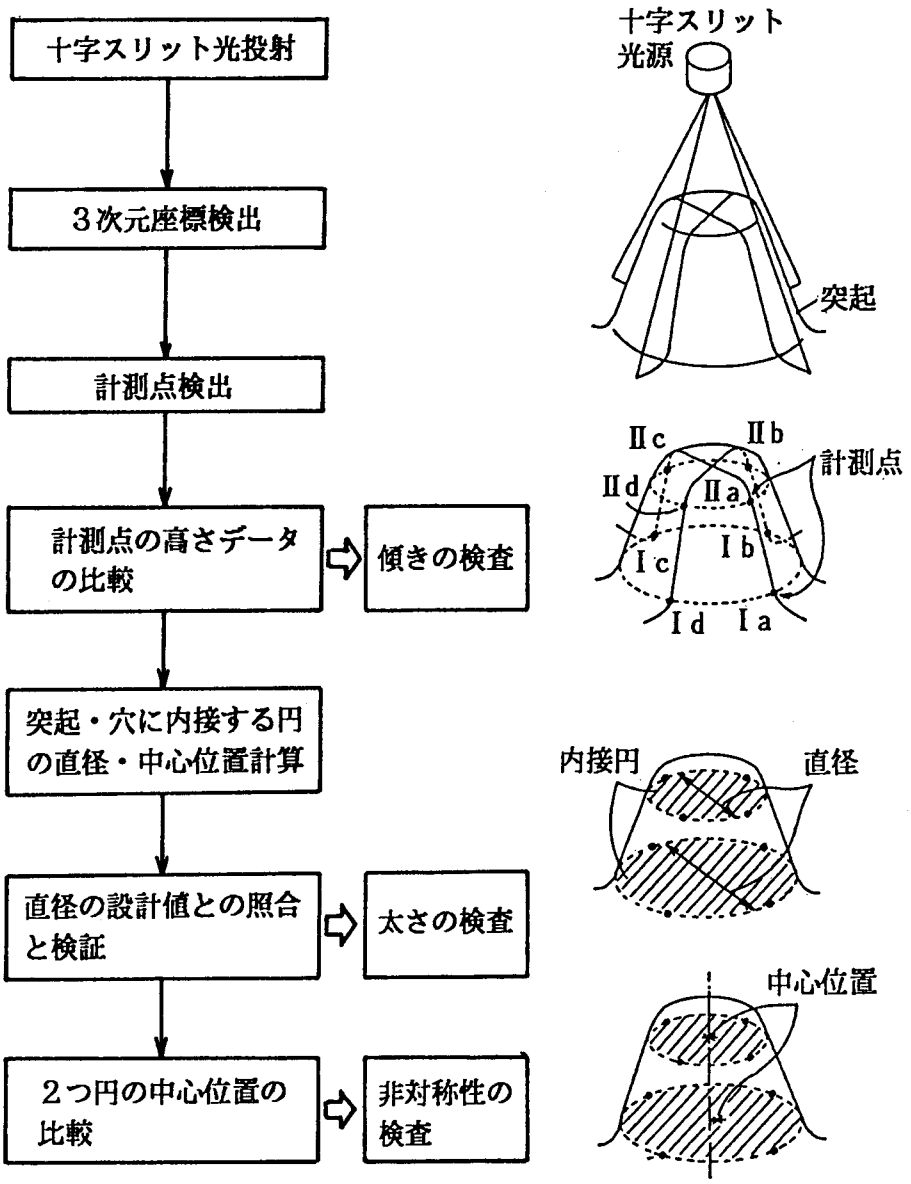


図5-3　突起や穴の寸法検査の方法

検出は、反射スリット光が途切れない場合も、途切れる場合も、突起や穴の上端、下端の円弧部分と側面部分の直線のつながる点を見つけ出して行なう．次に、検出した上端、下端それぞれ4点の計測点の高さの違いから突起や穴の傾きを検査する．傾きが許容範囲内にあるときは、次に4点の計測点に内接する円をそれぞれ求める．そして、求めた2つの円の直径をそれぞれ設計値と照合・検証し，突起や穴の太さを検査する．最後に，2つの円の中心位置のずれから突起や穴の三次元的な非対称性を検査する．

図5-4は，反射スリット光画像から計測点を自動的に検出するためのアルゴリズムである．計測点Ⅰ，Ⅱ（円弧の終了点）は，反射光に途切れがないときには，突起や穴の円弧部分を近似した円と，突起や穴の側面部分を近似した直線の接点を求めて検出する．一方、反射光に途切れがあるときには、側面部分の直線近似が行なえないので、円弧部を円近似した後、この近似円に接する直線を求め、この直線と近似円の接点を計測点Ⅰ、Ⅱとして推定する．

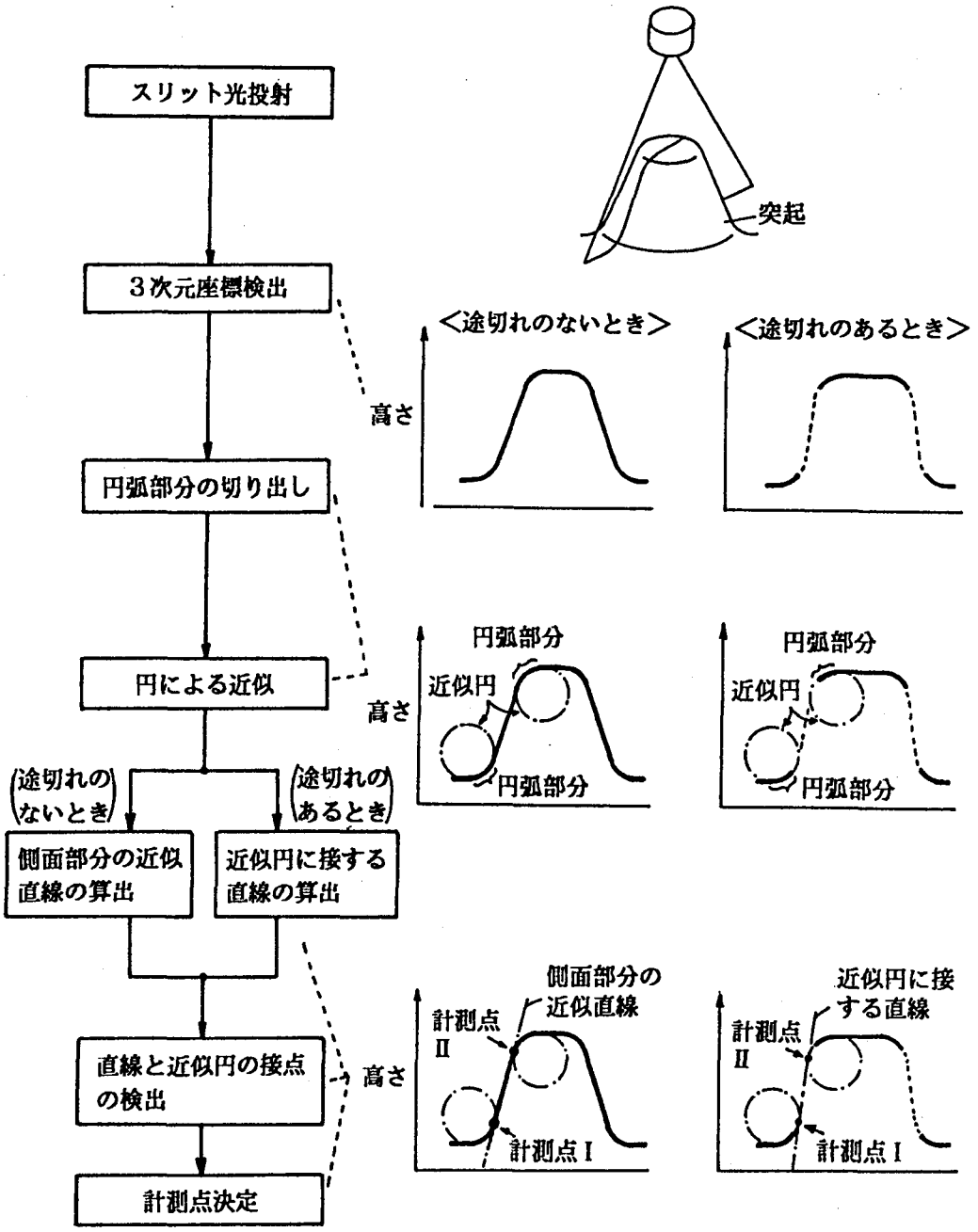


図5-4　計測点の検出アルゴリズム

図5-5は突起や穴を持つ自動車部品の寸法検査の基本アルゴリズムである．まず，十字スリット光の一方のスリット光を投射して三次元座標を検出し計測点を検出する．次に，もう一方のスリット光に対する計測点を検出した後，これら計測点の高さデータを比較して突起，穴の傾きの良否を判定する．ついで，計測点から求めた円の直径と中心位置をもとに突起，穴の太さおよび非対称性の良否を判定する．

5.3　試作システム

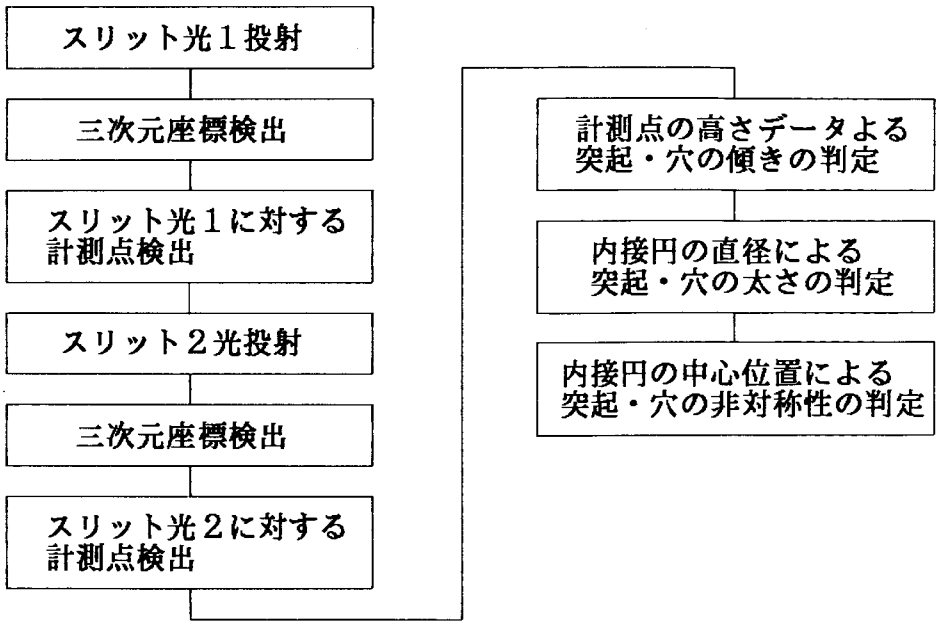


図5-5　突起や穴をもつ自動車部品の寸法検査の基本アルゴリズム

5.3.1　十字スリット光型三次元視覚センサ

図5-6に開発した十字スリット光型三次元視覚センサの原理を示す．このセンサは，第4章で述べたスリット光固定型三次元視覚センサを基本にしている．特徴的な点は，穴や

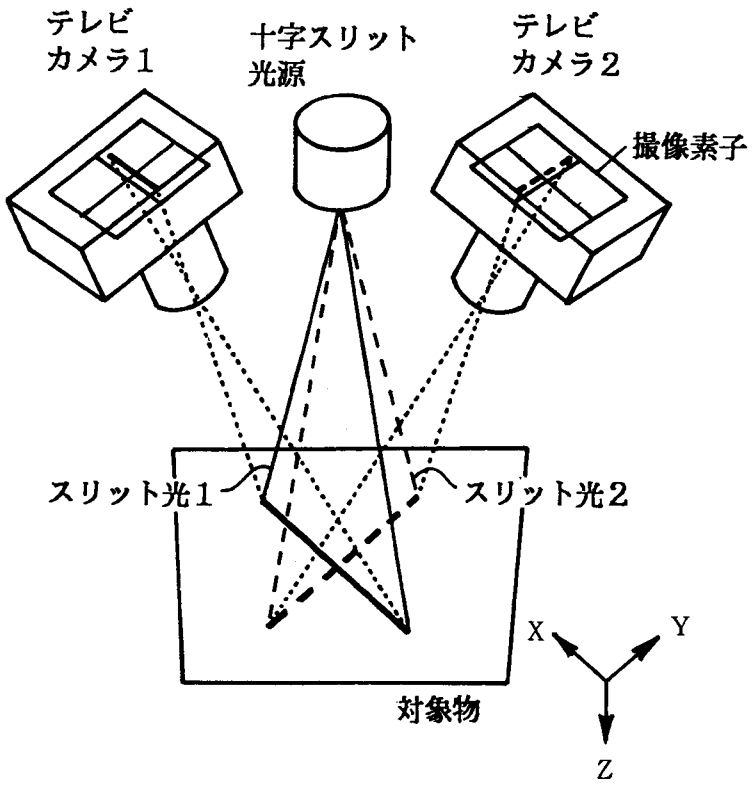


図5-6　十字スリット光型三次元視覚センサの原理

突起の寸法計測を高速に行うためにスリット光をスリット光１とスリット光２の十字スリット光にし，各スリット光に対しテレビカメラ１台づつを対応させている点である．三次元座標の測定は，スリット光１を投射してテレビカメラ１によりＸ，Ｚ座標を，スリット光２を投射してＹ，Ｚ座標を検出して行う．

図5-7に十字スリット光型三次元視覚センサの構成を示す．このセンサは，撮像ヘッドと実時間の座標測定を行うための座標演算ボードで構成されている．

撮像ヘッド内の十字スリット光源は，２本のスリット光を２個の半導体レーザからそれぞれ得，それらをハーフミラーで重ね合わせる構造としている．テレビカメラなどその他の部品は３章のスリット光固定型三次元視覚センサと同様の構造となっている．

座標演算ボードは，第３章で述べたスリット光固定型三次元視覚センサの座標演算ボードに，スリット光切り換え回路，座標テーブル２，および座標テーブル切り換え回路を追加したものである．これらの回路は，実時間で座標測定するためにすべて専用ハードウエアで構成されている．

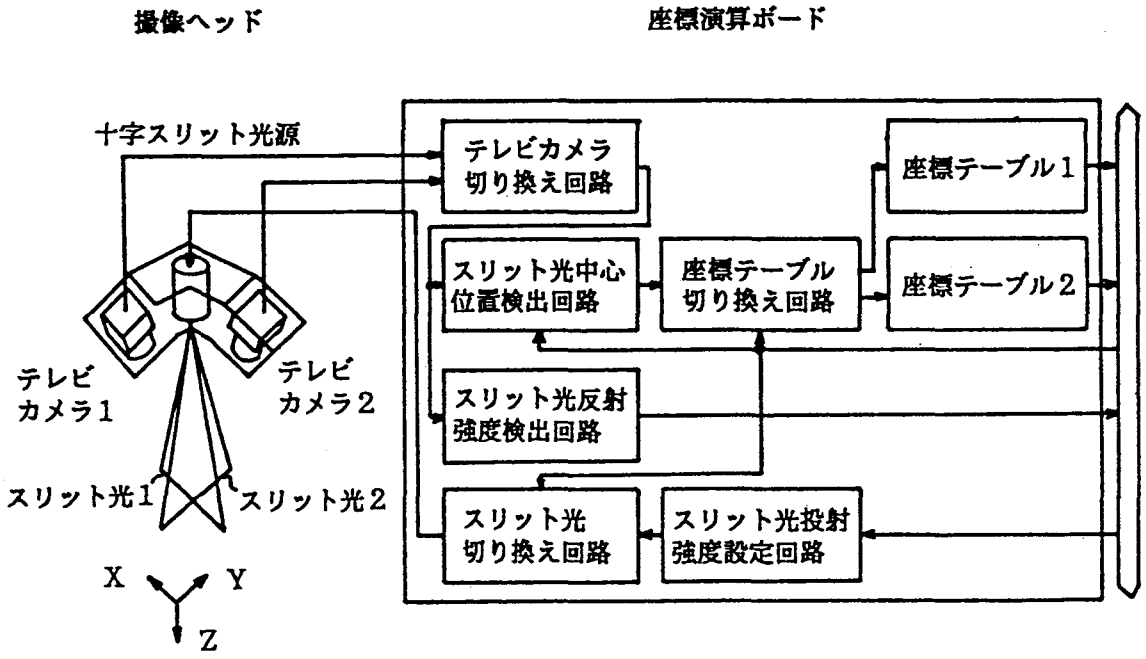


図5-7　十字スリット光型三次元視覚センサの構成

図5-8はこの三次元視覚センサの撮像ヘッドの外観写真である．

表5-1に十字スリット光型三次元視覚センサの性能を示す．測定範囲は撮像ヘッドのスリット光出射端から75mmの位置で30mm(X) ×30mm(Y) ×15mm(Z) ，測定精度は±0.1mm(X, Y, Z)である．測定点数はスリット光に沿って484 点、測定時間は実時間座標測定により484 点につき33.3msである．

撮像ヘッドの重量は1100g で、容易にアクチェータなどに装着できる．

5.3.2　システム構成

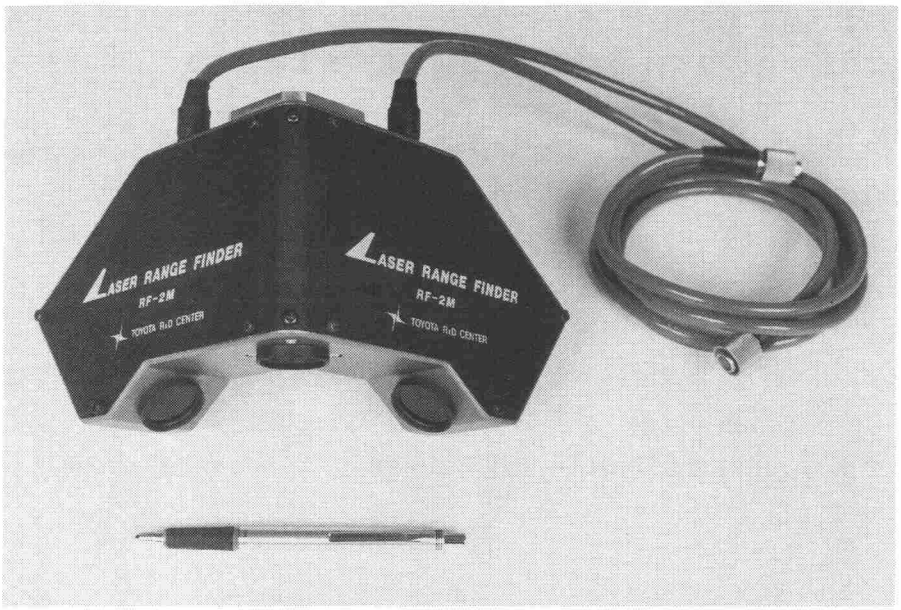


図5-8　十字スリット光型三次元視覚センサの撮像ヘッドの外観

表5-1　十字スリット光型三次元視覚センサの性能

動作距離	75mm(Z)
測定範囲	30mm(X)×30mm(Y)×±15mm(Z)
測定点数	484点／スリット
測定精度	±0.1mm(X,Y,Z)
測定時間	33.3msec/484点
寸　　法	140mm(W)×110mm(H)×140mm(D)
重　　量	1100g

図5-9に検査対象のエンジン用自動車部品を示す．この部品はアルミ鋳物で作られており、円筒形状をした突起や穴が多数ある．この部品の底面には，その寸法計測のための基準を与える基準面が設けられている．また，部品の表面性状は梨地である．

図5-10は、考案した検査方式を用いた試作システムの構成である．このシステムは、自動車部品の突起や穴の三次元座標を計測するための十字スリット光三次元視覚センサ、自

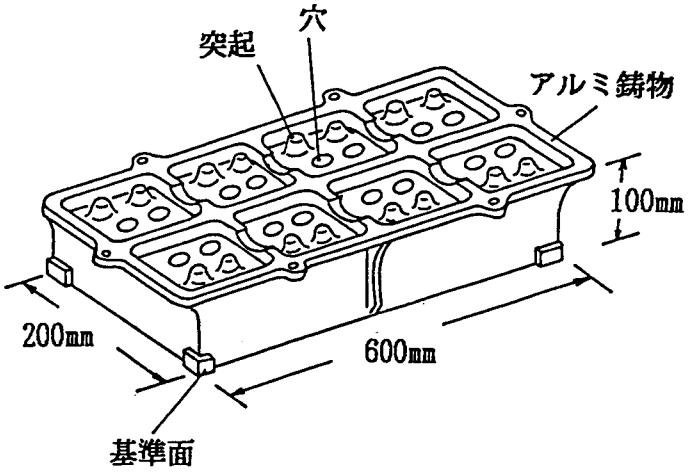


図5-9　検査対象のエンジン用自動車部品

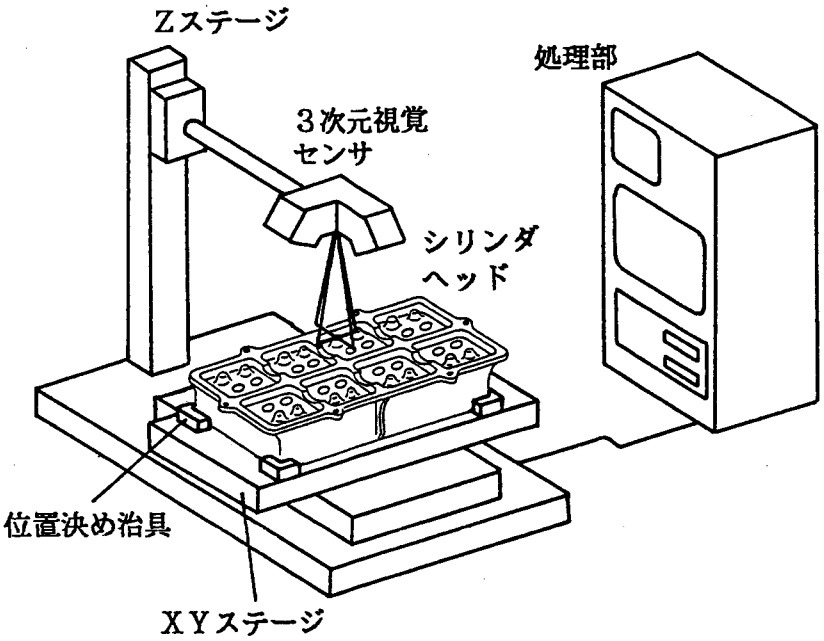


図5-10　試作検査システムの構成

動車部品を移動・位置決めするためのＸＹステージ、三次元視覚センサを上下させてその測定範囲内に対象物を設置するためのＺステージ、および三次元視覚センサの出力を処理し寸法を計算するための処理部からなる．ＸＹステージ上には，自動車部品を傾きなく，かつＸＹＺステージの座標系に正しく固定するための位置決め治具が設けてある．

