

Title	異種画像併用3次元視覚システムの構築と3次元物体形状認識への応用
Author(s)	藤本, 公三
Citation	大阪大学, 1992, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3063630
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

異種画像併用3次元視覚システムの構築と
3次元物体形状認識への応用

平成4年5月

藤 本 公 三

異種画像併用3次元視覚システムの構築と
3次元物体形状認識への応用

平成4年5月

藤 本 公 三

目 次

第1章 緒論	1
1.1 本研究の背景および目的	1
1.2 本論文の構成	3
第2章 異種画像併用3次元視覚システム構築の考え方	6
2.1 濃淡画像およびパターン投光画像から得られる形状情報とその特質	6
2.1.1 濃淡画像から得られる形状情報とその特質	6
2.1.2 パターン投光画像から得られる形状情報とその特質	8
2.2 形状情報抽出可能範囲	12
2.3 異種画像併用による形状情報取得性能の向上の可能性	16
第3章 輝度レベルの分散値に基づく物体縁辺検出	18
3.1 はじめに	18
3.2 濃淡画像中における輝度レベル変化	19
3.3 輝度レベルの分散値の特徴	23
3.4 輝度レベル分散値の耐ノイズ性	27
3.5 各種縁辺に対する輝度レベルの分散値	32
3.6 分散値による縁辺検出線幅	33
3.7 各種縁辺検出オペレータとの検出性能比較・検討	34
3.8 結論	37
第4章 スリットレーザ光走査による電子格子モアレ画像および凹凸判定画像の形成	39
4.1 はじめに	39
4.2 投影型モアレ縞画像の形成原理とその形成範囲	40
4.2.1 形成原理	40
4.2.2 実体格子投影における格子像形成範囲	42
4.2.3 均一格子パターン形成の問題点とその解決方法	44
4.3 アナログ波形成形による電子格子モアレ縞画像形成	45
4.4 スリットレーザ光走査によるモアレ縞画像形成	48
4.4.1 スリットレーザ光走査回転角	48
4.4.2 走査格子列の画像化	51
4.4.3 試作装置およびその駆動	53
4.5 平行格子投光画像をもとにした簡易凹凸判定画像の形成	60
4.6 結論	62

第5章	$\theta - \rho$ ハフ変換平面からの直線および2次曲線の線分抽出	64
5.1	はじめに	64
5.2	$\theta - \rho$ 平面への変換軌跡と線分パラメータの関係	66
5.2.1	変換軌跡と直線の線分パラメータの関係	66
5.2.2	変換軌跡と2次曲線の線分パラメータの関係	67
5.3	$\theta - \rho$ 平面における集積点の抽出	72
5.3.1	集積勾配による直線と曲線の集積点分離抽出	72
5.3.2	θ 方向重み付フィルターおよび集積度数分散値に基づく直線の集積点抽出	78
5.3.3	集積点の抽出方法および抽出結果	82
5.4	直線線分のパラメータ抽出方法	84
5.5	2次曲線のパラメータ抽出方法	86
5.5.1	抽出アルゴリズム	86
5.5.2	パラメータの集積点分布	88
5.5.3	パラメータ抽出結果の考察	89
5.6	結論	91
第6章	濃淡画像とモアレ縞画像併用3次元視覚システムの構築	93
6.1	はじめに	93
6.2	視覚システム構築	93
6.2.1	ハードウェア構成	93
6.2.2	処理の流れ	94
6.3	濃淡画像からの2次元形状記述	96
6.3.1	線分パラメータマスクによる線分混在画像からの線分抽出	96
6.3.2	抽出線分データ連結による2次元形状記述	98
6.4	パターン情報の抽出とそれによる3次元形状記述	99
6.4.1	2次元形状記述情報に基づいた各面の縞情報の抽出	99
6.4.2	両画像から得られる形状情報の相互補完	100
6.4.3	3次元形状データの記述手順と信頼性を考慮したデータ構造	103
6.5	3次元対象物体に対するシステムの適用とその性能	105
6.6	結論	110
第7章	CADモデルデータに基づく3次元物体形状・姿勢の照合・認識	111
7.1	はじめに	111
7.2	CADモデルデータに基づく3次元物体の形状照合の考え方と処理の流れ	113
7.3	3次元CADモデルデータからの投影形状分類	117
7.3.1	視線方向による投影形状の変化	117
7.3.2	視線ベクトル領域図の作成	118
7.3.3	代表投影形状の抽出	121

7.4 物体の安定姿勢を考慮したときの代表投影形状抽出	123
7.4.1 視点軌跡の視線ベクトル領域図への描画	123
7.4.2 代表投影形状の抽出	126
7.5 面の形状特徴による対応面照合抽出	127
7.5.1 2次元投影形状の面形状の表現	127
7.5.2 視覚情報の不完全さに対応する面形状要素	131
7.5.3 面形状データの階層化構造によるデータ圧縮	133
7.5.4 視覚照合面の選定とその対応モデル面の抽出方法	137
7.6 線分対応による形状・姿勢照合	141
7.6.1 対応面の投影面上での重ね合わせ	141
7.6.2 線分照合による形状一致判定	145
7.7 照合・認識システムの適用範囲とその性能	147
7.7.1 照合判別の閾値選定とそれによる類似形状の識別度	147
7.7.2 縁辺欠落を有する視覚データに対する形状照合シミュレーション	151
7.7.3 照合効率と物体識別性能の評価	153
7.8 結論	154
第8章 結論	157
謝辞	159
参考文献	160
発表論文	175

第1章 緒 論

1.1 本研究の背景および目的

産業界において、製品を製造する工程として、材料創製工程，加工工程，組立工程，検査工程，および各工程を結ぶ搬送工程がある。これらの各工程における技術の進展は目ざましいものがある。なかでも加工，組立工程では，NC機械やロボットの導入による自動化が進んでおり，自動車部品の組立工場では，フルオートメーションの無人化工場もできている¹⁾。

これら産業界における自動化は，従来，人間が行ってきた作業の機械化である。人間が加工，組立，検査等の作業をする場合，

- 1) 作業手順・仕様の理解
- 2) 作業対象の識別・認識
- 3) 作業の実行

の過程をたどる。前述の無人化工場における自動化に代表される現在の製造工程の自動化は，予め決められたシーケンスで作業を行う数値制御型製造ラインが大部分である。つまり，作業実行の自動化が主である。次世代の自動化では，第1，第2番目の作業手順・仕様の理解，作業対象の識別・認識が重要となる。

なかでも，作業対象の識別・認識には，作業対象の位置，形状を計測するための視覚システムの構築が必要となる。視覚に関する研究は1960年代から活発に行われてきたデジタル画像処理の基礎研究(画像のデジタル化・符号化，画像の強調・復元，画像の分割・記述など)²⁾を基に各方面で研究，開発が行われており，その視覚の対象画像は，濃淡画像，カラー画像，パターン投光画像などがあり，また，処理対象も機械部品，室内シーン，顕微鏡写真，X線写真など多岐にわたっている。

視覚システム構築において，要求される性能としては，

- 1) 情報取得性能が高いこと。
- 2) 取得情報の信頼性が高いこと。
- 3) 処理時間が早いこと。
- 4) 汎用的であること。

などがある。

現在，実用化されている視覚システムとしては，パーツフィーダ等により予め決められた姿勢に整列された作業対象をTVカメラ等の撮像装置で撮像して得られた画像を対象とした2次元視覚システムが大部分である³⁾⁻⁵⁾。このような2次元視覚システムでは，TVカメラによる撮像時の照明条件をそのシーンに最適な状態にすることが比較的容易であり，また，視覚情報の得られ方も一定している。このため，画像からの形状情報抽出は，正確で完全な情報抽出が容易であり，信頼性の高い視覚システムが実現しやすい。このため，視覚により得られる物体形状の照合・認識も比較的容易に行うことができる。さらに，2次元視覚システムでは，2値

画像を対象としたものが多く、実時間性に対しても適している。

しかし、生産工程における作業対象である3次元対象物体に対し、この2次元視覚システムを適用するには、パーツフィーダ等による物体の整列工程が必要となる。多品種少量生産方式にこの2次元視覚システムを適用するのは困難であり、整列工程を排除し、3次元作業対象物体を3次元物体として処理するには、2つの大きな問題がある。第1番目の問題は、対象物体の置かれ方によりその見え方が異なる点である。第2番目の問題は、2次元視覚システムに比べて、環境を整えにくいことにある。つまり、処理対象物体の置かれ方、環境等により得られた画像から必要とする形状情報が得られないことが生じる。

3次元対象物体の形状情報抽出において、検出対象となる形状データは、物体の形を規定する面と面の境界線と物体を構成する面、稜線、頂点の3次元距離情報である。これらの3次元形状情報の取得方法としては、ステレオ法^{6) -19)}、光線追跡法^{20) -24)}、光切断法^{25) -31)}、パターン投光法^{32) -41)}など各種の方法が研究・開発されている。これらの方法において、ステレオ法、光線追跡法では、主として濃淡画像を処理対象画像としており、光切断法、パターン投光法では、スリットパターン、格子パターン等のパターン投光画像を処理対象画像として用いている。

濃淡画像からの形状情報の抽出では、隣接する2面間の面と面の境界における明るさの変化の抽出により、形状情報である縁辺抽出画像が得られる。この縁辺抽出においては、画像に含まれるノイズ、および、面質の変化等の形状の不連続変化以外の明るさの変化が形状情報抽出を阻害している。一方、パターン投光画像では、基本的には、投光されたパターンの投光位置と撮像位置をもとに三角測量の原理に基づき物体上の各点の3次元座標値が得られる。また、このパターン投光画像では、物体を構成する個々の面において投光されたパターンの間隔や傾きに規則性を有しているため、パターンの間隔、傾きなどのパターン情報から個々の面の傾きなどの3次元情報が得られ、そのパターンの変化点から面間の境界線を抽出することができる。このパターン投光画像からの形状情報抽出においては、環境光の存在下での均一なパターン投光画像の形成が課題となる。このため、3次元視覚システムの構築においては、画像形成およびその画像からの形状情報抽出における対ノイズ性、対環境性の向上が重要となる。

また、形状情報をできるだけ広い範囲で取得するには、複数画像を利用すれば良い。しかし、ステレオ視のように、物体を撮像する方向を変化させて得られる同一種類の複数画像を利用する場合、2画像間の対応問題や2画像で異なった形状情報が抽出された時にどちらの形状情報を採用するか判断などの問題がある。

本研究では、濃淡画像とパターン投光画像では、画像の形成原理、形状情報の得られ方が異なることに着目し、これら両者の画像を併用した3次元視覚システムを構築することを目的としている。

つまり、同一撮像方向（視線方向）で濃淡画像とパターン投光画像を形成させ、形状情報を取得した場合、形状情報の得られない箇所が必ずしも一致しない。このため、両者の画像を併用することで、取得情報の欠損を補うことができると考えられる。また、両者から得られる形

形状情報の抽出源が異なるため、情報不一致時の判断が可能である。例えば、濃淡画像から抽出された縁辺を挟む2面において、得られたパターン情報が同一である場合、この2面は同一面上にあり、この縁辺が幾何学的な形状変化から得られたのではないとの判定を行うことができる。

このように、形成原理の異なる濃淡画像とパターン投光画像を併用することで、より正確で、信頼性の高い視覚システムが構築されることが考えられる。

本研究は、多面体と円柱で構成された物体を対象とし、パターン投光画像として、高精度な3次元距離情報の得られるモアレ縞画像およびその形成の基になる平行格子投光画像を取り上げ、濃淡画像およびパターン投光画像からの形状情報抽出における対環境性、対ノイズ性に優れた画像形成並びに形状情報抽出方法を検討するとともに、両画像からの情報を統合化した視覚システムの構築について検討したものである。

さらに、本研究で構築した視覚システムの応用として、この視覚システムより得られた3次元物体の形状情報を基にCADモデル形状データとの照合により、その撮像された物体の形状・姿勢の認識方法についての検討を行っている。特に、前述した3次元対象物体に対する第1番目の課題である物体の置かれ方に対する見え方の変化および形状照合・認識における視覚情報の不完全さ、不確実さを考慮した照合・認識について検討している。

視覚システム構築においては、適用対象を特定し、その対象、環境の制約を考慮してシステムを構築する方法と適用対象を特に限定せずに基本視覚システムを構築し、そのシステムの性能を評価しておき、特定対象への適用に際して、個々の処理パラメータをその対象、環境に対応させる方法がある。本研究では、各種対象への適用展開の観点から後者の基本視覚システムの構築を行っている。

1.2 本論文の構成

本論文の構成および流れを Fig.1.1 に示す。本論文は全8章から構成されている。

第2章では、濃淡画像とパターン投光画像から得られる形状情報およびそれらの得られる範囲等を明確にするとともに、これら形成原理の異なる2画像を併用することの意義について検討し、異種画像併用視覚システム構築の考え方を示している。

第3章では、濃淡画像において、作業対象物体を構成する面間における明るさの変化が大きく得られ、かつ、縁辺検出の障害因子となる対象物体表面の傷や影、曲面上などの局部反射による濃淡レベル変化が小さくなる照明方法を検討するとともに、耐ノイズ性が良好で、面間境界の明るさのステップ状変化のみを抽出可能な輝度レベルの分散値に基づく新たな縁辺検出オペレータについて検討している。

第4章では、高い3次元形状計測精度の得られるモアレ縞画像形成において、スリットレーザー光の走査投光およびTVカメラの電荷蓄積特性を利用して、作業環境下における環境光の存在下でコントラストの高いモアレ縞画像を形成するための方法について検討し、試作装置によ

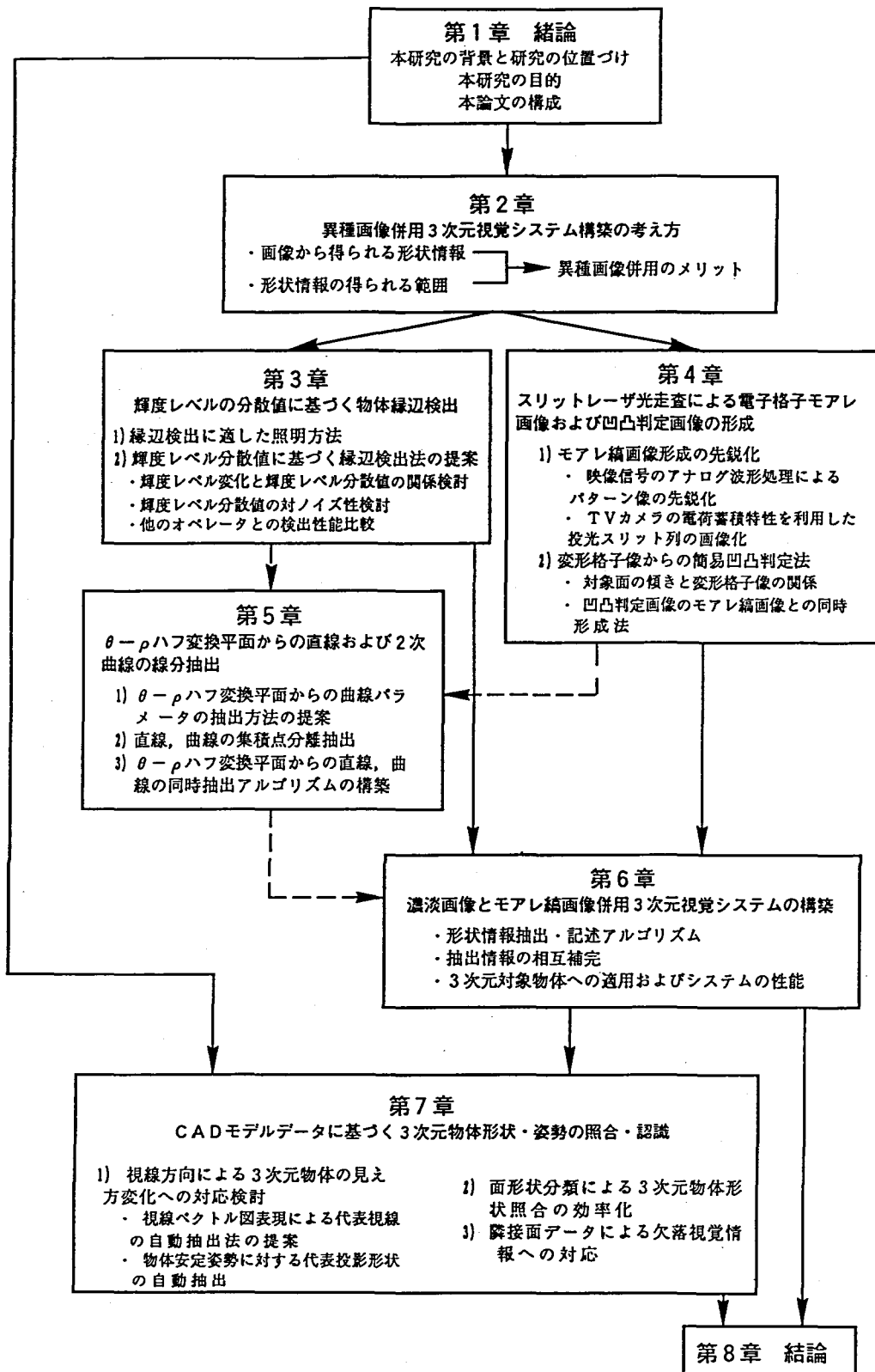


Fig.1.1 Flow chart of this study.

り有効性を立証している。さらに、モアレ縞画像形成の基になる平行格子投光画像からの物体面の傾きの正負判定法（凹凸判定法）について検討している。

第5章では、直線線分検出に用いられる $\theta - \rho$ ハフ変換平面へ2次曲線をハフ変換したときに得られる集積点軌跡が2次曲線の接線軌跡であることに着目し、ノイズ、線分の乱れを含む線画像である縁辺検出画像、パターン投光画像（モアレ縞画像、平行格子投光画像）から信頼性が高く、かつ、効率的に線分情報を抽出するための方法について検討している。

第6章では、第3章、第4章で形成された形成原理の異なる濃淡画像とパターン投光画像（モアレ縞画像、平行格子投光画像）を併用し、形状情報を相互補完することにより、信頼性が高く、形状取得範囲が広く、かつ、効率的な3次元形状計測のための視覚システムを構築し、有効性を実証している。

第7章では、視覚システムから得られる形状情報を基に、CADモデルデータとの照合から物体形状およびその姿勢を認識する方法について検討している。まず、3次元物体の視線方向に対する見え方の変化への対応に対しては、視線ベクトル図による代表投影形状の自動抽出法を提案し、安定姿勢を考慮した3次元物体の見え方の抽出法について検討している。また、形状情報の不完全さへの対応としては、モデルデータへの縁辺欠落データの付加および視覚データにおける2段階形状判定による対処方法について検討し、信頼性が高く、効率的な形状照合方法を確立している。

第8章では、本研究の総轄として、各章で得られた成果をまとめている。

第2章 異種画像併用3次元視覚システム構築の考え方

2.1 濃淡画像およびパターン投光画像から得られる形状情報とその特質

2.1.1 濃淡画像から得られる形状情報とその特質

対象物体をTVカメラで撮像して得られる濃淡画像は、Fig.2.1 に示すように、物体上の各点への入射光強度とその点での光の反射特性 ϕ で決まる明るさの情報で形成される。ここで、Fig.2.2 に示すように、

- 1) レンズの光軸を x^* 軸(物体方向を正の向き)
- 2) レンズ中心を通過して、この軸に垂直な面を y^*-z^* 面
- 3) レンズの中心を原点
- 4) 画像面とレンズの中心の距離を a
- 5) 撮像する対象物上の1点 $r(x, y, z)$ の法線と入射光線のなす入射角を i
- 6) 局所的法線と反射光線のなす反射角を e
- 7) 入射光線と反射光線のなす位相角を g
- 8) 画像の明るさと物体の輝度の比を t

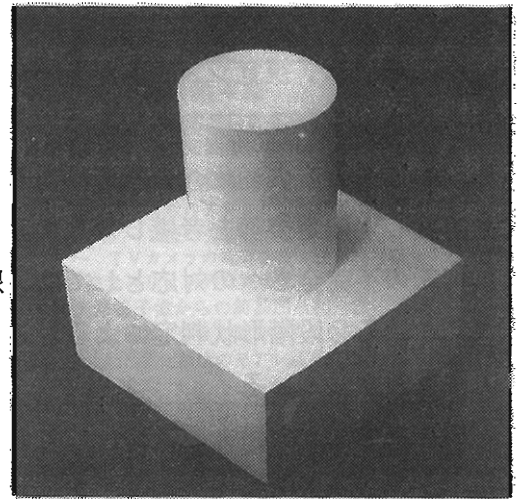


Fig.2.1 Gray image for 3-D object.

とし、

- 9) 画像空間と物体空間の屈折率は等しい。

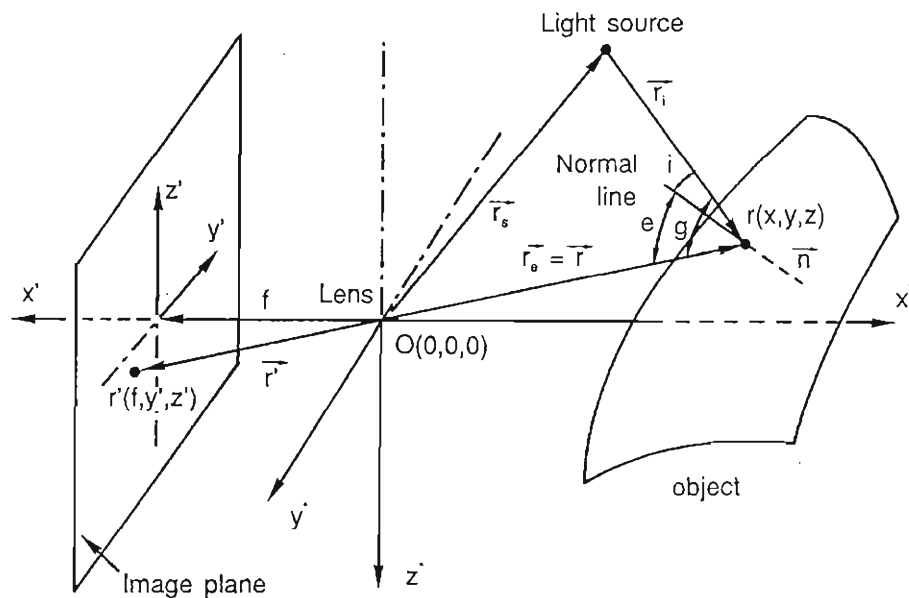


Fig.2.2 Generation of gray image.

ものと仮定すると，入射光の強度 I_1 とその点の物体の輝度 A の間には，次のような関係が成り立つ．

$$A(x, y, z) = t \cdot I_1(x, y, z) \quad (2.1)$$

物体上の点 r に対応する画像上の点 $r'(a, y', z')$ において測定される明るさ $B(r')$ は，

$$B(r') = A(r) \phi(I, E, G) \quad (2.2)$$

$$I = \cos(i)$$

$$E = \cos(e)$$

$$G = \cos(g)$$

となる⁴²⁾．つまり，物体上の点 r に対して測定される明るさは，その点への入射光強度とその点での光の反射特性 ϕ で決まる．反射特性は，その点における光の入射角，反射角，位相角およびその面の色，表面粗さ等の面質により決まる．このため，面質が一定な対象に対しては，計測される明るさは，照明装置，撮像装置，計測対象物体の幾何学的配置によってのみ決定される．このため，照明，撮像装置の配置が既知の場合は濃淡画像から物体上の各点の局所的法線ベクトルを算出することが可能である．しかし，一般的には個々の点への入射光強度 I_1 ，および，面質が一定ではない．このため，計測される個々の点の明るさからその点の距離情報（法線）を求めることができない．

一般に，濃淡画像からの情報抽出は，明るさが不連続に変化する点を抽出している．つまり，

- 1) 入射・反射角が不連続に変化する点
- 2) 面質が不連続に変化する点

を抽出している．このうち，物体形状情報は入射・反射角の不連続変化点から得られる．つまり，濃淡画像から抽出される物体形状は，TVカメラで撮像して得られる明るさの変化点に基づいている．Fig. 2.3 は，この明るさの変化点を抽出して得られた縁辺検出画像を示したものである．このように，濃淡画像における明るさの変化点を抽出することにより，対象物体の形状を最もよく表す物体の稜線を容易に抽出できる．しかし，このように濃淡画像を基に明るさが不連続に変化する点を抽出した場合，面上の汚れや色の変化等の面質の変化点や影等による形状変化以外の明るさの変化点を誤抽出することがある．

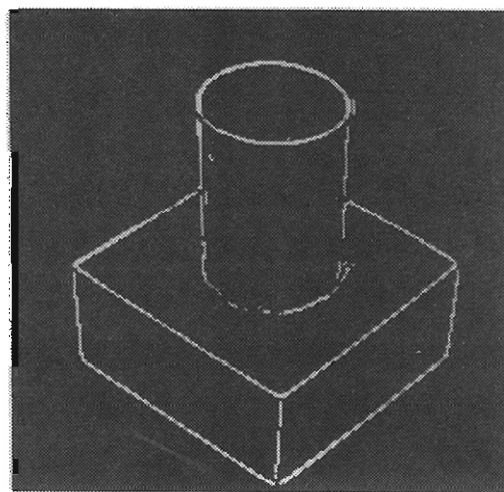


Fig.2.3 Edge line image detected from gray image.

2.1.2 パターン投光画像から得られる形状情報とその特質

対象物体に対して格子パターンやリングパターンなどの均一パターンを投光して得られるパターン投光画像から得られる情報は、Fig. 2.4 に示す三角測量の原理に基づくものである。光の投光源 $G_N(x_N, y_N, z_N)$ とその受光点 $H_N(x'_N, y'_N, z'_N)$ から、物体上に投光されている点 $F_N(x^0_N, y^0_N, z^0_N)$ は、

$$\begin{aligned} x^0_N &= \frac{a' d (a - a') + a' (a y'_N - a' y_N)}{a y'_N - a' (y_N + d)} \\ y^0_N &= \frac{a d y'_N}{a' (y_N + d) - a y'_N} \\ z^0_N &= \frac{a d z'_N}{a' (z_N + d) - a z'_N} \end{aligned} \quad (2.3)$$

で算出される。つまり、各パターン投光点の座標値が (2.3) 式に基づいて算出される。一定周期 Δp の格子パターンの場合、各投光点は、投光点 G_N の y 座標が Δp の間隔で存在する。ここで、パターン画像の形成対象となる物体を構成する各面（面素）の傾きを Fig. 2.5 に示すように、光軸に垂直な平面を基準面として、この基準面からの水平方向の傾きを α 、垂直方向の傾きを β ($-\pi/2 < \alpha, \beta < \pi/2$) とすると、対象面の方程式は

$$\begin{aligned} Ax + By + Cz &= D \quad (2.4) \\ A &= -\cos \alpha \cos \beta \\ B &= \sin \alpha \cos \beta \\ C &= \sin \beta \\ D &= A(\ell + \Delta \ell) \end{aligned}$$

で表すことができる。

Fig. 2.4 において、投影用格子上の点 $G_N(x_N, y_N, z_N)$ は投影用格子（格子の方向は紙面に垂直方向； z 軸方向）の中心から N 本目 ($-N_1 \leq N \leq N_1$) の格子上で z 座標が z_N の点とすると、

$$G_N(x_N, y_N, z_N) = (a' - a, -d + Np, z_N) \quad (2.5)$$

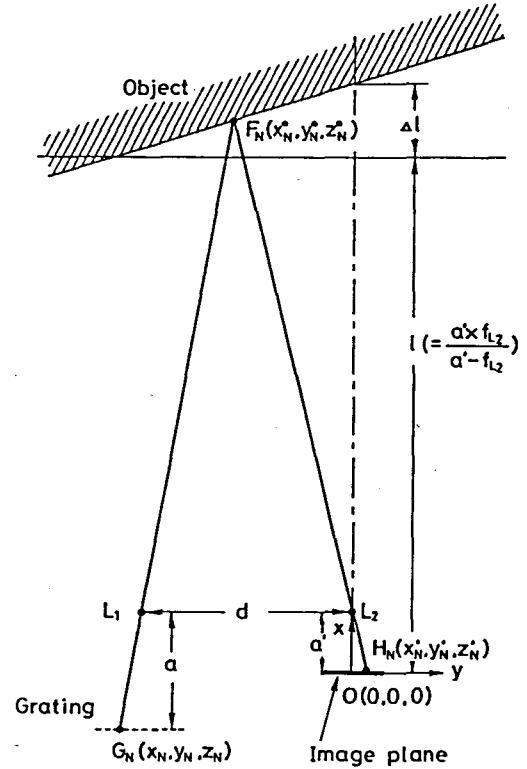


Fig.2.4 Principle of pattern projection.

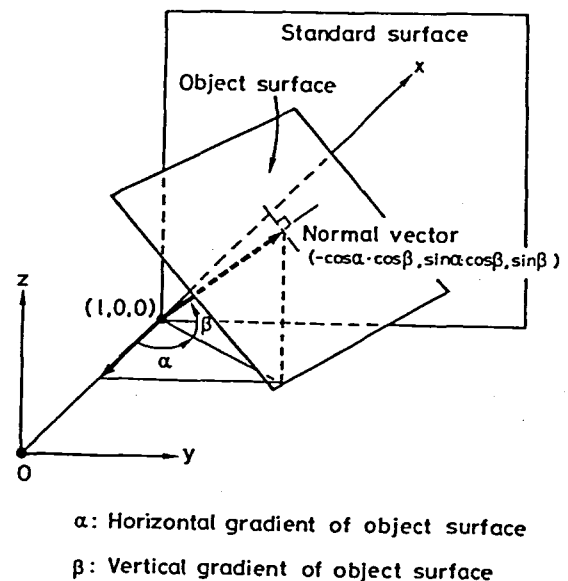


Fig.2.5 3-D gradient of plane surface.

となる。この点 G_N はレンズ L_1 により物体上の点 F_N に投影される。点 $F_N^0 (x_N^0, y_N^0, z_N^0)$ は直線 $\overline{G_N F_N}$ と対象面の交点より、

$$\begin{aligned} x_N^0 &= \frac{a(\ell + \Delta\ell)A + (ad - a'Np)B - a'z_N C}{aA - NpB - z_N C} \\ y_N^0 &= -Np \frac{(\ell + \Delta\ell - a')A + dB}{aA - NpB - z_N C} - d \\ z_N^0 &= -z_N \frac{(\ell + \Delta\ell - a')A + dB}{aA - NpB - z_N C} \end{aligned} \quad (2.6)$$

となる。この物体上の投影点は撮像面上の点 H_N に結像される。点 $H_N (x_N', y_N', z_N')$ は、直線 $\overline{F_N H_N}$ における $x_N' = 0$ の点より、

$$\begin{aligned} x_N' &= 0 \\ y_N' &= \frac{a'}{a} \left\{ Np + \frac{d(aA - NpB - z_N C)}{(\ell + \Delta\ell - a')A + dB} \right\} \\ z_N' &= z_N \frac{a'}{a' - x_N} \end{aligned} \quad (2.7)$$

となる。ここで、平行格子投光画像における格子像の傾き θ_2 は (2.7) 式より

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{d(aA - NpB - z_N C)}{z_N \{ (\ell + \Delta\ell - a')A + dB \}} \right] \quad (2.8)$$

また、 $N+1$ 本目の格子上の点の y 座標は

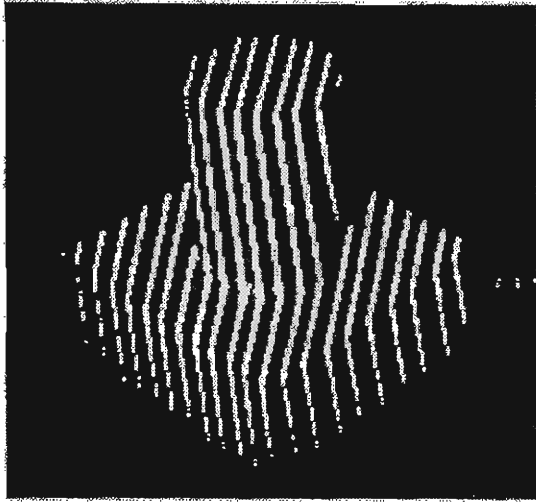
$$y_{N+1}' = \frac{a'}{a} \left\{ (N+1)p + \frac{d(aA - (N+1)pB - z_N C)}{(\ell + \Delta\ell - a')A + dB} \right\} \quad (2.9)$$

となる。ゆえに、平行格子投光画像の水平方向間隔 Δy は

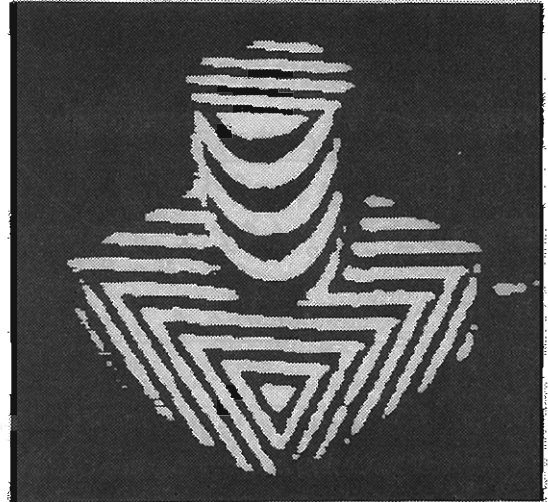
$$\begin{aligned} \Delta y &= |y_{N+1}' - y_N'| \\ &= \frac{a'}{a} p \left| 1 - \frac{d \sin \alpha}{(\ell + \Delta\ell - a') \cos \alpha + d \sin \alpha} \right| \end{aligned} \quad (2.10)$$

となる。式中 a, a', p, ℓ, d は光学系の設定値 (既知) であるので、平行格子投光画像の水平方向間隔 Δy は対象面 (面素) の水平方向の傾き α と対象面までの距離変化分 $\Delta\ell$ によって決定される。

このように、一定周期のパターンを投光して形成されるパターン投光画像は Fig. 2.6(a) に示されるように、面の形状に応じたパターン画像となる。つまり、平面に対しては、各面において間隔、傾きが一定なパターン画像となる。また、円柱側面に対しては、曲率に応じた間隔変化を有する格子パターンとなる。さらに、この平行格子投光画像を投光格子と同じ一定周期の格子を通して撮像すると、Fig. 2.6(b) に示すような新たな縞画像が得られる。これがモアレ縞画像である。



(a) projected image of parallel gratings



(b) Moire image

Fig.2.6 Pattern projected image.