5.3.3　検査アルゴリズム

図5-11に試作システムによる寸法検査の処理の流れを示す．先ず、自動車部品をＸＹステージ上に位置決め治具を用いて固定する．次に、ＸＹステージおよびＺステージをこの部品の設計値に基づいて移動させ、三次元視覚センサを測定対象の突起や穴の上に位置決

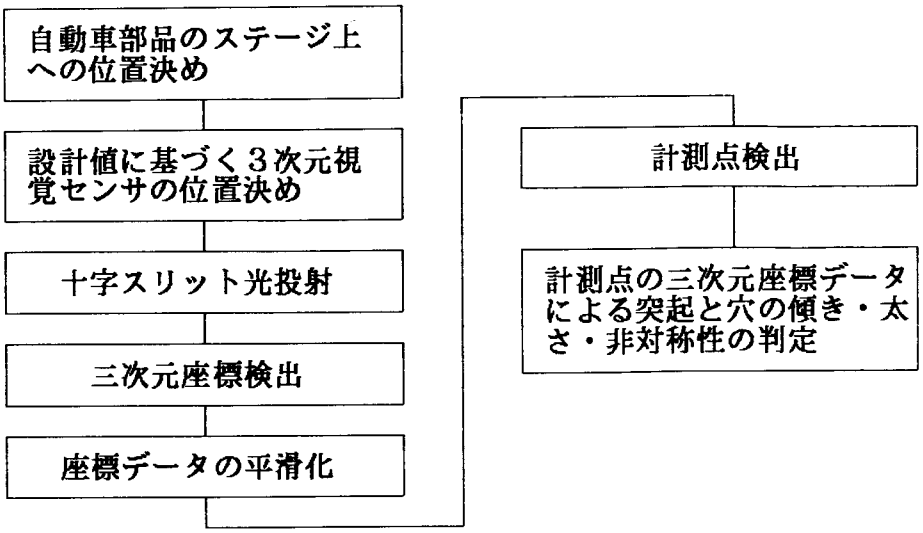


図5-11　試作検査システムの動作の流れ

めする．位置決め後、対象物に十字スリット光を投射し三次元座標を測定する．対象物表面の粗さなどによる座標データのノイズを平滑化により除去した後、計測点を検出する．検出した計測点の高さデータと突起や穴に内接する円の中心位置と直径をもとに，突起や穴の傾き，太さおよび非対称性を判定する．

5.4　評価実験

5.4.1　計測精度

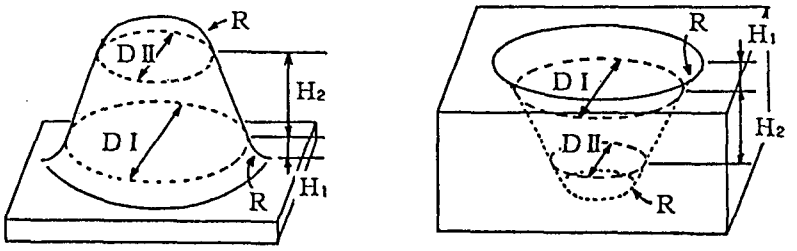
寸法検査アルゴリズムの検証のため寸法計測精度の評価を行なった．この精度評価は、検査対象の自動車部品の突起と穴を模擬した**図5-12**に示す標準対象について行なった．この対象はアルミ製で、NC加工により図に示した寸法に高精度（±5μm）に製作されたものである．その表面は実際の検査対象の自動車部品と同等の表面粗さになるように仕上げられている．サンプルの個数は突起，穴とも４個で、このうち２個は側面の傾斜が急のため、データに途切れが発生する．

このサンプルへのスリット光投射位置は，突起や穴の寸法の変動によるスリット光投射の位置ずれを考慮して，サンプルの中心位置に対してＸ方向，Ｙ方向にそれぞれ 0mm，±0.5mm，±1mmだけずらした合計25通りとした．精度の測定項目は，突起や穴の傾きを検査するための計測点の高さおよび，突起や穴の太さと非対称性を検査するための上端・下端の２つの内接円の直径と中心位置の３項目である．

表5-2にこのときの精度測定結果を示す．ここで精度は，上記の25とおりの実験で得た結果の±2σで表している．表からわかるように突起と穴には有意差はなく，計測点の高さの測定精度として最大±0.21mm，内接円の直径と中心位置の測定精度として，それぞれ最大±0.26mm，±0.28mmが得られた．このエンジン部品の突起と穴の傾き，太さおよび非対称性について許容されている誤差（以下，公差という）はいずれも±1mmであり，それ

らの寸法を測定する上での目標精度は公差の1/3以下である±0.30mmに設定されている．

上述の測定精度結果は，この目標精度を満足しており，これより十字スリット型三次元視覚センサと考案した寸法計測アルゴリズムが突起や穴の寸法計測に有効であることが確認された．



突起　　穴

	R	H_1	H_2	DI	DII	備考
サンプル1	3	2	12	22	10	
サンプル2	3	2	12	22	18	側面でのデータの途切れあり
サンプル3	5	4	12	22	10	
サンプル4	5	4	12	22	18	側面でのデータの途切れあり

(mm)

図5-12　精度評価のための標準対象

表5-2　標準対象についての精度測定結果

(a)突起

	計測点の高さ	内接円の直径	内接円の中心位置
サンプル1	±0.20	±0.22	±0.20
サンプル2	±0.19	±0.26	±0.28
サンプル3	±0.17	±0.18	±0.18
サンプル4	±0.17	±0.24	±0.23

(mm)

(b)穴

	計測点の高さ	内接円の直径	内接円の中心位置
サンプル1	±0.21	±0.24	±0.21
サンプル2	±0.19	±0.26	±0.26
サンプル3	±0.17	±0.19	±0.18
サンプル4	±0.18	±0.22	±0.20

(mm)

5.4.2 システム性能

表5-3に試作システムの性能をまとめて示す．検査対象はエンジン用自動車部品で、検査項目はその部品に設けられた突起と穴の傾き，太さおよび非対称性の３項目である．

検査に要する時間は１点あたり3.3secである．このうち三次元視覚センサの位置決めに2.0secを要し、寸法の測定は1.3secで完了する．この検査時間3.3secはこの検査の目標時間5.0sec／点を満足している．

表5-3　試作検査システムの性能

検査対象		エンジン用自動車部品
検査項目		突起・穴の傾き，太さ 非対称性
検査精度	傾き　（計測点の高さ） 太さ　（直　径） 非対称性（　中心位置　）	±0.21mm ±0.26mm ±0.28mm
検査時間		3.3sec／点 （三次元視覚センサの位置決め:2.0sec，測定:1.3sec）

5.5 まとめ

本章では，第４章で述べたスリット光固定型三次元視覚センサをベースに開発した十字スリット光型三次元視覚センサを用い，三次元形状の自動車エンジン部品の突起や穴の寸法を自動検査する方法とその有効性について論じた．

提案した方法は突起や穴の全体形状を計測する代わりに，突起や穴に十字スリット光を投射して得たそれらの特徴的部位の高さおよび突起や円に内接する円の直径や中心位置を計測することで寸法を検査する方法である．

検査される寸法は，突起や穴の傾き，太さおよび非対称性である．

この方法を用いた試作したシステムによる評価実験により、目標値を満たす±0.30mmの検査精度が得られた．またこのときの検査時間は，3.3sec／１点で，これについて目標値を満足した．これらの結果より，開発した十字スリット光型三次元視覚センサと検査方法の有効性が確認できた．

第6章　自動車部品の異品検査

本章では，ベルトコンベア上を位置決めされないで搬送される複雑で類似した三次元形状の自動車部品について，間違った種類の部品が混入していないかを検査する「異品検査」を三次元視覚センサを用いて簡便・高速に行う方法と，この方法の有効性について論ずる．提案する方法は，三次元視覚センサにより対称物の距離画像を検出した後，この距離画像にしきい値処理（以下，これを距離ゲーテイングという）を行うことにより，各部品の特徴が明確に表される高さで部品を輪切りにした二値画像（以下，これを距離ゲート画像という）を得，この距離ゲート画像について幾何学的特徴量を調べて対象物を識別する方法である．この方法を用いた評価実験により，9種類の類似形状の自動車部品を安定・高速に認識することができ，この方法が異品検査に有効であることが確認できた．

6.1 まえがき

自動車や自動車用エンジンの製造においては，その製造コストの低減のために部品の共通化が図られている．特に，機能部品（例えばスタータなど）においては，その機能部品を構成する主な部品（例えばモータなど）を共通にし，それに組み付けるための補助部品（以下，アタッチメント部品という）の形状を少しずつ変えることで，型式の異なる自動車やエンジンに適合できるようにしている．このため，このようなアタッチメント部品は種類が多く，さらに形状が非常に類似したものとなる．

このようにアタッチメント部品を持つ機能部品の組み付け工程においては，誤った種類のアタッチメント部品を組み付けないようにするための異品検査が必要になる．さらに，このような異品検査は組み付けラインの中で行われるので高速に行われることが必須である．ここでは，ベルトコンベア上を位置決めされないで搬送される三次元形状のアタッチメント部品について，その異品検査を高速に行う方法について検討する．

異品検査を含め，位置決めが行われていない三次元機械部品を識別する技術については，これまでに各種の方式が考案されている．まず，二次元視覚を用いる方法においては，対象物の輪郭画像について求めた幾何学的特徴量から選別ツリーにより認識を行ういわゆるSRIアルゴリズム[Agin 75]が著名である．また，Consightと呼ぶシステムにより，上方から投射したスリット光により三次元対象物の輪郭画像（シルエット画像）を得，特徴抽出を行い識別する方式[Holland 79]もある．しかし，これらはいずれも輪郭形状が類似している対象物には適用が困難である．類似形状の対象物に対する識別方式として谷内田氏らは機械部品の学習認識システム[Yachida 76]を提案している．この方法は，輪郭形状だけでは識別できない類似部品については，あらかじめ持っている部品のモデルを使って，戦略的に表面の特徴を順次調べて行き認識を行う方法である．この方法は，類似形状の対象物の認識が行える優れた方法であるが，処理が複雑で時間が長くかかるため生産工程のラインに適用することは現状難しいと考えられる．また，部品のモデルを階層構造的に表現して認識を行う方法[Brooks 81]もあるが，これも処理時間の点で，生産現場向きではない．

三次元視覚を用いた例としては，3DPO (3-Dimnsional Parts Orientation System) [Horand 84]が著名である．このシステムは，三次元視覚センサにより検出した対象物の

距離画像（対象物の高さを明るさとして表した画像）から対象物を構成している面とそれらのつながり具合いを求め認識を行うものである．この方法も，対象物の種類が増え形状が複雑になると処理時間が膨大となって，高速の識別は困難であると考えられる．

本章では，従来の三次元形状機械部品の認識方法では認識が容易ではなかった位置決めのされていない形状が類似した機械部品を三次元視覚センサを用いて簡便・高速に認識し，異品検査を実現する方法を提案する[Ozeki 86b],[Ozeki 86c]．

6.2 検査方式

6.2.1 検査対象

異品検査の対象部品は，エンジン用機能部品に取り付けられるアタッチメント部品で，対象となるエンジンに対応して９種類（以下，タイプＡからタイプＩと呼ぶ）がある．**図6-1**に９種類の部品の外観を示す．これらの部品は形状が類似しており，上面から観測した場合には全く同一形状の物（タイプＦとタイプＩ）もある．材質はアルミニウムで鋳物により作られており，その表面は概ね拡散反射面である．これらの大きさはタイプによって若干異なるが，**図6-2**に示すように，おおよそ130mm（幅）×100mm（奥行き）×60mm（高さ）である．また，これら部品はいずれもガイド，ボス，フランジおよびマウント部を有しており，タイプによってそれらの形や寸法が異なっている．また，マウント部の底面は，モータに組み付けるために平面状に切削加工されている．

これら９タイプの部品は，マウント部底面を下にして回転方向は拘束されることなく，ベルトコンベア上を定速で搬送される．これら部品は１個づつ搬送され，機能部品に組み付けられる前に，そのタイプが正しいかどうかが識別され検査される．

6.2.2 基本検査方式.

図6-3に開発した異品検査の基本方式を示す．検査は以下の手順で行われる．

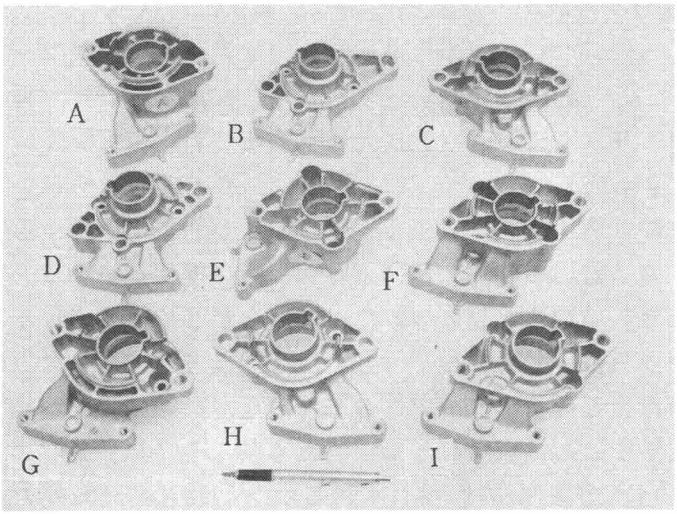


図6-1　異品検査の対象部品の外観

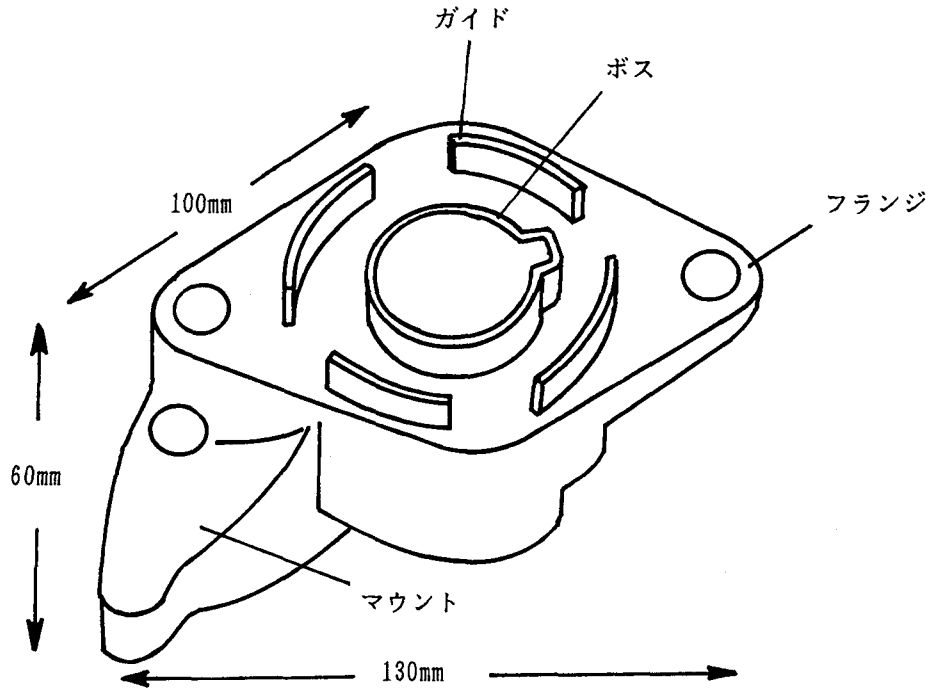


図6-2　異品検査の対象部品の概略寸法と構造

(1)三次元視覚センサにより，ベルトコンベア上を搬送される自動車部品の表面全体の三次元座標を検出する．
(2)検出した三次元座標から対象物の距離画像を生成する．
(3)生成した距離画像にしきい値処理（距離ゲーティング）を行うことにより，各部品の特徴が明確に表される高さで部品を輪切りにした二値画像(距離ゲート画像）を抽出する．

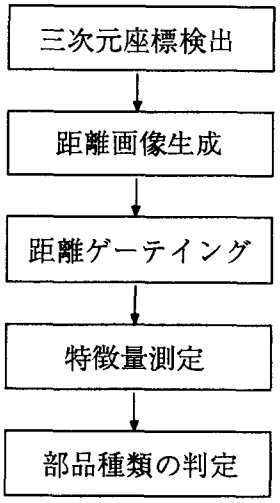


図6-3　異品検査の基本方式

(4)抽出した距離ゲート画像について面積や長さなどの幾何学的特徴量を測定する．
(5)測定した幾何学的特徴量により部品の種類を判定する．
この方法の特徴は，(1)～(3)の処理で，対象物の三次元形状の違いを二値画像として浮き上がらせることにより，(4)～(5)の簡単な処理で複雑で類似な対象の識別を実現するところにある．

6.3 検査システム

開発した検査方式を用いて検査システムを試作した．以下に，このシステムに用いた三次元視覚センサとシステム構成および検査アルゴリズムについて述べる．

6.3.1 三次元視覚センサ

この異品検査のために三次元視覚センサを開発した．このセンサは，第4章で述べたスリット光固定型型三次元視覚センサと同一原理のセンサである．対象物の大きさに合わせて視野を110mm（Y方向）に拡大するため，スリット光源の円筒レンズおよびテレビカメラ用撮像レンズの仕様を変更している．また，計測の高速化のため，スリット光1ライン分の座標検出点数はテレビカメラの1フィールド分の241点としている．これにより，スリット光1ライン分の計測時間は16.7msecとなっている．**図6-4**にこのセンサの撮像ヘッドの外観写真を，**表6-1**にこのセンサの性能を示す．

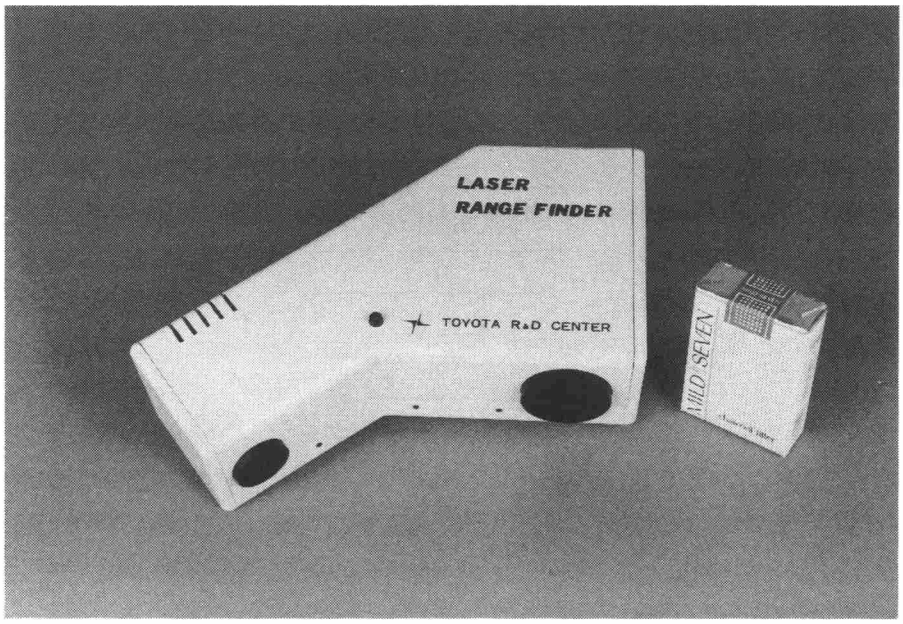


図6-4　異品検査用三次元視覚センサの撮像ヘッドの外観

動作距離	255mm(Z)
測定範囲	110mm(Y)×±25mm(Z)
測定点数	241点(Y)
測定精度	±0.5mm(Y), ±0.2mm(Z)
測定時間	16.7msec/241点

表6-1　異品検査用三次元視覚センサの性能

6.3.2　システムの構成

図6-5は，考案した検査方式を用いた試作検査システムの構成を示している．このシステムは，三次元視覚センサ，検出した三次元座標データの距離画像化と距離ゲーテイングおよび特徴量抽出のための前処理を行う画像処理部，および画像処理部で処理された画像について特徴量抽出と部品のタイプの判定を行うマイクロコンピュータからなる．自動車部品を搬送するベルトコンベアは三次元視覚センサの撮像ヘッドの下280mmに設置されている．また，その搬送速度は，後述するように距離画像を作成するためのスリット光の投射間隔を0.9mmとするために56mm/secの一定速度で移動するよう設定されている．**図6-6**に

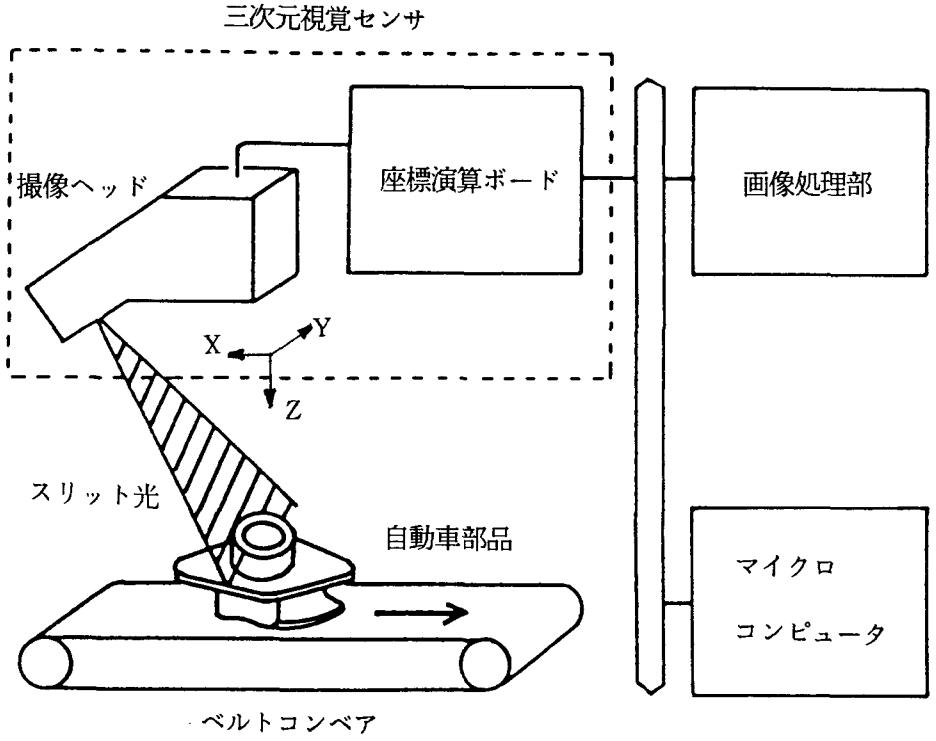


図6-5　試作異品検査システムの構成

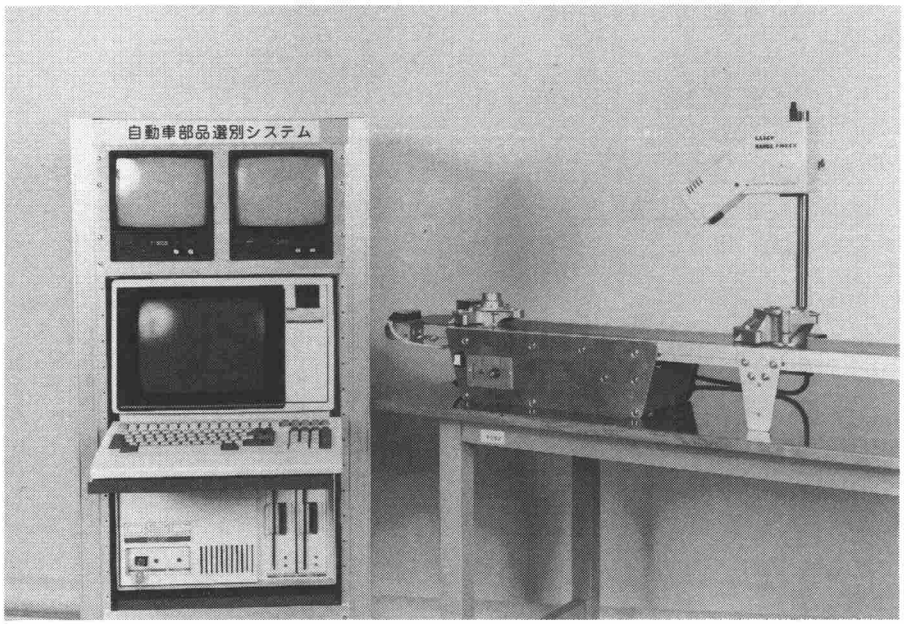


図6-6　試作異品検査システムの外観

試作したシステムの外観写真を示す．

図6-7は，この試作システムの画像処理部の構成図である．この画像処理部は，画像メモリ，距離ゲーテイング回路，ランレングス符号化回路，膨張・収縮回路および面積測定回路で構成されている．これらの回路は画像データの高速転送のために専用のビデオバスで接続されている．また，それぞれの回路はシステムバスによりマイクロコンピュータと接続されている．

図6-5，図6-7を用い，このシステムの動作を説明する．まず，ベルトコンベアの移動にともない，三次元視覚センサによりスリット光に沿う１ラインごとに対象物の三次元座標が繰り返し測定される．この時，スリット光の投射される間隔が短いほど対象物の三次元形状は忠実に測定されるが，対象物全体の三次元座標の測定時間が長くなるという欠点がある．そこでここでは，この三次元座標の測定時間をできるだけ短くするために，対象物の形状が失われない範囲でスリット光の投射間隔を長く設定するものとし，その値として0.9mmを選んでいる．また，１部品あたりのスリット光の投射本数は対象物の表面全体の形状が測定できるように150本（Ｘ方向の測定範囲として135mm）としている．

測定された三次元座標データ群は，高さデータが輝度データに変換されて画像処理部の画像メモリに記憶され距離画像（データ点数は150×241点）として表される．画像メモリは256階調を有しており，その距離（高さ）分解能は，対象部品の特徴形状が安定に記憶できるよう±0.2mmに設定している．**図6-8**に記憶された距離画像の例を示す．

この距離画像について，距離ゲーテイング回路により距離のしきい値が設定され，認識に必要な距離ゲート画像だけが距離ゲーテイング回路内の２値メモリに記憶される．この距離ゲート画像の抽出と同時に，特徴量の１つとして距離ゲート画像の総面積（総画素数）が面積測定回路により計測される．

距離ゲーテイング回路で抽出された距離ゲート画像は，画素間につながりのない離散画

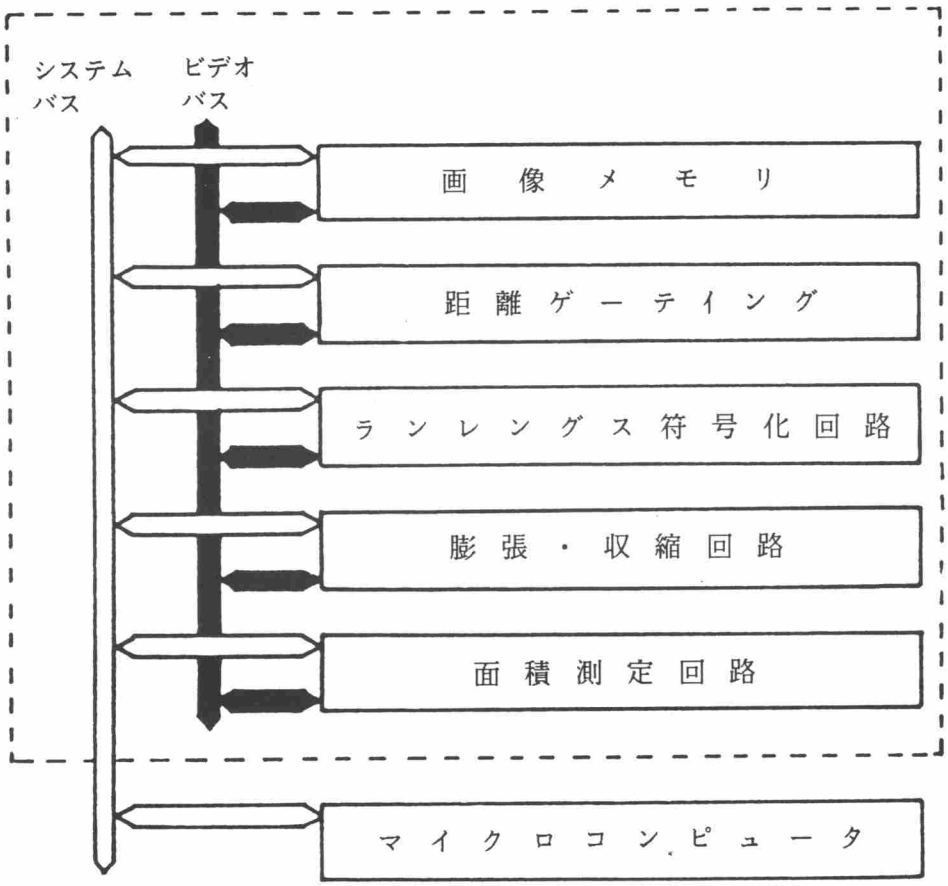


図6-7　異品検査システムの画像処理部の構成

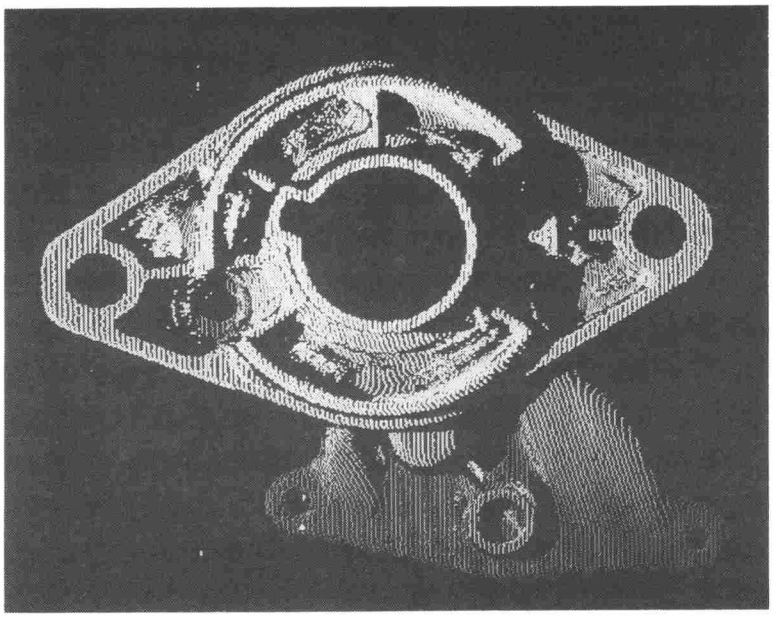


図6-8　異品検査システムで検出した距離画像の例（タイプC）

像であるため，膨張・収縮回路によって画素の結合が行われ連続画像に変換される．

得られた連続画像についてランレングス符号化回路により高速処理のための符号化が行われる．この符号化は，距離ゲート画像の行ごとに水平走査方向の黒画素（または白画素）の連なり（ラン）を調べ，ひとまとまりのランのデータをその位置と長さに変換して格納しておく処理である．この符号化したデータを用いると複数の画素を同時に処理できるため，画素単位で処理する場合に比べて大幅に処理時間を短縮することができる．

この符号化データを用い，マイクロコンピュータによるソフトウエア処理で幾何学的特徴量が計算され，部品の種類が判定される．

上記のハードウエアの動作のうち，距離画像作成のための三次元座標値の画像メモリへの書き込みは，１スリット光（座標点数で241点）あたり，三次元視覚センサが行う座標測定に要する時間16.7msec内で行われる．また，面積測定とランレングス符号化はそれぞれ33.3msecで，膨張・収縮は１回あたり66.7msecで行われる．

6.3.3 検査アルゴリズム

本方式により識別を行う場合，各部品の特徴形状として何を選ぶかが重要となる．これには，三次元視覚センサの死角の影響を受けないで安定に距離画像が得られる部分であり，かつ，それぞれの部品の間に形状的な有意差があることが必要である．そこで，ここでは部品の上部にあるボスとガイドに着目し，**図6-9**に示す検査アルゴリズムを決定した．

このアルゴリズムでは，Ｚ１からＺ５までの５段階の距離ゲーテイングで得たボスとガイドの距離ゲート画像の面積の大きさによりタイプＡからタイプＤまでの４タイプを識別する．次に，Ｚ４とＺ５の２回の距離ゲーテイングで得た距離ゲート画像のガイドの長さの違いによってタイプＥからタイプＩの５種類を識別する．図6-9の判定基準に合わない場合は，種類判別が不可能としてリジェクトされる．

タイプＡの識別方法について**図6-10**により説明する．タイプＡは９種類の部品の中でガイドが最も高く突き出た構造をしている．そこで，その距離画像について，撮像ヘッドの先端からＺ１＝220mm±0.6mmの高さで距離ゲーテイングを行い（同図(a)），このガイドを距離ゲート画像（同図(b)）として切り出す．同じ高さの距離ゲーテイングでは，他の８種類の部品については多重反射による若干の画像が得られる外は，距離ゲート画像は得られない．そこで，この距離ゲート画像の総面積（画素数）を面積測定回路で測定し，所定の面積が得られればタイプＡと判定する．

タイプＢ，Ｃ，Ｄの３種類は，タイプＡと同じく，そのタイプに合わせて設定した距離ゲーテイングによりボスあるいはガイドの距離ゲート画像を得，それらの総面積（画素数）を測定して識別する．

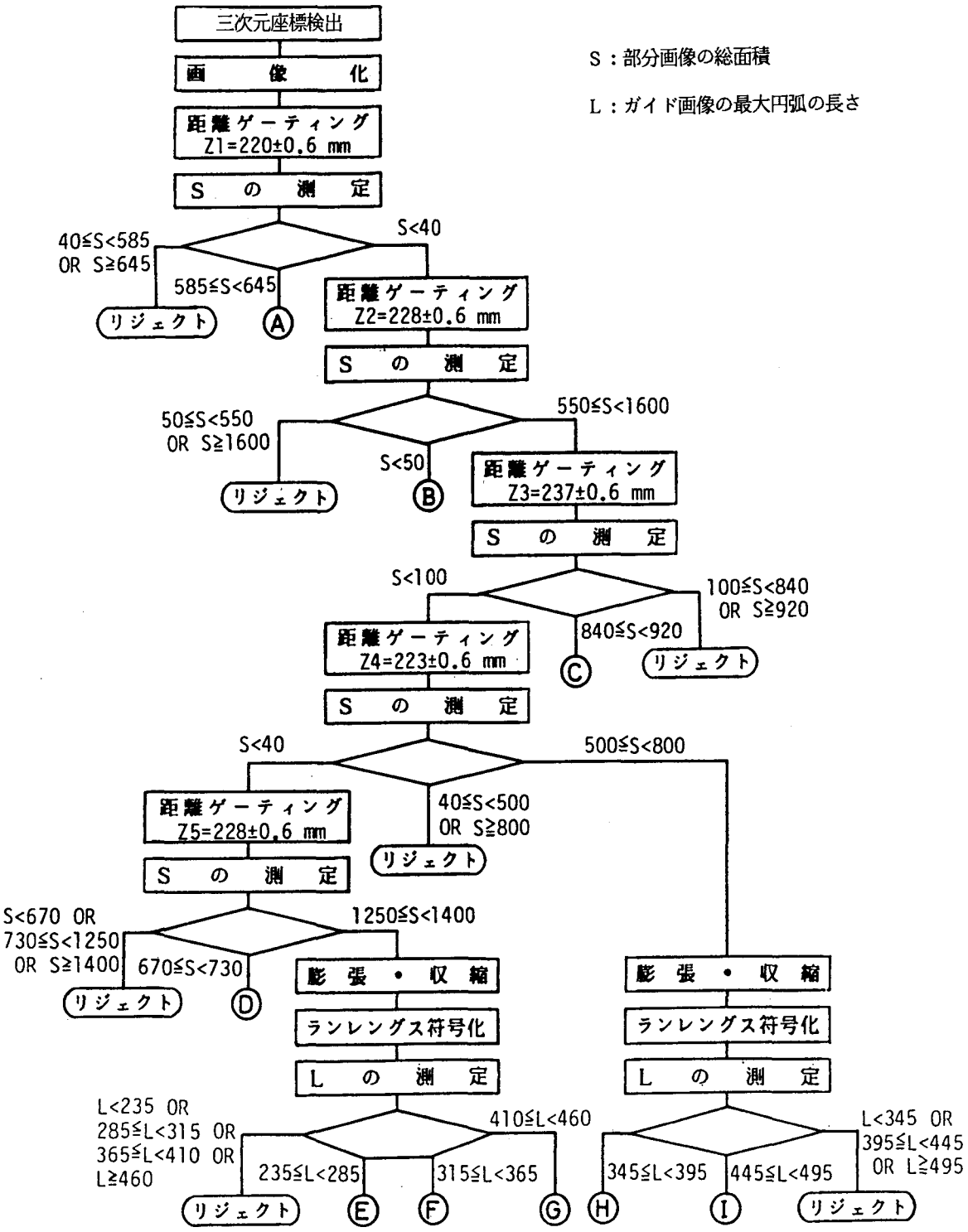
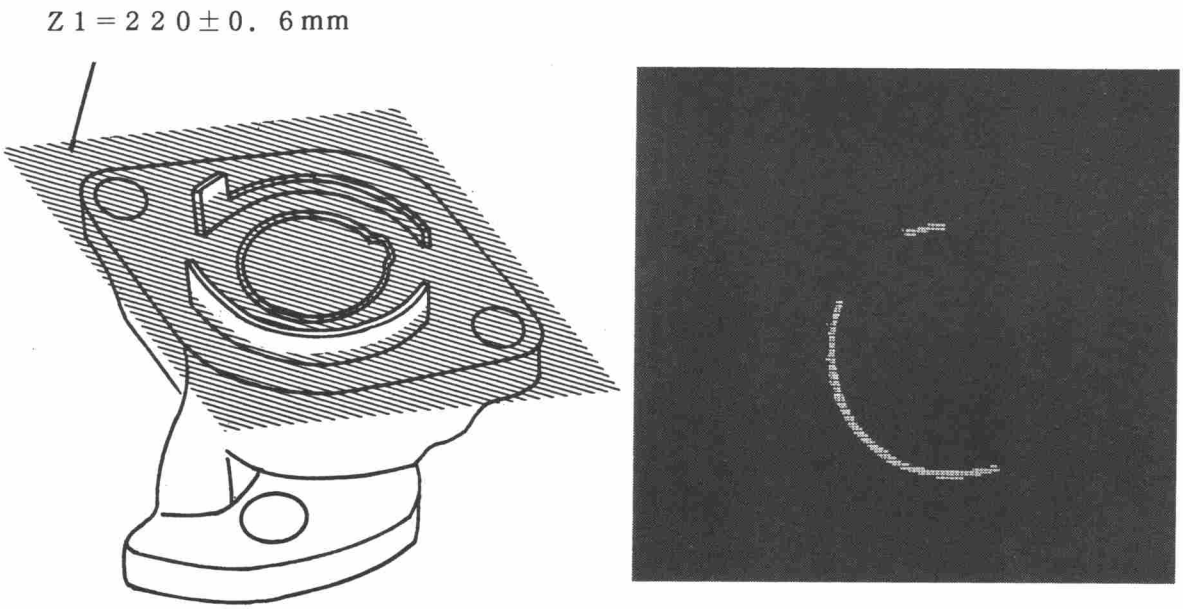


図6-9　異品検査アルゴリズム



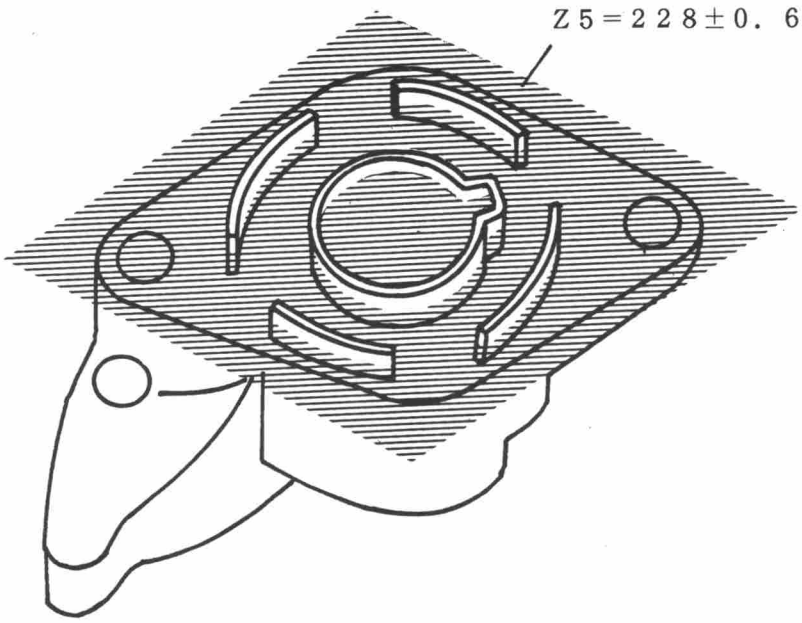
(a) 距離ゲーテイング　　(b) 距離ゲート画像

図6-10　図6-1に示す対象部品タイプＡの識別方法

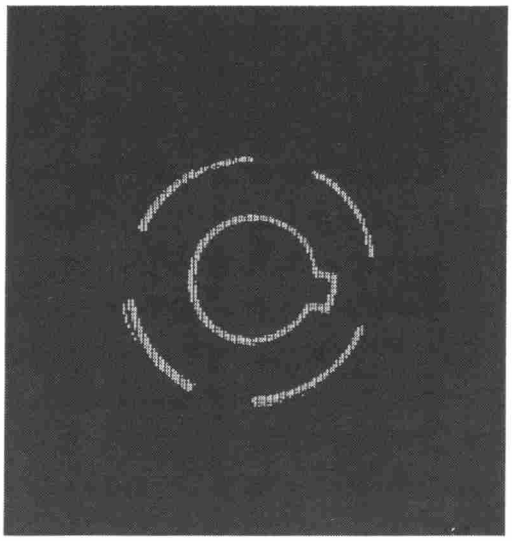
次にタイプＥの識別について**図6-11**により述べる．タイプＥは，特にタイプＦ，Ｇと類似しており，ボスとガイドの高さは３種類とも同一で，さらにそれぞれのボスとガイドの総面積は識別に有意なほどの違いがない．そこで，この３種類については，それぞれのガイドの長さが異なることに着目する．

まずＺ５＝228±0.6mmの高さで距離ゲーテイング（同図(a)）を行い，ボスとガイドの距離ゲート画像（同図(b)）を抽出する．この距離ゲート画像は三次元座標値をそのままプロットしたものであるので画素間につながりがない離散画像である．そのため，このままでは長さ測定が行えない．そこで，膨張処理を複数回行って画素を連結した後，収縮処理を行って特徴量を保存させた連続画像に直す（同図(c)）．ついで，この連続画像についてランレングス符号化処理を行い，この符号化したデータを用いてガイドの長さを求める．ここでガイドの長さは，簡便な処理でその値を得るために**図6-12**に示すように，各ガイドの画像についての重心位置とこのガイド画像の周囲画素のうち重心位置から最も遠い画素までの距離で等価的に表すようにした．４つのガイドの内，その距離が最長のものをその部品の特徴量Ｌとして求め，これによりタイプＥ，Ｆ，Ｇを識別する．

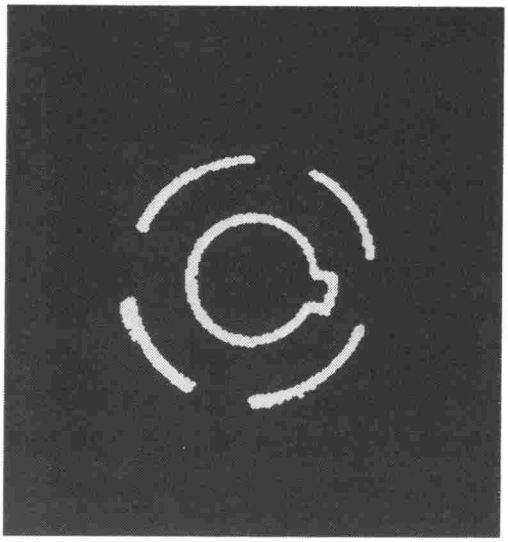
残りのタイプＨ，Ｉについても，Ｅ，Ｆ，Ｇと同様ガイドの長さを測定して識別を行う．