モアレ縞は Fig. 2.7 に示すように，この平行格子投光画像と撮像面上におかれた基準格子（電子格子）で形成されるひし形の鈍角の交点を結んだ線として形成される。

ここで，図に示すように基準格子を z 軸に平行にとり，その格子間隔を S_1 とし，平行格子投光画像の格子間隔を S_2 ，格子の傾きを θ_2 とすると，モアレ縞の縞間隔 S_m と垂直線からの傾き θ_m は

$$S_m = \frac{S_1 S_2}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 - 2S_1 S_2 \cos \theta_2}} \quad (2.11)$$

$$\sin \theta_m = \frac{S_1 \sin \theta_2}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 - 2S_1 S_2 \cos \theta_2}} \quad (2.12)$$

となる。ここで， S_1 は干渉用格子の間隔で，

$$S_1 = \frac{a'}{a} p \quad (2.13)$$

であり， S_2 は平行格子投光画像の格子間隔で (2.10) 式より，

$$\begin{aligned} S_2 &= \Delta y \cos \theta_2 \\ &= \frac{a'}{a} p \left| 1 - \frac{d \sin \alpha}{(\ell + \Delta \ell - a') \cos \alpha + d \sin \alpha} \right| \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

である。これより，モアレ縞の水平方向間隔 S_x および垂直線からの傾き θ_m は，

$$S_x = \frac{a'}{a} p \frac{\ell + \Delta \ell - a'}{d |\tan \alpha|} \quad (2.15)$$

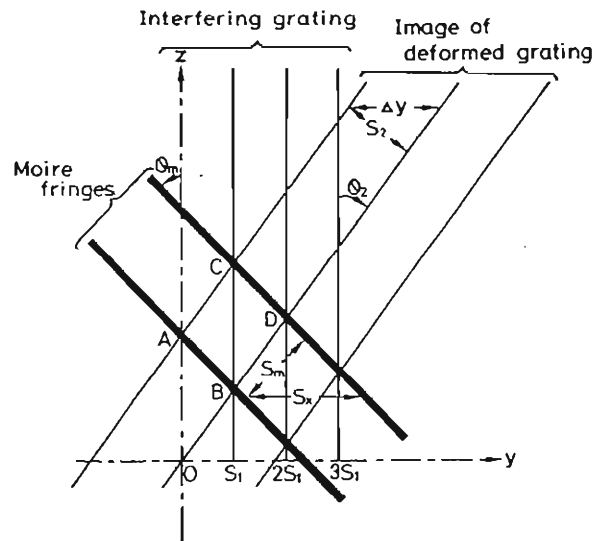


Fig.2.7 Generation of moire fringes.

$$\theta_m = \tan^{-1} \left(- \frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \right) \quad (2.16)$$

となり、対象面の傾き α 、 β は、モアレ縞の間隔 S_x およびモアレ縞の傾き θ_m から容易に求めることができる。

対象物体が円柱の場合は、Fig. 2.8に示すようにモアレ縞は円柱を yz 平面に平行な平面 S_n で切断した時の切り口（楕円）として形成される。

ここで、円柱の方程式は

$$(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + (z-z_c)^2 - \{ (x-x_c) \sin \psi + (y-y_c) \cos \psi \cos \theta + (z-z_c) \cos \psi \cos \theta \}^2 = r^2 \quad (2.17)$$

$$\sin \psi = b/a$$

で表され、もとの円柱の方程式は楕円の一部として形成されるモアレ縞像から、その楕円の長軸 a 、短軸 b 、水平線からの傾き θ 、および楕円の中心座標 (x_c, y_c, z_c) から決定される。

このように、計算上では楕円の一部として形成されるモアレ縞像から、対象面である円柱側面の方程式を容易に求めることができる。

しかし、実際のモアレ縞画像は縞に太さを有し、さらに、ノイズが加味され、標本化されているため、得られた縞画像から正確に楕円の方程式を求めることは難しい。

ここで、Fig. 2.9に示すように、円柱の中心軸ベクトル \vec{n} とその yz 平面への正射影 \vec{n}' とで作られる平面 $S_{\vec{n}}$ に対する円柱の正射影を考えると、同図(b)のように中心軸ベクトル \vec{n} の平面 $S_{\vec{n}}$ への正射影はモアレ縞による切断面 S_1, S_2 と角度 ψ で交わる。 S_1, S_2 上での円柱切断による楕円は Fig. 2.9(c) に示すような形状となる。この各楕円とその長軸との交点間の距離 D_E は Fig. 2.9(b) における D_E と一致し、 S_1, S_2 間の距離 h が既知である時

$$\tan \psi = h / D_E \quad (2.18)$$

なる関係から ψ を求めることができる。この ψ とモアレ縞画像から得られる θ をもとに図に示すように、円柱の中心軸ベクトル \vec{n} を求めることができ、円柱の方程式は容易に決定される。

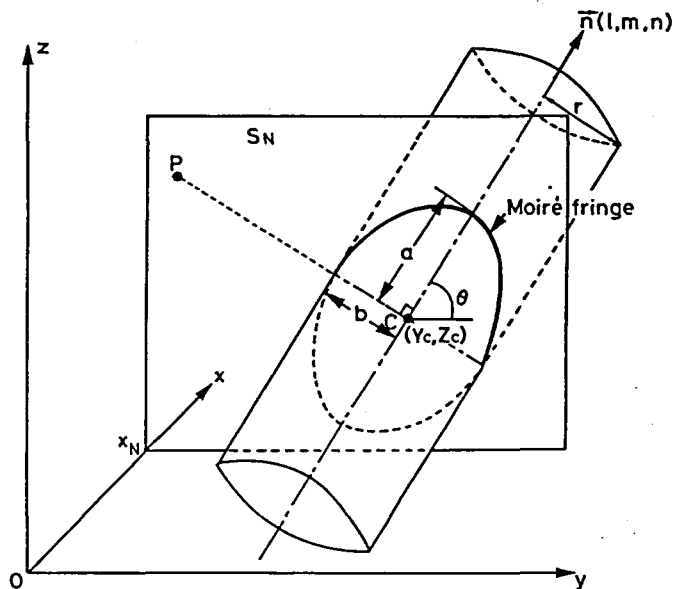


Fig.2.8 Moiré fringes formed on column surface.

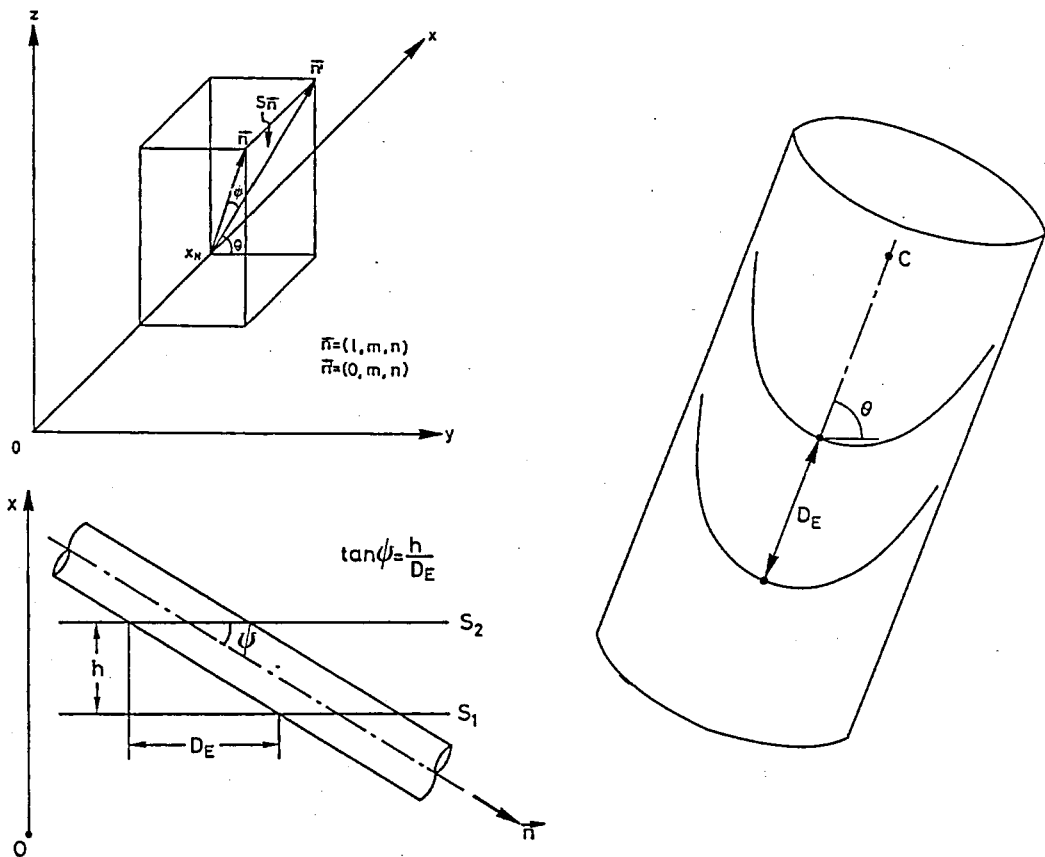


Fig.2.9 Relationship between moire fringes and gradient θ , ψ of column.

このように、パターン投光画像の場合、対象面の傾きに応じて変化したパターン周期からその面の傾きを得ることができ、3次元形状情報を得ることができる。また、面間の境界において、パターン形状が変化するため、パターンの変化点を抽出することで稜線を抽出することもできる。

2.2 形状情報抽出可能範囲

前節に示したように、濃淡画像では、面間の境界線である稜線を面間の境界における明るさの不連続変化から抽出できる。このため、濃淡画像において、形状情報である縁辺を検出できるかどうかは、その縁辺を挟む2面間の輝度差で決まる。Fig. 2. 10は計測対象面の傾き(α , β)とTVカメラで計測される面の輝度レベルの関係を示したものである。図中の数値は輝度レベルを示したものである。これからわかるように、照明方向と光軸との2等分角方向を向いた面が最も明るく、この方向から離れるほど輝度レベルが小さくなる。

ここで、Fig. 2. 11(a) に示すような2面(S_1 , S_2)間の輝度レベルの差を考えると、この両者の面が同じ明るさとなる面の傾きを有している場合、この2面間の縁辺は検出されないこ

となる。Fig. 2.11(b) は面 S_1 の傾きが $\alpha_1=0, \beta_1=\pi/4$ で、面 S_1 と面 S_2 の交角 ϕ が $\pi/2$ および $3\pi/4$ となるように面 S_2 を変化させたときの面 S_2 の軌跡を Fig. 2.10 上に描いたものである。なお、対象面の傾き α, β は、Fig. 2.5 に示す角度をとったもので、TVカメラの光軸に垂直な面を $\alpha = \beta = 0$ としている。この場合、交角 ϕ が $\pi/2$ となる面配置では2面間の輝度レベル差が 30 以上存在し、縁辺の検出が容易に行える。しかし、交角 ϕ が $3\pi/4$ の時は、面 S_2 の傾きが $-\pi/4 < \alpha_2 < -2\pi/15$ の範囲で2面間の輝度レベル差が 15以下となり、縁辺の検出が困難となる。また、この図からわかるように、この照明配置においては、面の垂直方向の傾きが同程度の面間において、輝度レベル差が小さくなる。

パターン投光の場合、形状情報取得可能かどうかはパターン像が形成されるかどうかによる。このため、情報の得られる範囲は投光パターンの輝度レベルがバックグラウンドレベルより大きく得られることが必要である。Fig. 2.12 は、格子パターン投光時の対象面の傾き (α, β) と投光パターンの輝度レベルを示したものである。これからわかるように、TVカメラの光軸に対する対象面の傾きが大きくなるほど、投光レーザ光輝度レベルが小さくなり、パターン像の形成が困難となる。

さらに、格子パターン投光においては、(2.10)式からもわかるように、対象面の傾き α が $\pi/2$ に近づくほど、得られる格子像（平行格子投光画像）の間隔は大きく

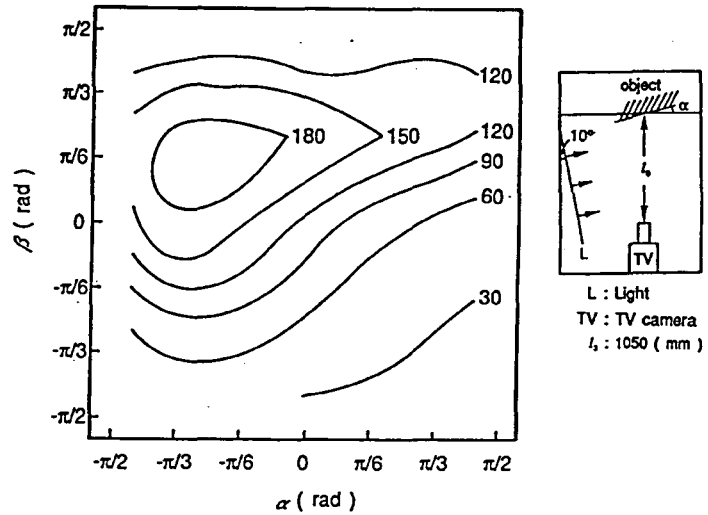


Fig.2.10 Gray level on surface with gradient α, β .

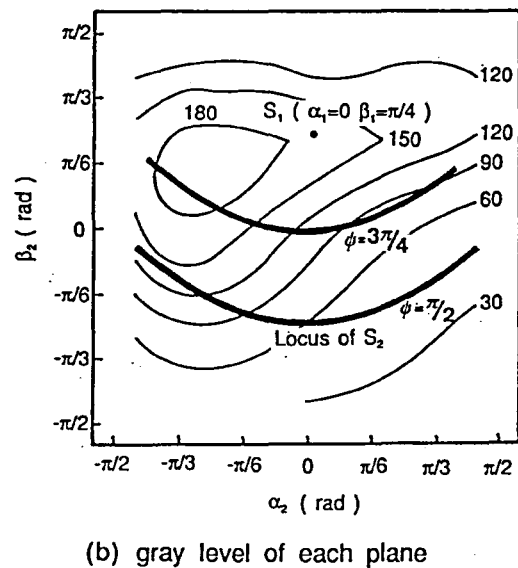
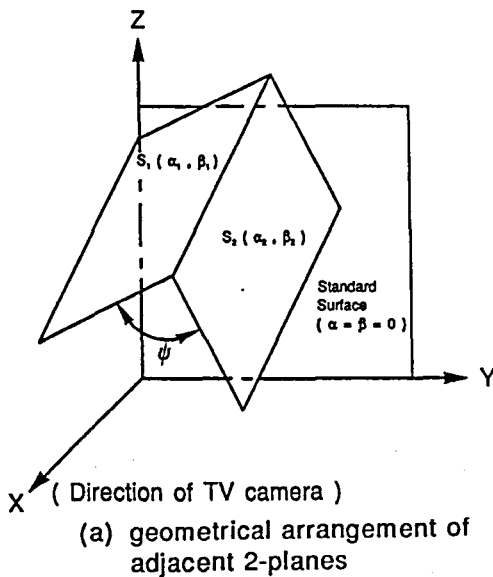


Fig.2.11 Difference of gray level between adjacent 2-planes.

なり，対象面上での格子像の形成本数が少なくなる．一方，傾き α が $-\pi/2$ に近づくと，格子像の間隔は小さくなり，TVカメラで解像できなくなる．つまり，面の傾き α の絶対値が大きくなるほど，パターン像が得られにくくなる．

このように，濃淡画像では，隣接2面間の明るさの変化がない場合に形状情報である縁辺が検出されないのに対し，パターン投光画像では，投光される面の傾きが大きい場合にパターン像が形成されない，または，パターン情報が得られないことが生じる．つまり，これら両者の画像において，形状情報が得られない状況が異なる．

Fig.2.13は，図に示すような多面体対象物体に対する濃淡画像からの縁辺検出可能範囲およびパターン画像形成範囲の実験方法を示したものである．図に示すように対象物体を回転ステ

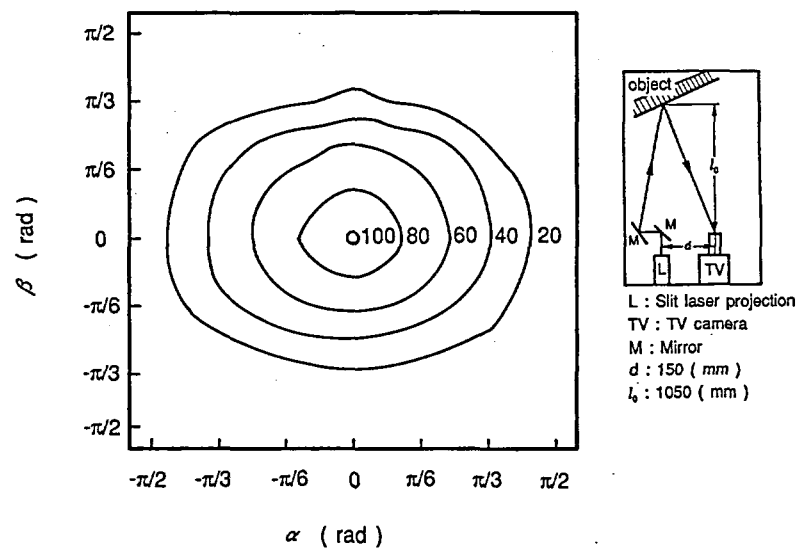


Fig.2.12 Gray level of projected slit pattern.

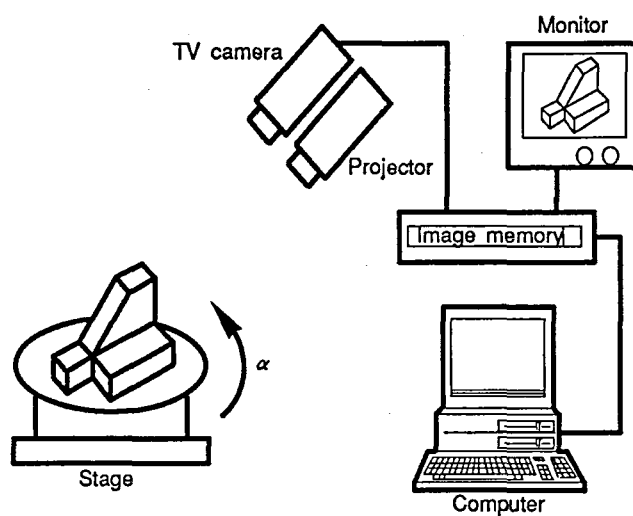


Fig.2.13 Experimental method for measurement of enable region of edge detection and generation of pattern image.

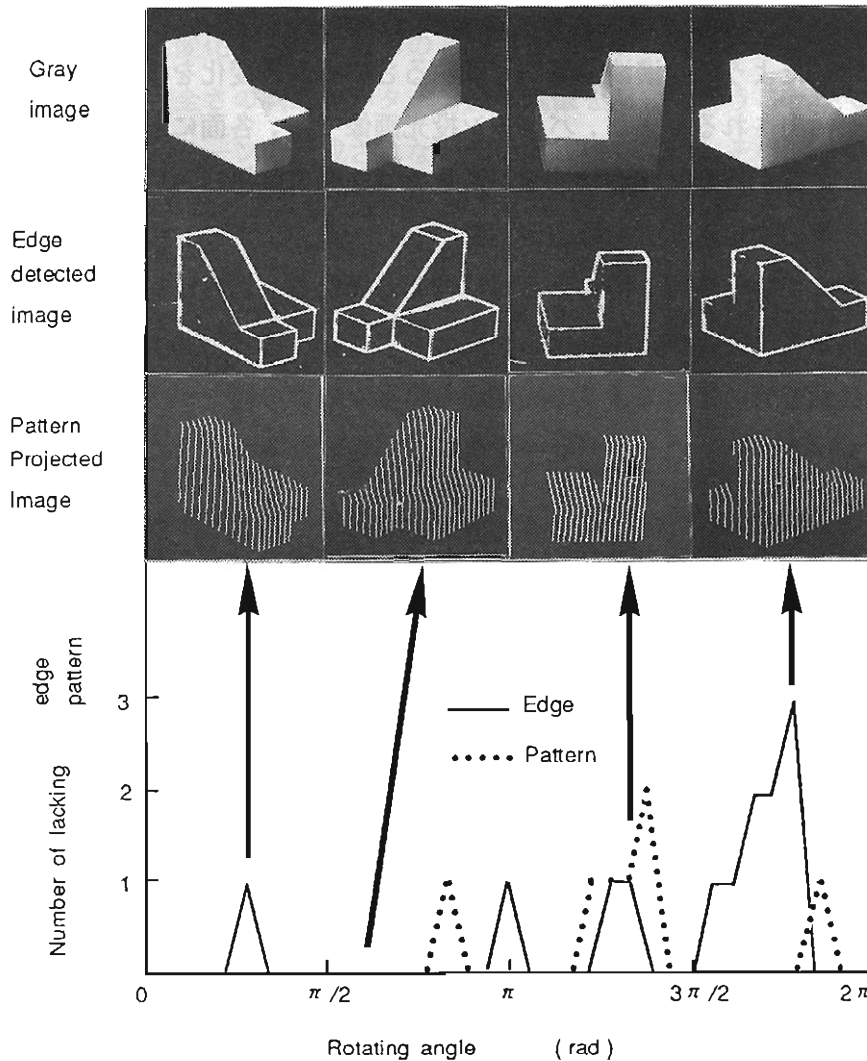


Fig.2.14 Edge detected image and pattern projected image according to view direction.

ージの上におき， $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ と変化させ，それらの各条件下で縁辺検出およびパターン画像を形成させ，縁辺検出可能範囲とパターン画像形成範囲を調べた．Fig. 2. 14は図に示す多面体対象物体に対して得た実験結果の一例で，各回転角に対する縁辺検出時の欠落縁辺数とパターン画像形成におけるパターン形成不能面数および代表的な縁辺検出画像とパターン投光画像を示したものである．この実験結果において，回転角が $\pi/4$ ， $3\pi/4$ において，濃淡画像からの縁辺検出では縁辺が欠落しているのに対して，パターン像は物体上の全ての面上で形成されている．また，回転角が $4\pi/3$ において，縁辺線の欠落とパターンの形成不能面ともに生じているが，濃淡画像からの縁辺検出において，パターンの形成されていない面の輪郭線が検出されている．このように，両者の画像において，形状情報の得られない箇所が異なっており，両者を併用することで，より確かな形状情報を得ることができる．

2.3 異種画像併用による形状情報取得性能の向上の可能性

2.1節に示したように、濃淡画像からは明るさの不連続変化を抽出することで面間の境界線である縁辺が抽出される。また、パターン投光画像では、各面に形成されるパターンおよびパターンの投光位置から3次元形状情報が得られ、面間の境界においては、投光されたパターンの間隔や傾き等の変化点として縁辺が抽出できる。このように、濃淡画像とパターン投光画像では画像の持っている情報、得られる形状情報が異なる。さらに、2.2節で示したように、濃淡画像では明るさの変化が得られない面間においては、形状情報である縁辺が抽出されず、パターン投光画像では、TVカメラの光軸からの個々の面の傾きが大きくなると投光されたパターンの輝度レベルが低くなり、パターン情報が得られなくなる。このように、濃淡画像とパターン投光画像では形状情報の得られない状況（範囲）が異なる。このため、形成原理の異なる両者の画像を併用することにより、相互の欠落した情報を補うことができ、より確かな形状情報を得ることができると考えられる。

Fig. 2.15は、これら両者の画像情報の得られ方を分類したものである。図(a)は両者とも完全な形で形状情報が得られた場合、図(b)、(c)は濃淡画像からの縁辺検出において、面間の明るさの変化が小さかったために縁辺検出がされなかった箇所を含む場合、図(d)は濃淡画像上に影や傷などで形状変化以外の明るさ変化を誤って抽出した場合、図(e)は物体上のある面上でパターンが形成されなかった場合である。前述したように、濃淡画像からの縁辺検出では、明るさが不連続に変化する点を抽出するため、対象面上の面質の変化や影等による形状の変化以外の明るさの変化をも抽出してしまう。一方、パターン投光画像においては、2.1節において示したように、形成されるパターンは対象面の傾きにより変化をし、対象面の面質等には影響されない。つまり、パターンの不連続変化は形状変化以外には生じない。このため、Fig. 2.15(b)のように、濃淡画像からの縁辺検出画像において領域分けされた領域内でパターン変化がある場合は、その領域内に縁辺が存在すると判断される。また、Fig. 2.15(d)のように、濃淡画像からの縁辺検出で2面として抽出された面に

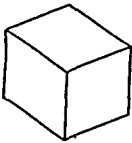

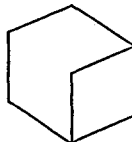

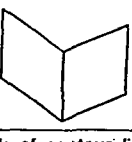

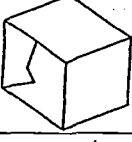
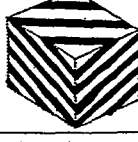
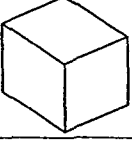

	Edge image detected for gray scale image	Pattern projected image
(a)	 Perfect detection	 Perfect detection
(b)	 Lack of edge line	 Perfect detection
(c)	 Lack of contour line	 Perfect detection
(d)	 Unnecessary element	 Perfect detection
(e)	 Perfect detection	 Lack of pattern

Fig.2.15 Patterns of shape data gotten by gray image and pattern projected image.

において、その2面間でパターンの変化がない場合は、その2面間の境界線として抽出された縁辺は、影や傷による明るさ変化を抽出したものと判定される。このように、濃淡画像からの縁辺検出において、その不完全さの判断をパターン投光画像を用いて行うことができる。一方、Fig. 2.15(e)のように、パターンの形成されなかった面に対しては、その面分の境界線が濃淡画像からの縁辺検出画像から抽出され、隣接する2面でパターンが形成されていれば、これらの情報を基にその面の3次元形状情報（頂点座標、面の傾き）も算出可能である。また、パターン画像におけるパターンの変化点は離散的であるのに対して、濃淡画像における明るさの変化は、面間の境界線である稜線に沿って連続的であるため、稜線の抽出においては、濃淡画像が優れている。

以上の観点より、縁辺検出画像により面分割された領域内においてパターン情報を抽出し、得られた情報を相互比較することで、より正確で信頼性の高い形状情報抽出システムが構築され、さらに、これら両者の形状情報取得範囲が異なっているため、併用することによりさらに広い範囲での形状情報も抽出されることが考えられる。

第3章 輝度レベルの分散値に基づく物体縁辺検出

3.1 はじめに

前章に示したように、濃淡画像は物体上の各点への入射光強度とその点での光の反射特性で決まる明るさの情報で形成され、物体上の縁辺は濃淡画像において、明るさが不連続に変化する点として抽出される。

3次元対象物体の形状を特徴付ける縁辺での濃淡の変化は、基本的にはステップ変化であり、縁辺の抽出には、このステップ変化を抽出すればよい。しかし、一般に、縁辺検出対象となる濃淡画像では、このステップ変化にノイズによるランダム変化および“ぼけ”が加わり、ステップ変化が明確でなくなることが多い。さらに、濃淡画像内には、影の部分や曲面上の濃淡変化におけるランプ状の変化も含んでいる。

このような濃淡変化を含む画像からステップ状に変化する縁辺を検出するオペレータは、以下のような要件を具備する必要がある。

- (a) 検出可能な輝度レベル変化量が小さいこと。
- (b) 耐ノイズ性が優れていること。
- (c) 曲面や影などによる輝度レベル変化に対して誤抽出しないこと。
- (d) エッジの方向により検出性が変わらないこと。
- (e) 処理が単純で、処理速度が速いこと。
- (f) 検出のためのしきい値の設定が容易であること。

まず、既存の縁辺検出オペレータについて上記の観点から検討する。縁辺検出オペレータとしては、一次微分に基づく差分型オペレータ^{43) -47)}、ラプラシアンなどの二次微分に基づくオペレータ^{48) -53)}、エッジモデルを仮定してこのパラメータを求めるモデルフィット法^{54)・55)}など各種の方法が研究・提案されている。また、これらの基本的な縁辺検出オペレータに対して、耐ノイズ性等の性能比較なども行われている^{56) -58)}。

一次微分に基づく差分型オペレータのように、画素点間の輝度レベル差に基づくオペレータでは、処理は単純であるが画像に含まれるノイズ要素を検出し易く（耐ノイズ性が悪い）、また、曲面や影などによるランプ状の輝度レベル変化をも誤抽出してしまう。また、縁辺検出のためのしきい値を処理対象画像に応じて設定する必要がある。

二次微分による方法では、ランプ状の輝度レベル変化に対しては二次微分値が小さくなるため有効であるが、微分値に基づくものであるため、耐ノイズ性に問題がある。このため、一般にはフィルタリング要素を加味させたり（ガウスラプラシアン^{48) -52)}、適当なフィルタリングをかけた後オペレータを適用したりして使われている。このフィルタリングは画像復元問題として、各種の方法が提案されている^{59) -64)}。しかし、処理対象画像に含まれるノイズ、影、

局部反射等の縁辺検出阻害要素を検出せずに、検出目的である縁辺のみを抽出するのは非常に困難である^{65) - 71)}。また、二次微分による方法では、ステップ状に変化する縁辺において、二次微分値が正の値から負の値へ（または負の値から正の値へ）大きく変化をし、この符号変化点を抽出するが、この符号変化点の抽出しきい値等を処理画像に応じて設定する必要がある。

このように、3次元対象物体におけるステップ状に変化する縁辺を有効に検出することを主眼とした縁辺検出オペレータに対しては、さらに検討が必要である。

本章は、縁辺における輝度レベル変化が大きく得られ、ノイズ、影、局部反射等の縁辺検出阻害要素による輝度レベル変化が小さくなる照明方法の検討および新たな縁辺検出オペレータについて検討しているものである。ここで、新しい縁辺検出オペレータとして、標準化濃淡画像 ($N \times N$ 画素) における $n \times n$ 画素 ($n \ll N$) の小領域における輝度レベルの分散値によるものを考え、濃淡レベル変化と輝度レベルの分散値の関係を明確にするとともに、この輝度レベルの分散値を用いて、輝度レベルがステップ状に変化する縁辺を検出する方法を検討している。

3.2 濃淡画像中における輝度レベル変化

濃淡画像において、物体を構成する面は個々に特有の明るさ（輝度レベル）を持つ。このため、縁辺においてその縁辺を共有する2つの面の明るさが変化する。一般に、濃淡画像から縁辺を検出する場合、この輝度レベルの不連続性を利用する。

物体の形状を特徴付ける縁辺（稜線、輪郭）は、2つの面の境界線（稜線）または、面と背景の境界線（輪郭）である。背景も1つの面と考えると縁辺はすべて2つの面の境界線となる。

Fig. 3.1 は直方体の上に円柱を載せた対象物体をTVカメラで撮像して得られた標準化濃淡画像における一走査線上の輝度レベル変化を示したものである。図からわかるように、縁辺部や曲面上で輝度レベルの変化が大きくなっている。このため、一般に用いられる差分型オペレータを用いて縁辺を検出すると、縁辺だけでなく、曲面上や影

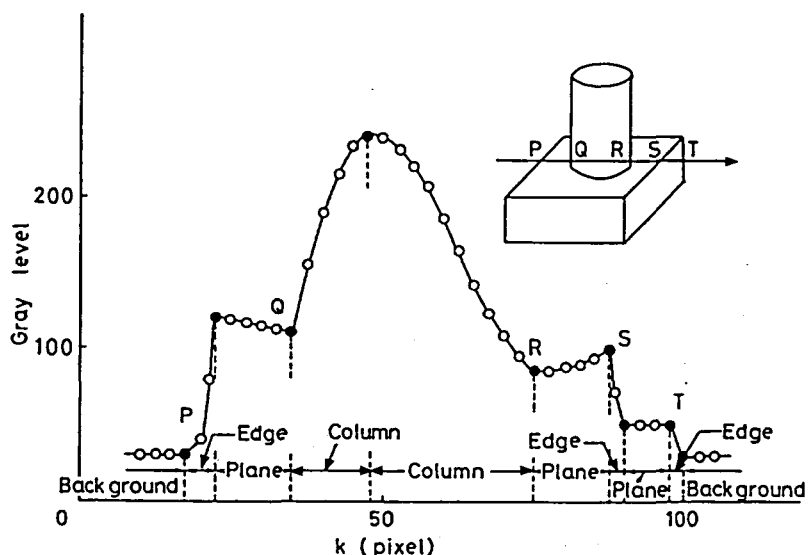


Fig.3.1 Profile of gray level in scene including polyhedron and column.