(a) 距離ゲーテイング



(b) 距離ゲート画像



(c) 連続画像に変換された
距離ゲート画像

図6-11　図6-1に示す対象部品タイプＥの識別方法

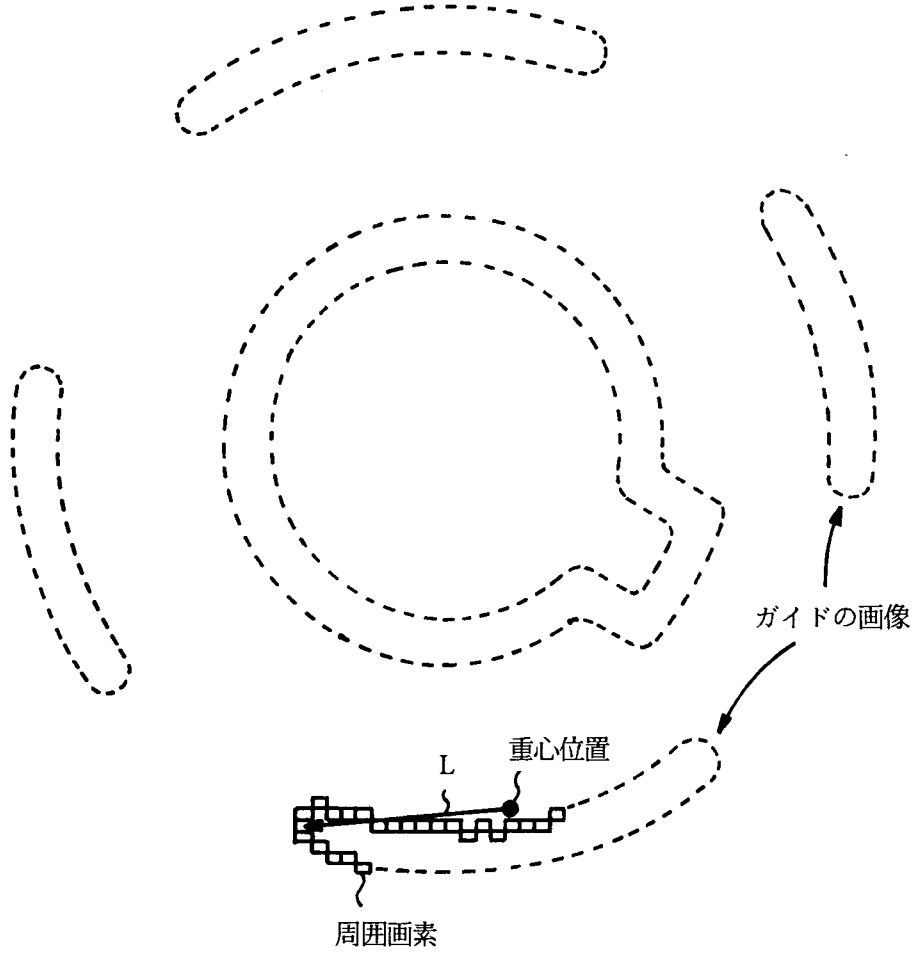


図6-12　部品のガイドの長さの求め方

6.4　評価実験

開発したシステムと検査アルゴリズムの有効性を調べるため評価実験を行った．実験には，タイプＡからＩまでそれぞれ10個，合計90個の部品を用意し，回転方向の影響を調べるため，約30度ずつ回転させた12方向（実験回数として1080回）についてマウント部を下にしてベルトコンベア上に載せて行った．

この結果，全実験において，誤って認識されることやリジェクトされることはなく正しく種類が識別された．このときの検査時間は，最も長い場合で3.5secであった．この時間の内訳は，三次元座標検出とその距離画像化が2.5sec，距離画像の処理が1.0secで，処理に要する時間の内，距離ゲーテイングと面積測定に要する時間が0.3sec，膨張・収縮が0.3sec，そしてランレングス符号化と長さ測定が0.4secであった．

このシステムの性能をまとめて**表6-2**に示す．

表6-2　異品検査システムの性能

検　査　対　象	自動車部品（アタッチメント部品）
種　　類	類似形状９種類
ベルトコンベア速度	56mm/sec
検　査　時　間	3.5sec（最大）

6.5　まとめ

本章では，従来の三次元形状機械部品の認識方法では高速の認識が容易ではなかった位置決めのされていない形状が類似した機械部品を，三次元視覚センサを用いて簡便・高速に認識し，異品検査を実現する方法を提案した．

提案した方法は，三次元視覚センサにより対象物の距離画像を検出した後，この距離画像にしきい値処理（距離ゲーテイング）を行うことにより，各部品の特徴が明確に表される高さで部品を輪切りにした二値画像（距離ゲート画像）を得，この距離ゲート画像について幾何学的特徴量を抽出して対象物を認識・検査する方法である．

この方法により，９種類の類似した形状を持つ自動車用アタッチメント部品を，検査時間3.5secで安定に識別することができ，この方法の有効性が確認できた．

上述した対象部品については，二段階の距離ゲーテイングと二種類の特徴量を用いて識別を行ったが，さらに複数の距離ゲート画像と特徴量の組み合わせることで，より複雑な形状の対象物への適用も可能である．また，考案した距離ゲーテイング手法は，複雑形状の三次元対象物について二値画像を安定に得る大変有効な手法の一つと考えられ，今後，各種の認識処理への活用が期待できる．

第７章　自動車パネルの寸法検査

本章では，第４章で述べたスリット光固定型三次元視覚センサを用い，端部に曲がりのある自動車用パネルの寸法を正確に検査するための方式とその有効性について論ずる．提案する方法は，検査すべきパネルと基準ブロック間に三次元視覚センサのスリット光を投射して，その反射光画像に円を当てはめその円弧端点を算出し，これから種々の曲率をもつパネルについて隙間と段差を計測する方法である．さらに，曲げ加工などで生ずるパネルの光沢のため反射スリット光画像に途切れが生じたときには，スリット光の投射角度と投射強度の制御によって良質な画像に改善して，上記の方法に基づいて検査する．この方法を用いて製作したシステムにより，目標値を満たす精度で寸法計測が行えることが確認され，提案した方式とシステムの有効性が示された．

7.1　まえがき

自動車の高級化指向に伴って，自動車ボデーの仕上がり品質向上への要望が益々大きくなっている．自動車ボデーの仕上がり寸法品質は，自動車の塗装品質と並んで重要な仕上がり品質の１つである．

自動車ボデーは，ボデーを構成する各部のパネルを組み合わせてボデーきょう体とし，それに種々の部品を取付け，塗装を施した後，完成車となる．そのため，自動車ボデーの検査は，ボデーを構成する各部のパネルでの検査，塗装する前のボデーきょう体での検査，および完成車両での最終検査に分けられ，各工程で非常に綿密な検査が行なわれる．

ボデーきょう体での検査には，各パネルを組み付けたボデーの全長，全幅などの寸法緒元の計測，各パネルの組み付け寸法の検査，および窓ガラスを装着するための位置の検出と検査などがある．このうち，ボデー寸法諸元の計測では，検査するボデーの両側に設置した６軸ロボットの先端にスポット光センサを装着し，ロボットを動かしてきょう体の全長・全幅などを計測した報告がある[Sakamoto 87]．また，ロボットを用いず固定治具に多くのセンサを取付けて検査するシステム[Seliger 88],[Wilson 85]が報告されているが，これらはいづれもスポット光センサによる検査で，計測部位も単純な形状をしたものに限られている．

完成車両の最終検査については，検査員による綿密な検査が行なわれていて，検査の自動化の強い要望があるが，これまでに検査システム開発の報告はない．

パネル検査は，端部に丸みを持つパネルの仕上がり寸法を検査するもので，これらについても開発報告例は見当たらない．

自動車ボデーではなく各種の部品や素材の寸法や形状の検査については，スポット光センサをアクチェータに取り付けたシステム[Takagi 86]や，第５章でも述べた舶用プロペラの形状検査システムの報告[Livingston 87]があるが，いづれも端部形状が複雑でなく，寸法や形状検査のための新しい工夫はなされていない．また，５章で述べた著者らによる十字スリット光型三次元視覚センサを用いた自動車エンジン用部品の寸法検査システム[Ozeki 91b]もあるが，これは十字スリット光により突起や穴の寸法や非対称性を検査するために開発されたもので，自動車パネルのように表面に光沢が生じやすく，そのため反射光画像に途切れが生じやすい対称物への適用を考慮してはいない．

提案する方法は，端部が規定の曲率で曲げられた自動車パネルの寸法を，スリット光固定型三次元視覚センサを用いて検査する方法である[Ozeki 92b].

この検査方法は，精密に製作された基準となる治具（以下，基準ブロックと呼ぶ）に沿わせて検査すべきパネルを位置決めし，それらにスリット光を投射し，その反射光画像からパネルと基準ブロック間の幅（以下，隙間と呼ぶ）と高さの差（以下，段差と呼ぶ）を得るもので，パネル端部の形状がある曲率で曲げられているにもかかわらず，安定して隙間と段差を計測・検査するものである．さらに，端部に光沢などが発生して反射光画像に途切れが生じても，投射するスリット光の角度制御と投射強度制御によって反射光画像の質を良くして検査できるようにしている．

以下では，このシステムの検査方式，システム構成および評価実験結果について述べる．

7.2 検査方式

7.2.1 検査対象

自動車ボデーは，ドア部パネル，エンジンフード部パネル，トランクフード部パネル，フェンダ部パネル，などの各部のパネルで構成されている．検査すべき対象は，これら各部のパネルで，これらのパネルには防錆鋼鈑が用いられている．

図7-1は，フェンダ部パネルを示したものである．パネルの端部は，多くのものが規定の曲率で曲げられている．検査は製作されたパネルが設計値通りに作られているかをみるもので，精密に製作された基準ブロックを標準として，検査すべきパネルと基準ブロックとの間の隙間や段差を計測することによって行なわれる．

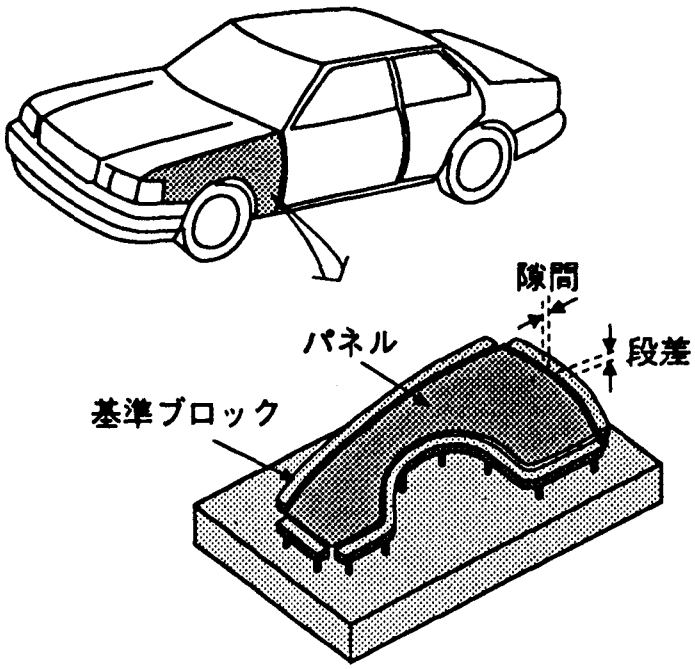


図7-1　自動車パネル

自動車の各部のパネルの端部はそれぞれ異なった形状をしている．図7-2はその代表的な端部形状を示したもので，その形状は，(1)パネル端部が切断されている場合，(2)パネルが内側に曲げられている場合，(3)パネルが直角に曲げられている場合，および，(4)パネルが鈍角に折曲げられている場合の４つに分けられる．隙間と段差は，各場合について図のように定義されている．すなわち，(1)については，隙間・段差ともパネル先端で，(2),(3)については，隙間はパネルの曲げ部分（以下，円弧部という）の先端，段差は円弧部が開始する点で，さらに，(4)については，隙間は円弧部の終了点，段差は円弧の開始点でそれぞれ定義されている（以下，これらの点を寸法定義点という）．このため，パネルの寸法検査においてはこの寸法定義点を検出するのが課題となる．また，(2),(3),(4)の場合には，鋼鈑をプレス曲げ加工することにより，その一部分が伸びて，その端部の表面に光沢などが発生することがある．

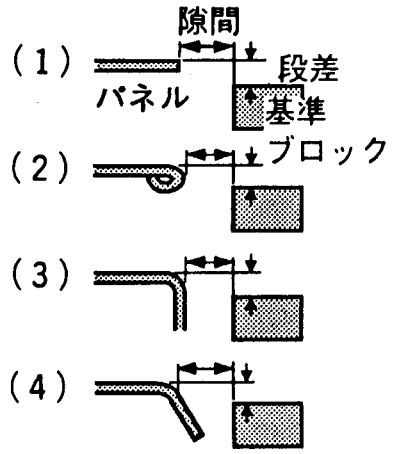


図7-2　代表的なパネル端部の形状

上述の端部形状をしたパネルを高速に検査するためには，光学的手法が有効と考えられ，その具体的な方法として，スリット光投影法がある．この方法を用いる場合，図7-3に示すようにスリット光をパネルと基準ブロックの間に投射すると，プレス曲げ加工によって発生する光沢などのために，テレビカメラの反射光画像に途切れが生ずる．このように，途切れの発生などのために正確な画像が得られないと，図7-2に示した各種のパネル端部形状に対し，正しい検査が行なえなくなる．正確な検査のためには，途切れのない画像を得ることが必要となる．

7.2.2　基本検査方式

考案した検査方式は，検査すべきパネルと基準ブロック間にスリット光を投射して，その反射光画像に最適な円を当てはめ，その円弧の端点（以下，寸法定義点という）を推定算出し，曲率が種々変わる端部形状のパネルについても，正確な隙間と段差を計測する方式である．さらに，曲げ加工によって生ずる光沢のために反射光画像に途切れが発生したときには，スリット光の投射角度制御と，投射強度制御を併用し，途切れのない画質の良い反射光画像に改善して検査する．

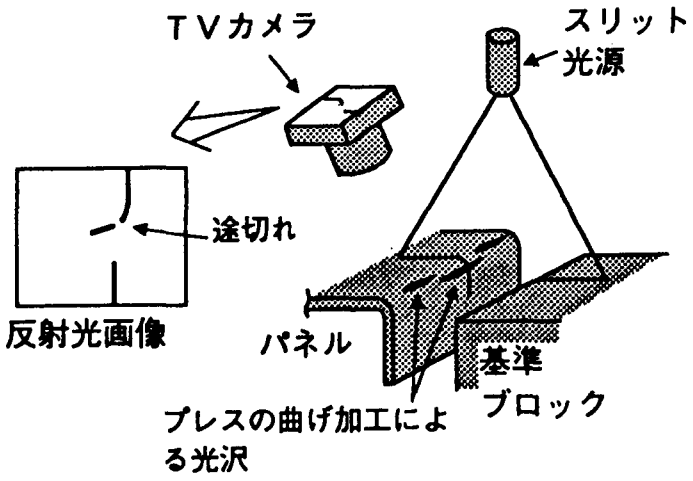


図7-3　パネル端部の計測と光沢による反射光画像の途切れ

図7-4は，図7-2(3)の端部形状について，反射したスリット光画像から寸法定義点を求める方法を示した図である．検査部位にスリット光を投射して得られる反射光画像から三次元座標を検出し，パネル端部の円弧部に円をあてはめ算出された円の中心と半径から寸法定義点である円弧部先端を決定する．ここで，円弧部は，図7-4に示すようにパネル断面の三次元座標値の二次微分，すなわち曲率を計算し，曲率が許容値以上の長さにわたりしきい値を超える領域として検出する．図7-2(2)および図7-2(4)の端部形状についてもこ

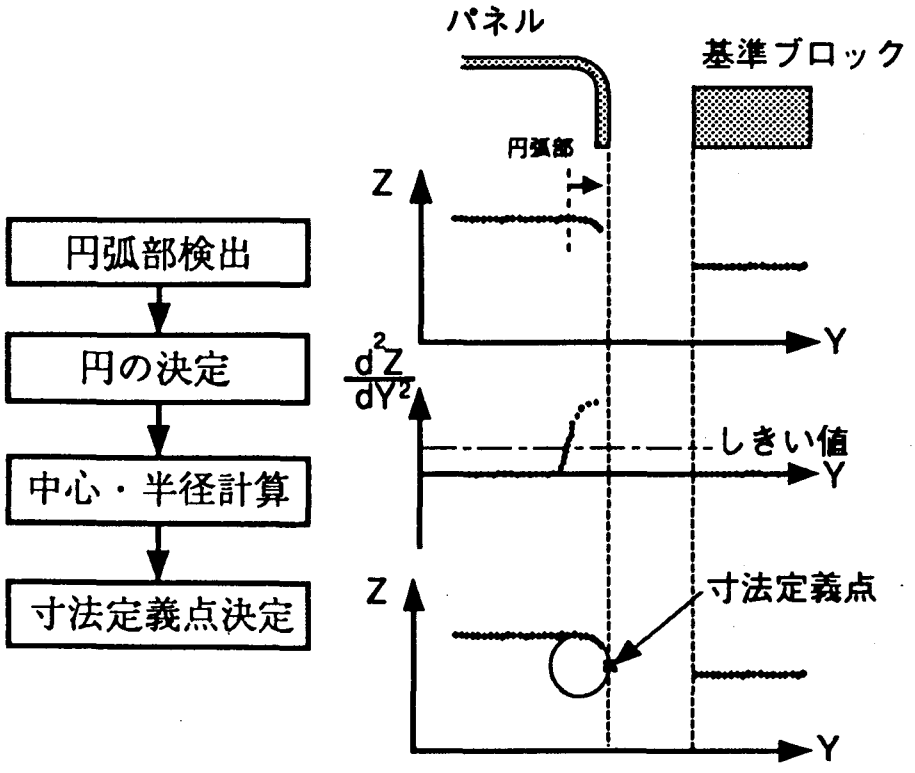


図7-4　円弧近似による寸法定義点の決定

の場合と同様に円のあてはめを行って，寸法定義点を決定する．また，図7-2(1)のように円弧部がない場合には，得られたスリット光画像の端点を寸法定義点とする．

図7-5は，パネルの円弧部の光沢のために発生する反射光画像の途切れを改善するための投射スリット光の投射角度制御と投射光強度制御の方法を示したものである．投射角度と投射光強度の制御を行なうために，まず着目すべきパネル端部の円弧部を抽出する．次に，円弧部において三次元座標値から途切れの長さ（同図(a)）を検出し，途切れがあった場合には，センサを移動させることでスリット光を投射する角度を微小角度だけ変化させる．このとき，センサの移動方向は，投射スリット光平面内で，パネル端部をのぞき込む方向とする（同図(b)）．この状態で，同様にスリット光を投射し，途切れの長さを検出する．ここでスリット光の途切れが小さくなれば，前回移動した方向と同じ方向にさらに移動させ，逆に，スリット光の途切れが大きくなる場合には，前回の移動の逆方向に移動させる．この投射角度制御により，途切れのない品質の良いスリット光画像を得ることができる．

次に，円弧部のスリット光の線幅を検出し，これが適正な範囲にあるかどうかにより投射光強度制御を行なう．すなわち，円弧部のスリット光の線幅が小さすぎる場合には，投射光強度を上げ，逆に線幅が大きすぎる場合には，投射光強度を下げる．

このように投射角度と投射光強度を制御することで，途切れのない均一な画像を得ることができる．

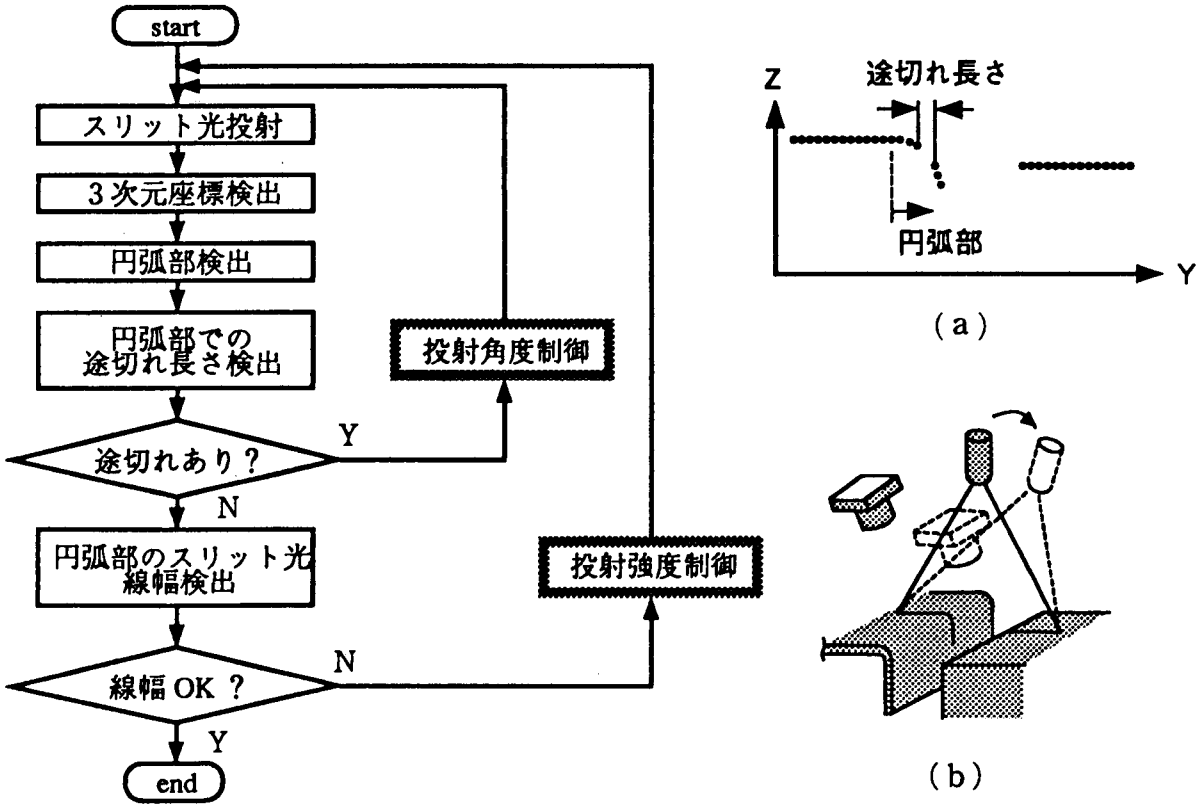


図7-5　スリット光の投射角度と投射強度の制御方法

7.3. 検査システム

7.3.1 システムの構成

開発した検査システムにおいては，パネルはパネル取り付け台に取り付けられて検査される．**図7-6**にパネル取り付け台の構成を示す．この取り付け台には，対象パネルに対応した基準ブロックが固定されており，パネルは，この取り付け台に磁石を用いた専用の取り付け治具で取り付けられる．また，この取り付け台の側面と底面には，パネルを検査システムへ正しく位置決めするための基準面が設けられている．この取り付け台は，各種パネルを検査システムに簡便かつ正しく位置決めするために，パネルの種類によらず共通の仕様で作られている．

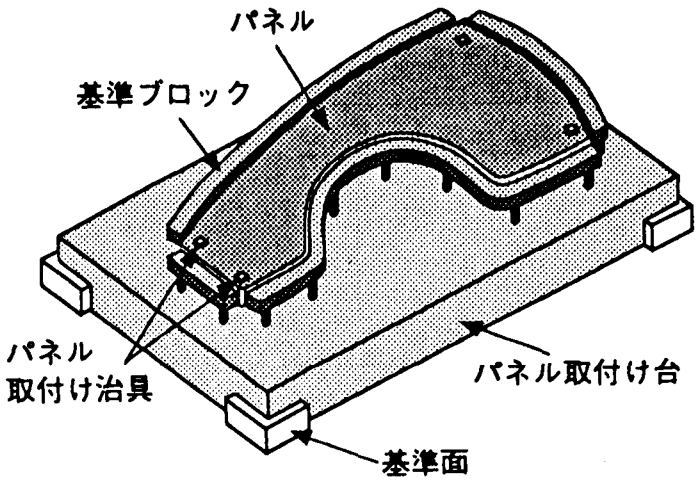


図7-6　パネル取り付け台の構成

図7-7に開発したパネル寸法検査システムの構成を示す．このシステムは，三次元座標を検出するための三次元視覚センサ，三次元視覚センサを計測部位へ移動・位置決めするための６軸ロボット，６軸ロボットを制御するためのロボットコントローラ，三次元視覚センサの出力の処理ほかを行うための処理部，および，６軸ロボットとパネル取り付け台を固定するための定盤からなる．このシステムに用いている三次元視覚センサは第３章で詳述したスリット光固定型三次元視覚センサである．処理部は，この三次元視覚センサの出力を処理し寸法を計算するためのパソコン，後述する検査ファイルの作成のための外部記憶装置とイメージスキャナなどで構成されている．また，定盤上にはパネル取り付け台上のパネルをロボット座標系に正しく位置決めするための位置決め治具が設けられている．

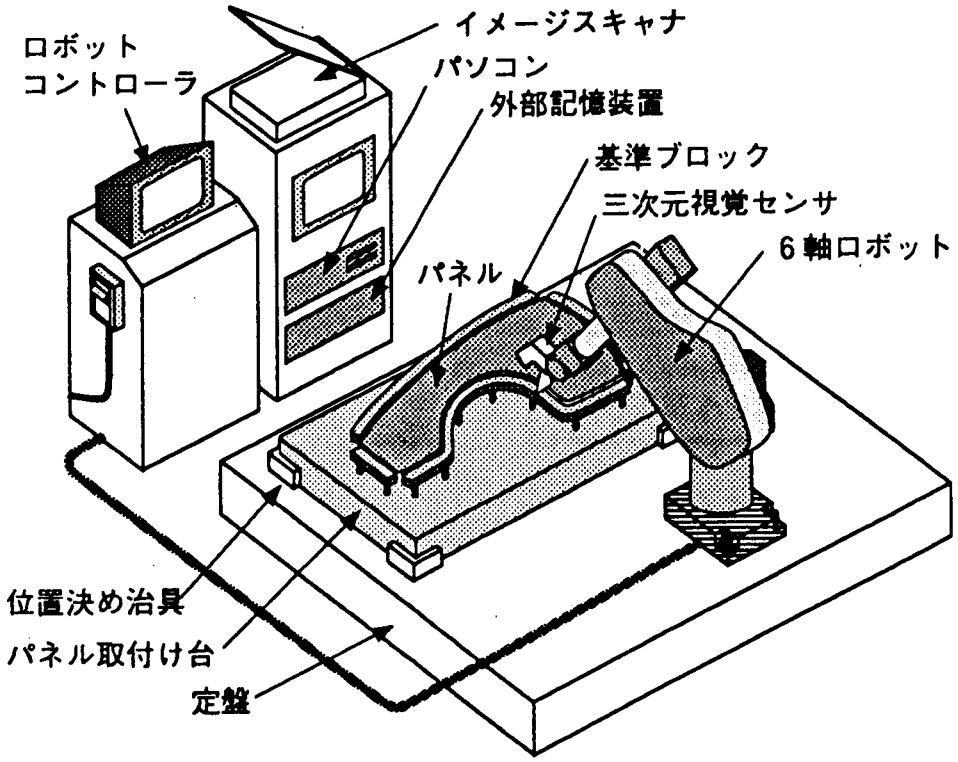


図7-7　パネル寸法検査システムの構成

7.3.2　検査アルゴリズム

図7-8は，この検査システムの検査アルゴリズムを示している．まず，パネル取り付け台の基準面を，定盤上の位置決め治具に当てがってパネルを固定する．次に，検査対象のパネルについての検査ファイルを外部記憶装置から読み込む．読み込んだ検査ファイルで指示される計測部位に，三次元視覚センサを6軸ロボットで移動・位置決めする．位置決め後，パネルと基準ブロックにスリット光を投射する．得られた反射光画像に途切れがある場合には，途切れのない反射光画像が得られるように，6軸ロボットにより三次元視覚センサの姿勢を変え，スリット光の投射角度の制御を行う．角度制御により途切れのない反射光画像を得た後，投射スリット光の強度制御を行って，反射光画像の線幅を適正な値にする．

このようにして，良好な反射光画像を得た後，パネルと基準ブロックについての三次元座標を検出し，これより寸法定義点を決定する．なお，上述の角度制御を，検査時間で制限される所定の回数まで繰り返し行っても画像の途切れがなくならない場合は，図7-4で示した円の当てはめにより途切れ部分の三次元座標を推定した後，定義点を決定する．次に，決定した定義点の三次元座標から隙間・段差を計算する．隙間・段差の計測結果の出力はグラフ表示と統計量表示により行う．グラフ表示は，計測結果の正寸値とのずれをパネル外形に沿って表示する．また，統計量として，正寸値からのずれについての平均値や偏差を出力する．

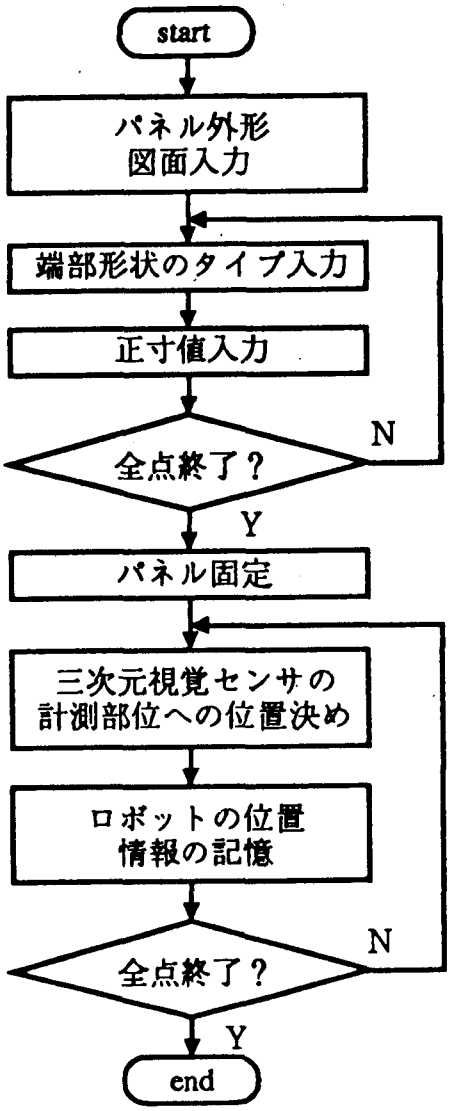


図7-8　パネル寸法検査アルゴリズム

図7-9は，検査ファイルの作成の手順を示す．検査ファイルは，パネル検査に必要な情報が登録された表で，各パネルごとにあらかじめ作成される．これには計測結果の表示のためのパネル外形図，パネルの複数の計測部位についての測定の順番，それぞれの計測部位の端部形状のタイプと隙間・段差の正寸値，そして，三次元視覚センサを計測部位に位置決めするためのロボットの位置情報が登録される．

パネル外形図はイメージスキャナから入力する．また，ロボットの位置情報の登録は，基準ブロック上に記された計測部位に三次元視覚センサのスリット光が正しく投射されるようにロボットを位置決めし，このときのロボットの位置を外部記憶装置に記憶させて行う．

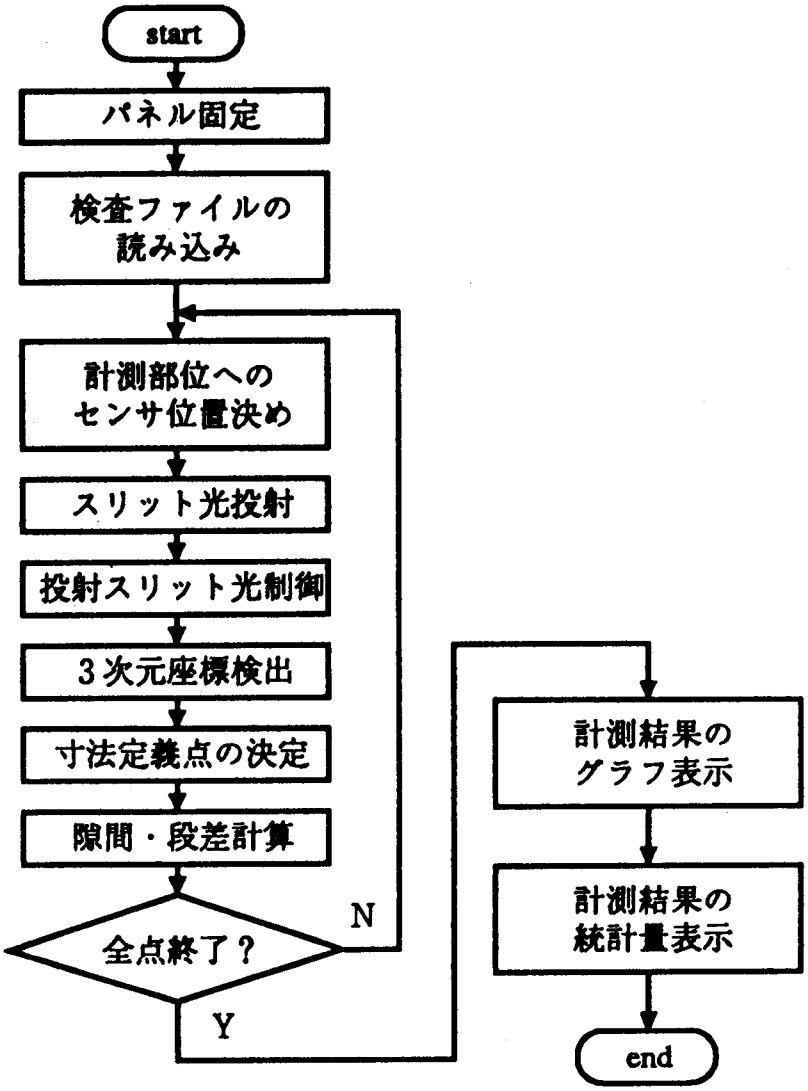


図7-9　検査ファイルの作成の手順

7.4. 評価実験

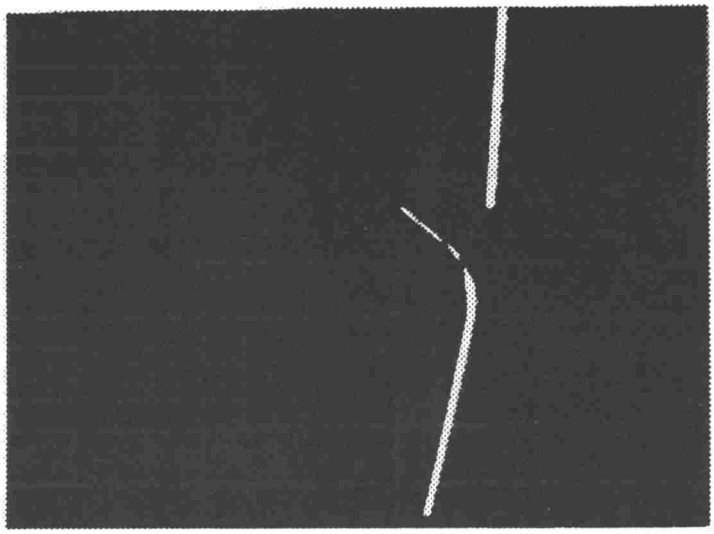
7.4.1　計測精度

途切れのない反射光画像を得るための投射スリット光制御の有効性の検証と，投射スリット光制御を行ったときの寸法計測精度の評価を行うため，開発したシステムを用いて実験を行った．

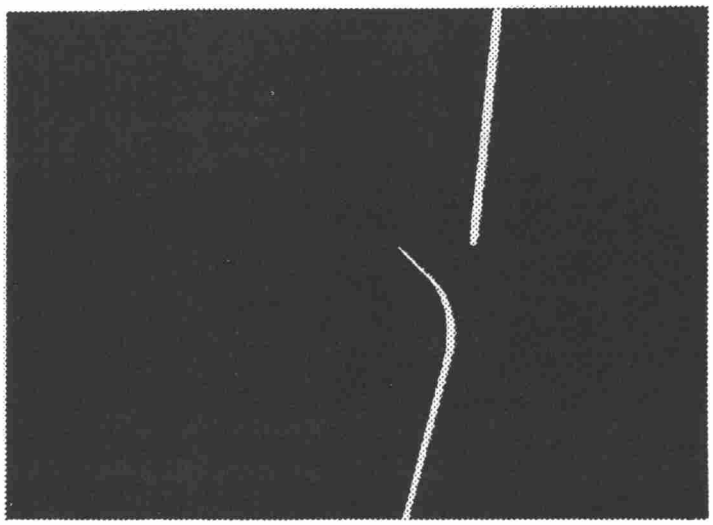
投射スリット光制御の有効性の検証は，パネル端部に光沢のある実パネルを対象に，投射スリット光制御を行わない場合と行った場合のそれぞれについて，三次元視覚センサにより検出された反射光画像を比較することで行う．

図7-10は投射スリット光制御の有効性の検証実験結果である．同図(a)は，図7-2の(4)の端部形状のパネルに，投射スリット光制御を行わないで，あらかじめ設定した一定角度で一定強度のスリット光を投射したときの反射光画像の例を示している．この図より，パネルの光沢のため端部に途切れが発生していることが分かる．さらに，この画像では，途切れていない部分についても，線幅は適正な幅よりも細く撮像されている．

同図(b)は，同じパネルについて途切れがなくなるように投射スリット光の角度制御を行い，さらに，強度制御を行った後の反射光画像を示している．これらの制御により，画像の途切れがなくなっていることと，画像の線幅が制御前に比べ広く撮像されていること



（a） 端部に途切れのある反射光画像



（b） 投射スリット光制御後の反射光画像

図7-10　投射スリット光制御の有効性

が分かる．

以上の実験結果から，投射スリット光制御がパネルの光沢による反射光画像の途切れなどの改善に有効であることが確認された．

寸法計測精度の評価は，実パネルを対象に行う．寸法計測部位は，図7-2に示される4種類の端部形状のそれぞれについて20点とし，図7-2の(2),(3),(4)の端部形状については，パネル端部に光沢が発生している部位とする．評価は，この計測部位の隙間と段差について，その真値と本システムによって投射スリット光制御を行って得た測定値とを比較することで行う．隙間と段差の真値は，本システムによる測定後，パネルに樹脂を流し込んで製作したレプリカの断面を万能投影機で観測して求める．

図7-11，**図7-12**に計測精度の実験結果を示す．図7-11が隙間，図7-12が段差の結果である．横軸はレプリカから求めた真値，縦軸は本システムによる測定誤差である．ここで，測定誤差は測定値から真値を引いた値である．端部形状の違いは□，△などの記号により示されている．この実験結果より，隙間と段差とも，端部形状の違いによる有意差はなく，(1)から(4)の全端部形状についての測定精度は$\pm 2\sigma$で表して，それぞれ±0.15mm，±0.1mmであることが分かる．パネルを製作するときに許容されている寸法誤差(以下,許容誤差という)は，パネルと基準ブロックとの隙間・段差で表して，いづれも±0.5mmであり，その寸法を測定する上での目標精度は許容誤差の1/3以下である±0.17mmに決められている．

上述の測定精度結果は，この目標精度を満たしており，これより，開発した検査方式と検査システムの有効性が確認された．

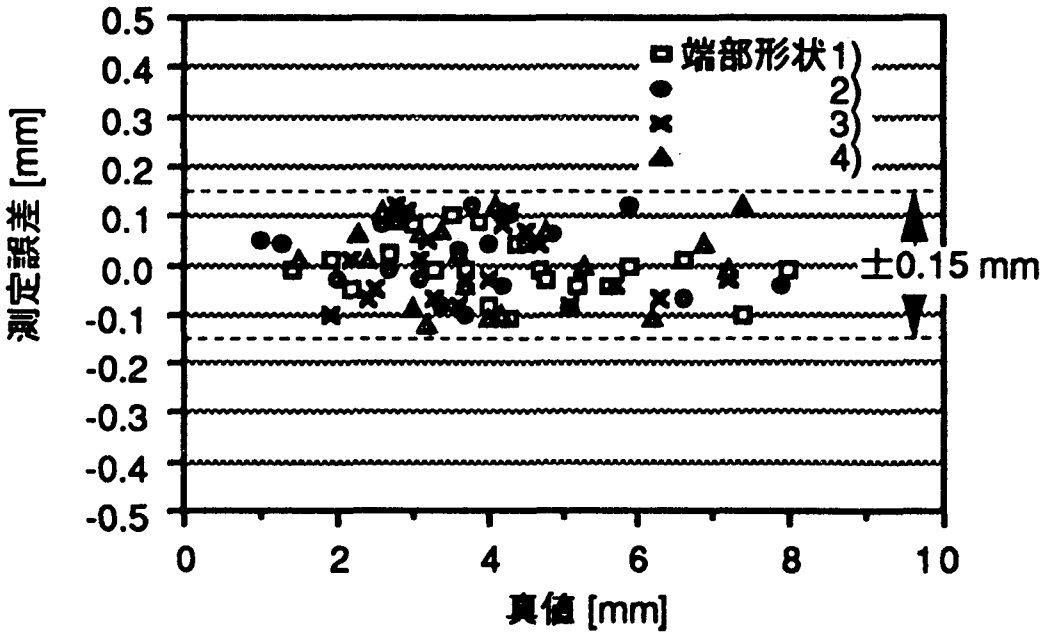


図7-11　パネル寸法の計測精度（隙間）

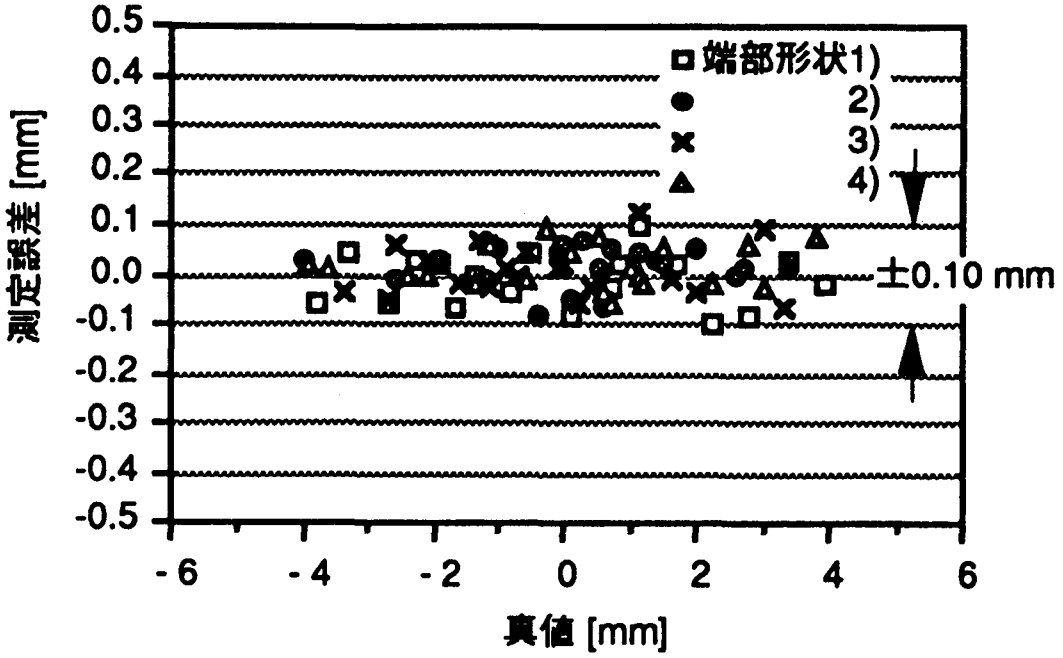


図7-12　パネル寸法の計測精度（段差）

7.4.2　システム性能

表7-1に検査システムの性能をまとめて示す．検査対象は，自動車用のドアパネルなど30種類である．隙間と段差の計測範囲は，隙間が1～8mm，段差が-4～4mmであり，計測精度は，隙間が±0.15mm，段差が±0.10mmで，ある．このシステムによる1部位の計測時間は6secで，この内，ロボットによる三次元視覚センサの位置決めと姿勢制御が4sec，三次元視覚センサによる測定が2secである．この1部位当りの計測時間は，従来，人手によって行われていた場合を約1/5に短縮しており，検査の大幅な高速化が達成されている．

表7-1　パネル寸法検査システムの性能

パネル種類	ドアパネルなど30種類
計測範囲	隙間：1～8mm，段差：-4～4mm
計測精度	隙間：±0.15mm，段差：±0.10mm
計測時間	6sec／1測定点 （位置決め:4sec，測定:2sec）

7.5. まとめ

本章では，自動車パネルの仕上がり寸法を検査するために，スリット光固定型三次元視覚センサを用いて開発した検査方法と同法による自動車パネル寸法検査システムについての有効性について論じた．

提案した検査方法は，検査すべきパネルと基準ブロック間に三次元視覚センサのスリット光を投射して，その反射光画像に円を当てはめその円弧端点を算出し，これから種々の曲率をもつパネルについて正確に隙間と段差を計測し検査する方式である．さらに，曲げ加工などで生ずるパネルの光沢のため反射スリット光画像に途切れが生じたときには，スリット光の投射角度と投射強度の制御によって，良質な画像に改善して，上記の方法に基づいて検査する．