での輝度レベル変化の大きな部分も検出してしまふ。

この輝度レベル変化は照明方法により大きく変わる。縁辺での輝度レベル変化は、Fig. 3.2 に示すように交角 θ_1 の2面 S_1, S_2 をTVカメラで撮像した時の両者の面の明るさの差 ΔV_c (TVカメラからの映像信号における信号レベルの差) として生じる。つまり、面の傾きに伴い面の明るさが変化するように照明を設定するのがよい。面の傾きをTVカメラの光軸からの傾き (α, β) で表した時、この傾きに応じた面の明るさが Fig. 3.3(a) に示すように直線的に変化すれば、交角 θ_1 の2面の境界(縁辺)において ΔV_c なる明るさの変化が常に得られることになる。また、物体を構成する隣接面において、交角 θ_1 を有しているため、(b)図に示すように、光軸に対する垂直面 ($\alpha = \beta = 0$) で明るさが変化するような照明方法にすれば縁辺における明るさの変化が容易に得られる。なお、この図は水平傾き α にのみ示したものである。

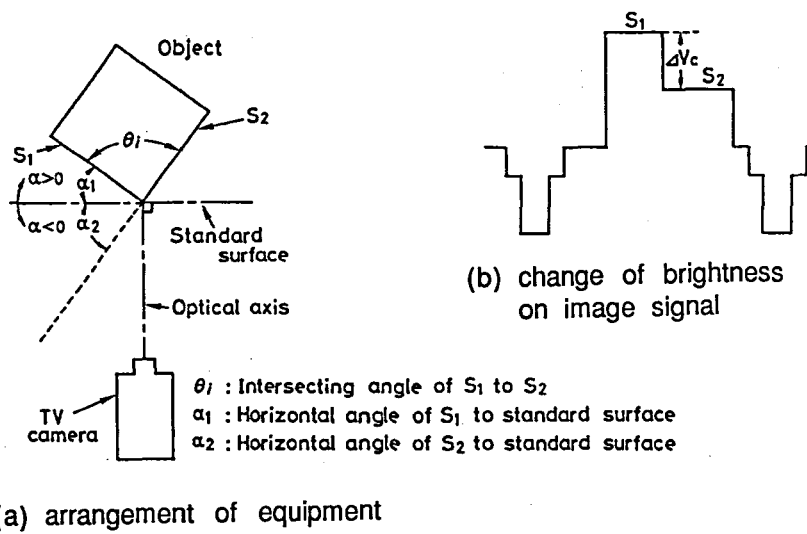


Fig.3.2 Change of brightness at edge line.

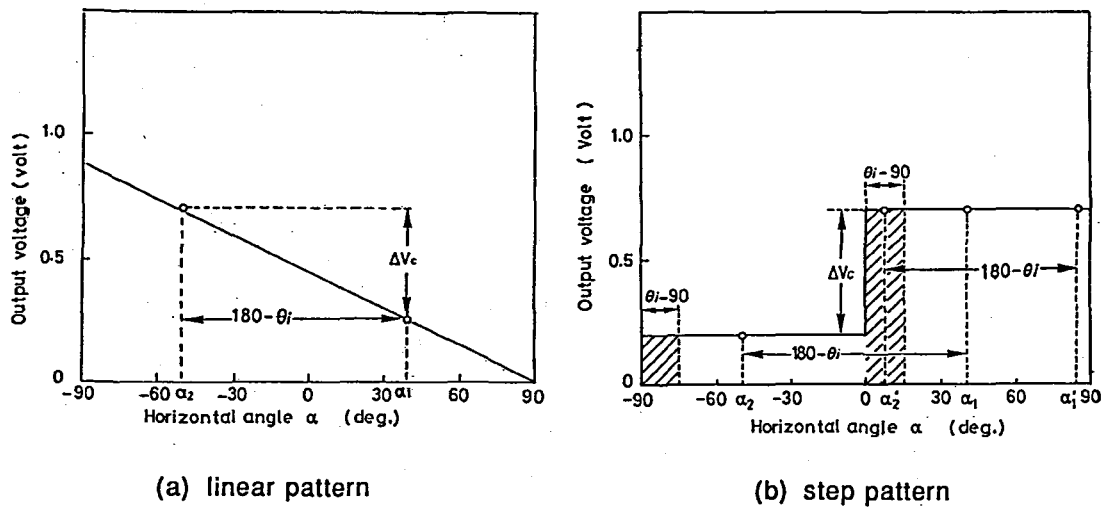


Fig.3.3 Ideal transition of incident ray power into TV camera according to object gradient.

Fig.3.4 は、照明方法の違いによる面の明るさの変化を調べるための2種類の照明方法を示したものである。図(a)は電球をTVカメラの光軸に対して θ_L の方向に設置した照明で、方向性を強く有しており、図(b)は蛍光灯を複数本並列に並べ、その前面に白色塩化ビニル板を設けた照明で、拡散的な照明となっている。なお、この拡散照明は、TVカメラの光軸に対して $\pm\pi/4$ の方向に配置しており、照明Aと照明Bの明るさは約2:1に設定している。

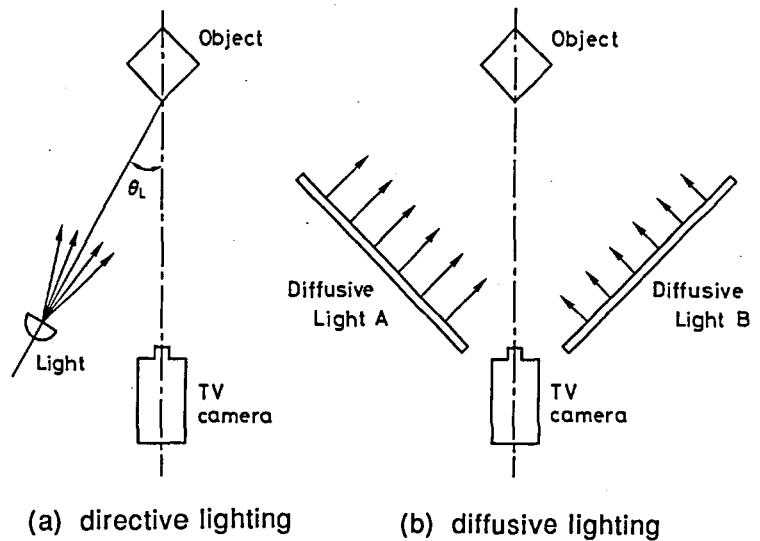


Fig.3.4 Lighting method.

これらの照明を用いて対象面の傾きによる面の明るさをTVカメラの映像信号の信号レベル V_0 で調べた結果がFig.3.5である。Fig.3.4(a)のような方向性の強い照明を対象面に当てた場合、照明方向 θ_L に対する全反射角($\alpha = \theta_L/2$)の時最大明るさを示す。散乱反射の小さな対象面(黒色面など)において、図からわかるように、照明方向に対して傾きが $\pm\pi/8$ 以内の面でTVカメラへの入射光強度が高くなるが、それ以外の傾きの面では入射光強度が小さく変化しない。これに対し、Fig.3.4(b)に示したような散乱照明を用いたものでは、黒色面などの散

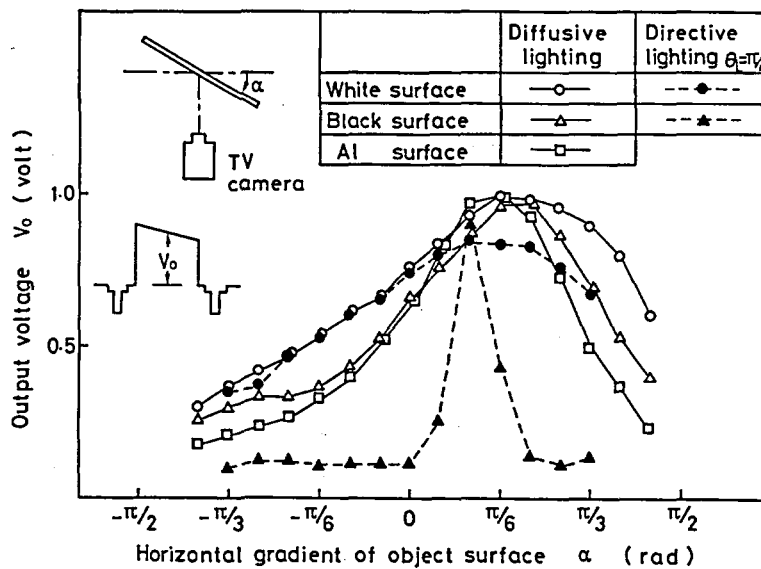


Fig.3.5 Influence of quality of object surface and lighting method on transition of incident ray power into TV camera according to surface gradient.

乱反射の小さな対象面に対しても、 $-5\pi/12 < \alpha < 5\pi/12$ の広い範囲で明るさが変化しており、Fig. 3.3 に示した明るさの変化に近いものとなっている。このように、この照明方法の違いは黒色面や金属面のような表面での光の散乱の小さな面を持つ対象において顕著な違いとなっている。

さらに、照明方法は影や曲面上での明るさの変化にも大きく影響する。Fig. 3.6 は、段差をつけて置いた2つの立方体をTVカメラで撮像し、画像メモリに取り込んだ標準化画像上での影の部分の明るさの変化を示したものである。

これから分かるように、方向性の強い照明の場合、影による明るさの変化が急峻になっている。これに対して、拡散照明を用いた場合には、影の部分での明るさの変化がゆるやかとなっており、縁辺での輝度レベルの変化と大きく異なっている。Fig. 3.7 は Fig. 3.4(b) で示した拡散照明を用いたときの縁辺、影、局部反射部、曲面上における明るさ（輝度レベル）の変化を各種の対象に対して調べた結果である。なお、図中の濃淡変化幅 W は連続した濃淡変化を示す部分の幅で、

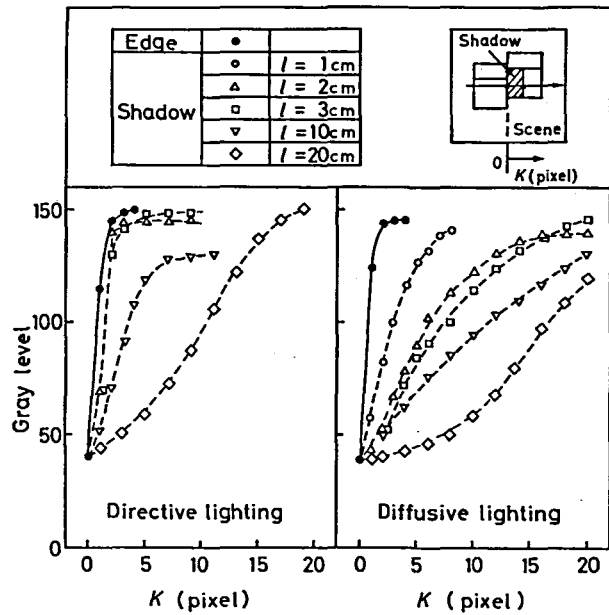


Fig.3.6 Transition of gray level in shadow region.

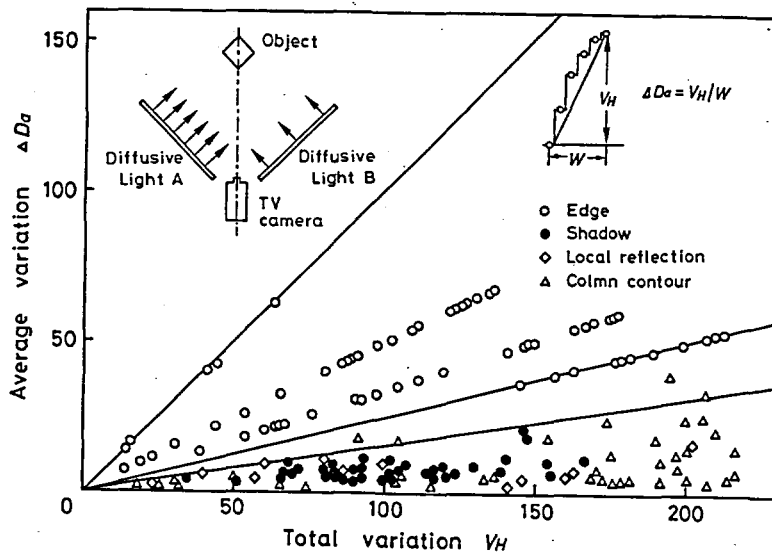


Fig.3.7 Relationship between total change V_H and average change ΔD_a of gray level against edge, shadow, local reflection, and column surface.

V_H はその間の濃淡変化量を示す。対象物体としては、白色立方体、白色立方体の上に白色円柱を載せた物体、熱間圧延鋼板で作成した立方体およびA1製の立方体、円柱を用いた。また、物体の置き方は、各種の輝度レベル変化が得られるように配置した。これから分かるように、縁辺での輝度レベル変化においては、輝度レベルの変化度合い V_H/W が 0.25 以上と大きくなっている。一方、影、曲面上での輝度レベル変化においては、その変化度合い V_H/W が 0.20 以下で、縁辺での輝度レベルの変化度合いより小さくなっている。

このように、拡散的な照明を用いることにより、縁辺における輝度レベルの変化はステップ状となり、影や局部反射による輝度レベル変化では一定に輝度レベルが変化をするランプ状の変化となる。このため、縁辺検出オペレータ構築において、この輝度レベルの変化の仕方を考慮することにより、輝度レベルがステップ上に变化する縁辺だけを検出することが可能となる。

3.3 輝度レベルの分散値の特徴

Fig. 3.8は図(a)に示す物体に対する濃淡画像において、縁辺を含む領域 R_a と縁辺を含まない領域 R_b における輝度レベルの度数分布 (Fig. 3.8(b-1), (c-1)) および輝度レベルとその領域内の平均輝度レベルの差の2乗 (Level-Mean)² の度数分布 (Fig. 3.8(b-2), (c-2))を示したものである。この分布は対象物体に対する各種の濃淡画像に対して輝度レベルの分布を算出した結果をモデル化して表現したものである。図からわかるように、縁辺を含む領域 R_a と縁辺を含まない領域 R_b では、輝度レベルの度数分布に差が生じる。つまり、縁辺を含む領域では縁辺を挟む2つの面の輝度レベルをピークに有する双峰分布となるのに対し、縁辺を含まない領域では単峰分布となる。また、輝度レベルとその領域内の平均輝度レベルの差の2乗 (Level-Mean)²の度数分布は、Fig. 3.8(b-2), (c-2)に示すように、縁辺を含む領域では単峰分布となるのに対し、縁辺を含まない領域では0値をピークにした裾広がり分布となる。

このように標準化画像内の各小領域 ($n \times n$ 画素)における輝度レベル分布と (Level - Mean)²の分布はそれぞれ縁辺を含む場合と縁辺を含まない場合で異なるため、これら輝度

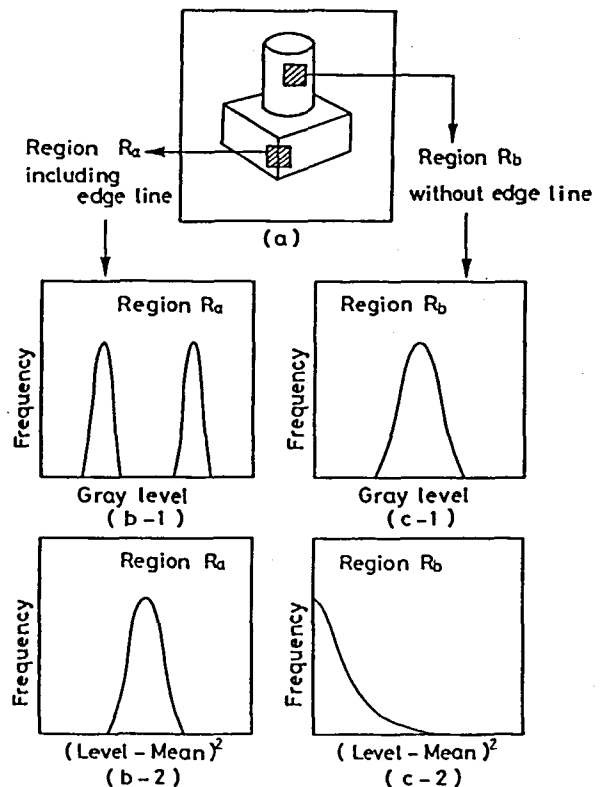


Fig.3.8 Distribution of gray level and (level-Mean)²
 (a) scene
 (b) in region including edge line
 (c) in region without edge line

レベルの分散値および (Level-Mean)²の分散値は、縁辺を含む領域と含まない領域で異なることが期待される。この処理領域内の分散値は、領域内の輝度レベル変化のコントラストに依存した物理量となる。本研究では、標本化領域内の $n \times n$ 画素の小領域における輝度レベルの分散値を V_1 で表している。また、標本化領域内の $n \times n$ 画素の小領域における (Level-Mean)²の分散値を2次分散値と呼び、 V_2 で表している。ここで、 V_1 、 V_2 は、

$$V_1(I, J) = \frac{1}{n^2} \sum_i \sum_j (L(I+i, J+j) - \text{Mean})^2 \quad (3.1)$$

$$\sum_i = \sum_{i=-n_1}^{n_2} \quad \sum_j = \sum_{j=-n_1}^{n_2}$$

$$n = n_1 + n_2$$

$$n \text{ が奇数の時 } n_1 = n_2 = (n-1)/2$$

$$n \text{ が偶数の時 } n_1 = n/2, n_2 = n_1 - 1$$

$$\text{Mean} = \frac{1}{n^2} \sum_i \sum_j L(I+i, J+j) \quad (3.2)$$

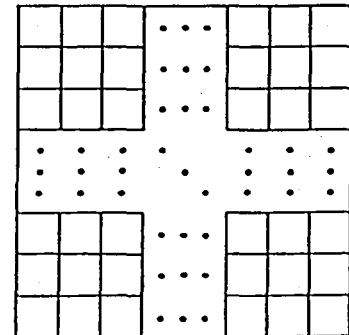
$$V_2(I, J) = \frac{1}{n^2} \sum_i \sum_j \{(L(I+i, J+j) - \text{Mean})^2 - V_1(I, J)\} \quad (3.3)$$

で表される。なお、 $L(i, j)$ は標本化画像における画素番地 (i, j) における輝度である。

まず、Fig. 3.9(b), (c)に示すノイズを含まない理想的なステップ変化（縁辺における輝度レベル変化）とランプ変化（曲面上、影の部分での輝度レベル変化）に対する分散値 V_1 、 V_2 について考える。この理想濃淡変化モデルは、(a)図に示す $n \times n$ 画素の2次元画像モデルにおける各行において、ステップ変化では $k = n/2$ を境に輝度レベルが L_1 から L_2 に変化し、ランプ変化では輝度レベルが L_1 から L_2 へ変化する。つまり、この画像モデルでは、輝度レベルの分散値は輝度レベル変化を一次元の変化として考えることができる。Fig. 3.9(b)のステップ変化では、

$$V_1 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n/2} \{(L_1 - \text{Mean})^2 + \sum_{k=n/2+1}^n (L_2 - \text{Mean})^2\} \quad (3.4)$$

ここで、



(a) pixel of digitized image

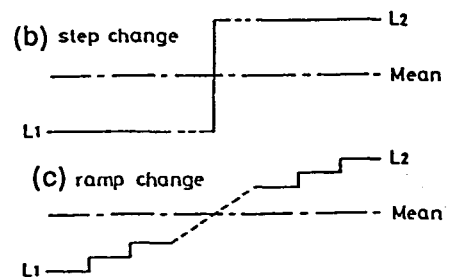


Fig.3.9 Ideal transition of gray level for step change and ramp change.

$$\text{Mean} = (L_1 + L_2) / 2 \quad (3.5)$$

ゆえに,

$$V_1 = \{(L_2 - L_1) / 2\}^2 \quad (3.6)$$

となる. また, V_2 は

$$V_2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |(L(k) - \text{Mean})^2 - V_1| = 0 \quad (3.7)$$

となる. また, Fig. 3.9(c) のランプ変化では,

$$L(k) = L_1 + \frac{k-1}{n-1} (L_2 - L_1) \quad (3.8)$$

$$\text{Mean} = \frac{1}{n} \sum (L_1 + \frac{k-1}{n-1} L_2) = L_1 + \frac{L_2 - L_1}{2} \quad (3.9)$$

ゆえに

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left\{ \left(L_1 + \frac{k-1}{n-1} (L_2 - L_1) \right) - \left(L_1 + \frac{L_2 - L_1}{2} \right) \right\}^2 \\ &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left\{ \left(\frac{k-1}{n-1} - \frac{1}{2} \right) (L_2 - L_1) \right\}^2 \\ &= \frac{n+1}{3(n-1)} \left(\frac{L_2 - L_1}{2} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{2}{n} \left[\sum_{k=1}^{n/4} \{ (L(k) - \text{Mean})^2 - V_1 \} + \sum_{k=n/4+1}^{n/2} \{ V_1 - (L(k) - \text{Mean})^2 \} \right] \\ &= \frac{2(L_2 - L_1)^2}{n} \left[\sum_{k=1}^{n/4} \left\{ \frac{2k-n-1}{2(n-1)} \right\}^2 - \sum_{k=n/4+1}^{n/2} \left\{ \frac{2k-n-1}{2(n-1)} \right\}^2 \right] \\ &= \frac{n^2}{4(n-1)^2} \left(\frac{L_2 - L_1}{2} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

となる. 式 (3.6), (3.7), (3.10), (3.11) からわかるように, 分散値 V_1 , V_2 はそれぞれ輝度レベル変化の絶対量 $(L_2 - L_1)^2$ の値により大きく変化する. ここで, V_1 , V_2 を処理領域内の最大変化量 $(L_{\max} - L_{\min})$ で基準化を計る. $\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2$ で除した値をそれぞれ基準化分散値 $V V_1$, 基準化2次分散値 $V V_2$ とすると, $L_{\max} = L_2$, $L_{\min} = L_1$ より, ステップ変化に対しては,

$$V V_1(\text{step}) = 1 \quad (3.12)$$

$$V V_2(\text{step}) = 0 \quad (3.13)$$

ランプ変化に対しては

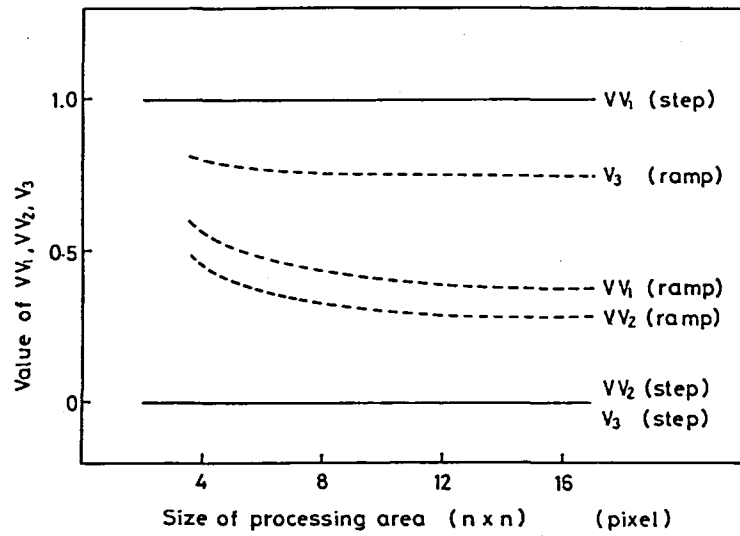


Fig.3.10 Value of V_1 , V_2 , V_3 in the region including step change and ramp change without noise.

$$V V_1 (\text{ramp}) = \frac{n+1}{3(n-1)} \quad (3.14)$$

$$V V_2 (\text{ramp}) = \frac{n^2}{4(n-1)^2} \quad (3.15)$$

となり，処理領域の大きさにのみ依存する値となる．Fig. 3. 10は，これを図示したもので，ステップ変化とランプ変化では明瞭な差が見られる．さらに，この図より，ランプ変化に対しては $V V_1$ ， $V V_2$ とともに同程度の値であるのに対し，ステップ変化では大きく異なっているのがわかる．

ここで， $V V_2$ を $V V_1$ で除した相関分散値 V_3

$$V_3 = \frac{V V_2}{V V_1} = \frac{V_2}{V_1} \quad (3.16)$$

は，式(3.12)～(3.15)より

$$V_3 (\text{step}) = 0 \quad (3.17)$$

$$V_3 (\text{ramp}) = \frac{3}{4} \times \frac{n^2}{n^2-1} \quad (3.18)$$

となり，Fig. 3. 10 からもわかるように，ステップ変化では，処理領域に関わらず相関分散値 V_3 は0であり，ランプ変化では，処理領域の大きさに関わらずほぼ一定値 (0.75) である．このように，ステップ変化に対する値とランプ変化に対する値において，この相関分散値 V_3 は基準化分散値 $V V_1$ ，および基準化2次分散値 $V V_2$ より明瞭な差となっている．

3.4 輝度レベル分散値の耐ノイズ性

前節に示したのは、ノイズ成分を含まない理想的な輝度レベル変化に対するものである。しかし、一般の画像にはノイズ成分が含まれており、このノイズ成分が縁辺検出を阻害している。そこで、ステップ変化およびランプ変化に正規分布ノイズを加えた輝度レベル変化に対する輝度レベルの分散値について検討する。

Fig. 3.9 に示したステップ変化とランプ変化のモデル画像に付加されるノイズレベルを $N(k)$ とすると、ノイズが付加されたステップ変化に対する輝度レベルの分散値 V_1 は、

$$V_1 = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{k=1}^{n/2} (L_1 + N(k) - \text{Mean})^2 + \sum_{k=n/2+1}^n (L_2 + N(k) - \text{Mean})^2 \right\} \quad (3.19)$$

ここで、平均レベル Mean は、

$$\begin{aligned} \text{Mean} &= \frac{1}{n} \left\{ \sum_{k=1}^{n/2} (L_1 + N(k)) + \sum_{k=n/2+1}^n (L_2 + N(k)) \right\} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n/2} N(k) + \frac{L_1 + L_2}{2} \end{aligned} \quad (3.20)$$

ゆえに、 V_1 は、

$$V_1 = \left(\frac{L_2 - L_1}{2} \right)^2 + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n/2} N^2(k) \quad (3.21)$$

となり、ノイズの付加によりノイズ成分 $N(k)$ の2乗平均の分だけ分散値は大きくなる。

Fig. 3.11は、この輝度レベル分散値 V_1 の耐ノイズ性を計算機シミュレーションした結果である。シミュレーションは、輝度レベル変化 ΔL_s のステップ変化を呈する縁辺画像を作成し、このモデル縁辺画像に正規分布ノイズを加えた画像に対して各処理領域における輝度レベルの分散値 V_1 を算出したものである。なお、ここで示す結果は、処理領域 100個の値で、各プロットはその平均値、縦線はバラツキを示している。これからわかるように、処理領域を大きく取るほどバラツキは小さくなっている。

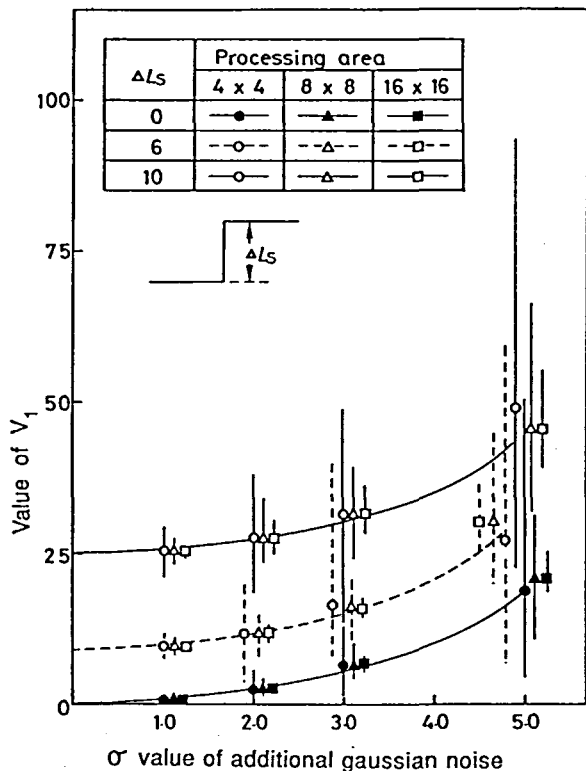


Fig.3.11 Influence of noise on V_1 value.