この方法を用いた検査システムは，三次元視覚センサを計測部位にロボットにより位置決めし，パネルと基準ブロック間の隙間と段差を計測する．このシステムは，30種類の自動車パネルの寸法を，1測定点当り6secの時間で，精度±0.15mm以内で計測することができる．これらの性能は目標性能を満たしている．

以上の結果より，スリット光固定型三次元視覚センサとこの検査方式を用いた自動車パネル寸法検査方式およびシステムの有効性が確認された．

第8章　ＩＣリードの外観検査

本章では，スリット光固定型三次元視覚センサとテレビカメラを用いて開発したQFP型ICのリード外観権査の方式とその有効性について論ずる．提案した方式は，三次元視覚センサによりリード高さとリード間ピッチを，テレビカメラによりリード長さを測定する方法である．この方法では，ICリードの表面性状の影響を受けにくくするためにスリット光の投射強度と投射位置の制御を行い，従来の方法で最も大きな課題であったリード高さ測定の信頼性の向上を図っている．また，検査に必要なICの位置決めを，長さ測定と同一のテレビカメラにより，リードピッチをリード高さと同時に三次元視覚センサにより測定することで，装置のコンパクト化も実現するようにしている．この方式を用いた製作された検査システムの性能評価実験では，目標を満たす精度で検査が行えることが確認され，検査方式とシステムの有効性が検証された．

8.1　まえがき

自動車の情報化や知能化に伴って，自動車に搭載される電子機器は益々多機能化し，そこに用いられるICも年々増加の傾向にある．ICの数の増加とともに，自動車用電子機器専用のASICの開発も盛んである．

これらは当初は半導体専門メーカのものが多く用いられていたが，最近では自動車メーカでの内製化も大幅に進んでいる．そのため，自動車メーカでもICなどを含むLSIや回路基板の検査が必要となってきた．

これらの代表的な検査には，(1)プリント基板のパターン検査，(2)ICのリード外観検査，(3)実装部品の外観検査，(4)はんだ付け部の外観検査などがある[Nakagawa 89]．プリント板のパターン検査は，パターンの太り・細り・断線などの欠陥を検査するもので，既にいくつかの報告例がある[Hara 84],[Ninomiya 87]．

実装部品の外観検査は，リード部品やチップ部品などの誤組付け・極性反転・部品の浮きなどを検査するもので，これについては数例の報告[Inagaki 86],[Takagi 88],[Tsuda 90]がある．

はんだ付け部の外観検査は，はんだの有無・過不足・短絡などを検査するもので，最近急激に注目されている[Nakagawa 86],[Kobayashi 89]．

ICリードの外観検査は，ICのリード高さ，相隣り合うリード間のピッチおよび対向するリード先端間の距離（以下，リード長さという）を検査するもので，はんだブリッジやはんだ接合不良などを防止するために行われる．この検査は，通常ICの製造直後や基板搭載前に実施されている．自動車に用いられるICは，近年自動車用電子機器の高機能化に伴って多ピン化と狭ピッチ化の傾向にあり，益々その必要性が増してきている．

これらに関しては，既に数例の報告がある．水野ら[Mizuno 87]は，Quad Flat Package型IC（以下QFP型ICと呼ぶ）を対象にテレビカメラでリード間ピッチとリードの高さを検査している．リードの高さは，ななめ下方より照明しその対角方向に配置したテレビカメラでそのシルエットを撮像し，２値画像処理によってその高さを検査しているが，斜めから投光するため検査できる高さの測定範囲が制約され，その精度も良好でない．

森永ら[Morinaga 87]は，DIP（Dual Inline Package）型ICを対象に，６台のテレビカ

メラとストロボを組合わせて各項目の検査をしている．リード高さはリードの側面のテレビカメラで測定するが，高さを直接測定するのではないためにリード上端の曲がりのために正確な高さ測定は行えない．

提案する方式は，スリット光固定型三次元視覚センサによりリード高さを直接計測する方式[Ozeki 92c]である．この方式は，ICリードの表面性状の影響を受けにくくするためにスリット光の投射強度と位置制御を行い，リード高さを精度良く測定できる点に特徴をもっている．また，システムをコンパクト化するために，リード高さとリード間ピッチを1台の三次元視覚センサで計測し，リード長さ測定とICの位置決めをテレビカメラにより行う点にも特徴がある．

以下では，検査方式，検査システムの構成，検査アルゴリズムおよび評価実験結果について述べる．

8.2 検査方式

8.2.1 検査対象

薄型の四辺形をしたQFP型ICは，面実装化ができ実装密度を高くできるために最近広く使われ始めている．

図8-1は，QFP型ICの外観を示したものである．このタイプのICには，四辺の長さが同じものや対向する二辺の長さだけが同じものがあり，ピン数も24ピンから多くなると300ピンにも及ぶものもある．ICの本体部はプラスチックまたはセラミックが用いられ，リード部は鉄とニッケルの合金が用いられている．

図8-2は，ICリード不良の一例を示したものである．正常なQFP型ICでは，リード間ピッチ，リード長さおよびリード高さは許容範囲内に収められている．このようなICで，リード間のピッチやリードの長さに不良があると実装時にはんだブリッジの発生の原因となり，またリード高さの不良ははんだ接合不良の原因となる．従って，実装前にはリード間ピッチと長さ及び高さの検査が必要となる．このうち，リード間のピッチやリード長さは比較的容易に検査できるが，リード高さの検査は容易ではない．

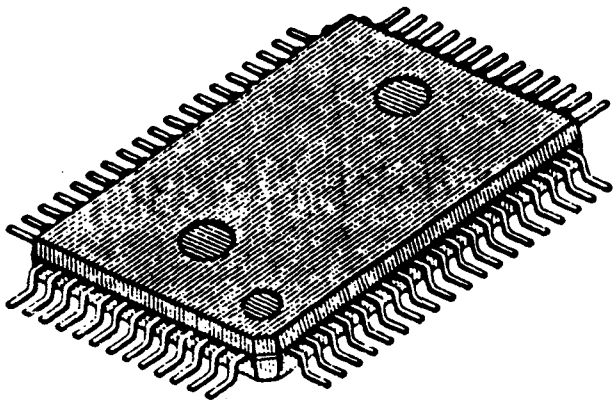


図8-1　QFP型ICの外観

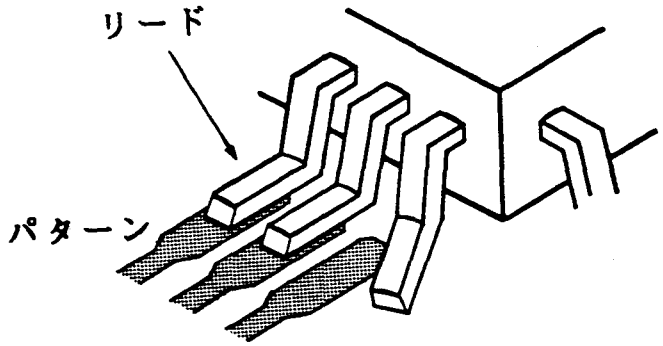


図8-2　QFP型ICリード不良の例

8.2.2　基本検査方式

図8-3は，開発した検査方式である．この方式は，スリット光固定型三次元視覚センサでリード高さとリード間ピッチを，テレビカメラでリード長さを検査するものである．テレビカメラは，その撮像画像によって検査のためのICの位置決めも行う．検査対象のQFP型ICの標準的なリード間ピッチ，リード長さは，それぞれ0.8mm，14.4mmである．これらを1台のテレビカメラで精度良く計測するのは難しい．このため，検査システムは，リード長さをテレビカメラで測定し，リードピッチは，三次元視覚センサによりリード高さと同時に測定するようにして，システムのコンパクト化を図っている．この三次元視覚センサはスリット光投射法を用いているため，検査すべき対象物の表面状態の影響を受けることがある．

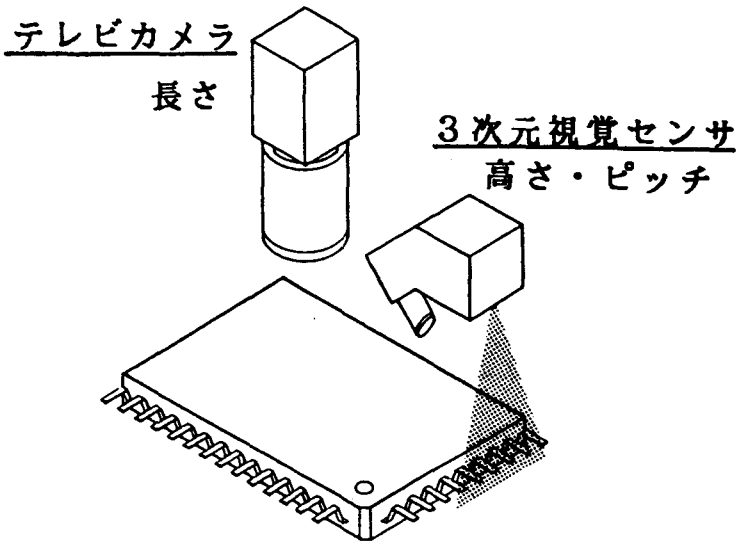


図8-3　ICリードの外観検査の基本方式

図8-4は，検査対象のQFP型ICのリード表面を示したものである．はんだ付けを容易にするため，リード表面にははんだディップコーティングが施されている．そのため，その表面は拡散反射面でもなく，また正反射面でもない．拡散反射面に正反射面が局在する表面となっており，その局在の仕方もリードにより異なっている．そのため，投光法を用いた時の測定にはこの表面性状に対する工夫が必要となる．

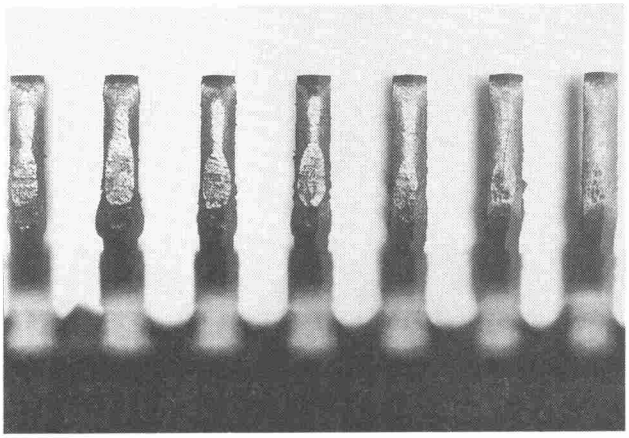


図8-4　ICリードの表面

そこで，リードの表面性状の影響を受け難くして反射光を得る方法を考案した．**図8-5**にその方法を示す．この方法は，ICの製造工程において寸法が安定しているリードの幅を三次元視覚センサで測定し，この測定値を反射光の良否の目安にして，良好な反射光が得られるように投射するスリット光の強度と位置を制御する方法である．

図8-5(1)の(a)において，テレビカメラで得たリードの反射光画像のうち，[2],[3]は，良好な反射光が得られ，それらのリード幅の測定値はリード幅の設計許容範囲に入っている．これに対し[1]は，反射光が弱すぎ，また，[4]は反射光が強すぎて，いずれもリード幅の測定値が設計許容範囲に入っていない．そこで，リード幅の測定値が設計許容範囲に入るように，[1]については投射光強度を強くし，[4]については，投射光強度を弱くして良好な反射光を得る．

投射した光がリード表面の鏡面状態のような部分に当たったときには反射光が強すぎ，投射光制御だけではリード幅の測定値をその設計許容範囲にできないことがある．この場合は同図(2)に示すように投射位置を0.01mm間隔で移動させる投射位置制御を前述の投射光強度制御に併用する．

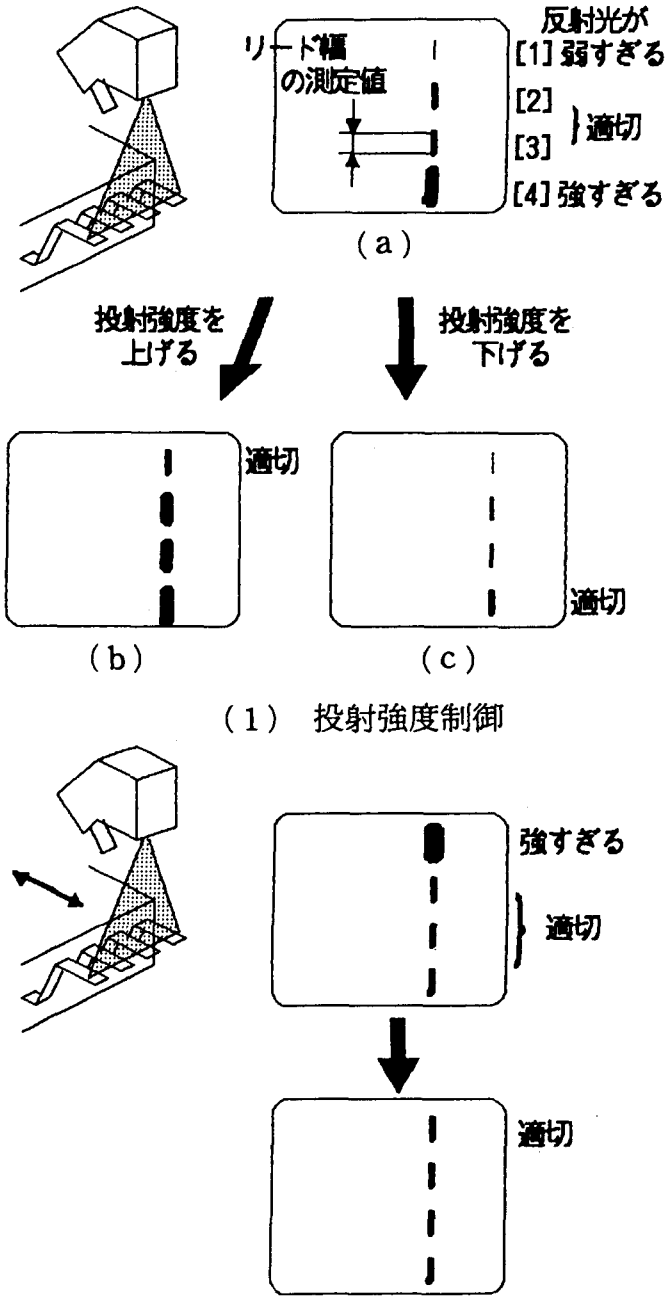


図8-5 投射スリット光の制御方法

図8-6は，この方式を用いたICのリード高さとリードピッチを測定するための基本アルゴリズムである．まず，事前に設定した強度のスリット光を三次元視覚センサから投射し，それぞれのリードの断面形状を表す三次元座標データを検出する．この三次元座標データからリード幅を測定し，その測定値がリード幅の設計許容範囲にあるリードについては，その三次元座標データを蓄える．リード幅の測定値が設計許容範囲を外れているリー

ドについては，まずスリット光投射強度制御を行い，それでも許容範囲内のリード幅の測定値が得られないときには，スリット光投射位置制御を併用する．この制御により設計許容範囲のリード幅測定値を得たのち，そのリードの三次元座標データを蓄える．全てのリードについて三次元座標データを蓄えた後，これらのデータからリード高さとリードピッチを計算する．

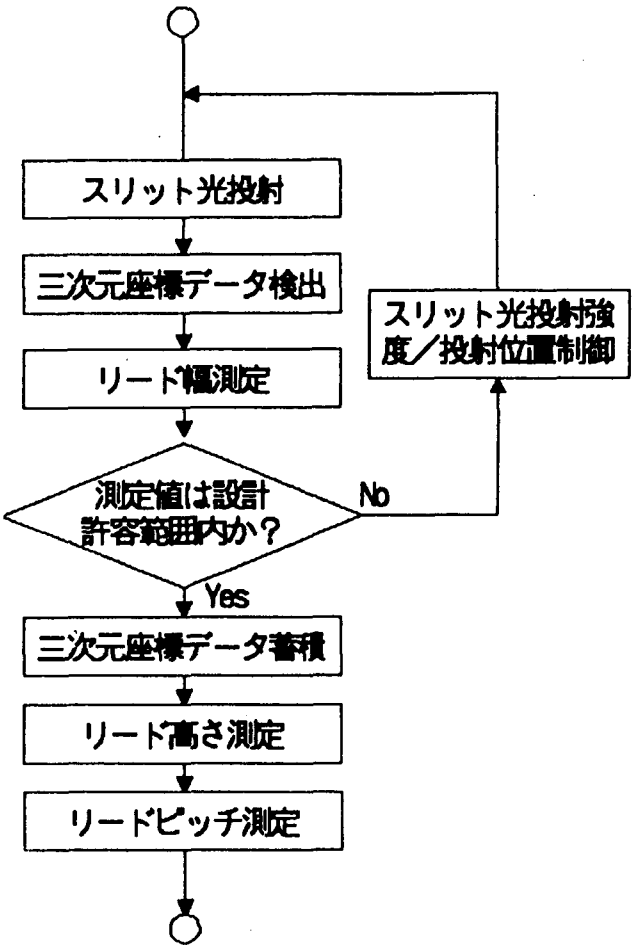


図8-6　リード高さとリードピッチ測定の基本アルゴリズム

8.3　検査システム

8.3.1　三次元視覚センサ

リードの高さとピッチを測定するための三次元視覚センサは，座標測定分解能を高くするために，第４章で述べたスリット光固定型三次元視覚センサを一部改造したものである．改造した点はテレビカメラとスリット光源の幾何学的配置とテレビカメラのレンズ系で，これらの仕様を変更することで第４章で述べた三次元視覚センサに比べ５倍の高分解

能を得ている．**図8-7**にこのセンサの撮像ヘッドの外観を示す．高分解能化するために顕微鏡のようにテレビカメラのレンズ系が突き出た構造となっている．また，座標演算ボードは第４章の三次元視覚センサと共通であり，座標テーブルの値のみ書換えを行っている．**表8-1**に，この三次元視覚センサの性能を示す．測定範囲は．動作距離22mmの位置で6.0mm(Y)×±2.5mm(Z)である．分解能は±0.012mm，測定時間は１スリット分の484点に33.3msecである．

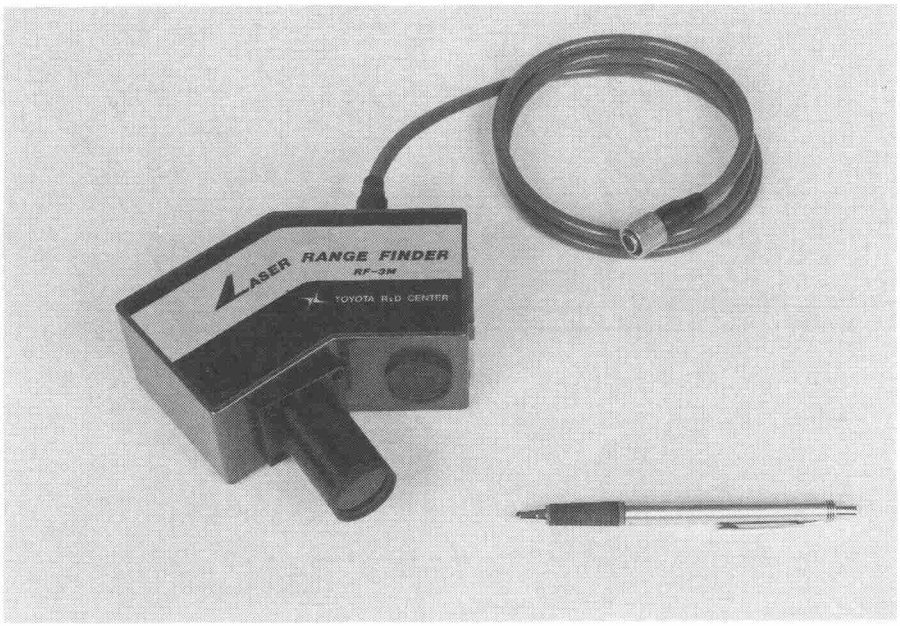


図8-7　三次元視覚センサの撮像ヘッドの外観

表8-1　三次元視覚センサの性能

動作距離	22mm(Z)
測定範囲	6mm(Y)×±2.5mm(Z)
測定点数	484点(Y)
分解能	±0.012mm(Y,Z)
測定時間	33.3msec/484点

8.3.2　システム構成

このシステムは，検査部と搬送部および処理部で構成される．**図8-8**に，検査部と搬送部の構成の概略を示す．

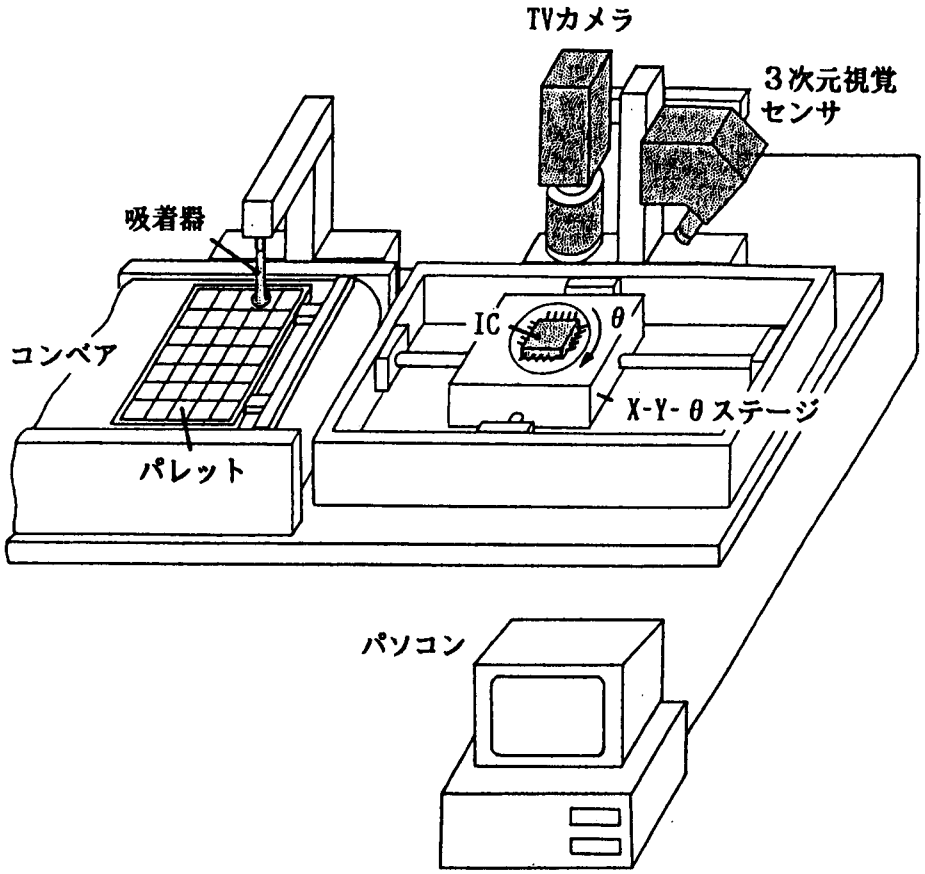


図8-8　ICリードの外観検査システムの構成

検査部は，QFP型ICの位置決めとリード長さの測定を行うテレビカメラ，リード高さとピッチ測定を行う三次元視覚センサ，およびICの位置決めを行うX-Y-θステージにより構成される．テレビカメラの画素のX-Y軸と三次元視覚センサのスリット光投射方向とX-Yステージの移動方向は，あらかじめ一致するように設定されている．このX-Y-θステージの移動・回転の機械精度は，後述するこの検査の目標精度に比べ十分小さな値となるように，X-Yステージの移動精度が±5μm，θステージ上面の回転時の平坦度が±3μmである．ICは真空ポンプによりにθステージ上に固定される．また，ICに対して透過照明を用いてコントラストのよい画像を得ることで画像の二値化を容易にしている．