これは処理領域が大きくなるほど、領域に含まれるノイズ要素が正規分布に近づき、分散値演算においてノイズの影響を除外しやすくなるためである。また、図からわかるように、付加正規分布ノイズの σ 値が3.0の時は処理領域 8×8 以上、また、 σ 値が5.0の時は処理領域 16×16 以上にすると、ステップ変化量6.0の縁辺要素を抽出することができる。このように、輝度レベルの分散値 V_1 は、耐ノイズ性に優れている。しかし、この V_1 は前項で述べたように、曲面上や影の部分で生じるランプ状の輝度レベル変化に対しても大きな値を取る。

次にノイズを含むステップ変化とランプ変化について前項で示した基準化分散値 $V V_1$ 、基準化2次分散値 $V V_2$ について検討する。

ノイズを含むステップ変化の場合、処理領域内の最大輝度レベル L_{\max} および最小輝度レベル L_{\min} は、

$$\begin{aligned} L_{\max} &= L_2 + \max N(k) \\ L_{\min} &= L_1 + \min N(k) \end{aligned} \quad (3.22)$$

となり、レベルの基準化量 $((L_{\max} - L_{\min})/2)^2$ は、

$$\left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} \right)^2 = \left(\frac{L_2 - L_1 + \max N(k) - \min N(k)}{2} \right)^2 \quad (3.23)$$

ここで、

$$\max N(k) - \min N(k) = (L_2 - L_1) / A \quad (3.24)$$

とすると、

$$\left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} \right)^2 = \frac{(1 + 1/A)^2 (L_2 - L_1)^2}{4} \quad (3.25)$$

となり、基準化分散値 $V V_1$ は

$$\begin{aligned} V V_1 &= \frac{1}{1 + (1/A)^2} + \frac{f_1(N(k))}{\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2} \\ f_1(N(k)) &= 1/n \sum N^2(k) \end{aligned} \quad (3.26)$$

と表される。ここで、ノイズによる最大変化がステップ変化量と同程度の場合($A=1$)を考えると、

$$V V_1 (A=1) > 0.5 \quad (3.27)$$

となる。

ノイズが付加されたステップ変化の2次分散値 V_2 は、

$$V_2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n | (L(k) + N(k) - \text{Mean})^2 - V_1 | \quad (3.28)$$

で表される。いま，正と負のノイズの出現確率が1：1であるとし，正のノイズを $N_1(k)$ ，負のノイズを $N_2(k)$ とすると，

$$\begin{aligned}
 V_2 &= \frac{1}{n} \left[\sum^{n/4} \{ (L_1 + N_1(k) - \text{Mean})^2 - V_1 \} \right. \\
 &\quad + \sum^{n/4} \{ (L_2 + N_1(k) - \text{Mean})^2 - V_1 \} \\
 &\quad + \sum^{n/4} \{ V_1 - (L_1 + N_2(k) - \text{Mean})^2 \} \\
 &\quad \left. + \sum^{n/4} \{ V_1 - (L_2 + N_2(k) - \text{Mean})^2 \} \right] \\
 &= \frac{2}{n} (L_1 + L_2 - 2 \times \text{Mean}) \left\{ \sum^{n/4} N_1(k) - \sum^{n/4} N_2(k) \right\} \quad (3.29)
 \end{aligned}$$

となる。ここで，式(3.20)より

$$\text{Mean} = \frac{1}{n} \sum_{k=1} N(k) + \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (3.30)$$

ゆえに，

$$\begin{aligned}
 V_2 &= \frac{2}{n^2} \sum N(k) \times \left\{ \sum^{n/4} N_1(k) - \sum^{n/4} N_2(k) \right\} \\
 &= f_2(N(k)) \quad (3.31)
 \end{aligned}$$

となる。よって， $V V_2$ は

$$V V_2 = \frac{f_2(N(k))}{\{ (L_{\max} - L_{\min}) / 2 \}^2} \quad (3.32)$$

となる。

また，ノイズが付加されたランプ変化における輝度レベルの基準化分散値 $V V_1$ ， $V V_2$ は以下のようになる。

ノイズが付加されたランプ変化に対する輝度レベルの分散値 V_1 は，

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \frac{1}{n} \sum \left\{ L_1 + \frac{k-1}{n-1} (L_2 - L_1) + N(k) - \left(1 + \frac{L_2 - L_1}{2} \right) \right\}^2 \\
 &= \frac{1}{n} \sum \left\{ \left(\frac{k-1}{n-1} - \frac{1}{2} \right) (L_2 - L_1) + N(k) \right\}^2 \\
 &= \frac{n+1}{3(n-1)} \left(\frac{L_2 - L_1}{2} \right)^2 + \sum N^2(k) + \frac{L_2 - L_1}{n} \sum N(k) \frac{2k-n-1}{n-1} \quad (3.33)
 \end{aligned}$$

となる。よって 基準化分散値 $V V_1$ は，

$$V V_1 = \frac{n+1}{3(n-1)} + \frac{f_3(N(k))}{\{ (L_{\max} - L_{\min}) / 2 \}^2} \quad (3.34)$$

$$f_3(N(k)) = \frac{1}{n} \sum N^2(k) + \frac{L_2 - L_1}{n} \sum N(k) \frac{2k - n - 1}{n - 1}$$

となる。

ノイズが付加されたランプ変化の2次分散値 V_2 を考える場合、まずノイズの付加されたレベル値 $(L(k) + N(k))$ を降べきの順に並べかえると、 V_2 は、

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{2}{n} \left[\sum_{k=1}^{n/4} \{ (L(k) + N(k) - \text{Mean})^2 - V_1 \} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=n/4+1}^{n/2} \{ V_1 - (L(k) + N(k) - \text{Mean})^2 \} \right] \\ &= \frac{n^2}{4(n-1)} \left(\frac{L_2 - L_1}{2} \right)^2 + \frac{4}{n} \left\{ \sum_{k=1}^{n/4} N^2(k) - \sum_{k=n/4+1}^{n/2} N^2(k) \right\} \\ &\quad + \frac{2}{n} \left\{ \sum_{k=1}^{n/4} N(k) (L(k) - \text{Mean}) - \sum_{k=n/4+1}^{n/2} N(k) (L(k) - \text{Mean}) \right\} \\ &= \frac{n^2}{4(n-1)} \left(\frac{L_2 - L_1}{2} \right)^2 + f_4(N(k)) \end{aligned} \quad (3.35)$$

となり、基準化2次分散値 $V V_2$ は、

$$V V_2 = \frac{n^2}{4(n-1)} + \frac{f_4(N(k))}{\{(L_{\max} - L_{\min}) / 2\}^2} \quad (3.36)$$

となる。

このように、ノイズが付加されることにより分散値は変化する。ステップ変化に対しては、基準化分散値 $V V_1$ 値はノイズの付加により減少し、基準化2次分散値 $V V_2$ 値は増加する。また、ランプ変化に対する分散値においては、ノイズの状態によりノイズによる値が正負両値を取るため、ノイズの無い時の分散値を基準値としたバラツキとして現れる。

Fig. 3.12, Fig. 3.13は、ノイズを含むステップ変化画像とランプ変化画像に対する基準化分散値 $V V_1$ 、基準化2次分散値 $V V_2$ を算出した結果である。なお、処理領域は 8画素×8画素で行ったものである。これらの結果にはノイズによる影響がよく現れている。これらからわかるように、ランプ変化に対して、

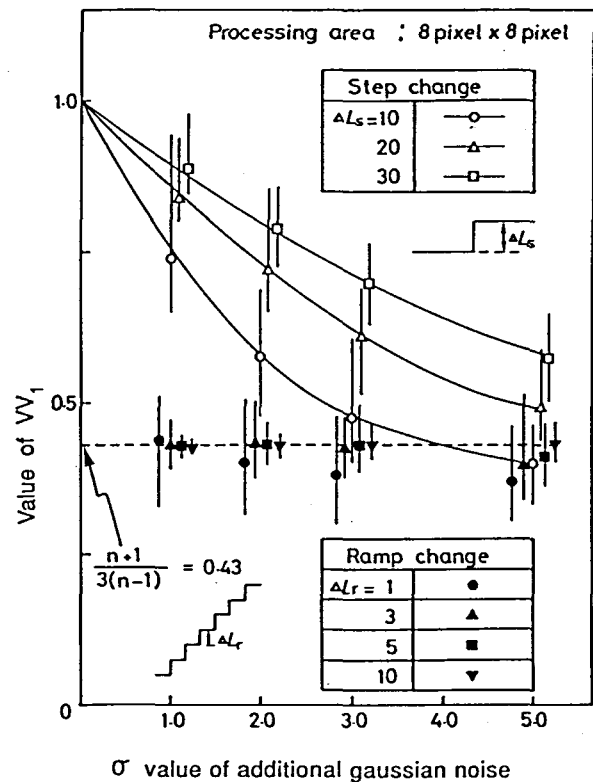


Fig.3.12 $V V_1$ value in the region including step change and ramp change with noise.

$V V_1$, $V V_2$ はランプの変化量, ノイズの大きさ (σ で表示) に関わらずほぼ一定で,

$$V V_1 \text{ (ramp)} < 0.5 \quad (3.37)$$

$$V V_2 \text{ (ramp)} > 0.3 \quad (3.38)$$

となっている. また, ステップ変化に対しては, 変化量が小さくなるほど, また, ノイズの大きさが大きくなるほどランプ変化に対する値に近くなっている.

次に, 式(3.16) で示した相関分散値 V_3 について検討する.

ノイズが含まれたランプ変化に対する相関分散値は, 式(3.34), (3.35)より

$$V_3 \text{ (ramp)} = 0.75 \pm f_5(N(k)) \quad (3.39)$$

となる. Fig.3.14 は Fig.3.12, Fig.3.13 で示した $V V_1$ (V_1), $V V_2$ (V_2) から算出した相関分散値 V_3 を示したものである. これからわかるように, ステップ変化に対する値とランプ変化に対する値がより明瞭に分離されている. 図からわかるように, ステップ変化に対して,

$$\frac{\text{ステップ変化量}}{\sigma_{\text{noise}}} \geq 4 \Rightarrow V_3 \text{ (step)} < 0.65 \quad (3.40)$$

であり, ランプ変化に対しては,

$$V_3 \text{ (ramp)} > 0.65 \quad (3.41)$$

$$V_3 \text{ (ramp) } 90\% > 0.7$$

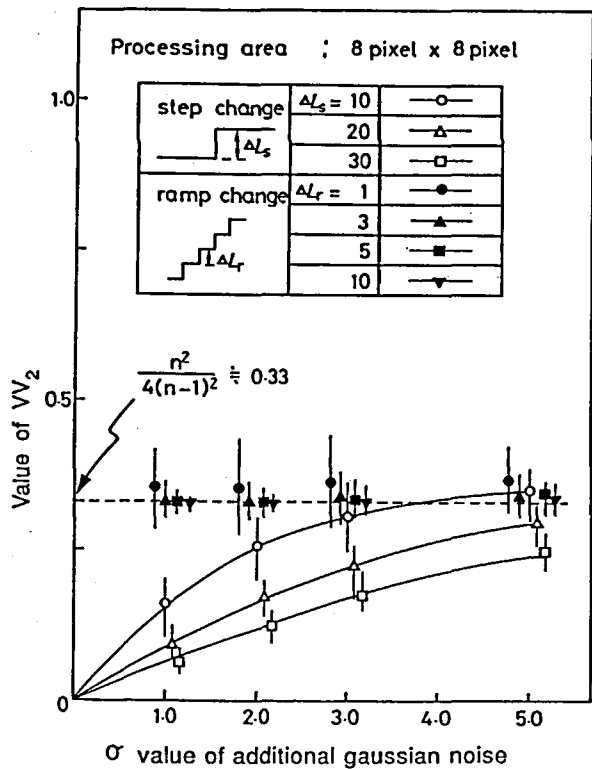


Fig.3.13 $V V_2$ value in the region including step change and ramp change with noise.

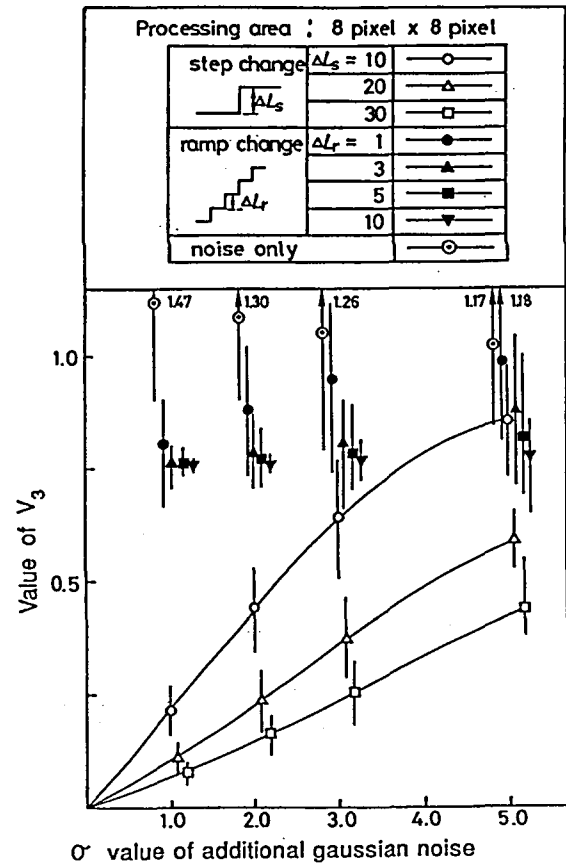


Fig.3.14 V_3 value in the region including step change and ramp change with noise.

で、縁辺検出の場合、しきい値として 0.65~0.7 の値を採用すればよく、他のオペレータの場合に問題となるしきい値の決定はこの分散オペレータを用いる場合においてはあまり問題とならないことを示している。

なお、TVカメラで、物体を撮像した時に画像に含まれるノイズ成分は、用いるカメラおよび撮像する対象で異なる。本研究で使用した1インチのビジコンとカルニコンをそれぞれ撮像管として持つTVカメラで室内の壁を撮像し、標本数 256*256, 8ビットのデジタル画像にした時のノイズレベルは、ビジコンで $\sigma=2.0$, カルニコンで $\sigma=1.3$ 程度であった。このノイズレベルから判断するとステップ変化量が8程度の縁辺もランプ変化を誤抽出せずに容易に検出できることを示唆している。

3.5 各種縁辺に対する輝度レベルの分散値

前節で示した結果は、縁辺での輝度レベル変化が理想的なステップ変化で、それに正規分布ノイズ成分が加わったものに対してコンピュータ上でシミュレーションした処理結果である。しかし、一般の画像では、縁辺がボケて急峻なステップ変化とならないことがよくある。また、縁辺を挟む両側の輝度レベルが一定でなく、ランプ状に変化する場合が多い。そこで、これらのことを考慮した各種の縁辺に対して検討を行う。

Fig. 3.15は、縁辺での立ち上がり方を図中に示すように4段階に変化させたときの相関分散値 V_3 の値を各々算出した結果である。これからわかるように、ステップ変化の立ち上がりが急峻でなくなるほど V_3 値は大きくなり、ランプ変化との境界値 ($V_3 = 0.65$) に近づく。しかし、処理領域の1/2以下の立ち上がり(ボケ)であれば、問題はない。また、ボケが特に問題になるのは、ステップ変化量の大きい場合であり、この場合には、 V_3 値自体が小さいので、問題にはならない。

Fig. 3.16は、縁辺の両側の輝度レベルを図中に示すように、ランプ状に変化させたものに対する相関分散値 V_3 値を算出したものである。図からわかるように、ランプの変化 ΔLr が正の場合は V_3 値

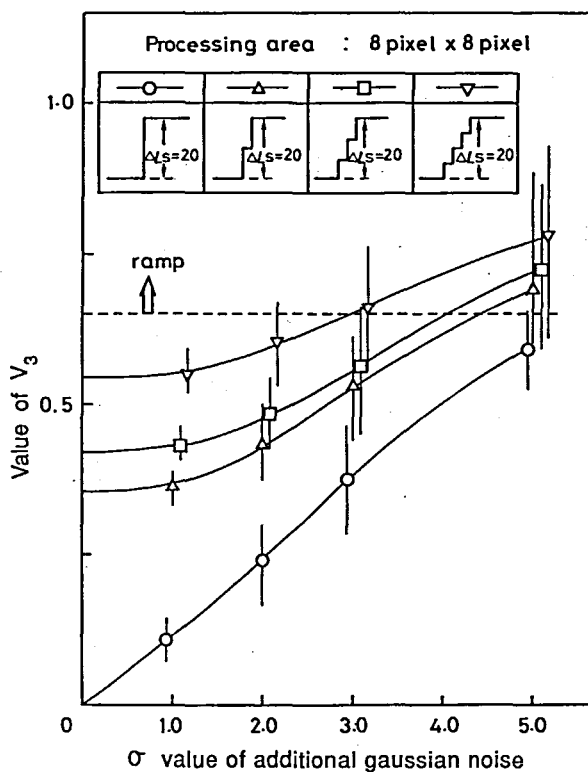


Fig.3.15 Influence of edge profile on V_3 value.

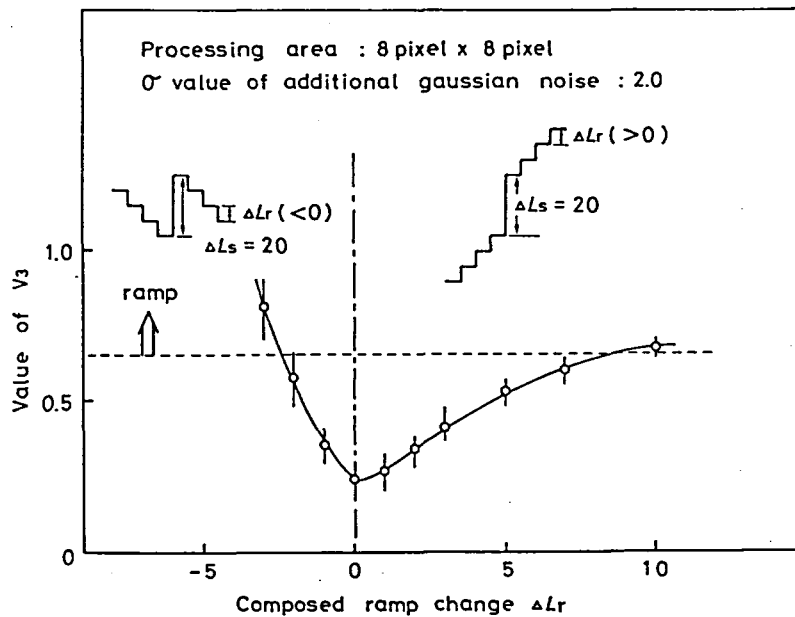


Fig.3.16 Influence of composed ramp change on V_3 value.

に大きな影響を与えないが、 ΔLr が負の変化をするものでは、 V_3 値に大きく影響し、縁辺検出を困難にすると考えられる。また、画像に付加されるノイズの σ 値が2.0の場合、正のランプ変化が複合された縁辺では、ランプ変化量 ΔLr がステップ変化量 ΔLs の1/3まではランプ変化と区別可能であり、負のランプ変化が複合された縁辺では ΔLr が ΔLs の1/10まではランプ変化と区別可能であると考えられる。

3.6 分散値による縁辺検出線幅

縁辺は隣接する2面間の境界線であるため、縁辺検出オペレータにより検出される縁辺検出線幅は1画素幅が理想である。最も代表的な差分型オペレータの場合には、処理領域（ウィンドウ）サイズに相当する縁辺検出線幅となる。本節では、本研究で提案した相関分散値 V_3 を縁辺検出オペレータとしたときの検出線幅について検討する。

Fig. 3.17(b)~(d)は、図(a)に示すステップ状変化に対する各分散値 V_1 、 V_2 、 V_3 の値の変化を示したものである。なお、ここに示した輝度レベル値は、Fig. 3.1に示した直方体の上に円柱を載せた物体をTVカメラで撮像した濃淡画像のある縁辺点近傍の輝度レベル変化であり、 V_1 、 V_2 、 V_3 はこの輝度レベル値から算出した分散値を示したものである。輝度レベルの分散値 V_1 は縁辺点で最大となり、2次分散値 V_2 は縁辺点で小さくその両側で大きくなっている。このため、この両者の商である相関分散値 V_3 は、縁辺点近傍でのみ値が小さくなる。

Fig. 3.18, Fig. 3.19は各々各種のステップ変化に対する縁辺検出線幅を示したものである。各々、算出された分散値を横軸に示すしきい値で2値化して得られた縁辺の検出線幅を示した

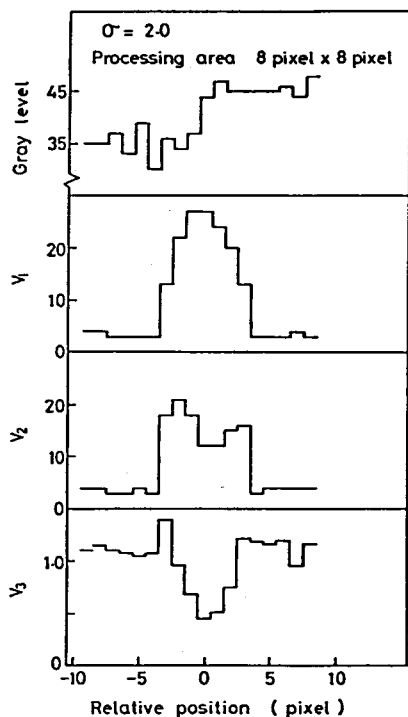


Fig.3.17 Profile of gray level and value of V_1 , V_2 , V_3 in neighbourhood of edge point.

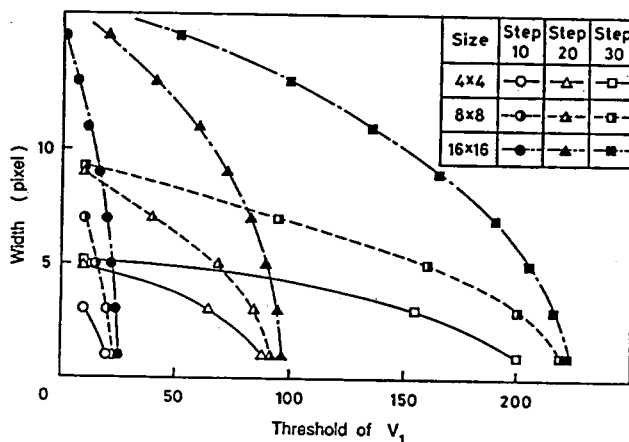


Fig.3.18 Edge width detected by V_1 operator.

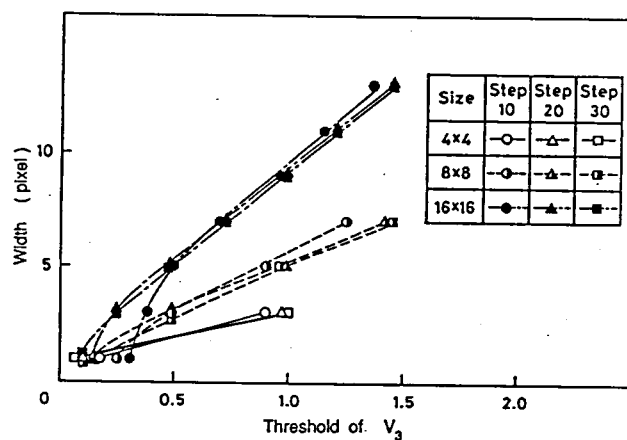


Fig.3.19 Edge width detected by V_3 operator.

ものである。Fig. 3. 18は分散値 V_1 によるもの、Fig. 3. 19は相関分散値 V_3 によるものである。輝度レベルの分散値 V_1 で縁辺を検出した場合は、縁辺検出線幅は処理領域の大きさ、しきい値の大きさ、ステップ変化量により変化している。しきい値 50 において、ステップ変化量30の縁辺に対する縁辺検出幅は、処理領域 4×4 で 5画素、 8×8 で 8画素、 16×16 で 14画素となっており、ほぼ処理領域に匹敵する検出線幅を有している。一方、相関分散値 V_3 の場合は、縁辺検出線幅はステップ変化量には依存しない。また、 V_3 により縁辺検出する場合は、前述したように、しきい値は0.65~0.7 固定で良いので、縁辺検出幅は処理領域の大きさのみ依存することになる。このしきい値において、縁辺検出線幅は処理領域サイズの1/2 以下と細くなっている。

3.7 各種縁辺検出オペレータとの検出性能比較・検討

輝度レベルの分散値 V_1 は、Fig. 3. 11からわかるように、画像中にランプ的な変化がないものに対する耐ノイズ性はオペレータ V_3 より優れている。また、 V_3 は V_1 を基に算出される。このことより、縁辺検出に際しては、この V_1 , V_3 両オペレータを組み合わせる。即

ち、

$$V_1 \geq V_{1th} \text{ .AND. } V_3 \leq V_{3th} \quad (3.42)$$

V_{1th} ; V_1 のしきい値 (10 程度)
 V_{3th} ; V_3 のしきい値 (0.65 程度)

を満たす点を縁辺要素点として抽出するのが、縁辺検出性能、処理時間の点で有効であると考えられる。

この分散オペレータ V_3 の縁辺検出性能を差分型オペレータおよびガウ斯拉シアン^{48) -52)} によるオペレータと比較するため、Fig. 3.20に示すような縁辺画像を作成した。これは240画素×240画素の画像メモリーを100分割(10×10)し、その各々の領域(24画素×24画素)内の中央に1本の縁辺を含むモデル画像である。各区画において、縁辺でのステップ変化量 ΔL_s を変化させ、さらに縁辺の両側の輝度レベル変化をランプ状に変化(ランプの変化量 ΔL_r) させたものである。また、参考に最下列に一定なランプ変化パターンを作成してある。

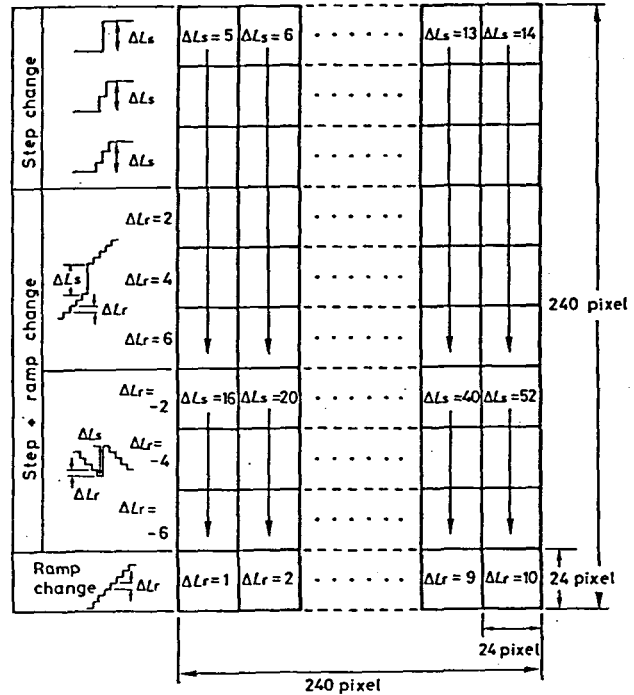


Fig.3.20 Model of transition of gray level for edge detection.

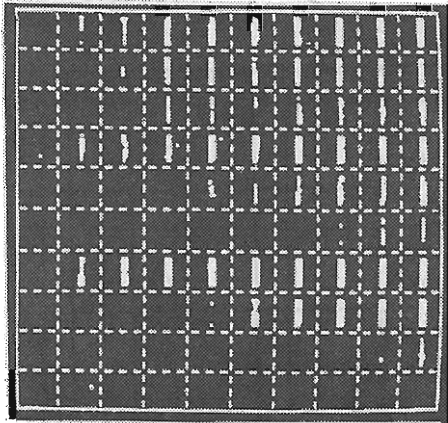
なお、ノイズとしては $\sigma=2.0$ の正規分布ノイズを付加してある。比較対象に差分型オペレータとガウ斯拉シアンを用いたのは、両者とも縁辺検出処理が単純であり、さらに、本研究で取り扱っているランプ状の輝度レベル変化に対する比較に適しているためである。

Fig. 3.21は、Fig. 3.20に示した縁辺検出比較画像モデルから各オペレータにより縁辺を検出した結果である。(a) は分散オペレータによる結果、(b) は5画素×5画素の処理領域による差分型オペレータによる結果(Sobel オペレータを拡張したもの)、(c) は処理領域9画素×9画素のガウ斯拉シアン画像からゼロクロス点を検出したものである。

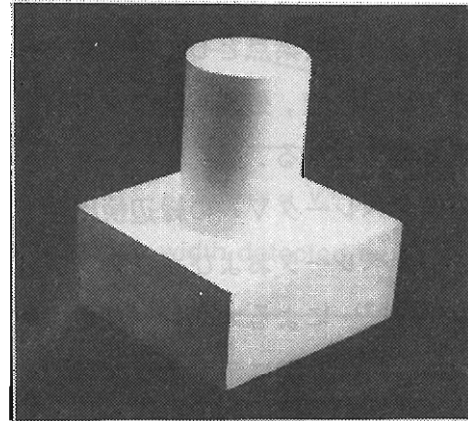
これらからわかるように、(b) 図に示した差分型オペレータによる縁辺検出では、上3段に示された縁辺の両側の輝度レベル変化が一定値(ステップ変化)の場合には、良好な縁辺検出がなされているが、4段目から下のランプ変化を含む縁辺に対しては、ランプ変化を誤抽出される。この誤抽出を少なくするため、縁辺検出しきい値を大きくすると、縁辺の検出性能が大きく低下する。また、(c) 図に示したガウ斯拉シアンのような2次微分に基づくオペレータの場合、ランプ状変化の誤抽出はほとんどなくなるが、基本的に微分演算であるので、処理

領域を 9 画素×9画素としているにもかかわらずノイズによる誤抽出が生じている。これに対して、(a)図に示した分散値 V_3 による縁辺検出は、ノイズ、ランプ変化ともに誤抽出せずに良好な結果となっている。

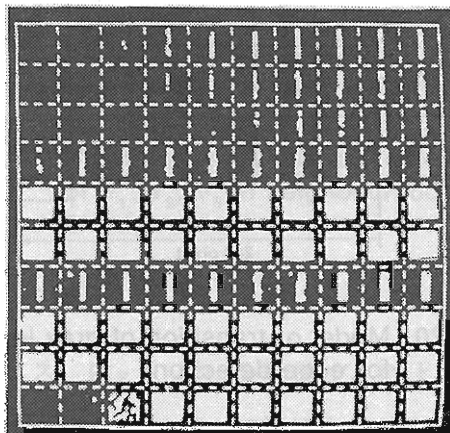
Fig.3.22(b) は、Fig.3.22(a) に示す濃淡画像（直方体の上に円柱が載ったもの）に対して、



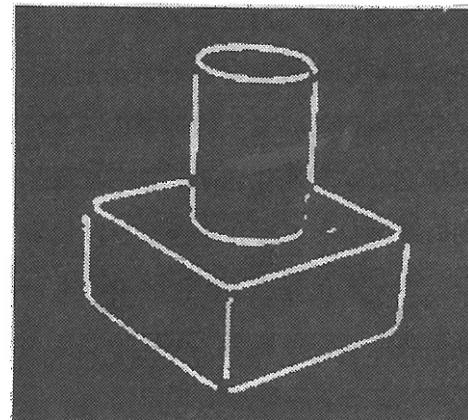
(a) V_3 operator (8pixel×8pixel)
 $V_3\text{th}=0.65$



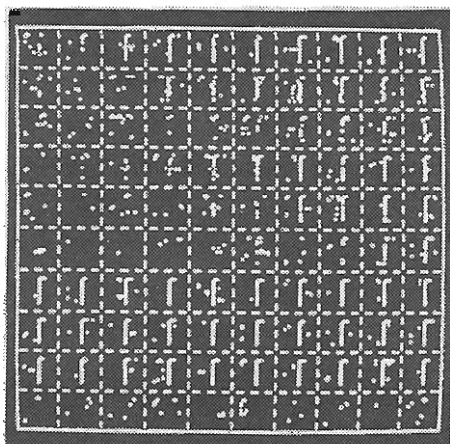
(a) gray image.



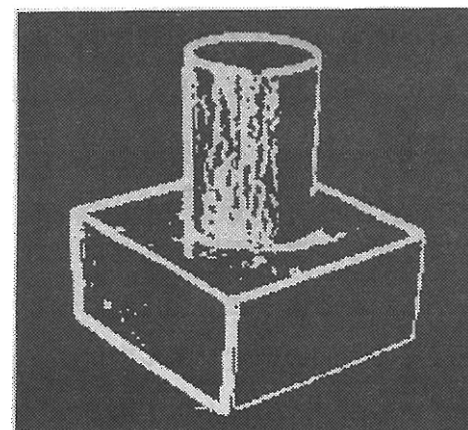
(b) differential operator
(5pixel×5pixel)



(b) edge image detected by
 $V_1(8\times 8)$ and $V_3(8\times 8)$



(c) Gause Laplacian (9pixel×9pixel)
 $\sigma=1.0$



(c) edge image detected by
Sobel operator.

Fig.3.21 Processing result for the image shown by Fig.3.20.

Fig.3.22 Processing result.