搬送部はパレットにより供給されるICを一つ一つ取り出してθステージ上にセットし，検査の終わったICについては検査結果に応じて再びパレットに返す動作を行う．

処理部はパソコンにより検査部の制御・測定を行い，各種データの表示・検査判定を行っている．検査の判定値の変更，検査対象のICの変更などもソフトウェアを変更することにより簡便に対応可能である．

図8-9に，開発した検査システムの外観を示す．

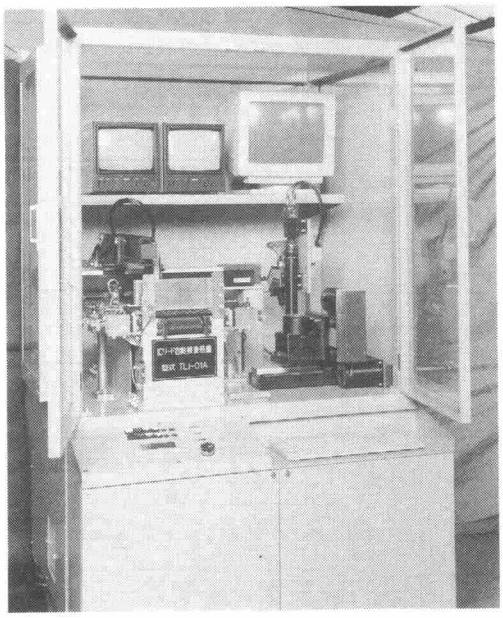


図8-9　ICリードの外観検査システムの外観

8.3.3　検査アルゴリズム

図8-10は，開発したQFP型ICのリード外観検査アルゴリズムである．

三次元視覚センサによりリード高さとピッチを測定するためには，リード先端に正確にスリット光を投射する必要がある．そのため，ICのスリット光に対する正確な位置決めが必要である．本検査システムでは，テレビカメラで得た画像をもとにICの傾きを補正し，さらに，その画像から得たICのリード先端の座標をもとに，ICのリード先端をスリット光の直下に移動させて位置決めを行った後，三次元視覚センサによりリード高さとピッチを測定する．

テレビカメラによるリード長さ測定は，前述したICの傾き補正の後，対向する２つのリード間距離を計算して行う．

図8-11に，ICの傾き補正アルゴリズムを示す．傾き補正は，部品本体の外形により粗い補正を行い，次にリードの付け根により精密に補正を行う２段階で行う．粗い補正は，リードの付け根を高速かつ正確に検出するために行っている．

まず，透過照明されたICをテレビカメラにより撮像し所定のレベルで２値化する．次に画像の収縮処理により，リード部を取り除き部品本体の外形を抽出する．抽出された外形の１辺からサンプル点として等間隔に10点を選び，外形直線近似を行う．この直線のテレビカメラX軸（またはY軸）に対する傾きをICの傾き角として検出し，その角度分だけ部品を回転させ傾き補正を行う．この時，本体の外形抽出だけでは，ばりのため精密な傾き補正はできない．そのため，製造工程上安定なリード付け根部を基準として精密な傾き補正を行う．

精密な傾き補正では，粗い傾き補正と同様に二値画像を得る．この二値画像から向かい合う辺のリード付け根部を検出する．向かい合ったリードの付け根部を結ぶ線分とテレビカメラのX軸（またはY軸）との傾き角検出を行い，その角度を基に傾き補正を行う．

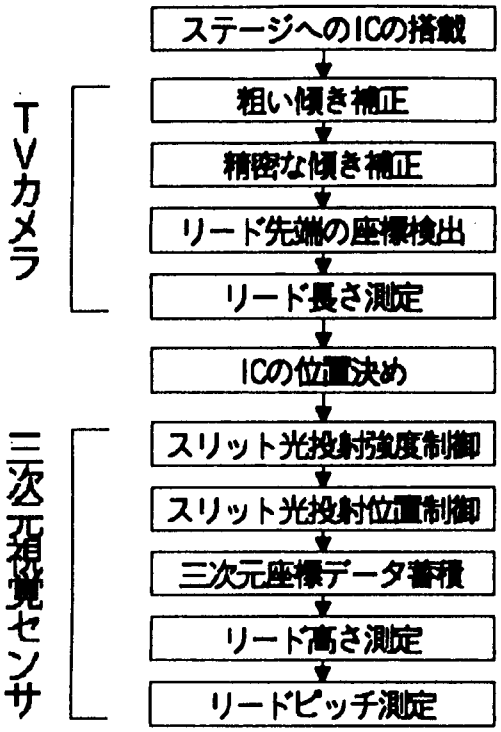


図8-10　ICリード外観検査アルゴリズム

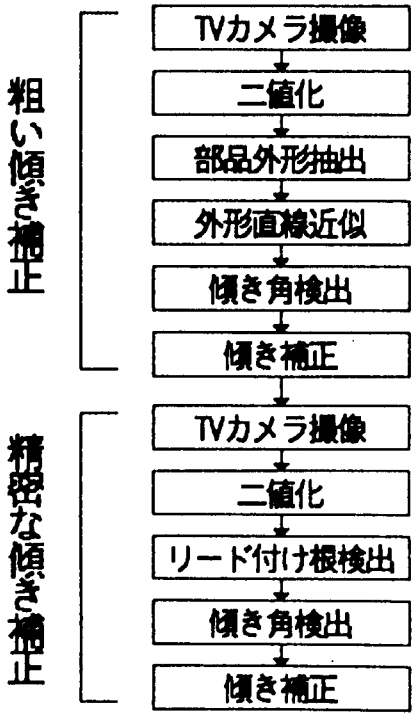


図8-11　ICの傾き補正アルゴリズム

図8-12にリード高さ・ピッチの測定アルゴリズムを示す．まず，前述した方法により位置決めされたICの一辺のリード先端にスリット光を投射して三次元座標データを検出し蓄積する．このとき，反射光が良好でない場合は，投射光制御を行ってから三次元座標データを蓄積する．センサの測定範囲(6mm)に一辺の全リードが含まれない場合は，一部のリードをオーバラップさせるようにICを平行移動させ，スリット光を投射する．一辺の測定が終了したら，ICを90° 回転させ，残りの三辺について同様の測定を繰り返す．

四辺の全リードについて三次元座標データを蓄積した後，リード高さとピッチを算出する．ここで，リード高さは，各リードの三次元座標データの高さの平均値として，また，リードピッチは，各リードの幅方向の中心位置間距離として求める．リード高さとピッチを求めるとき，微少なリード表面の凹凸により生じるデータの欠落や多重反射によるノイズなどは周辺の値を代入して補完する．

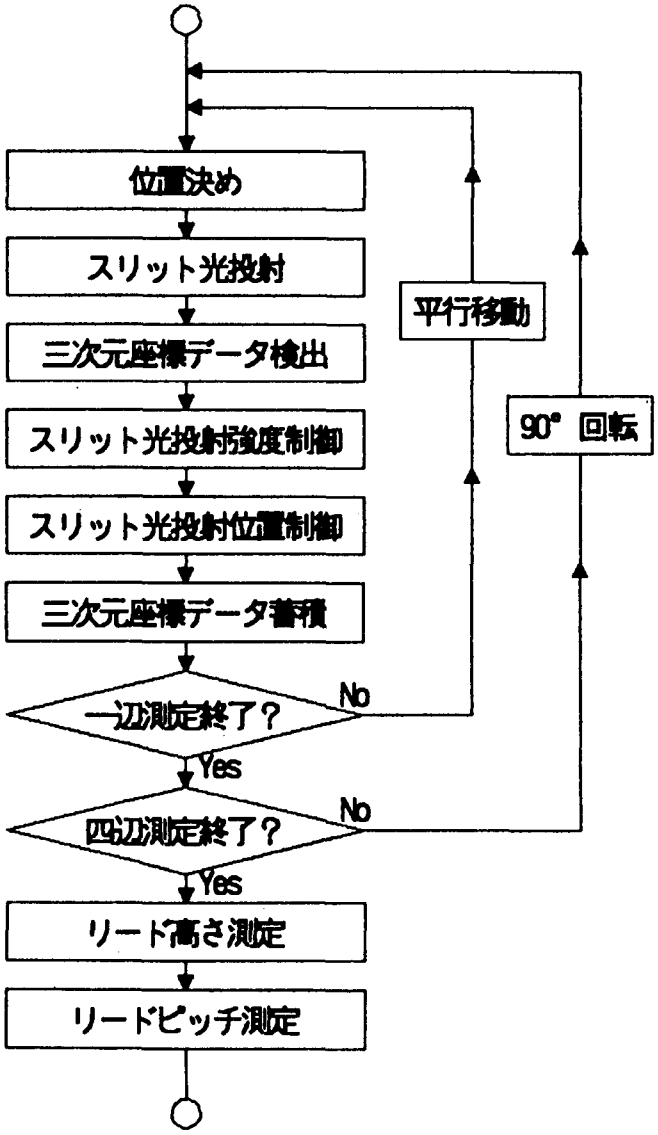


図8-12　ICリードの高さ・ピッチ測定アルゴリズム

8.4 評価実験

8.4.1 計測精度

表面性状の影響に対する投射光制御の有効性の検証と投射光制御を行ったときの計測精度の評価を行なうため，開発したシステムを用いて実験を行った．

図8-13は，実験の対象としたQFP型ICの外観である．本体は10mm×10mmの正方形で，1辺が11リードで全部で44本のリードがある．リード幅の設計値は0.3mmで，その他の設計値寸法は図に示す通りである．

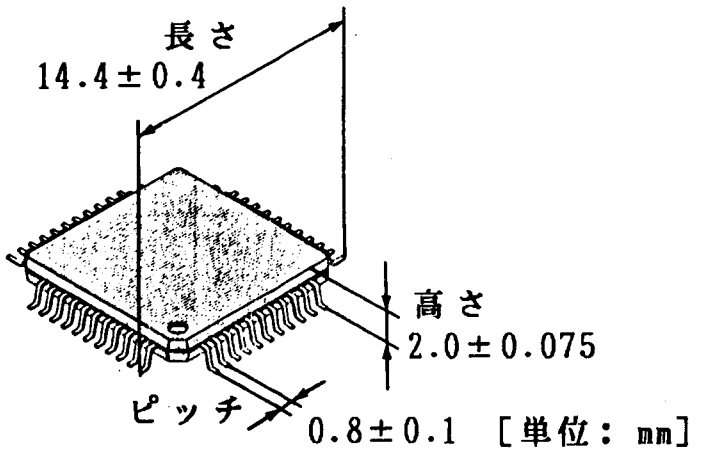


図8-13 検査対象としたQFP型IC

投射光制御の有効性の検証は，投射光制御を行わない場合と行った場合のそれぞれについて，三次元視覚センサにより検出されたリードの反射光を比較することにより行った．

図8-14(a)は，投射光制御を行わないで，あらかじめ設定した一定強度のスリット光を投射したときのリードからの反射光の例を示している．同図のうち，リード[1]からの反射光はリード幅全体から得られているが，[3]からの反射光はその反射位置がリード幅の上端に片寄っており，幅の設計許容値を満たしていない．さらに[2],[3]では反射光の一部にかすれもある．これらは，ICリード表面に拡散反射面と正反射面が混在していることやその反射率にむらがあるために生じているものである．

同図(b)は，同じリードについてリード幅が設計許容値に入るように投射光制御を行った後の反射光を示している．投射強度と投射位置の制御により，リード[2],[3]からの反射光がリード幅全体からかすれることなく良好に得られていることが分かる．

以上の実験結果から，投射光の制御がリードの表面性状の影響を抑制するのに有効であることが確認された．

計測精度は，目視検査でリード高さ，ピッチおよび長さがいずれも良好と判定された25個のサンプル（リード数で1100本）を対象に，投射光制御を行った場合について調べた．各項目の真値はこのシステムによる測定後，リード表面の光沢を除去するための表面処理

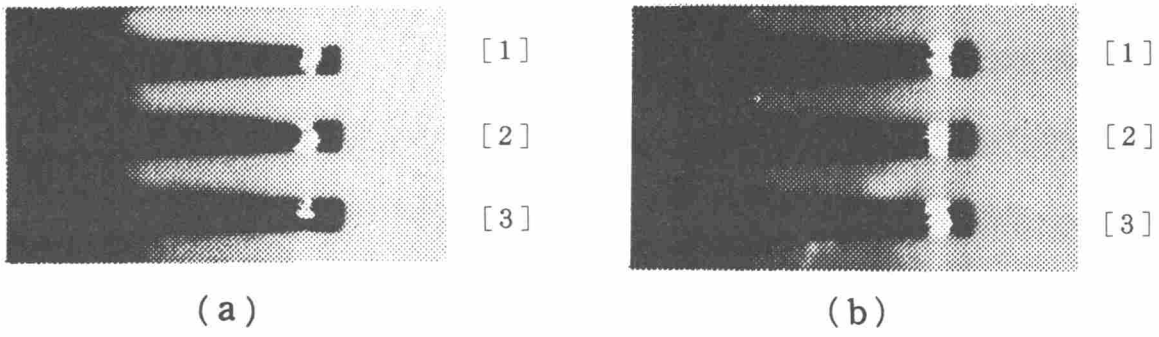


図8-14　ICリードにスリット光を投射して得られる反射光画像の例

を行ってから，リード高さはスポット光型変位センサにより，リードピッチと長さは万能投影機により測定して求めた．

リード高さとリードピッチの計測精度の実験結果をそれぞれ**図8-15**，**図8-16**に示す．それぞれ横軸は真値，縦軸はこのシステムによる測定値である．これらの結果より，リード高さ，ピッチの測定精度は，$\pm 2\sigma$（図中に破線で示す）で表してそれぞれ±0.02mm，±0.028mmであることが分かる．この測定精度を決めている誤差要因は，リード高さについては，三次元視覚センサ自体の座標測定精度，θステージの平坦度およびICの本体の厚みの非一様性（実測で約$\pm 5\mu$m）などが，また，リードピッチについては，三次元視覚センサの座標測定精度が支配的と考えられる．

ここで，誤差要因が多いにもかかわらずリード高さの測定精度がリードピッチのそれよりも良好であるのは，リードピッチは，各リードの幅方向の両端の２点の座標データから求めるため，センサの座標測定精度の影響が大きいのに対し，リード高さは，各リードの

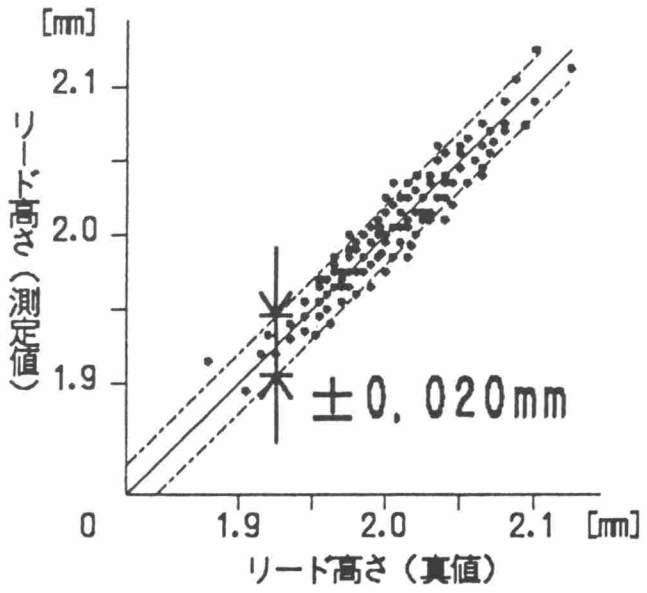


図8-15　ICリード高さの計測精度

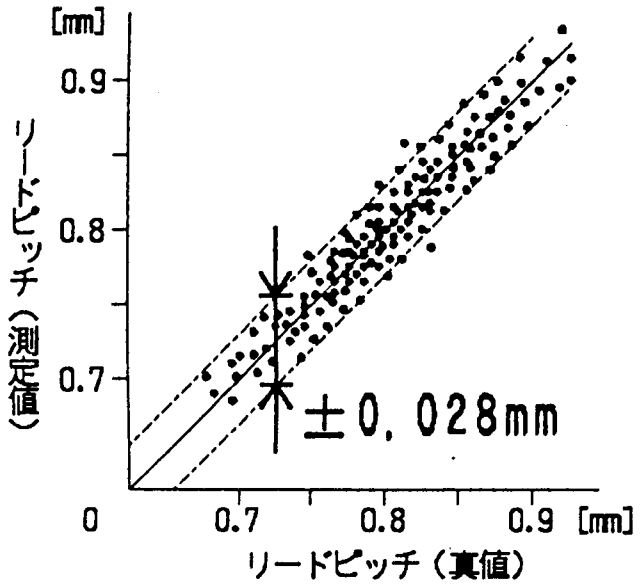


図8-16　ICリードピッチの計測精度

幅方向の多数点（平均24点）の高さデータの平均値として求めるため，センサの座標測定精度が見掛け上改善され，その影響が小さくなるためと考えられる．

このICの設計上の寸法許容値は図8-13に示す通りリード高さで±0.075mm，リードピッチで±0.1mmであり，検査のためそれらを測定するときの目標精度はこの許容値の1/3以下に決められている．

上述のリード高さとリードピッチの測定精度は，いずれもこの目標精度を満足している．また，テレビカメラで測定するリード長さの測定精度についても目標精度を満たす±0.080mm（$\pm 2\sigma$）が得られた．これらの結果より，開発したアルゴリズムとシステムの有効性が確認された．

8.4.2システム性能

表8-2に開発したシステムの性能をまとめて示す．

検査時間は，投射光制御の回数の違いにより変化するが，平均でIC1個あたり7secである．この7secの内，ICの位置決め，投射光制御，測定などの処理が平均で3sec，パレットからのICの出し入れ，テレビカメラと三次元視覚センサ間の移動のための搬送が4secである．

表8-2　ICリードの外観検査システムの性能

検査精度		（設計値公差）
リード高さ	±0.020mm	（±0.075mm）
リードピッチ	±0.028mm	（±0.100mm）
リード長さ	±0.080mm	（±0.400mm）
検査時間	7sec（平均） [処理:3sec（平均），搬送:4sec] （44リードQFP型ICの場合）	

8.5　まとめ

本章では，スリット光固定型三次元視覚センサとテレビカメラを用いたQFP型ICのリード外観検査方式とこの方式による検査システムについて述べた．

提案した方式は，三次元視覚センサによりリード高さとリード間ピッチを，テレビカメラによりリード長さを測定する方法である．この方法では，ICリードの表面性状の影響を受けにくくするためにスリット光の投射強度と位置制御を行い，従来の方法で最も大きな課題であったリード高さ測定の信頼性の向上を図った．また，検査に必要な位置決めを長さ測定と同一のテレビカメラで行い，リードピッチ測定を三次元視覚センサでリード高さと同時測定を行うことで，装置のコンパクト化も実現した．

開発した方式を用いた検査システムの性能評価実験では，限度見本25サンプルの1100リードについて，リード高さが±0.020mm，リードピッチが±0.028mm，リード長さが±0.080mmの測定精度が得られ，目視検査では得られない定量評価ができるようになった．これらの結果から，開発した検査方式とシステムの有効性が検証された．

第9章　結論

自動車産業を始めとする生産工程においては，生産される品物の品質管理や品質確認を目的にして各種の検査が行われている．従来，このような検査の多くは，人間の目視あるいは人間が簡単な治具を用いて行ってきたが，検査の定量化，高信頼性化，過酷な労働からの解放などの観点から，その機械化・自動化が強く望まれるようになってきた．

生産工程における検査の機械化・自動化の方法には各種あるが，視覚技術を用いる方法は非接触，非破壊で高速の検査が行える可能性があるため期待は大きい．この視覚技術のうち，二次元視覚技術は古くから活発に研究・開発が行われ，これまでに多くのシステムが実用化されている．これに対し，三次元視覚技術の産業応用については三次元視覚センサの研究も応用研究の例も少ない．

そこで，本論文においては，自動車生産工程での検査を対象に，三次元視覚センサの研究から，それを用いた応用技術開発まで一貫した研究を行った．

第1章は序論で，生産工程における検査の機械化・自動化の必要性，これに対する三次元視覚技術の現状と課題，そしてこの課題を踏まえた本研究の目的について述べた．

第2章では，本研究において開発する三次元視覚センサの基本方式を決めるために，自動車生産工程における検査という観点から，現状の三次元情報の検出手段を概観した．その結果，確実な三次元座標検出，実時間計測の実現，寸法計測に有利な線状に並んだ多数点の三次元座標検出および，センサ構成のシンプルさからスリット光投影法が本研究には適切であることを導いた．

第3章では，対称物の表面全体につて三次元座標をリアルタイムに測定することを目的に開発したスリット光走査型の三次元視覚センサの原理，方式，構成および性能について述べた．

従来のスリット光走査型三次元視覚センサではスリット光を非連続に走査し，かつ，必要な三角測量の計算をソフトウエアにより行っているため，リアルタイムの座標検出が不可能であった．これに対し，試作したセンサでは，スリット光を連続走査し，この走査と同期して，専用ハードウエアにより座標演算を行うことでリアルタイムの三次元座標検出を実現した．このセンサでは，スリット光を490msecで連続走査し，この走査期間内に48点（X方向）×50点（Y方向）の三次元座標を検出する．使用しているテレビカメラは，画素数49画素（水平）×50画素（垂直），フレーム時間10msecである．専用ハードウエアにより，テレビカメラが1画面を撮像する10msecの間に垂直方向の50点の座標を検出し，これをスリット光走査期間の490msecの間に49回繰り返すことで，上記点数の三次元座標をリアルタイムで検出する．試作したセンサの測定範囲は，センサから100cm離れた位置で約60cm×60cmである．このときの測定精度は±2cm（Z座標）である．また，距離画像化実験を行い，このセンサによりリアルタイムで三次元座標検出が行えることを確認した．このセンサの試作により，スリット光投射法を用いて，対象物全体の座標検出をリアルタイムに行えることを示した．