式(3.42) に示された分散値オペレータにより縁辺を検出したものである。なお、処理領域は 8画素×8画素で行っている。また、Fig.3.22(c)は Sobel オペレータを用いて検出した結果である。これからわかるように、差分形オペレータで縁辺を検出すると曲面(円柱)上等の輝度レベル変化の大きい箇所を縁辺として抽出している。これに対し、分散オペレータを用いて抽出を行ったものでは、多少の縁辺線の途切れがあるが不要な縁辺要素をほとんど抽出していない。なお、分散オペレータによる検出での線の途切れは、縁辺での輝度レベル変化のなかった箇所と3本以上の縁辺が交わる箇所である。

このように、輝度レベルの分散値を基にした分散オペレータを用いると、拡散的な照明下において、曲面上や影等でのランプ状の輝度レベル変化を抽出することなく、 $4\sigma_{noise}$ より大きなステップ変化を示す縁辺を容易に検出することができる。なお、対象物としては、それを構成する面が滑らかな反射特性を示すものに対して有効であり、鏡面反射的な面では局部反射部を検出してしまう。

以上に示したように、この輝度レベルの分散値を基にした縁辺検出は、耐ノイズ性、ランプ変化との分離性、しきい値設定の容易さ、検出線幅、さらに処理の単純さの点から非常に有効であると考えられる。

3.8 結論

本章では、縁辺検出に適した濃淡画像形成のための照明方法の検討を行うとともに、標本化画像(N 画素× N 画素)内の小領域(n 画素× n 画素, $n \ll N$)における輝度レベルの分散値に着目した新たな縁辺検出オペレータについて検討したものである。以下、本研究で明らかになった点を要約する。

- 1) TVカメラの光軸に対して $\pm\pi/4$ 方向に拡散照明(複数の蛍光灯の前面にアクリル板を置いたもの)を配置し、両者の照明の強度が 2:1 になるようにした場合、対象物の配置に対して最も広い範囲で縁辺での輝度レベル変化が得られる。対象面の傾きに対するTVカメラへの入射光強度測定実験では、方向性の強い照明を用いた場合、面の傾きが照明方向に対して $\pm\pi/8$ 以内の面でTVカメラへの入射光強度が高くなるが、それ以外の傾きの面では入射光強度が小さく変化しない。これに対して、本研究で選定した拡散照明を用いた場合、対象面の傾き α が $-5\pi/12 < \alpha < 5\pi/12$ の範囲でTVカメラへの入射光強度が連続的に変化する。
- 2) 拡散的な照明を用いることにより、曲面上や影の部分での輝度レベルの変化を縁辺における輝度レベル変化より小さくすることができる。輝度レベル変化部の平均変化量を全変化量で除した値が、縁辺における輝度レベル変化で0.25以上であるのに対して、影や曲面上では0.2以下となっている。
- 3) 縁辺を含む小領域($n \times n$)では縁辺をはさむ2領域(2面)で明るさ(輝度レベル)が

異なるため、輝度レベルの度数分布は双峰分布となる。このため、この領域内の輝度レベルの分散値は大きくなる。一方、縁辺を含まない小領域 ($n \times n$) における輝度レベルの度数分布は単峰分布となり、この領域内の輝度レベルの分散値は小さくなる。

- 4) 輝度レベルの分散値は、処理領域内の平均値に対する変化量の平均であるため、ノイズによるランダムな輝度レベル変化を平滑化することができ、対ノイズ性が良好である。
- 5) 輝度レベルの分散値 V_1 を処理領域内の $\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2$ で除した基準化分散値 V/V_1 は、縁辺を含む領域で 0.5 以上、縁辺を含まない領域で 0.5 以下となる。
- 6) $n \times n$ の小領域において、輝度レベルと処理領域内の平均輝度レベルの差の 2 乗値の分散値 V_2 (2 次分散) を処理領域内の $\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2$ で除した基準化 2 次分散値 V/V_2 は、縁辺を含む領域で小さくなり (0.3 以下)、縁辺を含まない領域で大きくなる (0.3 以上)。
- 7) 輝度レベルの 2 次分散値 V_2 を輝度レベルの分散値 V_1 で除して得られる相関分散値 V_3 は、ステップ変化に対して、

$$\frac{\text{ステップ変化量}}{\sigma_{\text{noise}}} \geq 4 \Rightarrow V_3(\text{step}) < 0.65$$

であり、ランプ変化に対しては、

$$V_3(\text{ramp}) > 0.65, \quad V_3(\text{ramp})90\% > 0.7$$

で、ステップ変化に対する値とランプ変化に対する値が 0.65~0.7 で分離できる。

- 8) 分散オペレータで検出される縁辺の線幅は、処理領域サイズの半分以下 (8 画素 \times 8 画素の処理領域で、線幅 3 画素程度) である。
- 9) 分散オペレータによる縁辺検出法は、微分、二次微分に基づく縁辺検出法に比べて、耐ノイズ性が良好であり、かつ、局部反射や曲面上での濃淡変化を抽出せずにステップ状に変化する縁辺のみを検出可能である。

第4章 スリットレーザ光走査による電子格子モアレ画像 および凹凸判定画像の形成

4.1 はじめに

画像から3次元形状情報を得ることのできるパターン投光画像としては、平行格子投光画像、市松格子投光画像、リングパターン投光画像など各種の画像がある^{32) - 41)}。本研究では、パターン画像が等高線画像として得られ、奥行き方向の変化に対して敏感で、良好な計測精度の得られるモアレ縞画像^{72) - 75)}をパターン投光画像として検討している。

モアレ縞画像による計測は、Meadowsおよび高崎らにより格子照射型モアレ法^{76) - 80)}として提唱されたのに始まり、材料の変形計測^{81) - 83)}、振動解析^{84) - 90)}、人体表面の計測^{77), 91) - 94)}などに主として利用されている。近年、このモアレ縞画像からコンピュータによる画像処理によって3次元形状情報を抽出する処理アルゴリズムの開発^{95) - 102)}並びにコンピュータヘリアルタイムにモアレ縞画像を取り込むためのスキヤニングモアレ法^{103), 105)}、電子格子モアレ法^{104), 106), 107)}が開発されている。

しかし、これらは、暗室下での形成が前提であるが、一般の作業環境下では室内照明等があり、対象に対して与えるパターンの光の強弱がこの環境光により影響される。また、3次元対象物にパターンを投光した場合、対象面への光の入射角および撮像装置の受光角により光の強弱レベルが変化し、均一なパターン画像を形成するのが困難となる。特に、モアレ縞画像形成において用いられる平行格子は、ピッチが1mm以下と非常に細かく、環境光の存在下での均一パターン形成が非常に困難となる。しかし、パターン投光画像を用いて視覚システムを構築する場合、このような状況下でも均一なパターン画像が形成されなければならない。

本研究では、環境光の存在下でも高いコントラストのモアレ縞画像を形成させることを目的としている。

環境光の存在下で高いコントラストのパターン画像を形成するには、

- 1) 対象面の傾きに伴うパターン像の明るさの変化を均一化すること。
- 2) 環境光と分離可能な光の周波数を有する光を用いること。
- 3) 投光する光のパワー密度を高くすること。
- 4) 投光、受光の格子の透過率をシャープにすること。

などが挙げられる。

本研究では、上記の問題に対して、まず、対象面の傾きに伴う平行格子投光画像の明るさの変化に対し、TVカメラで撮像して得られる平行格子投光画像の映像信号をアナログ回路により波形整形し、格子の明暗による振幅の均一化をはかることにより、均一明暗を有する平行格子投光画像形成の可能性を検討している。

また、課題2)～4)に対しては、単一の光周波数を有するレーザを投光用光源として用い、レーザ光をスリット状にして物体上に一定間隔で投光することにより、平行格子投光画像を形成させることを検討している。この場合、モアレ縞画像は投光された平行格子の間隔が対象面の傾きに依りて変化することを利用して作り出されるため、特に、投光される平行格子間隔および平行格子投光画像の縞間隔が重要となる。このため、スリットレーザ光の走査投光による平行格子投光画像形成において、検討しなければならないのは、レーザ投光位置精度、レーザ走査条件、走査投光されたスリット列を1枚の平行格子画像として得る方法である。このスリット列の画像化においては、TVカメラの電荷蓄積特性に着目し、画像化時の格子像間隔の保持をはかり、高いコントラストの格子パターン画像を形成する方法について検討している。

さらに、コンピュータによる画像処理によりモアレ縞画像から物体の3次元形状情報を得る場合、実用上検討しなければならないことは、前述の環境光の存在下での均一格子パターン形成と、簡便な凹凸判定法の開発である。この凹凸判定に関しては、符号化格子法¹⁰⁷⁾や格子の位相を変化させて形成させた2種類のモアレ縞画像を比較することにより、凹凸の判定を行う方法^{103), 104)}が報告されている。しかし、これらの方法は処理が煩雑であり処理時間がかかると言う欠点を有している。本研究では、モアレ縞画像形成の元になる平行格子投光画像のピッチが対象面の傾きと線形関係にあることに着眼し、モアレ縞画像形成と同時に対象面の傾きの正負による2値画像(凹凸判定画像)形成手法を提案・検討している。

4.2 投影型モアレ縞画像の形成原理とその形成範囲

4.2.1 形成原理^{72) -75)}

2枚の直線等間隔格子を Fig.4.1のように格子が交差するように重ねると、図にみられるように2枚の格子の明暗以外の新たな明暗が生じる。これをモアレ縞と呼んでいる。これは、2枚の格子の光の透過率分布に差があるためで、重ねられた2枚の格子の各々の透過率の高い部分が重なりあっている所は明るくなり、逆に透過率の低い部分が重なったところは暗くなるためである。2枚の格子の透過率は、各々の格子の明暗に対応した一定の周期を持つ正弦波と考えられ、この波長をそれぞれ λ_1 , λ_2 , 周波数を f_1 , f_2 とすると、各々の格子の透過率 I_1 , I_2 は、

$$\begin{aligned} I_1 &= 1 + \cos(2\pi x / \lambda_1) \\ I_2 &= 1 + \cos(2\pi x / \lambda_2) \end{aligned} \quad (4.1)$$

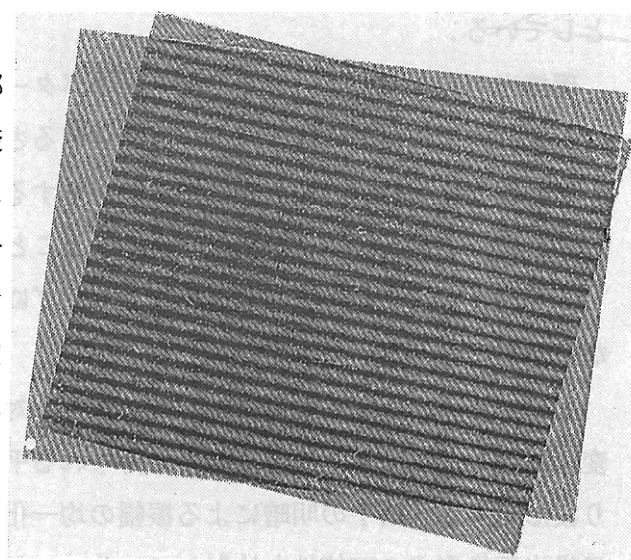


Fig.4.1 Principle of moiré formation.

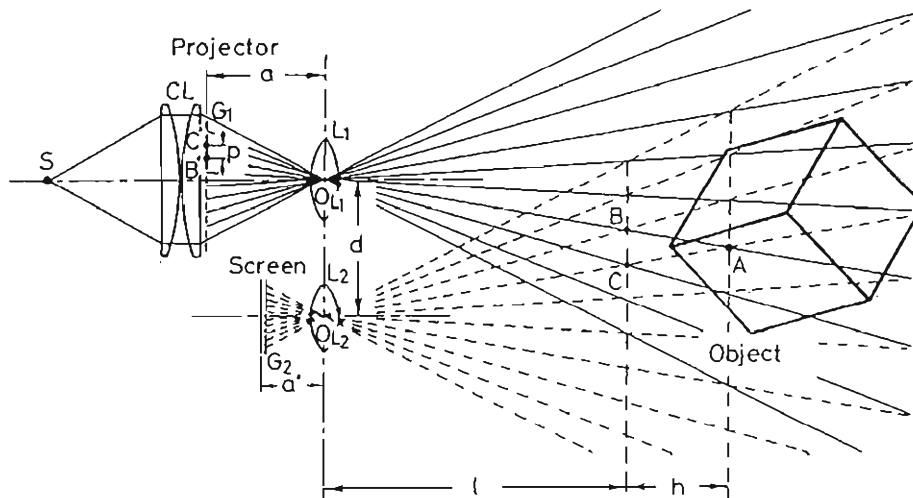


Fig.4.2 Schematic diagram of projective type moire method.

となる。モアレ縞の透過率はこの両者の透過率の積で表される。つまり、

$$\begin{aligned}
 I_m &= I_1 \times I_2 \\
 &= \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{\lambda_1}\right) \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{\lambda_2}\right) \\
 &= 1 + \cos \frac{2\pi x}{\lambda_1} + \cos \frac{2\pi x}{\lambda_2} \\
 &\quad + \frac{1}{2} \cos 2\pi x \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}\right) + \frac{1}{2} \cos 2\pi x \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \\
 &= 1 + \cos 2\pi f_1 x + \cos 2\pi f_2 x \\
 &\quad + \frac{1}{2} \{ \cos 2\pi (f_1 + f_2) x + \cos 2\pi (f_1 - f_2) x \} \tag{4.2}
 \end{aligned}$$

となる。モアレ縞の周波数成分は、それぞれの周波数の差である $|f_1 - f_2|$ (最後の項) となって現れる。

Fig. 4.2 は、3次元対象物体に対するモアレ縞画像形成のための格子投影型モアレ法の装置配置図を示したものである。光源Sによって一定ピッチの格子 G1 を物体上に投影し、その格子投影像を別の格子 G2 (干渉格子)を通して撮像すると、Fig. 4.3 に示すように、モアレ縞形成装置からみた時、等高線として現れる。この各縞の現れるピッチ h は、 $\triangle BCO_{L1} \sim \triangle B'C'O_{L1}$ 、 $\triangle ABC \sim \triangle AO_{L1}O_{L2}$ より、

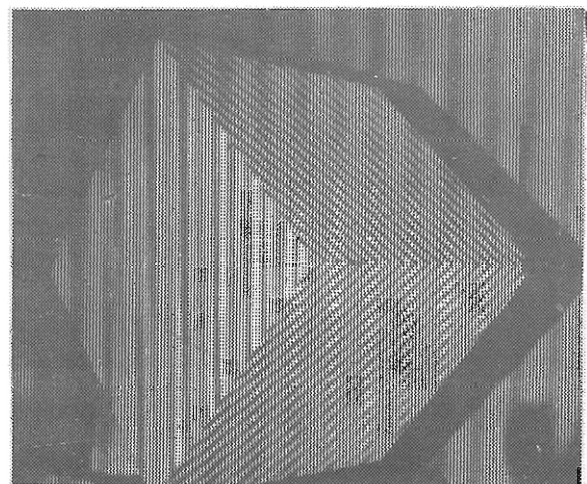


Fig.4.3 Moire image formed optically.

$$h = \frac{p \cdot \ell^2}{a \cdot d - p \cdot \ell} \quad (4.3)$$

で表される。すなわち，格子のピッチ (p)，投影レンズと投影格子間の距離 (a)，投影軸—撮像軸間距離 (d) を変化させることにより，縞の現れるピッチ (h) を変えることができ，奥行きの変化に対して敏感で，3次元形状計測には有効な一手段である。(a) は投影レンズの焦点距離 (f) とレンズ—物体間距離 (ℓ) によって決まる。

4.2.2 実体格子投影における格子像形成範囲

パターン投光画像から形状情報を抽出する場合，まず，TVカメラでパターン投光された物体に対する像が得られなければならない。本項では，モアレ縞画像形成に一般に用いられている実体格子投光において，TVカメラで撮像したときに格子像の得られる範囲（格子像形成範囲）について検討する。

対象物体に格子を投光し，その像をTVカメラで撮像して得られた平行格子投光像を示したものがFig. 4.4(a)である。また，図中の走査線上の映像信号を示したものがFig. 4.4(b)である。これからわかるように，平行格子投光像の映像信号は格子の明暗に相当する正弦波信号と各面の明るさに相当する直流成分が重畳した信号となる。これを模式的に示したものが Fig. 4.5である。格子投光のための光源以外の照明がない場合，(a)図に示すように，投光された格子の明暗に相当する正弦波状の信号のみが得られる。各面における振幅はその面への光の入射角とTVカメラの受光角によって変化する。一方，室内照明等の環境光が存在する状況下では，環境光により物体の各面がある明るさを有し (Fig. 4.5(a))，これに格子像の明暗 (Fig. 4.5(b)) が重畳されて，Fig. 4.5(c)に示す映像信号となる。格子パターン画像が形成されるのは，この格子の明暗に相当する振幅 ΔV_1 ， ΔV_2 が映像信号上で識別できる範囲である。Fig. 4.6は，図中に示した装置配置で格子ピッチ p が 0.42 mmの格子を白色対象面に投光した時の面の傾き

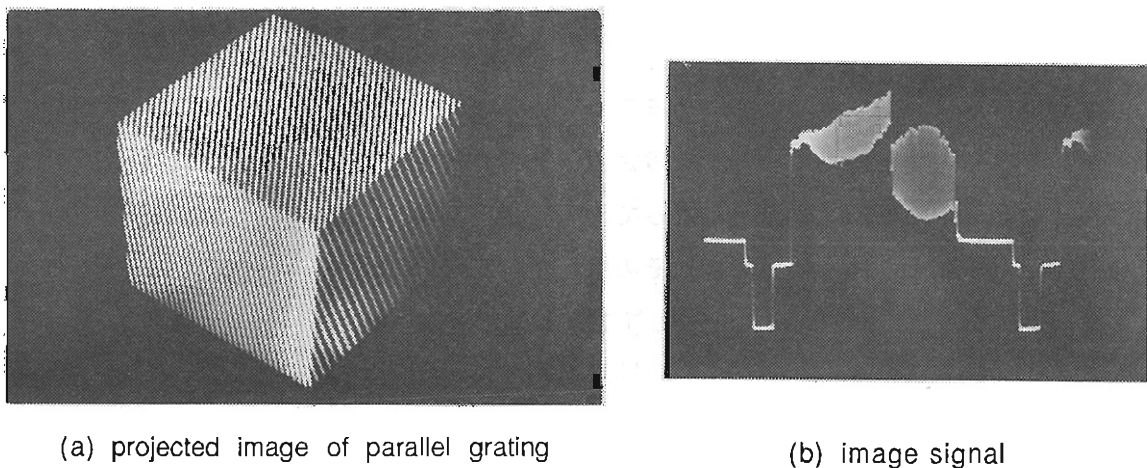
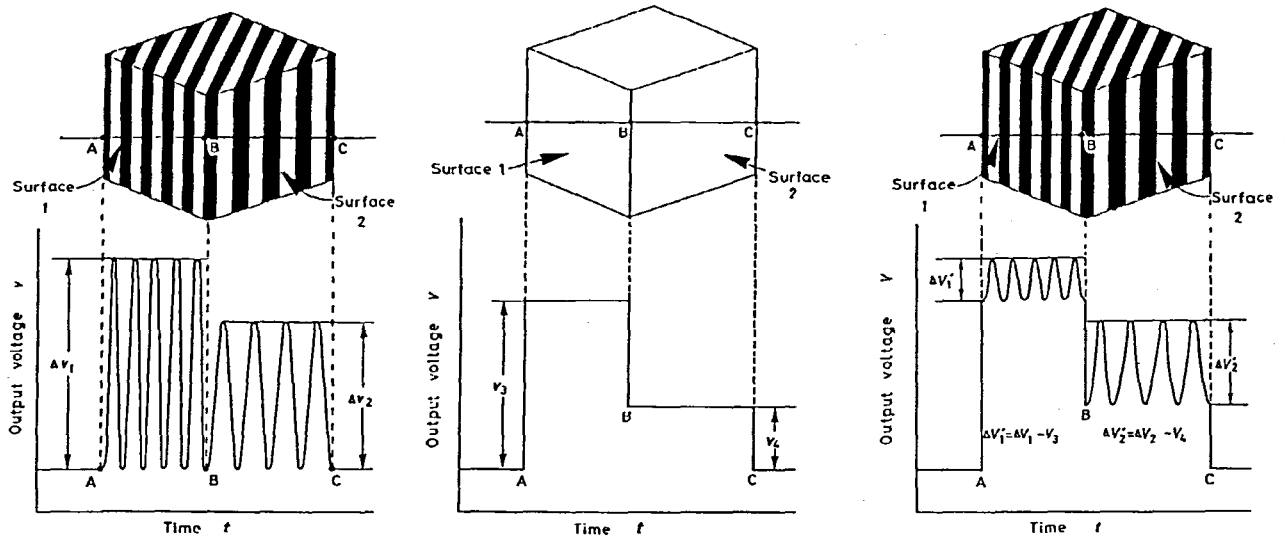


Fig.4.4 Projected image of parallel grating and its image signal.



(a) image signal of projected image of parallel grating formed only by projection lighting

(b) brightness on each surface under environmental lighting

(c) image signal of projected image of parallel grating formed under environmental lighting

Fig.4.5 Image signal of projected image of parallel grating.

α と格子の明暗による映像信号上の振幅 ΔV の関係を示したものである。図に見るように、環境光のない場合(○), 対象面の傾き α が $-\pi/3$ の時に振幅が小さくなっているが、 $-\pi/4 \leq \alpha \leq \pi/3$ の間で振幅が $0.4V$ 以上得られており、良好にパターン投光されているのがわかる。これに対し、室内照明がある場合(△, □)全計測範囲にわたって格子の明暗による振幅が $0.1 \sim 0.2V$ である。映像信号上のホワイトノイズが $0.05V$ 程度存在しているので、識別が非常に難しくなっているのがわかる。

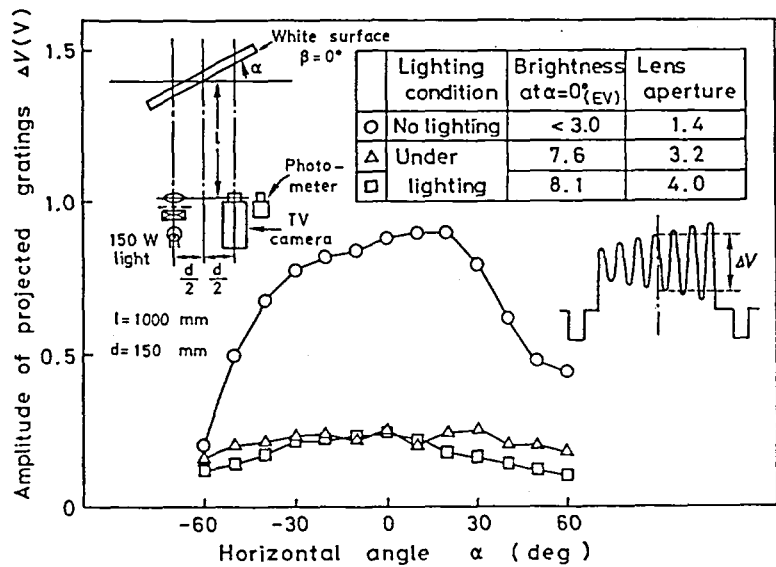
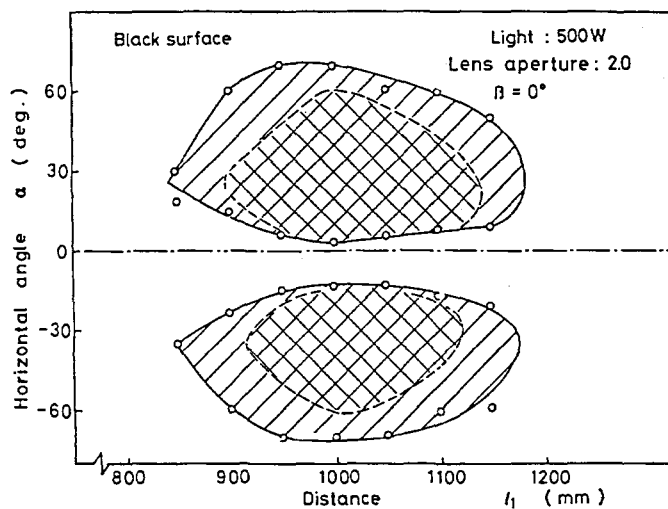
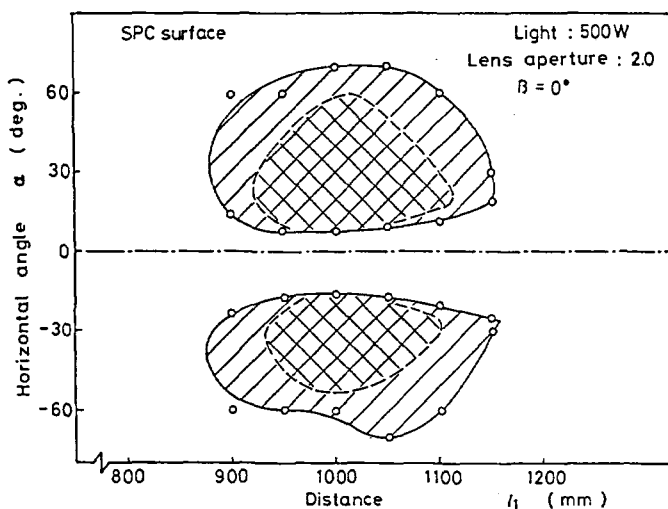


Fig.4.6 Influence of environmental lighting on amplitude of image signal correspond to light and dark of grating.

Fig.4.7 は、アクリル板上に黒色ペイントを塗った面と薄鋼板（SPCC材）面に対する格子パターン形成範囲を調べた結果である。なお、この実験は環境光のない状況で行った。黒色面は光の反射が小さく、鋼板面は乱反射が少ないため、格子投光を行う光源として 150 W のハロゲンランプでは格子パターンがほとんど形成されないため、500 W の光源を用いて実験を行った。格子パターン形成範囲としては、格子の明暗による映像振幅が 0.1V 以上得られた場合にパターン形成されたとして図示した。なお、 $\alpha=0$ 近傍でパターンが形成されていないのは、全反射角に近く映像信号が飽和しているためである。実験に用いた板は一辺 200mm の正方形板で TV カメラの視野の大きさは約 500mm 角である。図中の実線で囲まれた範囲は板の半分以上の部分で格子パターンが形成された領域を示し、破線で囲まれた領域は 200 mm 角の板全面で格子パターンが形成された領域を示したものである。これからわかるように、金属光沢のあるものや光の反射の小さな面に対しては、環境光のない場合（暗室）でもパターン画像形成は非常に困難である。



(a) for black painted surface



(b) for steel sheet (SPCC)

Fig.4.7 Distinguishable region of projected image of parallel grating formed by projection of solid grating.

4.2.3 均一格子パターン形成の問題点とその解決方法

環境光の存在下で、かつ、各種の光の反射特性を有する計測対象面に対しても良好に均一なパターン画像を形成するには、

- 1) パターンの明暗差の映像信号レベルでの均一化をはかる。
- 2) パターンの明暗のコントラストをよくする。
- 3) パターン投光用の光と環境光を分離する。

などの問題を解決する必要がある。

まず、投光面の傾きに起因する撮像装置への入射光量の変化にともなう格子像の明暗差の不均一を改善する必要がある。この明暗差の不均一には、Fig. 3.5 に示したように、平行格子投光画像における各投光面の明るさに起因する直流分と格子像自体の明暗差の不均一化がある。これらの不均一を改善するには、平行格子格子画像をTVカメラで撮像して得られる映像信号上で電気回路的に波形成形することで、対処可能であると考えられる。

つぎに、投光パターンの明暗のコントラストであるが、Fig. 3.2 に示したような実体格子を用いて対象物体上へ投光する場合、格子のピッチが小さくなればなるほど光の干渉、回析により格子像のコントラストを得るのが困難になる。3次元計測の1手法として用いられているレンジファインダーなどによく使われている（スリット）レーザ光は絞り込むことにより光のパワー密度を高くすることができる。このため、格子の明暗のコントラストを高くすることができる。さらに、レーザ光は単一の光の周波数を有しており、適当な光学フィルターを用いることにより、環境光と分離してレーザスリット像を得ることができる。このため、このレーザ光の利用は有効であると考えられる。

上述のように、環境光の存在下でもコントラストの高い格子像を形成し、容易にモアレ縞画像を形成するには、計測対象物体に対して、スリットレーザ光を等間隔に投光し、それにより得られる平行格子投光画像の映像信号の明暗に相当する振幅の均一化をはかればよい。

ここで、電子回路による明暗信号の均一化、スリットレーザ光走査による格子像形成において、特に検討しなければならない点として、

【明暗信号の均一化】

- 1) 各面の明るさに起因する直流成分の除去。
- 2) モアレ縞の周波数成分のみの抽出（格子の明暗による不要縞の除去）。

【スリットレーザ光走査による格子像形成】

- 1) レーザの走査回転角の制御。
- 2) 投光スリット列の画像化。

がある。

4.3 アナログ波形成形による電子格子モアレ縞画像形成

モアレ縞は、(4.2) 式で示したように、投光格子と干渉（受光）格子の透過光強度の積により生じる各々の明暗の周波数 f_1 、 f_2 の差の周波数 $|f_1 - f_2|$ の明暗となり現れる。本研究では、モアレ縞の明暗を投光格子と干渉格子の透過強度の和から作り出している。つまり、各々の格子の透過光強度を

$$\begin{aligned} I_1 &= \sin 2\pi f_1 x \\ I_2 &= \sin 2\pi f_2 x \end{aligned} \tag{4.4}$$

とおくと、これらの和は、

$$\begin{aligned}
 I_m &= I_1 + I_2 \\
 &= \sin 2\pi f_1 x + \sin 2\pi f_2 x \\
 &= 2\sin 2\pi \left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right) x \cdot \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) x
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

となる。Fig. 4.8 は、これを図示したものである。これからわかるように、各々の透過光強度の和は、周波数が $(f_1 + f_2)/2$ と $(f_1 - f_2)/2$ の正弦波の積となる。この波形の包絡線の周期は図からわかるように、 $1/|f_1 - f_2|$ で、周波数は $|f_1 - f_2|$ となり、(4.2) 式で示したモアレ縞の周波数に一致する。

モアレ縞画像形成において、干渉用実体格子を利用しない方法として、スキャニングモアレ法、電子格子モアレ法など^{103) - 107)} が報告されている。スキャニングモアレ法は、TVカメラにより撮像された平行格子投光画像の映像出力波形を一定時間間隔でサンプリングすることによりモアレ縞画像を形成する方法である。また、電子格子モアレ法は、干渉用格子に相当する電子格子を形成させて加算することによりモアレ縞画像を形成する方法である。なお、これらの方法は一般的にはデジタル信号処理に基づいている。

本研究では、この電子格子モアレ法の形成手法を基に、多面体対象物体に対する平行格子投光画像の映像出力 (Fig. 4.9 (b)-1) における格子振幅の不均一および対象面の傾きの

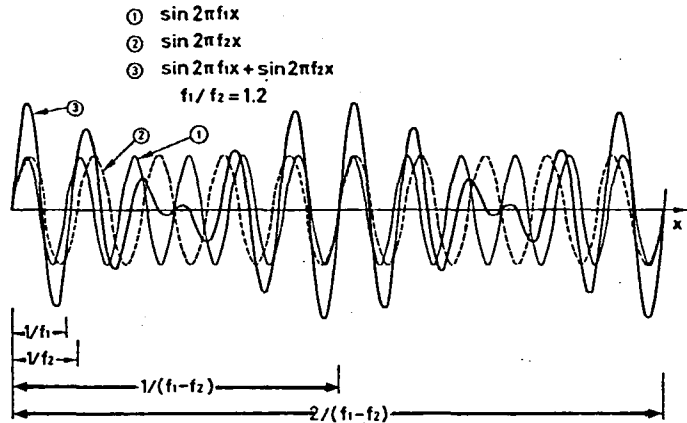
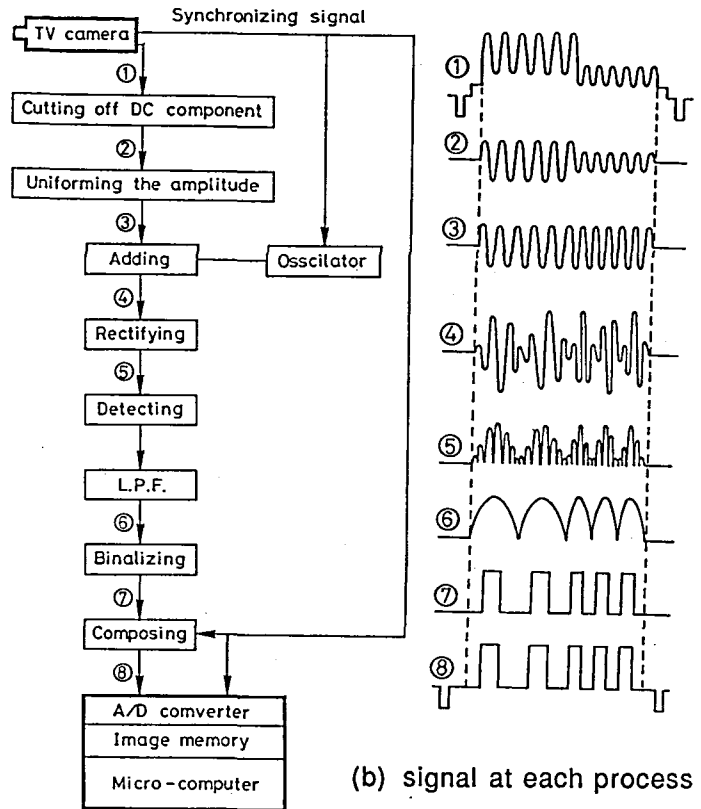


Fig.4.8 Moire signal formed by addition of sine waves.



(a) block diagram of circuit

(b) signal at each process

Fig.4.9 Signal arrangement in electrical moire circuit.

違いによる直流分の不連続変化にも対処できるモアレ縞形成のためのアナログ波形成形回路を試作した (Fig. 4.9) .

試作回路における各波形成形過程は以下の通りである .

- | | | |
|------|---------|------------------------|
| 過程 1 | 波形①→波形② | 対象面の反射特性に起因する直流分の除去 |
| 過程 2 | 波形②→波形③ | 格子像の明暗による振幅の均一化 |
| 過程 3 | 波形③→波形④ | 干渉用格子に相当する一定周波数の正弦波を加算 |
| 過程 4 | 波形④→波形⑤ | 整流 |
| 過程 5 | 波形⑤→波形⑥ | モアレ成分抽出 (検波, フィルタリング) |
| 過程 6 | 波形⑥→波形⑦ | 2 値化 |
| 過程 7 | 波形⑦→波形⑧ | 映像同期信号の複合化 |

波形成形過程 1 の直流分の除去では, バンドエミュレーションフィルター (B E F) により格子の明暗による周波数成分を除去した直流成分信号を元の格子信号から減算することにより行っている. なお, B E F の遮断周波数は, 格子の明暗による周波数の最大周波数 f_{c1} と最小周波数 f_{c2} を遮断周波数としている.

また, モアレ縞の信号成分は上述したように, 格子信号の加算信号における包絡線である. このため, 波形④の加算信号から包絡線を抽出するのに, まず, 整流を行い, 検波, フィルタリングを行うことにより, 格子の明暗による周波数成分を含まないモアレ縞信号を作り出している. これにより, 光学的手法で形成させたモアレ縞画像 (Fig. 4.3) 中に含まれる格子の明暗による不要縞が除去された鮮明な 2 値モアレ縞画像の形成を可能にしている.

Fig. 4.10 は, 直方体の上に円柱を載せた対象物体に対して形成させたモアレ縞画像である. この物体に実体格子を投光した像を TV カメラで撮像した時, 平行格子投光像の映像信号上の明暗の振幅は $0.1 \sim 0.5 \text{ V}$ と変化していた. このように, 振幅の不均一な平行格子投光画像の映像信号をアナログ波形成形することにより, 容易に格子の明暗による映像信号の振幅均一化が計られ, 対象面の傾きの変化に伴う TV カメラへの入射光量の不均一にも対処可能とした.

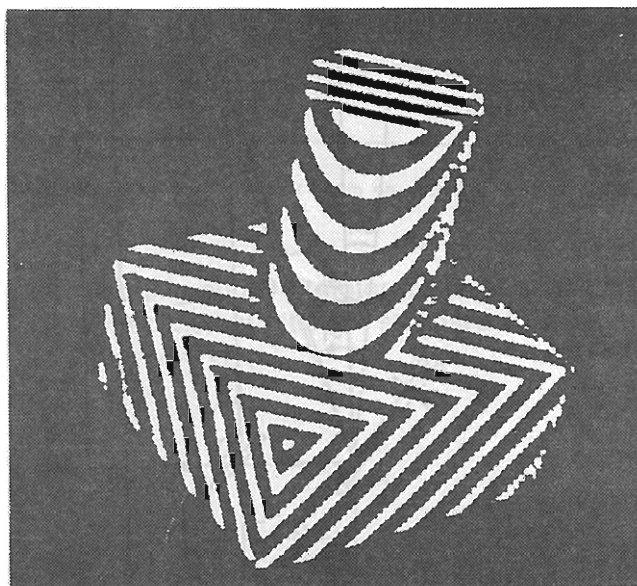


Fig.4.10 Moire image formed by electrical moire method.

4.4 スリットレーザ光走査によるモアレ縞画像形成

4.4.1 スリットレーザ光走査回転角

実体格子投光の代用としてスリットレーザ光走査を用いる場合、スリットレーザの投光間隔は光学系の光軸に垂直な面上で一定間隔になるように投光しなければならない。Fig.4.11はTVカメラのレンズ中心から光軸方向に l 離れた基準面上に投光間隔 p' でスリットレーザ光を走査投光する場合の光学系走査の模式図である。いま、スリットレーザ光が基準面上で第 i 番目の投光位置 $P_i(l, y, 0)$ に投光されているとする。これを第 $i+1$ 番目の投光位置 $P_{i+1}(l, y+p', 0)$ に投光するのに必要な回転軸Mの回転角 $\Delta\theta_M$ は、光軸を基準としたときのレーザ投光角を θ_i, θ_{i+1} とすると、

$$\begin{aligned} \Delta\theta_M &= \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{2} \\ &= \frac{\tan^{-1}(y+p')/l - \tan^{-1}y/l}{2} \end{aligned} \quad (4.6)$$

で求まる。

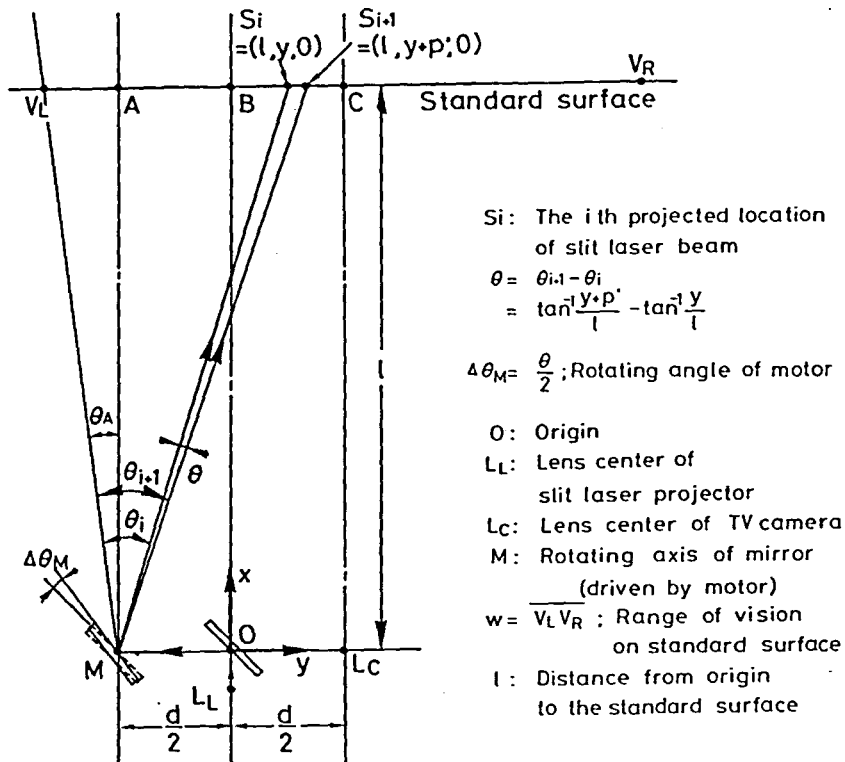


Fig.4.11 Scanning of slit laser beam by mirror rotation.

Fig. 4.12 は、基準面までの距離 l を 1000 mm とした時のレーザの投光位置に対する反射鏡の回転角 $\Delta \theta_M$ を示したものである。投光間隔 p' は 3 mm, 4 mm, 5 mm の場合である。ここで、TVカメラの視野サイズを w とした時、図からもわかるように、視野の右端で回転角は最小値をとる。この回転鏡Mの最小回転角 $\Delta \theta_{Mmin}$ は、

$$\Delta \theta_{Mmin} = \frac{1}{2} \left(\tan^{-1} \frac{\frac{d+w}{2} + p'}{l} - \tan^{-1} \frac{\frac{d+w}{2}}{l} \right) \quad (4.7)$$

となる。ここで、視野サイズ w を 380 mm, TVカメラ-回転鏡間距離 d を 150 mm としたとき、回転最小角は、

$$\begin{aligned} p' = 3 \text{ mm の時} & \quad \Delta \theta_{Mmin} = 0.0802^\circ \\ p' = 4 \text{ mm の時} & \quad \Delta \theta_{Mmin} = 0.107^\circ \\ p' = 5 \text{ mm の時} & \quad \Delta \theta_{Mmin} = 0.134^\circ \end{aligned} \quad (4.8)$$

となる。

スリットレーザ光走査において、各投光位置で (4.6) 式で求まる回転角を精度よく制御する必要がある。しかし、実際には、回転誤差を有するため、この回転角誤差がモアレ縞に与える影響を計算機シミュレーションにより調べた。

Fig. 4.13 は投光間隔 p' の設定に対して $\Delta p'$ の投光位置誤差が存在するとき、この誤差による投光間隔の誤差が最も大きく現れる場合を想定したときの模式図である。図(a)は投光状態を、図(b)はその明暗レベルを示したものである。このときの投光間隔の最大値 p'_{max} 、最小値 p'_{min} は、

$$\begin{aligned} p'_{max} &= p' + 2 \Delta p' \\ p'_{min} &= p' - 2 \Delta p' \end{aligned} \quad (4.9)$$

となる。このとき、この格子パターン投光画像から形成されるモアレ縞の中心位置の変化量を Fig. 4.14から求めた。つまり、投光位置誤差のない場合(a)と最大投光位置誤差を有する場合(b)に対して、格子パターン画像の明暗とモアレ縞形成のための干渉格子の明暗を正弦波で表し、

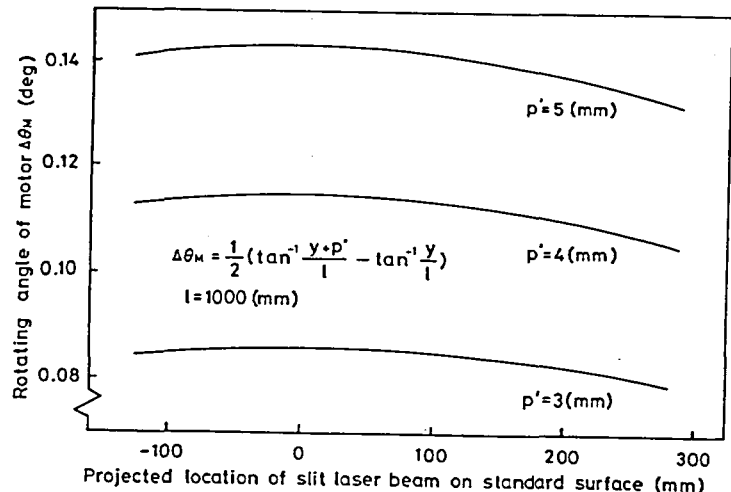
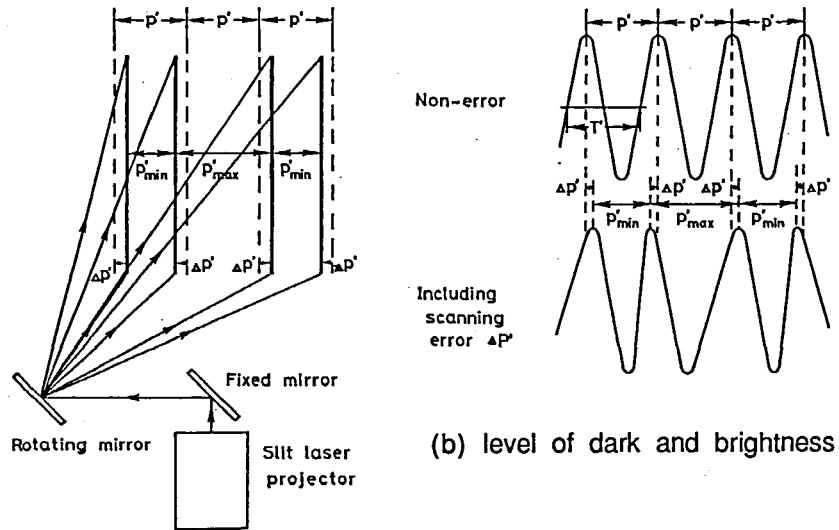


Fig.4.12 Rotating angle of motor for laser scanning with constant pitch on standard surface ($\alpha = \beta = 0$).



(a) scanning projection of slit laser

Fig.4.13 Projected grating formed by scanning with error $\Delta p'$.

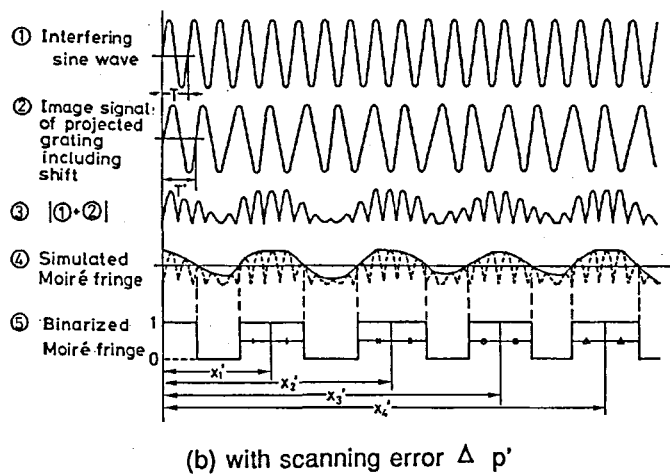
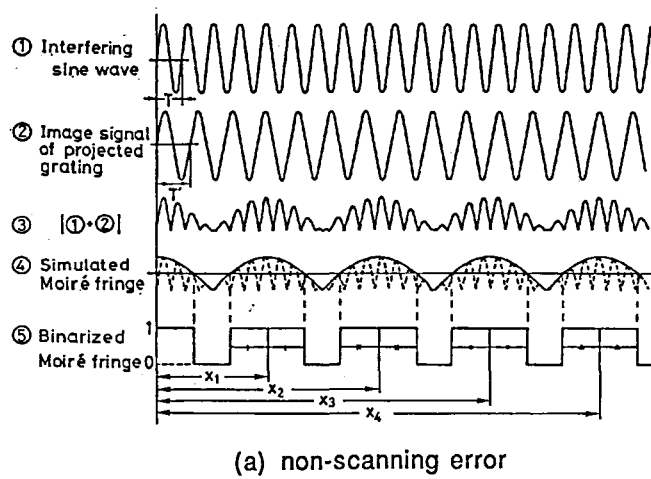


Fig.4.14 Simulation of moiré formation by grating projector with scanning error.

これらを加算し，その包絡線を算出してモアレ縞形成位置を各々求め， x_1, x_1' として，その差をモアレ縞形成位置誤差 $\Delta x'_{max}$ として評価した。

シミュレーションを行った結果，

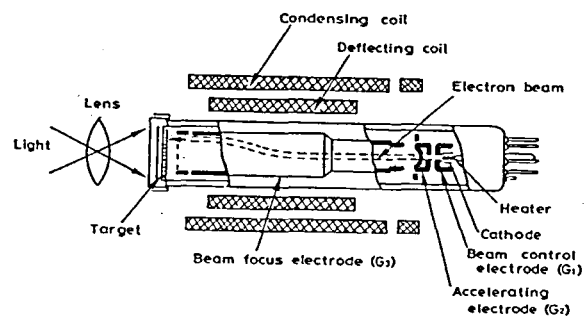
$$\begin{aligned} \Delta p' = 0.05 \times p' \text{ のとき} \quad \Delta x'_{max} &= 0.14 \times p' \\ \Delta p' = 0.10 \times p' \text{ のとき} \quad \Delta x'_{max} &= 0.374 \times p' \end{aligned} \quad (4.10)$$

の位置誤差が生じる。即ち，格子投光の位置誤差の約3倍のモアレ縞形成位置誤差が生じる。なお，これは最悪の場合を想定したものであり，実際にはこの半分程度と考えられる。

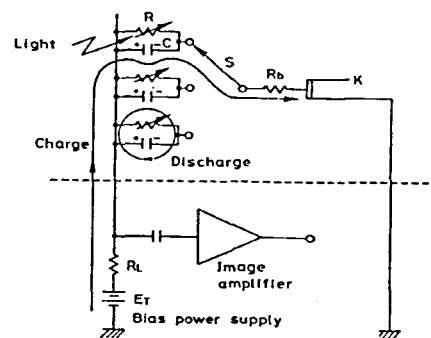
4.4.2 走査格子列の画像化

1本のスリットレーザ光を物体上に走査投光して格子像を作成する方法として，2種類の方法がある。まず第1は，1本1本のスリット像を画像メモリー上で加算する方法である。しかし，前項で示したように，モアレ縞形成には格子の投光位置精度が非常に重要であり，TVカメラの視野全体に対して200本の格子を投光する場合を想定すると，5%以内の投光位置精度を確保するには，1走査線当たり4,000サンプル点以上のA/D変換が必要となる。このため，格子像の位置精度，画像入力装置上不適当であると考えられる。

第2の方法としては，TVカメラの光量蓄積特性を利用して，光電変換ターゲット上でスリット像の蓄積を行う方法がある。Fig. 4.15は，光導電型撮像管の断面構造(a)とその光電変換および走査に関する等価回路(b)を示したものである¹⁰⁸⁾。図にみるように，TVカメラに光が入射されると，光導電面(Target)上で光電変換される。光導電面は静電容量(C)と入射光量の増大とともに値の減少する抵抗(R)の無数の並列回路が2次的に分布したものと見なせる。各々の静電容量はカソード(K)より放出された電子ビームの走査により，放電した分の電荷を補充される。この補充に要した電流が映像信号として得られる。つまり，光導電面上のある1点では，電子ビームが照射されてから次の照射までの期間に入射された光の情報が光導電面上で電荷の



(a) image pick up tube



(b) equivalence circuit

Fig.4.15 Construction of image pick up tube and equivalence circuit of target plane.

変化として蓄積される。このため、電荷情報読み取りのための電子ビームを遮断すれば、この遮断中、電荷情報は光導電面上に保持され、走査投光された格子列が光導電面上で形成される。

光導電面上での蓄積特性を利用する場合、TVカメラの光導電面上での電荷蓄積特性と電子ビームを一定時間遮断後、再度電子ビーム走査を行ったときの電子ビームによる電荷補充（電荷状態読み取り）特性が重要となる。

Fig. 4.16は、TVカメラの特性を調べるための実験配置(a)とタイムチャート(b)を示したものである。実験手順としては、

- 1) 電子ビームを遮断 (OFF) する。
- 2) 電子ビーム遮断中のある時点 (t_a) でTVカメラの前面に取り付けたシャッターを t_0 [s] 開くことにより、光導電面にレーザ反射光を照射する。
- 3) 電子ビーム遮断から t_a [s]後に電子ビームを "ON" にして、走査を行う。
- 4) 電子ビーム"ON"後、 t_b [s]後に、画像メモリにこの蓄積画像を取り込み、その電荷の蓄積状態を調べる。

Fig. 4.17は、本研究で用いたTVカメラ(撮像管; 1インチ カルニコン)の電荷蓄積特性を調べた結果である。なお、この計測はレーザを冷間圧延鋼板 (SPC) および白色塗装面 (white)

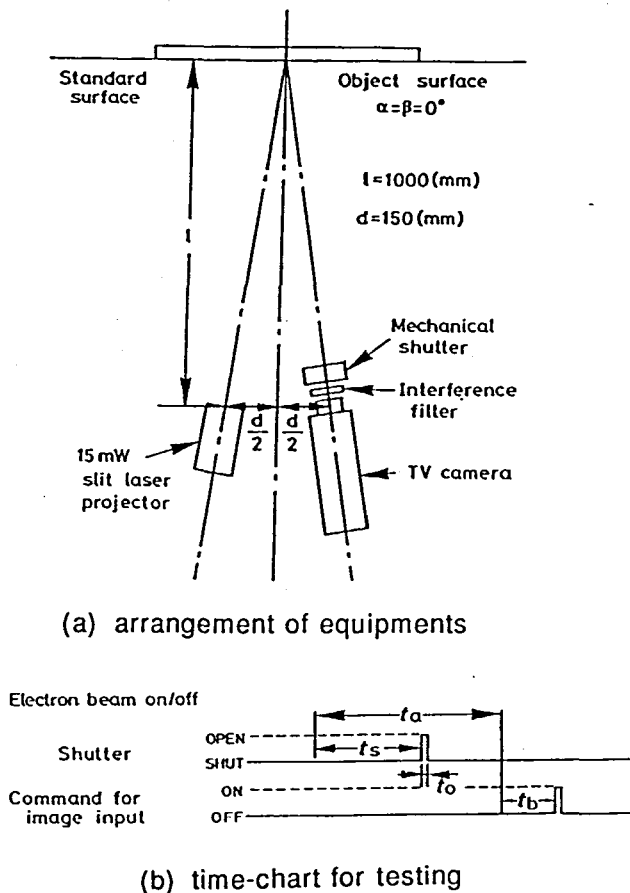


Fig.4.16 Measurement method for image storage characteristics on image target plane in TV camera.

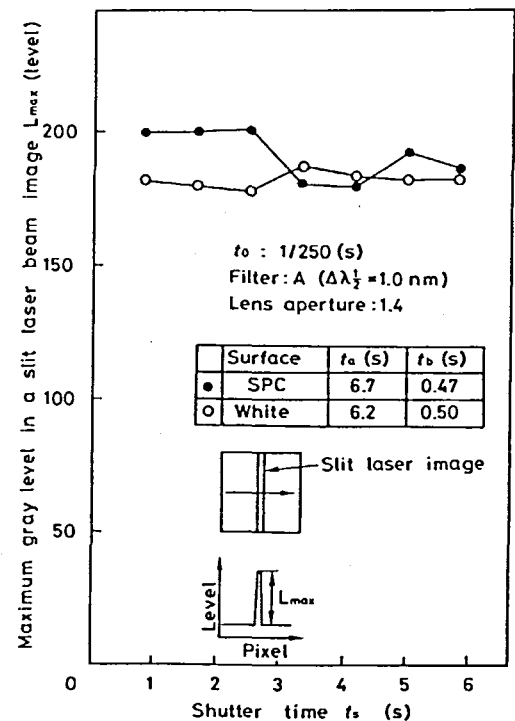


Fig.4.17 Electric discharging characteristics on image target plane in TV camera

に投光した時の結果である。これからわかるように、画像蓄積中（走査電子ビーム"OFF"の間）のどの時点でスリットレーザ光を入射しても、出力レベルは同レベルである。これより、スリットレーザ光を走査投光し、その反射光を順次蓄積してもTVカメラへの入射光量に応じた格子画像が得られると考えられる。

又、Fig. 4.18は画像蓄積後、走査電子ビームを"ON"にした後の映像出力値を示したものである。なお、TVカメラへの入射光量はレンズの絞りを変化させて行っている。この場合、ビーム"ON"後、ある一定時間(0.3s)は出力値は0(グランドレベル)であり、その後、図に示すような出力となる。これからわかるように、入射光量の大小に応じて出力電圧のピーク値およびその時点が変化する。このビーム"ON"後の出力特性、つまり、光電面の電荷充電特性は、TVカメラの撮像管により異なる。このように、電子ビーム"ON"後の電荷充電特性が入射光量により変化するため、画像メモリへの画像取り込み時点を制御する必要がある。

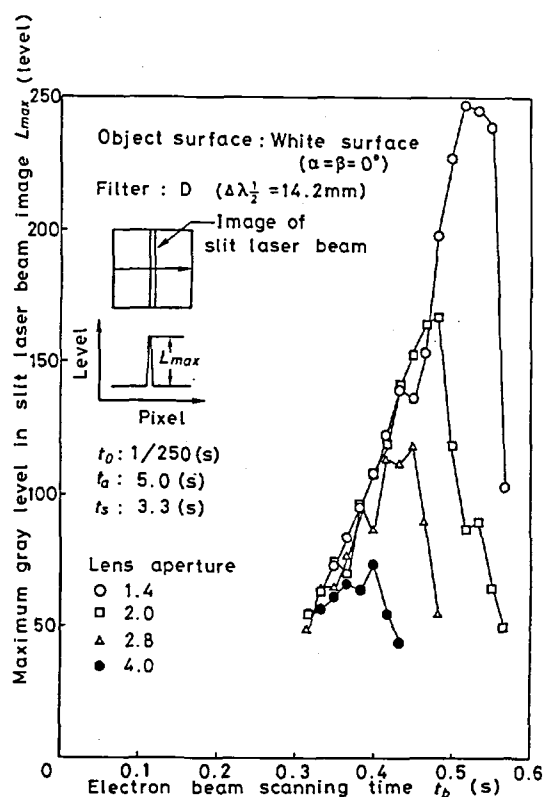


Fig.4.18 Electric charging characteristics on image target plane in TV camera.

4.4.3 試作装置およびその駆動

本項では、試作したスリットレーザ走査電子格子モアレ縞画像形成装置の駆動方法ならびにその性能について検討する。

Fig. 4.19は試作した装置の光学系の概略図を示したものである。本装置は、レーザをスリット状に投光するためのシリンダカルレンズを装着したレーザ投光器、走査投光するための固定鏡、回転鏡およびその駆動装置としてのパルスモータ、および、投光スリット列を撮像・蓄積す

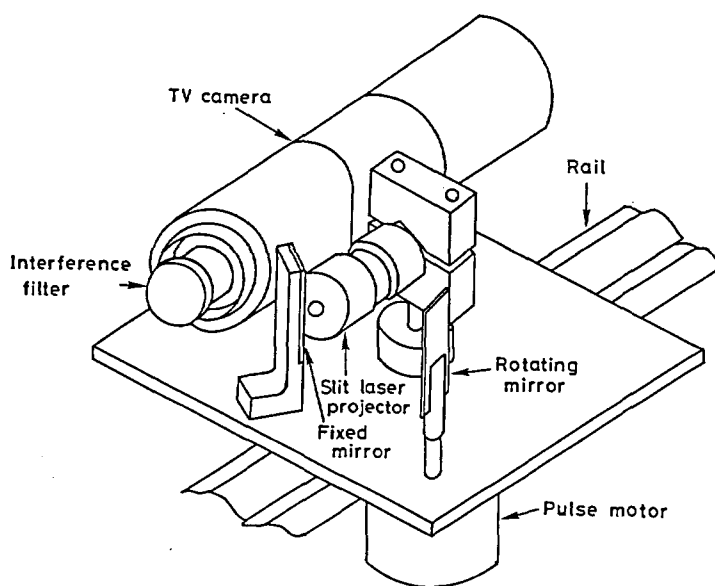


Fig.4.19 Appearance of slit laser scanner.

るためのTVカメラから構成されている。

Fig. 4.20は、試作した装置のブロック図を示したものである。また、Fig. 4.21は格子像形成のタイムチャートを示したものである。これにみるように、まずTVカメラの走査電子ビームを"OFF"にし(Fig. 4.21(c)の④)、その後、レーザ光走査用パルスモータを設定パルス数の値だけ回転させ(Fig. 4.21(c)の⑥)、その位置で一定時間(t_w)停止させる(Fig. 4.21(c)の⑦)。この回転、停止をTVカメラの視野範囲内で繰り返すことにより、レーザ光によるスリット列の投光が行われ、スリット列がTVカメラの撮像面上に蓄積される。そして、レーザ光走査終了後に走査電子ビームを"ON"する(Fig. 4.21(c)の⑧)ことで、スリットレーザ光による投影格子像の映像信号を出力し、Fig. 3.8 に示したモアレ縞形成回路により、モアレ縞画像を形成している。

使用した装置の性能ならびに格子形成条件について検討する。

(1)装置の性能について

(a)使用レーザ

環境光の影響を除外するには、可視域以外の波長を有するレーザ光を用いるのが望ましい。しかし、計測時に視覚的に状況を検知できることを考慮し、可視域レーザ(He-Neレーザ

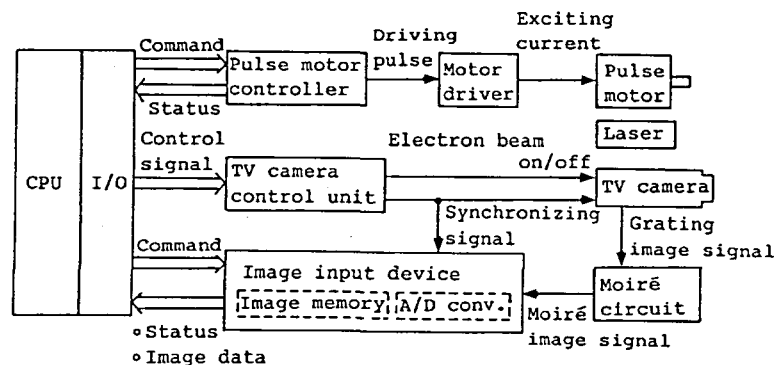


Fig.4.20 Blockdiagram of equipment for slit laser scanning moiré.

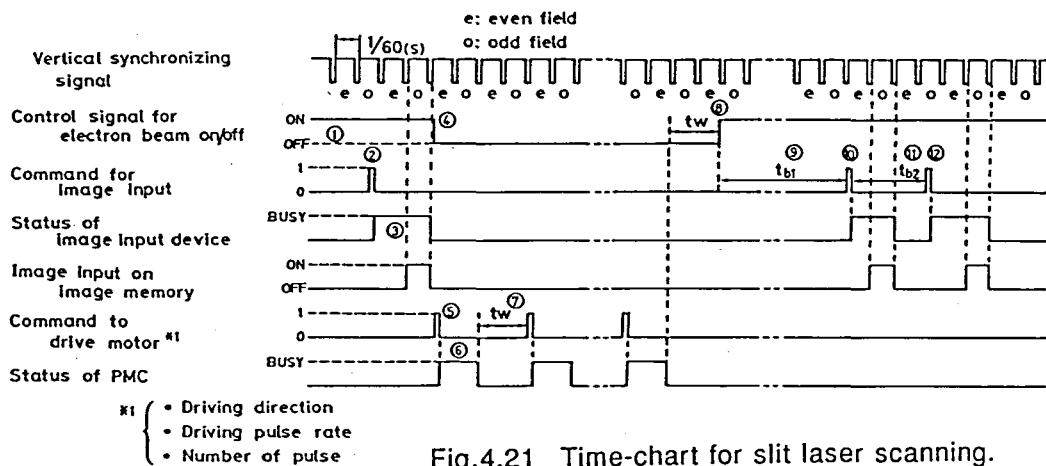


Fig.4.21 Time-chart for slit laser scanning.

: $\lambda_i=632.8\text{nm}$, 2 mW) を用い, その適用性の検討を行った. なお, レーザ光はシリンドリカルレンズにてスリット状にして投光している.

(b) 光学フィルター

可視域レーザを用いたため, 環境光の影響を除外する目的で, 中心波長が約 632.8 nm の干渉フィルターを TV カメラ前面に装着した. 検討した干渉フィルターの特性を Fig. 4.22 に示す. 環境光の影響を小さくするには, 半値幅 $\Delta\lambda_{1/2}$ の狭い干渉フィルターを使用するのがよい. しかし, 半値幅が狭いとフィルターへの光の入射角による透過光量の減衰が生じる. Fig. 4.23 はフィルターへの入射角と透過光量の関係を調べた結果である. 実験は, 試作装置を用いて, レーザの投光位置と TV カメラへの入射光量の関係を TV カメラの出力電圧で計測した. 図からわかるように, 半値幅の狭いフィルターほど視野の周辺 (フィルターへの入射角が大きい) で TV カメラへの入射光量が減衰しているのがわかる. この結果より, 試作装置においては半値幅 5.0 nm の干渉フィルター C を用いた.

(c) パルスモータの回転角誤差

使用したパルスモータの 1 駆動パルス当たりの回転角を調べたものが Fig. 4.24 である. なお, 1 駆動パルス当たりの回転角を精度よくはかることが困難なので, 試作装置において, 距離 1m 離れたところに, 光軸に垂直な面 (基準面) を設定し, この基準面上に 4 mm 間隔で投光を行うためのパルス数を順次求め, そのパルス数の逆数をとって 1 駆動パルスに対する回転角に換算して求めている. 図からわかるように, 1 駆動パルス当たりの回転角は周期を持って変動している. もし, パルスモータに回転角誤差がない場合, 一定間隔 p' で走査投光するための駆動パルス数 N_p は, (4.6) 式に示した投光回転角 $\Delta\theta_M$ より,

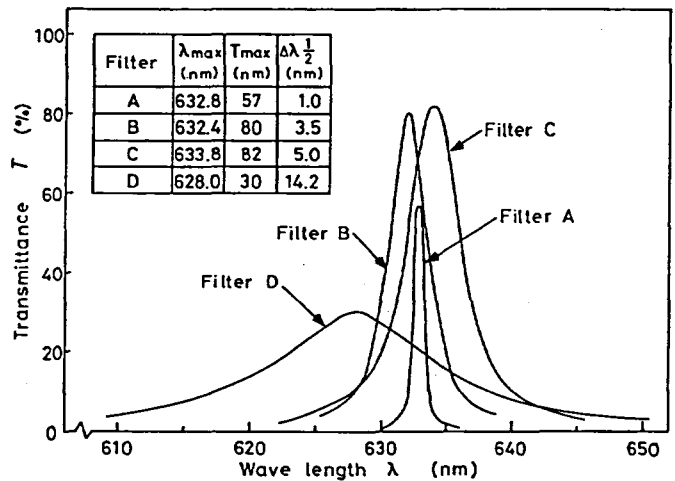


Fig.4.22 Spectral characteristic of interference filter.

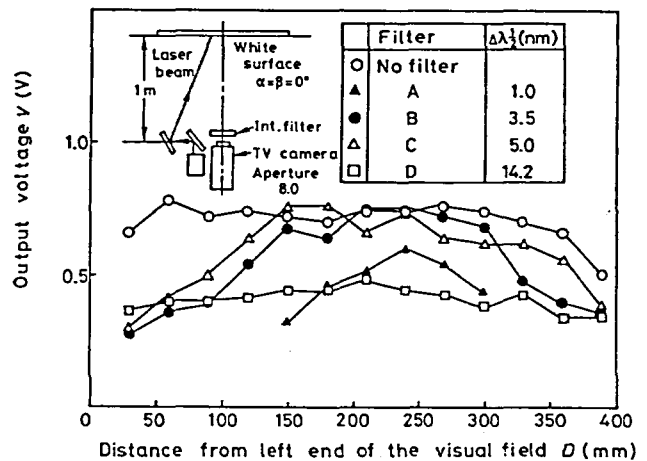


Fig.4.23 Relationship between incident angle to interference filter and incident light power to image target plane.

$$N_p = \Delta \theta_M / 0.0072 \quad (4.11)$$

で算出できる。しかし、この実験によれば、1 駆動パルス当たりの回転角誤差は最大 0.002° であり、格子走査投光角 (約 0.1°) に比較すると小さく問題はないが、この回転角誤差が周期性を有しているため、(4.11)式に示した駆動パルス数を単純に利用できない。そこで、この駆動パルス数をもとに基準面上で等間隔になるように、各投光位置での駆動パルス数の補正を行っている。これにより、投光間隔 p' が 4 mm の時、この p' に対する投光位置最大誤差 2.5%を実現している。これは、前述したモアレ縞形成に対する格子投光位置精度を満足するものである。

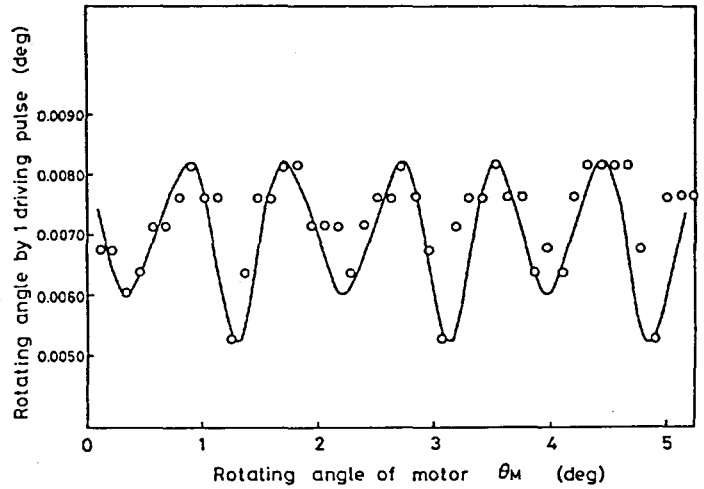


Fig.4.24 Rotating angle by 1 driving pulse of pulse motor used in this research.