第4章では，自動車関連の生産工程における計測・検査への適用を前提に，高速，高精度，対称物の表面性状の影響の低減および小型・軽量を考慮して開発したスリット光固定型の三次元視覚センサの原理，方式，構成および性能について述べた．

高精度については，重心計算によるスリット光画像中心位置の検出とルックアップテー

ブルによるレンズ歪補正を行った．高速化については，専用ハードウエアによるパイプライン処理により実時間計測を可能とした．対象物の表面性状の影響については，その反射率に応じてスリット光の投射強度が設定できるように，スリット光反射強度検出回路と，スリット光投射強度設定回路を設けた．さらに，小型・軽量・高信頼性化については，半導体レーザと小型カメラを用いた小型・軽量の撮像ヘッドの実現と，可動部品を用いない構造による長期の信頼性確保を図った．精度を保証するためのキャリブレーションは，高精度移動ステージを用いて，測定範囲内で実際の距離（座標）とスリット光像画像との関係を調べることで行った．これにより，レンズ歪の補正を含めたキャリブレーションが行えた．開発したセンサは，当初の目標を満足する性能が得られ，応用システム開発の強力なキーデバイスとすることができた．

第５章では，第４章で述べたスリット光固定型三次元視覚センサをベースに開発した十字スリット光型三次元視覚センサとこれを用いて開発した自動車エンジン部品の突起や穴の寸法検査方法について述べた．

提案した方法は突起や穴の全体形状を計測する代わりに，突起や穴に十字スリット光を投射して得たそれらの特徴的部位の高さおよび突起や円に内接する円の直径や中心位置を計測することで寸法を検査する方法である．検査される寸法は，突起や穴の傾き，太さおよび非対称性である．この方法を用いた試作したシステムによる評価実験により、目標値を満たす±0.30mmの検査精度が得られた．またこのときの検査時間は，3.3sec／１点で，これについて目標値を満足した．これらの結果より，開発した十字スリット光型三次元視覚センサと検査方法の有効性が確認できた．

第６章では，従来の三次元形状機械部品の認識方法では高速の認識が容易ではなかった位置決めのされていない形状が類似した機械部品を，スリット光固定型三次元視覚センサを用いて簡便・高速に認識し，異品検査を実現する方法を提案した．

提案した方法は，三次元視覚センサにより対象物の距離画像を検出し，この距離画像にしきい値処理（距離ゲーテイング）を行って，各部品の特徴が明確に表される高さで部品を輪切りにした二値画像（距離ゲート画像）を得，この二値画像について幾何学的特徴量を抽出して対象物を認識・検査する方法である．この方法により，９種類の類似した形状を持つ自動車用アタッチメント部品を，検査時間3.5secで安定に識別することができ，その高速性と有効性を明らかにした．

第７章では，自動車パネルの仕上がり寸法をスリット光固定型三次元視覚センサを用いて検査する方法と同法による自動車パネル寸法検査システムについての有効性について論じた．

提案した検査方法は，検査すべきパネルと基準ブロック間に三次元視覚センサのスリット光を投射して，その反射光画像に円を当てはめその円弧端点を算出し，これから種々の曲率をもつパネルについて隙間と段差を検査する方式である．さらに，曲げ加工などで生ずるパネルの光沢のため反射スリット光画像に途切れが生じたときには，スリット光の投射角度と投射強度の制御によって，良質な画像に改善して，上記の方法に基づいて検査する．この方法を用いた検査システムは，三次元視覚センサを計測部位にロボットにより位置決めし，パネルと基準ブロック間の隙間と段差を計測する．このシステムは，30種類の自動車パネルについて，１部位当り6secの時間で，精度±0.15mm以内で寸法を計測することができる．これらの性能は目標性能を満たしている．

これらの結果より，スリット光固定型三次元視覚センサとこの検査方式を用いた自動車

パネル寸法検査方式およびシステムの有効性が確認できた.

第８章では，高分解能化を図ったスリット光固定型三次元視覚センサとテレビカメラを用いたQFP型ICのリード外観検査方式とこの方式による検査システムについて述べた.

提案した方式は，三次元視覚センサによりリード高さとリード間ピッチを，テレビカメラによりリード長さを測定する方法である．この方法では，ICリードの表面性状の影響を受けにくくするためにスリット光の投射強度と位置制御を行い，従来の方法で最も大きな課題であったリード高さ測定の信頼性の向上を図った．また，検査に必要な位置決めを長さ測定と同一のテレビカメラで行い，リードピッチ測定を三次元視覚センサでリード高さと同時測定を行うことで，装置のコンパクト化も実現した.

開発した方式を用いた検査システムの性能評価実験では，限度見本25サンプルの1100リードについて，リード高さが±0.020mm，リードピッチが±0.028mm，リード長さが±0.080mmの測定精度が得られ，目視検査では得られない定量評価ができるようになった．これらの結果から，開発した検査方式とシステムの有効性が検証された.

以上述べたように，本論文では，自動車関連の生産工程での検査を対象に，三次元視覚センサの開発から応用技術開発まで行った内容について述べた.

開発したスリット光固定型三次元視覚センサは，これまでに40台以上が製作され，その内の多くが，ここで述べた検査システムを含め各種の計測・検査システムとして生産工程で実用化されている.

しかしまだ，生産工程での三次元視覚技術の実用化は始まったばかりの段階であり，さらに各種の検査システムの機械化・自動化が要望されている．筆者らも，ここに述べた応用技術のほか，完成車両の建付け寸法検査，エンジン部品の容積検査などの技術開発と実用化を現在進めている.

今後，自動車関連の生産工程において三次元視覚に期待される主な事柄には以下のことが上げられる.

センサについては，光沢の強い対象物や反射率の大きく異なる部分が混在する対象物についてのより安定な三次元入力機能，測定精度を維持しての測定範囲の拡大と高速化，さらなる小型・軽量化などである.

応用技術開発においては，多重反射や対象物の表面性状などにより発生するノイズの多い情報のもとでの安定な検査技術がある．これには，CAD情報を含む対象物の知識の利用が有効と考えられる.

これらの課題を解決することで，今後，益々三次元視覚の応用が拡大されていくものと期待される.

謝辞

本論文のまとめと研究の各段階におきまして，終始懇切なご教示，ご指導，ご配慮を賜りました大阪大学井口征士教授に心から感謝申し上げます．

さらに，論文作成と学会などにおきまして，数々の有益なご教示をいただきました大阪大学辻三郎教授，谷内田正彦教授に心から御礼申し上げます．

また，論文のまとめを含め種々の内容につきまして，ご教示と細やかなアドバイスをいただきました大阪大学佐藤宏介講師に深く感謝いたします．

本研究は，筆者が（株）豊田中央研究所において行った研究をまとめたものであり，研究の遂行ならびに論文をまとめる機会を与えて下さいました森本英武所長に心から感謝申し上げます．

研究を進めるにあたり，終始懇切なご指導と激励を賜った当研究所細野晃副所長，高橋理一取締役，五十嵐伊勢美顧問に厚く御礼申し上げます．

また，本研究の遂行にあたり，ご指導と助言をいただきました当研究所高橋信明システム２部部長に心より感謝申し上げます．

さらに，本研究の推進と論文のまとめにあたり，終始懇切なご教示と激励を頂きました当研究所山本新システム２部次長に心より御礼申し上げます．また，本研究の各段階におきまして助言と協力を賜りました同部画像情報研究室中野倫明研究員，樋口和則副研究員，塚田敏彦副研究員ならびに同研究室関係各位に深く感謝いたします．

また，センサと実験システムの製作にあたり種々の協力をいただきました当研究所開発部松井正行技師に深謝いたします．

研究への励ましをいただきました（株）タイムフレックス社久野晧代表取締役（前当研究所試作部次長）に心より感謝いたします．

貴重なご意見をいただいたトヨタ自動車（株），日本電装（株），トヨタ車体（株），ならびに（株）東海理化電機製作所の関係各位に厚く御礼申し上げます．

最後に，種々の協力をしてくれました家族に感謝します．

参考文献

[Agin 75]G. J. Agin:"An experimental vision system for industrial application", Proc. 5th Int. Symp. on Industrial Roibots, pp. 135-148 (1975)

[Brooks81]R. A. Brooks:"Symbolic reasoning among 3-D objects and 2-D models", AI journal, Vol. 16, pp. 285-348 (1981)

[Doi 74]土井, 河辺:"レーザ光切断法による3D物体の認識", 計測制御学会論文集, Vol. 10, No. 1, pp. 18-21 (1974)

[Duda 79]R. O. Duda, D. Nitzan and P. Barett:"Use of range and reflectance data to find planar surface regions", IEEE Trans., Vol. PAMI-1, No. 3, pp. 259-271 (1979)

[Hara 84]原・柄崎・宇部：「プリント基板パターン検査の自動化」, 信学論, J67-C, 5, pp. 435-442(1984)

[Hattori 78]服部, 河村：「パターン認識による調整工程の自動化（メータゲージ）」, 日本機械学会第２回技術講演会, 生産の合理化と生産技術の改善論文集, No. 780, 10, pp. 81-83 (1978)

[Holland 79]S. W. Holland, L. rossol and M. R. Ward:"Consight- Ⅰ:A Vision-Controlled Robot System for Tranferring Parts from Belt Conveyors", Computer Vision and Sensor-Based Robots, edited by G. G. Dodd and L. Rossol, Plenum Press, pp. 81-100 (1979)

[Horand 84]P. Horand and R. C. Bolles:3DPO's strategy matching three-dimensional objects in range data, Int. Conf. Robotics, pp. 78-85 (1984)

[Idesawa 77]T. Idesawa, T. Yatagai and T. Soma:"Scanning moire method and automatic measurement of 3-D shapes", Appl. Opt., Vol. 16, No. 8, pp. 2152-2162 (1977)

[Inagaki 86]稲垣, 柿木, 安藤：「三次元姿勢計測による実装部品検査技術」, 電気学会論文誌, Vol. 106-C, No. 4, pp. 49-56 (1986)

[Inokuchi 84]S. Inokuchi, K. satoand F. Matsuda:"Range-imaging system for 3D object recognition , 7th ICPR, Montreal, pp. 806-808 (1984)

[Inokuchi 89]井口：「目視検査における画像処理技術 1. 総論」, 電気学会全国大会, S. 15-1～15-4 (1989)

[Inokuchi 90]井口, 佐藤：「三次元画像計測」, pp. 20～63, 昭晃堂 (1990)

[Ishi 74]石井, 長田:"レーザトラッカによる３次元物体の特徴抽出", 計測制御学会論文集, Vol. 10, No. 5, pp. 599-605 (1974)

[Ito 84]伊藤, 上田：" 距離・位置センサとインターフェイス", コンピュートロール, No. 7, pp. 91-97 (1984)

[Jarvis 83]R. A. Jarvis:"A laser time-of-flight range scanner for robot vision", IEEE Trans., Vol. PAMI-5, No. 5, pp. 505-512 (1983)

[Kobayashi 89]小林：「はんだ付け自動検査技術について」, 精密工学会画像応用技術専門委員会報告, 4, 1, pp. 11-18 (1989)

[Kozima 87]小島・高木・高草木：「三次元レーザ形状計測装置の開発」, 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, p. 7 (1987)

[Kuno 85]久野：「２値画像による多面体の位置，姿勢計測」，情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料，35-1 (1985)

[Lemke 83]D.Lemke and D.Langdon："Gagesite-computerized vision for automotive instrument calibration", SAE technical paper, 830327, pp.243-248 (1983)

[Lewis 77]R.A.Lewis:"A scaninng laser range finder to a robotic vehicle", Proc. 5th IJCAI (1977)

[Levine 83]S.S.Levine:"Application of three-dimensional vision systems to industrial robotic manufacturing and inspection", Vol.15, NO.1, pp.1-5 (1983)

[Livingston 87]R.F.Livingston, A.F.Tulal and M.R.Thomas:"Application of 3-D Vision to the measurement of marine propellers", Proc.of Vison'87, pp.10-25～10-36 (1987)

[Medioni 85]G.Medioni and R.Nevatia:"Segment-based stereo matching", CVGIP, Vol.31, No.1, pp.2-18 (1985)

[Mizuno 87]水野，木村：「フラットパッケージICのリード検査技術の開発」，第１回日本自動制御協会インテリジェントFAシンポジウム, pp.73-74 (1987)

[Morinaga 87]森永・東野：「IC外観検査装置」，昭62電気関係学会九州支部連大，p.303 (1987)

[Motizuki 85]望月，岡田，岡部，秦，杉本：「ITVカメラとスリット光レンジファインダによる３次元物体認識（２）」昭和60年度電子通信学会総合全国大会講演論文集，p.5-55 (1985)

[Nakagawa 86]中川・押田・二宮・佐々木：「スポット光走査方式光切断法によるはんだ付部の形状検出」，計測自動制御学論, 22, 9, pp.982-987 (1986)

[Nakagawa 89]中川：「電子産業における目視検査の自動化」, 電学論, 109-D, 7, pp.458-462, (1989)

[Nakano 88]中野，武田，山本：「塗装面を背景とした刻印文字の認識方式」，電子通信学会論文誌(D), Vol.J71-D, No.6, pp.1057-1064 (1988)

[Narita 87]成田：「目視検査の自動化の特集号によせて」，電気学会論文誌, Vol.107-C, No.8, pp.703 (1987)

[Ninomiya 87a]二宮・広井・中川：「斜め十字型スリット光を用いたロボット用小型３次元センサ」，計測自動制御学会論文集，Vol.23, No.10, p.7 (1987)

[Ninomiya 87b]N.Ninomiya & Y.Nakagawa:" Automated Pattern Inspection for Unbaked Layers of Multi-Layer Ceramic Substructes" , Proc. of IEEE Int.Work shop on Machine vision & MachineIntelligence, p.346- (1987)

[Nitzan 77]D.Nitzan, A.E.Brain and R.O.Duda:"The measurement and use of registered reflectance and range data in sciene analysis", Proc.IEEE, Vol.65, No.2, pp.206-219 (1977)

[Okada 85]岡田，杉本，岡部，秦：「ITVカメラとスリット光レンジファインダによる３次元物体認識（１）」昭和60年度電子通信学会総合全国大会講演論文集，p.5-54 (1985)

[Ohshima 73]大島，高野:"３次元物体認識システムのための特殊ハードウエア"，電子技術総合研究所　報, Vol.37, No.5, pp.493-501 (1973)

[Ohshima 80]大島，白井:"距離情報を用いた物体認識の一手法"，電子通信学会技術研究報告，PRL80-11,pp.25-32 (1980)

[Ohshima 82]大島，白井:"３次元情報を用いた物体認識"，電子通信学会論文誌，Vol.J65-D,No.5,pp.629-636 (1982)

[Ohshima 83]M.Oshima and Y.Shirai:"Object recognition using three-dimensional information",IEEE Trans.,Vol.PAMI-5,No.4,pp.353-361 (1983)

[Ohta 84]太田：「走査線間の整合性を考慮した動的計画法によるステレオ対応探索」，情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料，29-7 (1984)

[Ohta 87]太田：" 画像を用いた三次元計測技術の動向"，電気学会論文誌，Vol.107-C,No.7,pp.608-612 (1987)

[Ozeki 85]小関，中野，山本:"光切断法による実時間距離検出装置"，電子通信学会論文誌，Vol.J68-D,No.5,pp.1141-1148 (1985)

[Ozeki 86a]O.Ozeki,T.Nakano and S.Yamamoto:"Real-time range measurement device for three-dimensional object recognition",IEEE Trans.,Vol.PAMI-8,No.4,pp.550-554 (1986)

[Ozeki 86b]小関，中野，山本：「距離画像を用いた３次元物体の識別方式」，電子通信学会論文誌，Vol.J69-D,No.1,pp.111-112 (1986)

[Ozeki 86c]小関，中野，山本：「距離画像を用いた機械部品選別システム」，電子通信学会全国大会，S15-13,pp.6-347～6-348 (1986)

[Ozeki 87]小関，中野，山本:"画像処理技術を用いた非接触寸法測定プローブ"，電子通信学会総合全国大会，S12-3,pp.5-224～5-225 (1987)

[Ozeki 91a]小関，樋口，山本:"パルス制御三次元視覚センサ"，第22回画像光学コンファレンス，No.6-4,pp.145-148 (1991)

[Ozeki 91b]小関，樋口，山本:"三次元視覚センサを用いた自動車部品の寸法検査システム"，電気学会論文誌，Vol.111-C,No.6,pp.249-255 (1991)

[Ozeki 92a]小関，樋口，山本:"パルス制御三次元視覚センサによる自動車ボディ計測"，1992年電子情報通信学会春季全国大会，D-411 (1992)

[Ozeki 92b]樋口，小関，山本:"三次元視覚センサによる自動車パネル寸法検査システム"，電気学会論文誌，Vol.112-C,No.2,pp.117-124 (1991)

[Ozeki 92c]塚田，小関，山本：「ICリード外観検査システム」，電気学会論文誌，Vol.112-C,No.2,pp.144-151 (1992)

[Perkins 80]W.A.Perkins:"Computer vision inspection of valve spring assemblies on engine heads",General Motors Research Laboratories,GMR-3369 (1980)

[Rioux 84]M.Rioux:"Laser range finder based on syncronized scanner",Appl. Opt.,Vol.23,pp.3837-3844 (1984)

[Saeki 86]佐伯：「日経メカニカル」,1986年1月27日号,p.66 (1986)

[Sakamoto 87] Y.Sakamoto, K.Yamamoto: "Development of a Car Body Inspection System", Proc. of SAE/ESD International Computer Graphics Conference, pp.101-109 (1987)

[Sato 85a]佐藤，井口:"空間コード化による距離画像入力"，電子通信学会論文誌，Vol.J68-D,No.3,pp.369-375 (1985)

[Sato 85b]K.sato,H.Yamamoto and S.Inokuchi:"3-D shape measurement of megalithic

statue -MOAI- ", 8th ICPR, Paris, PP. 675-677 (1986)

[Seliger 88] G. Seliger, W. Felsing, K.D.Lennartz, H.Trilk: "Laser scanning for flexbilization of robotic assembly cells", Proc. of Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls, pp.307- (1988)

[Shirai 72]Y.Shirai:"Recognition of polyhedrons with a range finder", Pattern Recognition, 4, pp.243-250 (1972)

[Takagi 86]高木・小島・高草木・粟根・吉岡：「レーザー応用形状計測装置」, 日立評論, 68-3, pp.73- (1986)

[Takagi 87]Y.Takagi and S.Hata:"High speed precise 3-D vision sensor using slit-light method", Proc. of IEEE int. workshop on ind. app. of machine vision and machine intelligence, pp.235-239 (1987)

[Takagi 88]高木・勝田・秦・大井・村田・小林：「光切断法を用いた面付け基板の外観検査装置」, 精密工学会画像応用技術専門委員会報告, 3, 1, pp.1-11 (1988)

[Takasaki 70]H.Takasaki:"Moire topography", Appl.Opt., No.9, No.6, pp.1467-1472 (1970)

[Tsuda 90]津田・池谷・荒木・三宅・鳥羽・脊戸：「光切断法による高速三次元計測とその応用」, テレビ学会技報, 14, 49, pp.13-18 (1990)

[Tomita 85a]富田, 金出：" 三次元物体のエッジに基づいた記述の生成と認識", 情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料, 35-3 (1985)

[Tomita 85b]富田：" ステレオ画像の輪郭線による対応", 情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料, 38-1 (1985)

[Tsuji 88]辻：「Ⅷ. ロボットの視覚」, 学術月報, Vol.41, No.4, PP.310-315 (1988)

[Ueda 81]上田, 松本：" 時系列符号化格子法とその装置化", 電子通信学会論文誌, Vol.J64-D, No.6, pp.780-787 (1981)

[Ueshiba 91]植芝, 吉見, 大島:"光学系の３次元モデルに基づくレンジファインダの高精度キャリブレーション", 電子情報通信学会論文誌D-Ⅱ, Vol.J74-D-Ⅱ, No.9, pp.1227-1235 (1991)

[Wilson 85]W.S.Wilson:"The role of vision in a dimensional control strategy", Proc. of Vison'85, pp.7-43～7-55 (1985)

[Yachida 76]谷内田, 辻：" 機構部品の学習・認識システム", 電子通信学会論文誌, Vol.J59-D, No.3, pp.149-156 (1976)

[Yachida 87]谷内田：「目視検査の自動化－総論（現状と今後の課題）－」, 電気学会論文誌, Vol.107-C, No.8, pp.704-709 (1987)

[Yonezawa 78]米沢, 玉邑：" 符号化格子法を用いた物体形状の計測", 電子通信学会論文誌, Vol.J61-D, No.6, pp.411-418 (1978)

[Yoshimura 89]K.Yoshimura and S.Okamoto:"A three-dimensional sensor for automatic visual inspection of soldered parts" Proc. of IECON'89, pp.562-567 (1989)

著者発表の研究論文

（本論文中の所在）

1)小関，中野，山本:"光切断法による実時間距離検出装置"，電子通信学会論文誌，Vol.J68-D,No.5,pp.1141-1148 (1985)　第３章

2)O.Ozeki,T.Nakano and S.Yamamoto:"Real-time range measurement devicefor three-dimensional object recognition",IEEE Trans., Vol.PAMI-8,No.4,pp.550-554 (1986)　第３章

3)小関，中野，山本：" 距離画像を用いた３次元物体の識別方式"，電子通信学会論文誌，Vol.J69-D,No.1,pp.111-112 (1986)　第６章

4)小関，中野，山本:"画像処理技術を用いた非接触寸法測定プローブ"，電子通 信学会総合全国大会，S12-3,pp.5-224～5-225 (1987)　第４章

5)小関，樋口，山本:"三次元視覚センサを用いた自動車部品の寸法検査システム"，電気学会論文誌，Vol.111-C,No.6,pp.249-255 (1991)　第５章

6)樋口，小関，山本:"三次元視覚センサによる自動車パネル寸法検査システム"，電気学会論文誌，Vol.112-C,No.2,pp.117-124 (1991)　第７章

7)塚田，小関，山本：「ICリード外観検査システム」，電気学会論文誌，Vol.112-C,No.2,pp.144-151 (1992)　第８章