(2) 形成条件

(a) レーザ走査投光条件

スリットレーザを走査投光して格子列をつくる場合、投光格子列の明暗差は、レーザ光のパワー、環境光による面固有の明るさ、TVカメラのレンズ絞り値、レーザ走査投光条件により変化する。ここでは、試作した装置に用いたレーザにおいて、レーザの走査投光条件と格子の明暗差の関係について検討する。

電子ビーム "OFF" 中の環境光による光量蓄積量を Fig. 4.25 に示す。これは、露出計による測定値 7.1 [EV] の明るさの面を TV カメラで蓄積撮像したときの蓄積時間 (電子ビームの "OFF" 時間) と TV カメラからの出力レベルの関係を示したものである。図からわかるように、環境光の影響を除外するため干渉フィルターを装着しているが、蓄積時間が長くなればなるほど出

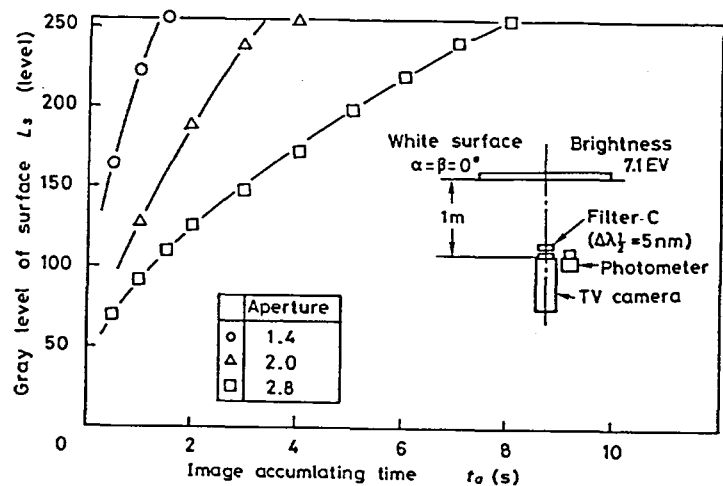


Fig.4.25 Relationship between image accumulating time and accumulated level by environmental lighting.

カレベルが高くなっており，環境光の影響がでていいる．このレベルが暗レベルの基準となる．暗レベルは，この環境光によるレベルとレーザ走査によるレベル上昇分が加算されることになる．Fig. 4.26は，画像蓄積時間2秒におけるレーザ走査速度と暗レベルの関係を示したものである．レーザの走査速度は，駆動パルスモータのパルス周波数で与えている．図からわかるように，駆動パルスモータのパルス周波数が7 kHz以上で，環境光による暗レベル(115)とほぼ等しくなっている．このことより，7 kHz以上のパルス周波数を駆動パルスモータに与えれば，レーザ光走査による暗レベルの増加はないものと考えられる．

格子像の明暗の明のレベルであるが，これはレーザの投光位置での停留時間で決まる．Fig. 4.27は，環境光の影響がない状態で，図に示したようにスリットレーザを走査投光し，TVカメラの視野中央部で一定時間 (t_w [s]) 停留させ，その後再び走査させた時の投光スリットの出力レベルを示したものである．このように，停留時間に比例して出力レベルが増大している．

このように，レーザ走査速度，投光停留時間 t_w ，走査時間 t_s により格子列の明暗は変化する．

(b) 画像取り込み時期と格子像の明暗の関係

Fig. 4.28は，白色立方体に対して，投光間隔(p') 8mmでスリットレーザ光を走査投光したときの出力画像を示したものである．図(a)～(e)は各画像取り込み時点 t_b における画像を示したものであり，TVカメラの走査周期 1/30 [s] ごとの画像取り込みによるものである．こ

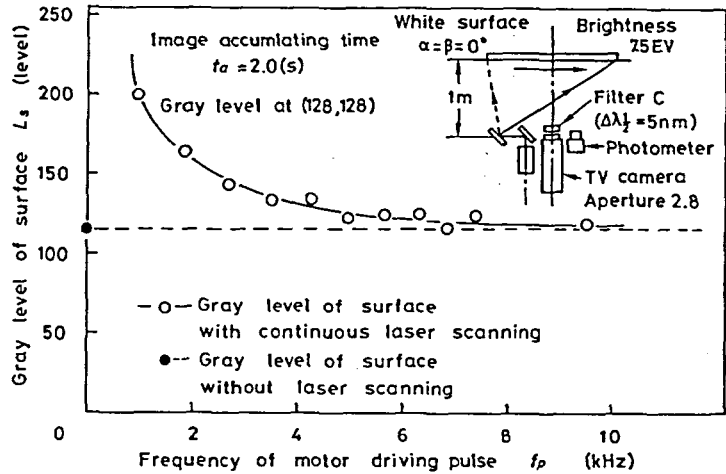


Fig.4.26 Relationship between frequency of motor driving pulse and gray level by laser scanning.

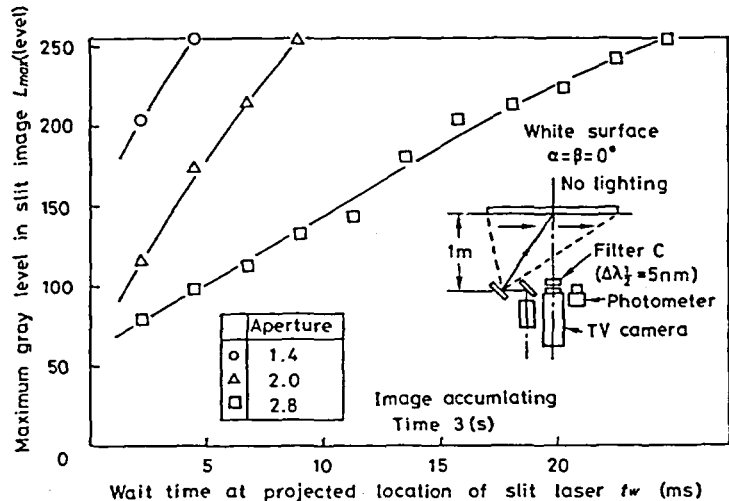


Fig.4.27 Relationship between waiting time at laser projecting position and gray level of light part in slit image.

の各画像における格子の明暗レベルおよび明暗レベル差 ΔL を示したものが Fig.4.29(a), (b)である。これからわかるように、各面の環境光による明るさが異なっており、それにより格子の明暗差の明瞭に得られる時期が異なる。取り込み時点(a), (b), (c)では、面B, Cにおける格

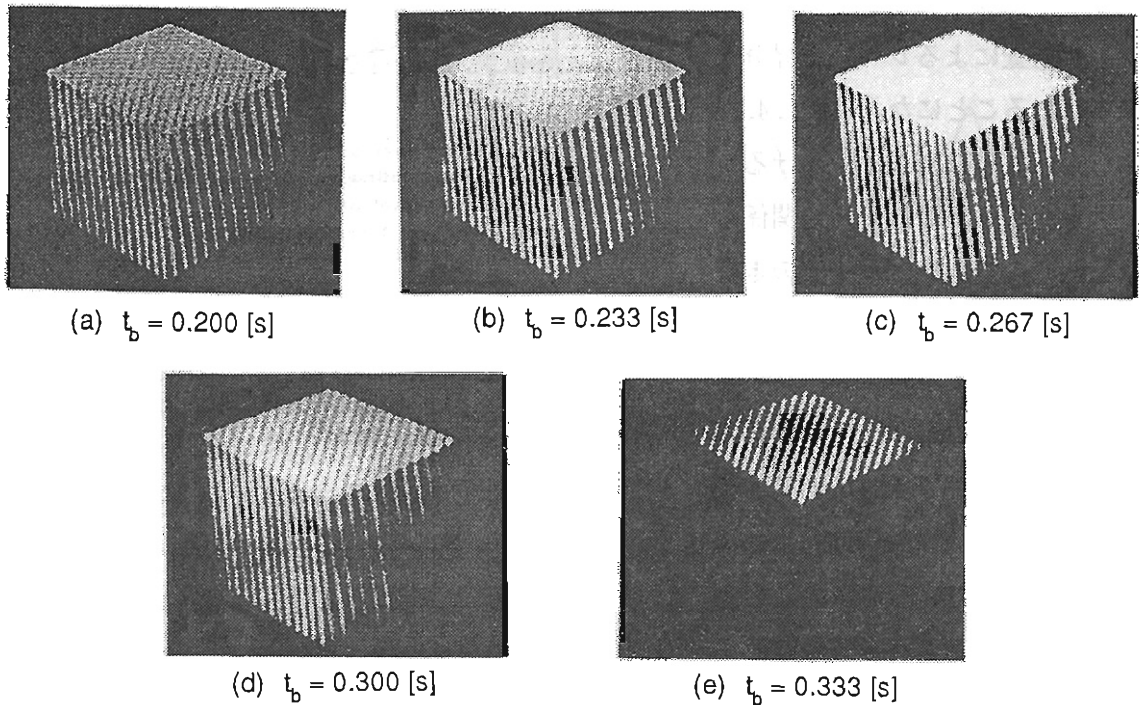


Fig.4.28 Output image throughout TV camera of accumulated grating image on target plane at each scanning time t_b of electron beam.

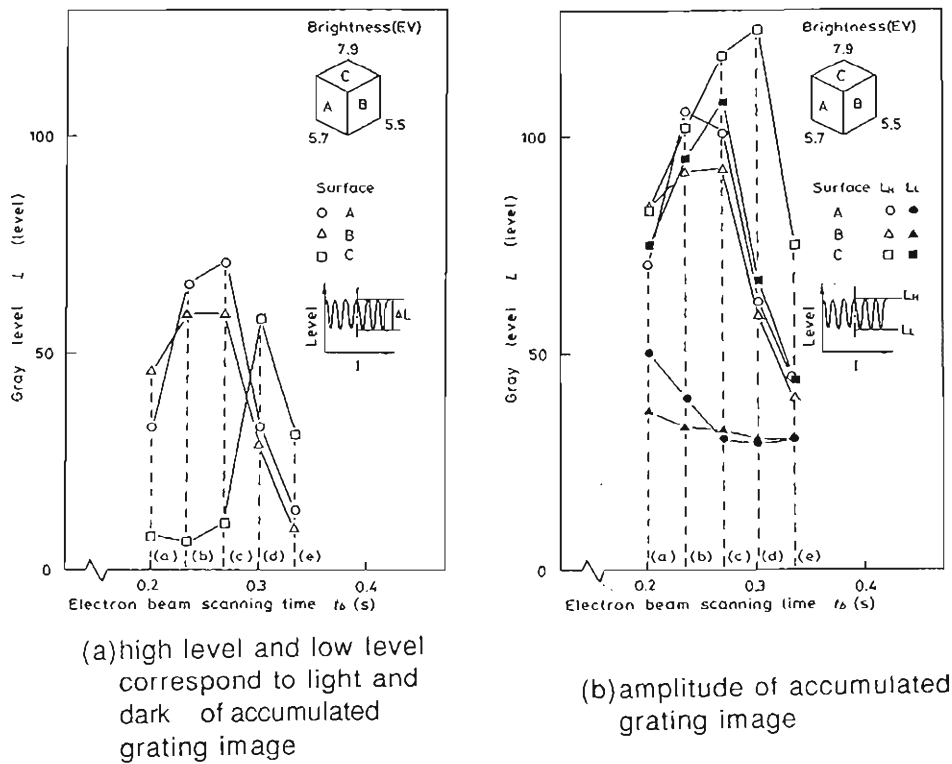


Fig.4.29 Gray level of accumulated grating image at each scanning time of electron beam shown by Fig.4.28.

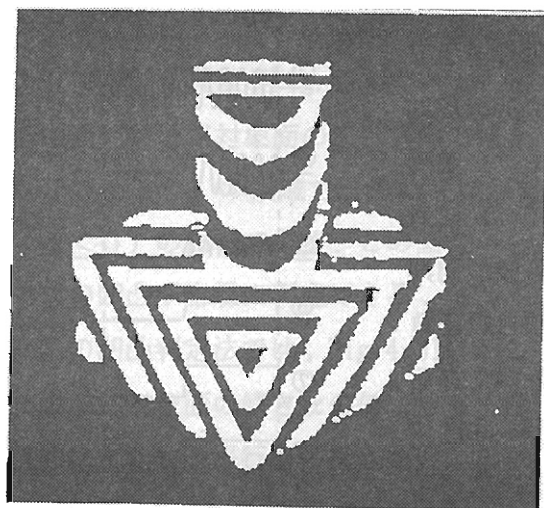
子像の明暗は明瞭にでている（明暗差50程度）が，面Cでは，明暗差が10程度と非常に小さい．これに対し，取り込み時点(d),(e)では，面Cにおける明暗差の方が大きくなっている．これは，図中において露出計での測定明るさを示してあるように，環境光による面Cの明るさが面A，Bより明るく（測定値が大きい）暗レベルが高くなったためである．このように，TVカメラの光導電面における電荷蓄積状態により，電子ビーム走査時の電荷補充特性が異なるため，出力の変化が生じる．

画像メモリへの画像取り込みは，いずれの面に対しても明暗差が得られている時点を選定するか（(d)），もしくは，各時点の画像を重ね合わせて，より明瞭な画像の形成をすればよい．各時点での画像を重ね合わせた場合，暗レベルの状態にあまり影響されずに明瞭な格子像が得られるため，格子像の得られる範囲が拡大される利点がある．

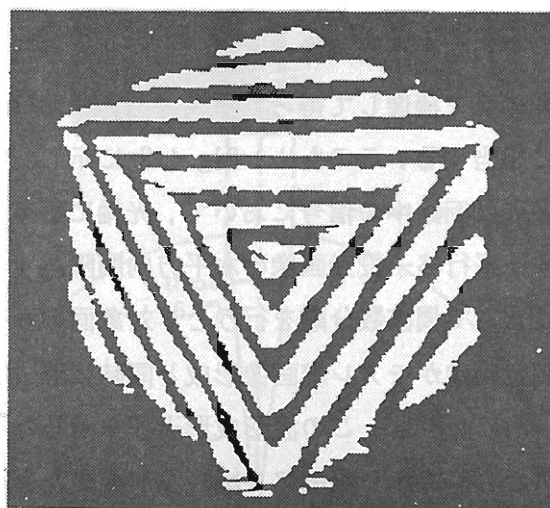
(c) 試作装置によるモアレ縞画像の形成

Fig. 4.30 (a), (b)は各々，環境光の存在下（自然光+蛍光灯）において本方式によりモアレ縞画像を形成させたものである．(a)は表面が白色の物体に対して形成させたモアレ縞画像，(b)は熱間圧延鋼板で作られた物体（立方体）に対して形成させたモアレ縞画像である．これらに見られるように，環境光の存在下でもモアレ縞画像が良好に形成されている．なお，Fig. 4.30(a)のモアレ縞画像形成に約1.5秒要している．このモアレ縞画像形成時間は投光するレーザーのパワーと計測対象物体の面質（光の反射特性）に依存する．

このように，本研究で構成・試作したスリットレーザー走査電子格子モアレ法においては，スリットレーザー光の走査投光，TVカメラの撮像面での画像蓄積，および映像信号のアナログ波形形成により，従来法では困難であった環境光の存在下においても，また，光の散乱反射の小さな面に対しても良好にモアレ縞画像が形成される．



(a) for white painted object



(b) for cubic object made by hot-rolled steel

Fig.4.30 Moire image formed by slit laser scanning moire method in light room.

4.5 平行格子投光画像をもとにした簡易凹凸判定画像の形成

モアレ縞画像の場合, (2.15), (2.16)式に示したように, モアレ縞の間隔と傾きから対象面の傾き α , β がわかる. しかし, この式からもわかるように, 傾きが正か負かはわからない. つまり, 3次元物体の稜線が凸稜線か, 凹稜線かがわからない. このため, モアレ縞画像を用いて物体形状の3次元形状計測を行う場合, この凹凸判定が必要となる.

モアレ縞画像形成の基になる一定間隔の格子像を投光して得られる平行格子投光画像の間隔は, (2.10)式に示したように, 光学系の各設定値に対して, 対象面の傾き α により決まる.

Fig. 4.31は $\ell = 1000\text{mm}$, $d = 150\text{mm}$, $p = 0.42\text{mm}$, $a = 111.1\text{mm}$ ($f = 100\text{mm}$), $a' = 25.64\text{mm}$ ($f = 25\text{mm}$) における α と Δy の関係を示したものである. これからわかるように, 各 $\Delta \ell$ に対して平行格子投光画像の水平間隔 Δy と対象面の水平方向傾き α は1対1の関係がある. また, $\alpha = 0$ においては $\Delta \ell$ の値にかかわらず一定値で,

$$\Delta y_{\alpha > 0} < \Delta y_{\alpha = 0} < \Delta y_{\alpha < 0} \quad (4.12)$$

となる. このことより, Δy の値から α の正負の符号判定が可能となる.

平行格子投光画像の水平間隔 Δy は平行格子投光画像をTVカメラで撮像して得られる映像出力における正弦波成分の周期に相当する. このため, Fig. 4.8 に示した電子格子モアレ縞画像形成回路中の信号において, 光軸に垂直な面 ($\alpha = 0^\circ$) に対する平行格子投光画像の水平方向間隔 Δy に相当する波形周期 $T_{\alpha=0}$ で周波数分離を行うと, 対象面の水平方向の傾きの正負判定画像がモアレ縞画像形成と同時に形成させることができる.

Fig. 4.32は, この波形形成過程を示したもので, ①~③は Fig. 4.8 で示したモアレ縞画像形成のための波形形成過程の①~③と同一である. この③の波形に対して, まず, 振幅平坦特性を有するLPF (ローパスフィルタ) を用いて $\alpha = 0^\circ$ に対する平行格子投光画像の映像出力における格子周波数 f_0 をカ

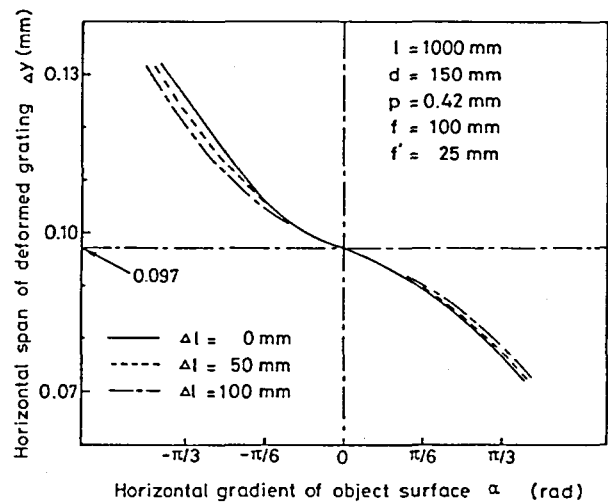


Fig.4.31 Relationship between surface gradient α and horizontal span Δy of deformed gratings.

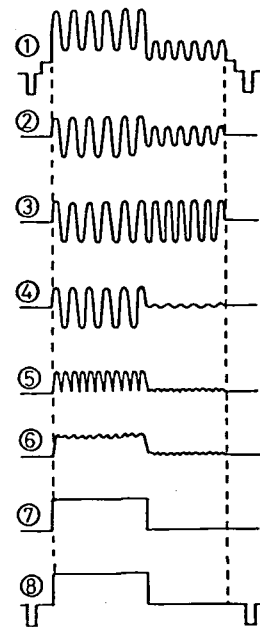
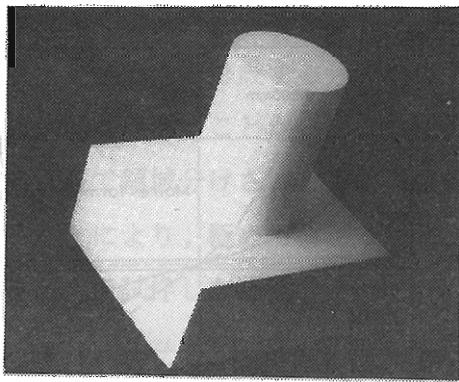
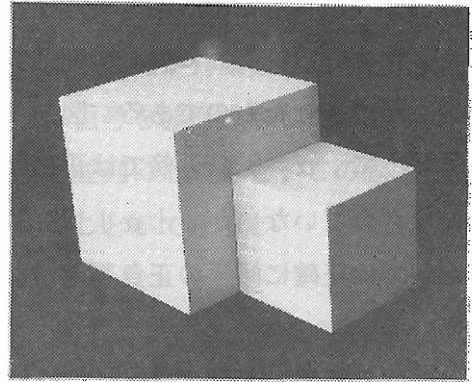


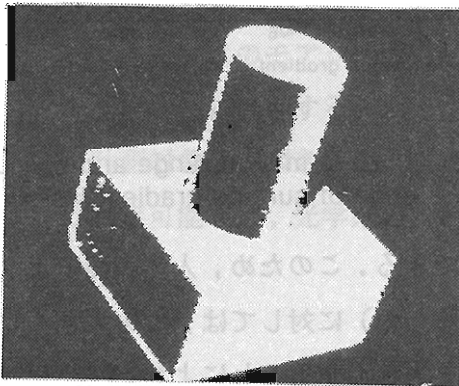
Fig.4.32 Signal arrangement for formation of binary image divided by sign of surface gradient.



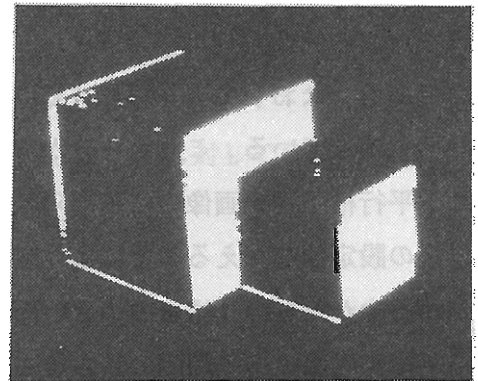
(a-1) gray image



(b-1) gray image



(a-2) binary image divided by gradient sign



(b-2) binary image divided by gradient sign

Fig.4.33 Binary image divided by sign of surface gradient

ットオフ周波数として、 $\alpha < 0^\circ$ の面に対する格子信号を減衰させる④。さらに、⑤～⑦に示すように、整流、フィルタリング、2値化している。この波形成形により得られた画像がFig. 4.33である。画像中白い領域が対象面の水平方向の傾きが正 ($\alpha > 0$) の領域で、黒い領域が負 ($\alpha < 0$) の領域である。この画像から物体の凹凸が容易に判定できる。

この凹凸判定法では、Fig. 4.31に示したように対象面の傾き α の値に伴って連続的に変化する平行格子投光画像の水平方向間隔を $\alpha = 0^\circ$ の面に対する間隔を境界に対象面の傾きの正負を分離しているため、この境界判定の精度が重要となる。Fig. 4.34は、この判定の精度（可能

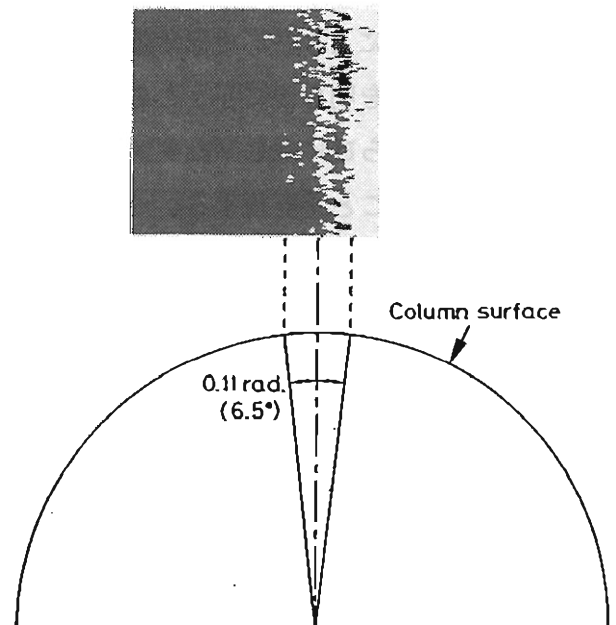


Fig.4.34 Divided range of surface gradient's sign.

範囲)を調べるため、傾き角度が連続的に変化する円柱側面に対して凹凸判定画像を形成させたものである。図から分かるように、 $\alpha=0^\circ$ 近傍では正確な判定がなされていないが、 $|\alpha|>6.5^\circ$ においては正確に傾きの正負判定がなされている。

Fig. 4.35は、各種の投光-撮像軸間距離 d に対する平行格子投光画像の格子間隔ならびに凹凸判定可能領域を示したものである。なお、モアレ縞形成範囲も合わせて示している。これから分かるように、平行格子投光画像の格子間隔は、光学系の設定値を変えることにより変化させることができる。このため、人体表面のように凹凸がゆるやかなもの(傾きの小さい面で構成されているもの)に対しては、 d を大きくし、平行格子投光画像の格子間隔の傾き α に対する変化度合を大きくすることにより、凹凸判定可能領域を広くすることができる。

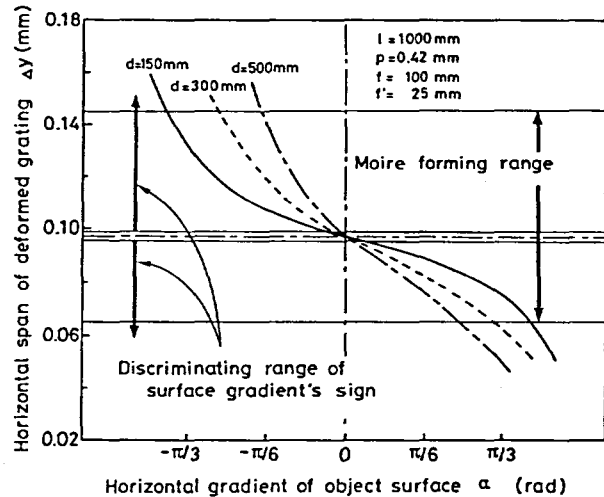


Fig.4.35 Moire formation range and divided range of surface gradient's sign.

4.6 結論

本章では、スリットレーザ光を対象物体上に走査投光し、さらに、得られる格子像の映像信号をアナログ回路により波形成形することで、環境光の存在下でも、コントラストの高い格子像が得られることを明らかにし、この格子像を用いて、多面体、円柱で構成された物体に対するモアレ縞画像ならびに簡易凹凸判定画像を形成する方法を提案したものである。以下に本研究で明らかにしたことを要約する。

- 1) 投光された格子像の明暗による周波数成分から面の傾きにもなう映像信号中の直流成分を除去し、この格子の明暗による映像信号と一定周波数の正弦波信号を加算、全波整流、検波、フィルタリングすることにより、モアレ縞の周波数成分のみを有する2値化モアレ縞画像を容易に得ることができる。
- 2) 電荷蓄積型撮像管は、電子ビームの ON-OFF により撮像面での電荷蓄積制御が可能であり、この電荷蓄積特性を用いることにより走査投光されたスリット列の画像化を計ることができる。
- 3) TVカメラの光導電面への電荷充電時間は、入射光量による電荷放出量により変化するため、電子ビーム走査開始時点からの時間により映像信号レベルが変化する。この特性を利用して、TVカメラからの映像を各フレームごとに重ね合わせることで格子像形成

範囲を広くすることができる。

- 4) モアレ縞画像を形成する元になる平行格子投光画像の格子間隔が対象面の傾きと1対1の対応関係があることから、この平行格子投光画像のTV信号を波形成形して対象面の傾きの正負で領域分けされた2値画像をモアレ縞画像形成と並列に形成させ、この画像を用いることにより、極めて容易に対象物体の凹凸判定を行うことができる。
- 5) 本研究で試作した装置の性能は、以下の通りである。
 - ① スリットレーザの走査投光に用いたモータは 0.0072° /パルス のパルスモータで、投光距離 1.2 m で 0.2 mm の精度で等間隔投光が可能である。
 - ② 環境光の存在下で、表面が白色の物体に対して約 1.4秒でモアレ縞画像形成が可能である。このモアレ縞画像形成に要する時間は、レーザ光のパワーと計測対象面の反射特性に依存する。
 - ③ 計測対象面の傾きの正負判定は、傾きが6.5 度以上の面に対して可能である。この判定可能域は、光学系の設定に大きく依存する。

第5章 $\theta - \rho$ ハフ変換平面からの直線および2次曲線の線分抽出

5.1 はじめに

第3章，第4章で示した縁辺検出画像，格子パターン画像は共に2値化された線画像であり，縁辺検出画像では，各線分が物体を構成する各面分や領域境界を表しており，また，パターン画像における線パターンは各面における3次元形状情報を含んでいる．つまり，これらの画像に含まれる線分が各々形状情報を表していることになる．このため，画像を理解・認識するには，これらの線分を画像からの確に抽出する必要がある．

縁辺検出画像，パターン投光画像における線画像は，前章までに示した画像からもわかるように，直線線分と曲線線分が混在しており，さらに，ノイズ点を有し，画像の標本化およびノイズによる線分の乱れ（がた付き），線分の途切れを含んでいる．このため，このような線画から線分情報を抽出するには，これら線画像に含まれるノイズ，線分の乱れ，線分途切れを考慮した線分抽出法を検討する必要がある．

2値線画像からの線分抽出方法としては，

- 1) 線分追跡法^{109) -111)}
- 2) 線分当てはめによる方法^{112), 113)}
- 3) ハフ変換法^{114) -142)}

などがある．

まず，これらの線分抽出方法の適否について検討する．

第1番目の方法である線分追跡法は，画像を順次走査することにより線分要素点を抽出し，この抽出された線分点から線分連結状態を判別しながら，画像内から線分を抽出していく方法である．この方法は，直線，楕円，放物線，自由曲線など線分の種類に依存せずに画像内のすべての線分要素を抽出することができる．しかし，ノイズによる不要点や画素標本化，縁辺検出性能による線の乱れを有する線画像に対して，追跡法を適用する場合，不要点か線分要素点かの判別，さらには抽出された線分点列の線分方程式への当てはめ基準が一意的には決まらず，処理対象画像に応じた判定基準が必要となる．さらに，この追跡法は逐一的な処理方法であるため，パイプライン処理や並列処理には適さず，処理の高速化に劣ると考えられる．

第2番目の方法である線分当てはめによる方法は，画像内に現れると想定される線分を用意し，これらの線分を画像上に重ね合わせて一致する線分要素点を抽出する方法である．当てはめる線分との一致度合いから判定するため，ノイズ点等の影響は小さくなる．しかし，用意した線分以外の線分が存在すれば抽出できない．さらに，直線だけを対象にした場合でも，直線の傾きと切片を順次変化させて当てはめを行わなければならない．

第3番目のハフ変換法による線分抽出は，Hough, P. V. C. が傾き a ，切片 b によって表現され

たパラメータ空間への直線の写像からその直線のパラメータを抽出する方法として提案¹¹⁴⁾したことに始まる。 $x-y$ 平面に描画された直線 ($y = ax + b$) を $a-b$ 平面へ写像すると、 $x-y$ 平面の直線上の各点の $a-b$ 平面における軌跡が1点で交差する。この交差点が直線のパラメータ (a, b) である。この方法はノイズや途切れ等を含む画像から線分やパターンを抽出するのに適しており、広く研究、利用されている¹¹⁵⁾。

直線パラメータの抽出には、現在Duda and Hart が提唱した (θ, ρ) パラメータ空間からの抽出法¹¹⁶⁾ が主に使われている^{117) -119)}。このハフ変換法は、このように線分を表すパラメータ空間へ写像したときにもっともよく適合するパラメータを抽出する方法であり、線分当てはめによる方法と同様にパターンマッチング法の一つといえる。この方法は画像中の線分要素点に対し、個々に同一の変換を行い、その軌跡を重ね合わせて、通過度数の極大点を抽出すればよいので、処理が簡便である。さらに、個々の点に対して独立に処理可能なので、パイプライン処理、並列処理等への適用も可能である。特に直線を対象にしたハフ変換による線分抽出に対しては、専用プロセッサの開発^{120) -122)} や線分検出の高精度化¹²³⁾、高信頼、高効率化^{124) -130)} 等の研究が行われており、実用レベルに達している。

このハフ変換法は、パターンマッチングの一種であり、任意形状検出への展開も提案されている^{131) -133)}。しかし、一般的にこのハフ変換法を直線以外のものに適用する場合、適用対象を表現するのに必要なパラメータ数の空間が必要である。例えば、楕円の場合は5つのパラメータで決定されるため、楕円のパラメータを決定するには5次元のパラメータ空間が必要であり、莫大なメモリー空間と処理時間を要する。このため、処理を分割して、パラメータを順に決定していく手法が各種提案されている^{134) -142)}。このパラメータ決定の基本となっているのが、接線が平行となる楕円の中心対称点における (θ, ρ) 値からの楕円中心の決定である。しかし、この手法は楕円の中心対称点列 (線要素) が存在していなければ、パラメータ抽出ができない。

このように、ハフ変換法はメモリー空間と処理時間の問題点はあるが、ノイズや線の乱れのある線画に対しては有効な手法であると考えられる。

研究対象である製造分野における組立対象物体の縁辺検出画像およびパターン投光画像である線画に含まれる線分の大部分は、直線と2次曲線 (主に楕円) であり、一般の曲線もこれらを複合することで近似ができる。そこで、本研究では、直線と2次曲線の混在する線画像からハフ変換を利用して、効率よくかつ精度よく各線分を抽出可能な処理方法を提案・検討している。すなわち、『2次曲線を規定する最も重要な要素は、2次曲線の軸成分であり、2次曲線の軸はその2次曲線の軸対称点における接線の角の2等分線である。』こと、『2次曲線を $\theta-\rho$ パラメータ平面へ写像して得られる $\theta-\rho$ ハフ変換画像において、その度数極大点はもとの2次曲線上の各点の接線を表している。』ことに基づいて、新たな2次曲線のパラメータ抽出アルゴリズムの提案を行うとともに、直線と2次曲線混在の線画像から効率よく、かつ、信頼性の高い線分抽出方法を検討している。

5.2 $\theta - \rho$ 平面への変換軌跡と線分パラメータの関係

5.2.1 変換軌跡と直線の線分パラメータの関係

$x - y$ 平面において，直線の方程式は，

$$y = ax + b \quad (5.1)$$

で表される．Fig. 5.1 に示すように， $x - y$ 平面に描かれた直線を原点からの垂線の長さ ρ ，傾き θ で表すと，

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (0 \leq \theta < \pi) \quad (5.2)$$

となる．この直線上の各点 (x_1, y_1) を通る直線は

$$\rho = x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta \quad (5.3)$$

と表される．式(5.2) を θ, ρ に関する方程式と考え，その軌跡を $\theta - \rho$ パラメータ平面に描くと，Fig. 5.1(b) に示すように，ハフ曲線は (θ_0, ρ_0) 点で交差する．この点が $x - y$ 平面上における直線のパラメータを表すことになる．画像処理において，線画の描かれた $x - y$ 平面，写像空間である $\theta - \rho$ パラメータ平面ともに標本化された画像メモリで扱われる．このため，直線上の各点を通る直線は， $\theta - \rho$ 平面

上では軌跡の通過度数で表され，直線のパラメータは， $\theta - \rho$ 平面での軌跡の交差点 (θ_0, ρ_0) において，度数極大点として表される．

このことから，線画画像中における直線のパラメータが $\theta - \rho$ パラメータ平面上における度数極大点から容易に抽出できる．つまり，直線のパラメータ a, b は，

$$\begin{aligned} a &= -1 / \tan \theta_0 \\ b &= \rho_0 / \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

で得られる．

Fig. 5.2 は直線の原画像(a) とそのハフ変換画像(b) を示したものである．ハフ変換画像は，Fig. 5.1 に示した軌跡の通過度数で表現されているので，白くなっている箇所が通過度数の高い部分である．図中の矢印の点が通過度数最大点で，この点の (θ, ρ) 値が図(a)の直線のパラメータを与える．また，同図(c) は，ハフ変換画像における軌跡の通過領域の境界を示した

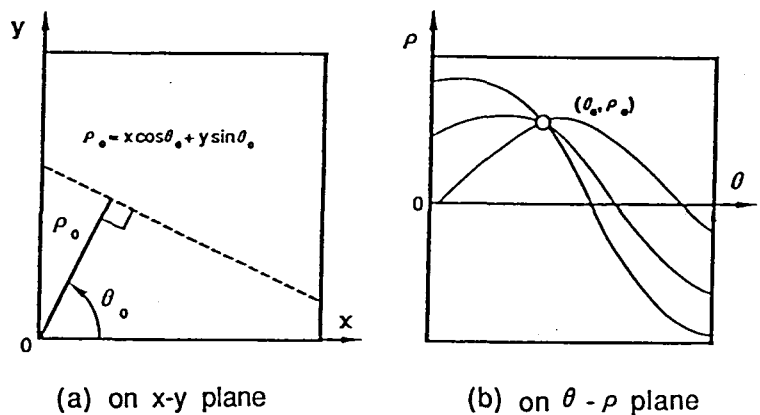
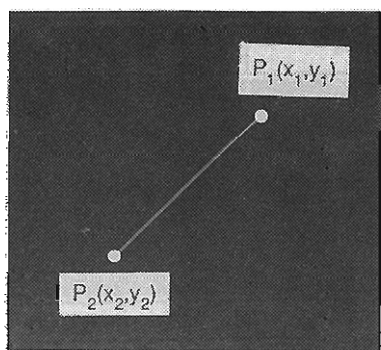
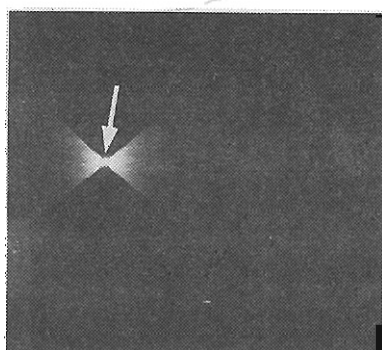


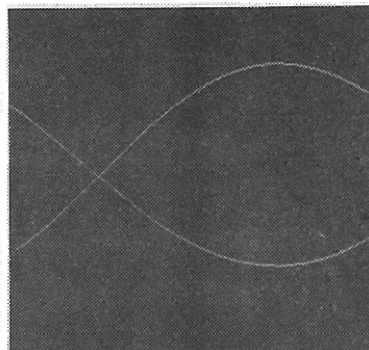
Fig.5.1 Hough transform of straight line onto $\theta - \rho$ plane.



(a) line image



(b) Hough transformed image



(c) boundary line of Hough transformed region

Fig.5.2 Hough transformed image of straight line.

ものである。この境界線は直線の端点 $p_1(x_1, y_1)$, $p_2(x_2, y_2)$ に対する変換軌跡である。つまりこの境界線から直線の端点を抽出することができる。

5.2.2 変換軌跡と2次曲線の線分パラメータの関係

本研究の対象とする2次曲線としては、楕円、双曲線、放物線の3種類があり、2次曲線の軸が座標軸に平行な場合、各々は以下の式で表される。

$$\text{楕円} \quad \frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (5.5)$$

$$\text{双曲線} \quad \frac{(x-x_0)^2}{a^2} - \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (5.6)$$

$$\text{放物線} \quad y - y_0 = a(x - x_0)^2 \quad (5.7)$$

これらの2次曲線(Fig. 5.3(a-1), (b-1), (c-1))を $\theta-\rho$ 平面へハフ変換した結果が同図(a-2), (b-2), (c-2)である。 $\theta-\rho$ ハフ変換像は、各線分上の点に対する変換軌跡の通過度数で表現される。図からわかるように、2次曲線を $\theta-\rho$ 平面へハフ変換して得られる変換画像上では、度数の極大点が曲線軌跡を示す。

なお、本研究では、 $\theta-\rho$ 平面における累積度数の極大点を集積点と呼ぶ。また、曲線の $\theta-\rho$ 平面へのハフ変換において、集積点は曲線軌跡を呈する。この軌跡を集積点軌跡と呼ぶ。

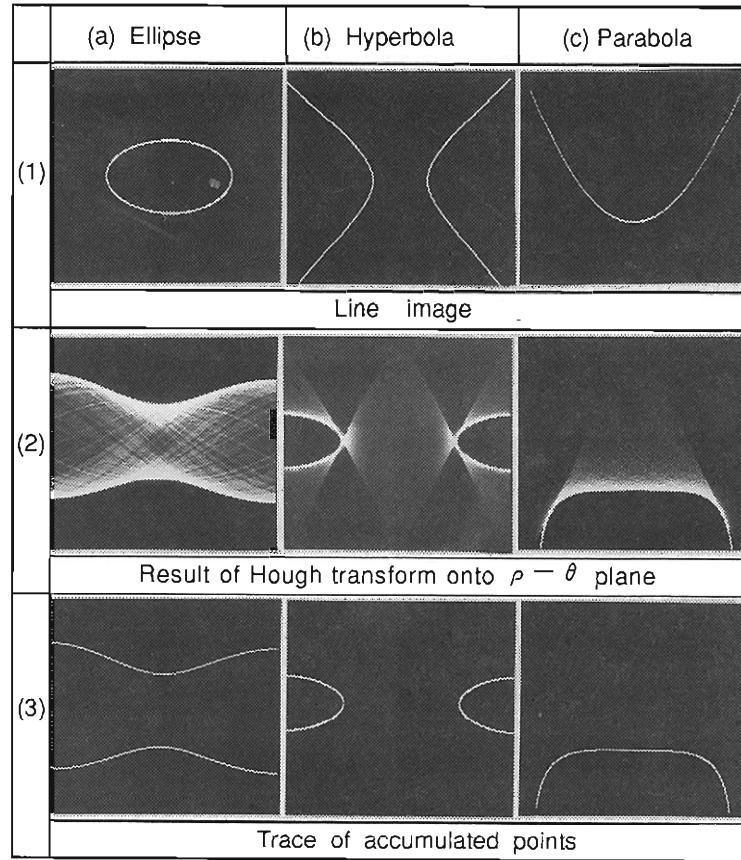


Fig.5.3 Hough transform of second degree curve onto $\theta - \rho$ plane.

Fig. 5.3(a-2), (b-2), (c-2) における集積点軌跡を抽出したものが同図(a-3), (b-3), (c-3)である。これらの集積点は元の2次曲線上の各点における接線を表しており、集積点軌跡曲線は次式で表される。

$$\text{楕円} \quad \rho = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \pm \sqrt{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} \quad (5.8)$$

$$\text{双曲線} \quad \rho = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \pm \sqrt{a^2 \cos^2 \theta - b^2 \sin^2 \theta} \quad (5.9)$$

$$\text{放物線} \quad \rho = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta - \frac{\cos^2 \theta}{4 a \sin \theta} \quad (5.10)$$

なお, (5.8), (5.9), (5.10) 式は2次曲線の軸が座標軸に平行な場合である。

一般に2次曲線の軸は座標軸に平行ではなく、傾き α を有している。Fig. 5.4は楕円の軸が座標軸に対して α 傾いた楕円とその $\theta - \rho$ 平面へのハフ変換画像上での集積点軌跡を示したものである。いま、楕円の軸に平行な座標軸を x', y' とし、この座標系におけるパラメータを $\rho', \theta', x_0', y_0', a', b'$ とすると、集積点軌跡は、

$$\rho'(\theta') = x_0' \cos \theta' + y_0' \sin \theta' \pm \sqrt{a'^2 \cos^2 \theta' + b'^2 \sin^2 \theta'} \quad (5.11)$$

で表される。ここで、図からも容易に分かるように、 $x' - y'$ 座標系における $\rho'(\theta')$ 値と $x -$

y 座標系における集積点軌跡値 $\rho(\theta)$ との間には次の関係がある。

$$\rho'(\theta' + \alpha) = \rho(\theta) \quad (5.12)$$

つまり、 $x'-y'$ 座標系における ρ 値は $x-y$ 座標系で変換された $\theta-\rho$ 変換曲線から得ることができる。また、パラメータ間の関係は、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} a &= a' \\ b &= b' \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} x_0 &= x_0' \cos \alpha - y_0' \sin \alpha \\ y_0 &= x_0' \sin \alpha + y_0' \cos \alpha \end{aligned} \quad (5.14)$$

つまり、軸が α 傾いている楕円に対するパラメータ抽出は、各 α ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$) に対して座標軸が $x-y$ 座標軸から α 回転してできる新たな座標軸に対するパラメータ抽出を行えば良いことになる。このことは双曲線、放物線に対しても成り立つ。このことより、 $\theta-\rho$ ハフ変換平面からの2次曲線のパラメータ抽出に関しては、2次曲線の軸が座標軸に平行な2次曲線に対して検討すれば良いことになる。

2次曲線を規定する最も重要な要素は、2次曲線の軸成分である。軸が座標軸に平行な場合、軸を表すパラメータは (x_0, y_0) である。2次曲線の軸は、その2次曲線の軸対称点における接線の角の2等分線である。また、2次曲線を $\theta-\rho$ 平面にハフ変換して得られる変換画像において、その集積点は2次曲線の接線を表している。さらに、2次曲線はすべてその2次曲線の軸に対して対称であり、その軸に対して対称な2点における接線と軸の交角は等しい。本研究では、これら2次曲線の共通性質に着目し、軸対称点の接線情報から2次曲線のパラメータを抽出する新たな方法を提案する。

2次曲線の軸とその曲線の交点である軸上点は $\theta-\rho$ 平面上において、 $\theta = \pi, \theta = \pi/2$ の点となり、2次曲線の軸に対象な曲線上の2点である軸対称点は $\theta-\rho$ 平面上で、 $\theta = \pi/2 + \theta_0, \pi/2 - \theta_0$ 、および、 $\theta = \pi + \theta_0, \pi - \theta_0$ の点である (Fig. 5.5)。楕円の場合、軸対称点における接線を示す (θ, ρ) 値は (5.8) 式より、

$$\rho(\pi/2 + \theta_0) = -x_0 \sin \theta_0 + y_0 \cos \theta_0 \pm \sqrt{a^2 \sin^2 \theta_0 + b^2 \cos^2 \theta_0} \quad (5.15)$$

$$\rho(\pi/2 - \theta_0) = x_0 \sin \theta_0 + y_0 \cos \theta_0 \pm \sqrt{a^2 \sin^2 \theta_0 + b^2 \cos^2 \theta_0} \quad (5.16)$$

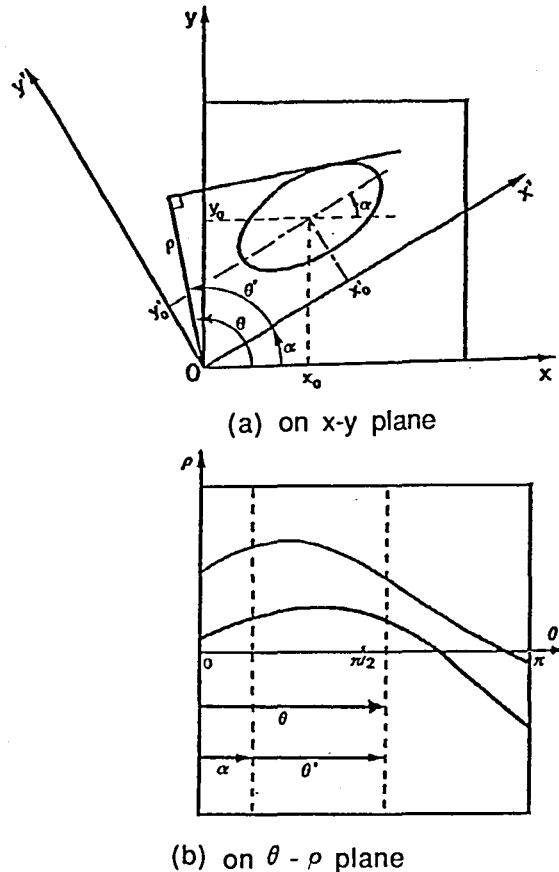


Fig.5.4 Axis gradient α of second degree curve on $\theta-\rho$ plane.

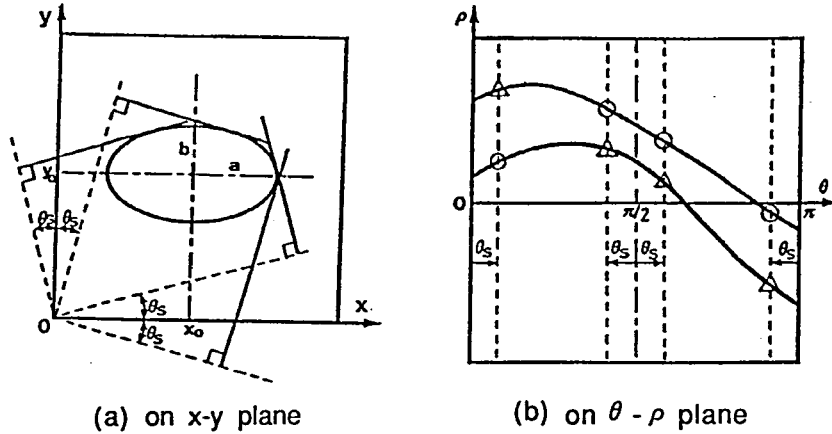


Fig.5.5 Relationship between (θ, ρ) values of tangent lines at symmetrical points with respect to axis of curve and parameter of ellipse.

$$\rho(\pi + \theta_s) = -x_0 \cos \theta_s - y_0 \sin \theta_s \pm \sqrt{a^2 \cos^2 \theta_s + b^2 \sin^2 \theta_s} \quad (5.17)$$

$$\rho(\pi - \theta_s) = -x_0 \cos \theta_s + y_0 \sin \theta_s \pm \sqrt{a^2 \cos^2 \theta_s + b^2 \sin^2 \theta_s} \quad (5.18)$$

となる。これらより (x_0, y_0) は、

$$x_0 = \frac{\rho(\pi/2 - \theta_s) - \rho(\pi/2 + \theta_s)}{2 \sin \theta_s} \quad (5.19)$$

$$y_0 = \frac{\rho(\pi - \theta_s) - \rho(\pi + \theta_s)}{2 \sin \theta_s} \quad (5.20)$$

で算出される。また、算出された (x_0, y_0) から (5.8) 式は、

$$\{\rho(\theta) - x_0 \cos \theta - y_0 \sin \theta\}^2 = a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta \quad (5.21)$$

で表現される。ここで、

$$f(\theta, x_0, y_0) = \{\rho(\theta) - x_0 \cos \theta - y_0 \sin \theta\}^2 \quad (5.22)$$

とすると、 θ_1, θ_2 の2点の集積点から

$$f(\theta_1, x_0, y_0) = a^2 \cos^2 \theta_1 + b^2 \sin^2 \theta_1 \quad (5.23)$$

$$f(\theta_2, x_0, y_0) = a^2 \cos^2 \theta_2 + b^2 \sin^2 \theta_2 \quad (5.24)$$

これより

$$a^2 = \frac{f(\theta_1, x_0, y_0) \sin^2 \theta_2 - f(\theta_2, x_0, y_0) \sin^2 \theta_1}{\cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2} \quad (5.25)$$

$$b^2 = \frac{f(\theta_1, x_0, y_0) \cos^2 \theta_2 - f(\theta_2, x_0, y_0) \cos^2 \theta_1}{\sin^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 - \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2} \quad (5.26)$$

となり、 (x_0, y_0) の解に対してパラメータ (a, b) が算出され、楕円パラメータが決定される。

双曲線の場合、 (x_0, y_0) の抽出に関しては (5.19) (5.20) 式と同一の関係式が成立ち、 (a, b)

抽出に関しては,

$$a^2 = \frac{f(\theta_1, x_0, y_0)\sin^2\theta_2 - f(\theta_2, x_0, y_0)\sin^2\theta_1}{-\cos^2\theta_1\sin^2\theta_2 + \sin^2\theta_1\cos^2\theta_2} \quad (5.27)$$

$$b^2 = \frac{f(\theta_1, x_0, y_0)\cos^2\theta_2 - f(\theta_2, x_0, y_0)\cos^2\theta_1}{-\sin^2\theta_1\cos^2\theta_2 + \cos^2\theta_1\sin^2\theta_2} \quad (5.28)$$

と, 楕円の場合の関係式(5.25), (5.26)式の分母の符号が変わるだけとなる.

また, 放物線の場合, (5.9)式より, 軸対称点は,

$$\rho(\pi/2 + \theta_s) = -x_0\sin\theta_s + y_0\cos\theta_s - \frac{\sin^2\theta}{4a\cos\theta} \quad (5.29)$$

$$\rho(\pi/2 - \theta_s) = x_0\sin\theta_s + y_0\cos\theta_s - \frac{\sin^2\theta}{4a\cos\theta} \quad (5.30)$$

$$\rho(\pi + \theta_s) = -x_0\cos\theta_s - y_0\sin\theta_s + \frac{\cos^2\theta}{4a\sin\theta} \quad (5.31)$$

$$\rho(\pi - \theta_s) = -x_0\cos\theta_s + y_0\sin\theta_s - \frac{\cos^2\theta}{4a\sin\theta} \quad (5.32)$$

で表される. これらより

$$x_0 = \frac{\rho(\pi/2 - \theta_s) - \rho(\pi/2 + \theta_s)}{2\sin\theta_s} \quad (5.33)$$

$$x_0 = \frac{\rho(\pi - \theta_s') + \rho(\pi + \theta_s')}{-2\cos\theta_s'} \quad (5.34)$$

が成立ち, 放物線の軸が決定される.

なお, (5.33), (5.34)式は $\theta_s = \pi/2 - \theta_s'$ において同一関係式となり, パラメータ抽出は楕円, 双曲線の場合と同一式(5.33)で算出される. また算出された x_0 に対して,

$$\rho(\theta) - x_0\cos\theta = y_0\sin\theta - \frac{\cos^2\theta}{4a\sin\theta} \quad (5.35)$$

ここで,

$$f(\theta, x_0) = \rho(\theta) - x_0\cos\theta \quad (5.36)$$

とすると,

$$f(\theta_1, x_0) = y_0\sin\theta_1 - \frac{\cos^2\theta_1}{4a\sin\theta_1} \quad (5.37)$$

$$f(\theta_2, x_0) = y_0\sin\theta_2 - \frac{\cos^2\theta_2}{4a\sin\theta_2} \quad (5.38)$$

これより,

$$a = \frac{\sin^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_2 \cos^2 \theta_1}{4 \{ f(\theta_1, x_0) \sin \theta_2 - f(\theta_2, x_0) \sin \theta_1 \} \sin \theta_1 \sin \theta_2} \quad (5.39)$$

$$y_0 = \left\{ f(\theta_1, x_0) + \frac{\cos^2 \theta_1}{4 a \sin \theta_1} \right\} / \sin \theta_1 \quad (5.40)$$

または,

$$y_0 = \left\{ f(\theta_2, x_0) + \frac{\cos^2 \theta_2}{4 a \sin \theta_2} \right\} / \sin \theta_2 \quad (5.41)$$

となり, 放物線パラメータが決定できる.

5.3 $\theta - \rho$ 平面における集積点の抽出

前節で示したように, $\theta - \rho$ 平面上における度数極大点 (集積点) から直線および2次曲線の線分パラメータが容易に得られる. このため, $\theta - \rho$ ハフ変換平面における集積点の抽出が重要となる. この集積点抽出においては, 直線の変換軌跡による集積点と2次曲線の変換による集積点とを区別して抽出する必要がある. 本節では, 直線と2次曲線の集積点の特徴を明確にし, 各々の集積点を区別して抽出する方法を提案する.

5.3.1 集積勾配による直線と曲線の集積点分離抽出

Fig. 5.6 は, 直線(a)と楕円(b)を $\theta - \rho$ 平面へハフ変換したときの変換画像と ρ 方向における集積度数を示したものである. このハフ変換画像から直線および2次曲線のパラメータ決定のために抽出しなければならない箇所は, 直線の場合, 直線のハフ変換画像における最大集積点 (図中A) であり, 2次曲線の場合, 各 θ における度数の極大点 (ρ_1, ρ_2) である.

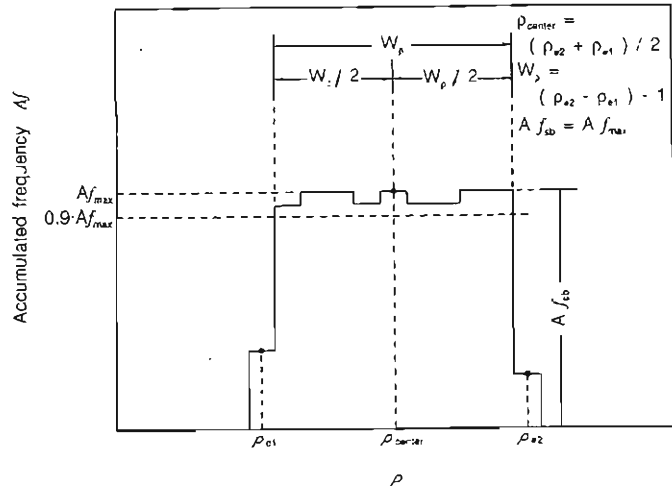
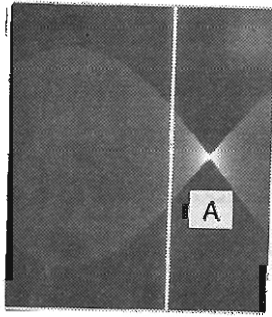
Fig. 5.6 からわかるように, 直線のパラメータを示す最大集積点である直線の集積点では, 集積度数が大きく, 近傍領域中極大値を呈する. 一方, ハフ変換像において, 曲線上の各接線に対する集積点である曲線の集積点では, ρ 方向において極大値を呈する. また, 直線の集積点, 曲線の集積点とも ρ 方向における集積勾配が大きい.

なお, 本研究では, 集積勾配を Fig. 5.7 に示すように, ρ 方向における前方勾配 $\tan \gamma_f$ と後方勾配 $\tan \gamma_b$ を

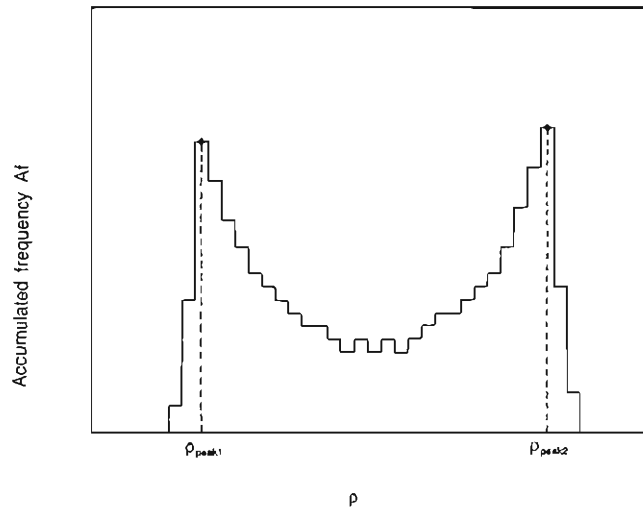
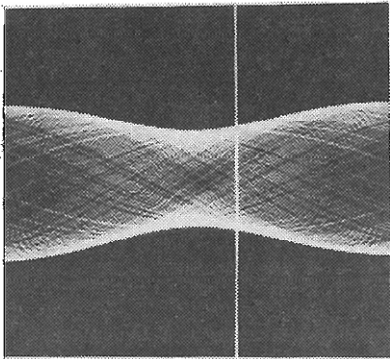
$$\tan \gamma_f = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \{ (A f(\rho_0) - A f(\rho_{+k}) / k) \} \quad (5.42)$$

$$\tan \gamma_b = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \{ (A f(\rho_0) - A f(\rho_{-k}) / k) \}$$

で定義し算出している. さらに, 個々の点における集積勾配の大小比較を行い,



(a) Hough transform of straight line



(b) Hough transform of ellipse line

Fig.5.6 Transition of accumulation degree on ρ direction.

$$\begin{aligned} \gamma_{\max} &= \max(\gamma_f, \gamma_b) \\ \gamma_{\min} &= \max(\gamma_f, \gamma_b) \end{aligned} \quad (5.43)$$

としている。なお、本研究で対象とした線画のハフ変換画像上において、直線の集積点、曲線の集積点の ρ 方向における集積度数変化が3程度であることから、(5.42)式で示した集積勾配算出において、nを3で計算している。

直線の集積点の集積度数および集積勾配は、直線線分の長さおよび標本化画像上における線分点列の回帰直線からのズレ度合い（直線度）により変化

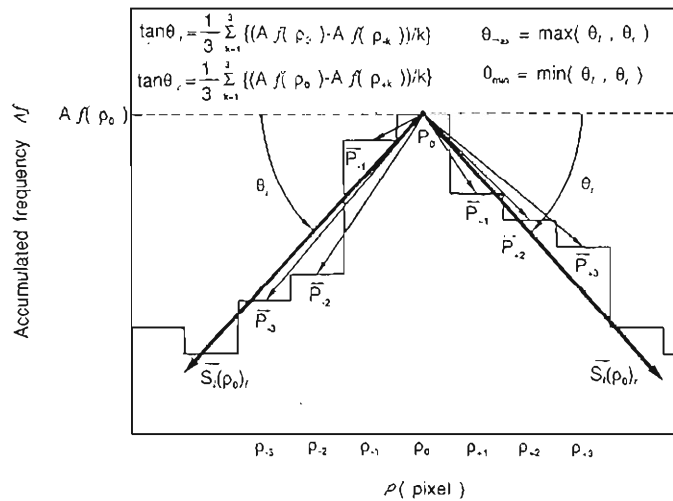


Fig.5.7 Definition of accumulation gradient.

する。Fig.5.8 は、線幅 1(pixel) 直線線分の長さが 30 (pixel), 60 (pixel) の線分をハフ変換したときの線分の直線度に対する直線の集積点の集積度数, 集積勾配を示したものである。線分の直線度は標本化画像における線分点列の回帰直線からの個々の点列のズレの分散値で示している。Fig.5.9 は分散値 0.05 と 0.30 の直線点列の一例を示したものである。Fig.5.8 から分かるように, 集積度数, 集積勾配は線分長に応じて大きくなる。また, 線分の直線度が悪くなる (分散値が大きくなる) と集積度数, 集積勾配ともに小さくなる。

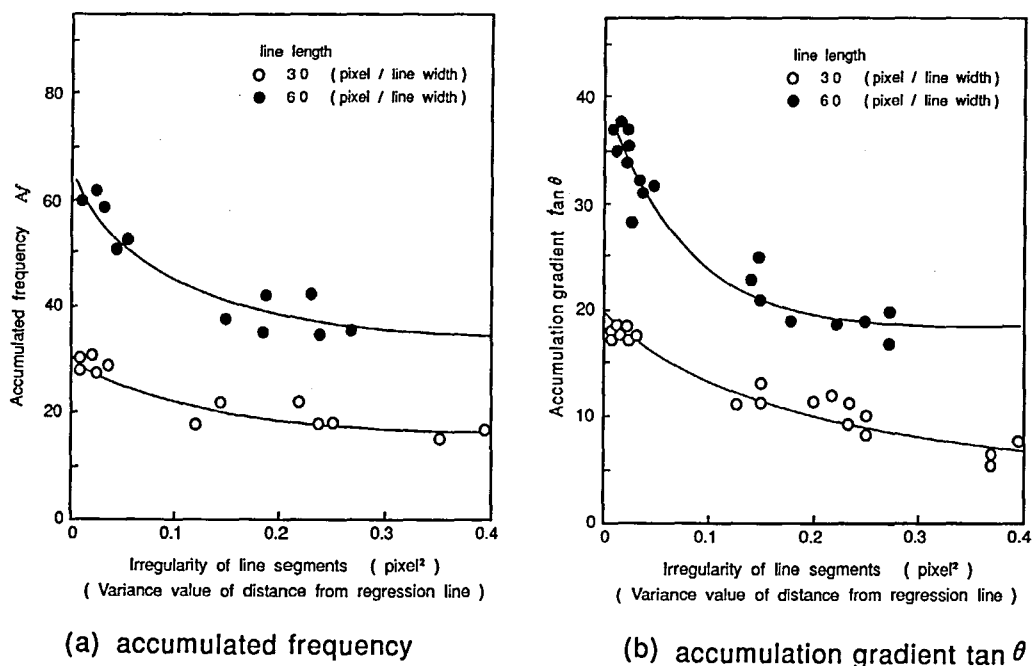


Fig.5.8 Relationship between irregularity of line segments and accumulation for accumulated point of straight line segment.

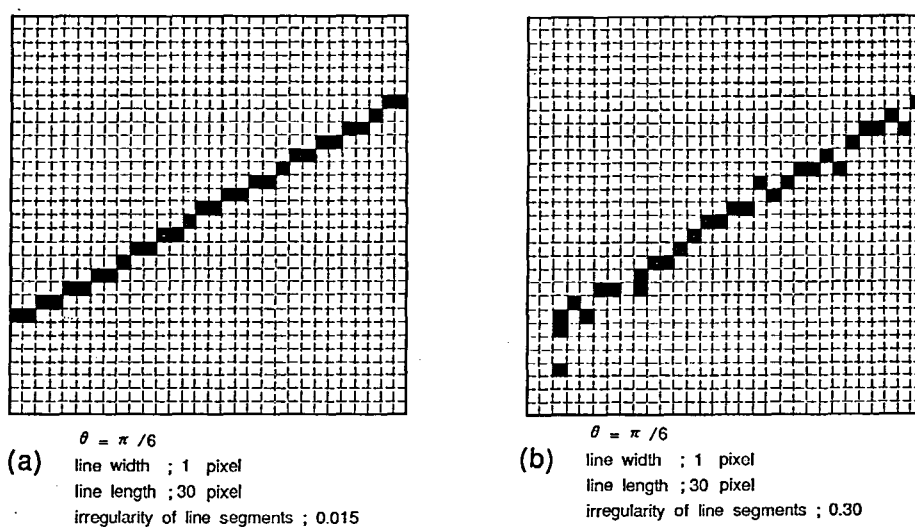


Fig.5.9 Irregularity of straight line segment.

直線のハフ変換像の集積境界における集積度数，集積勾配を示したものがFig. 5.10である．図は直線の集積点からの角度にともなう集積度数，集積勾配の変化を示したもので，これからわかるように，直線の集積点から離れるほど集積度，集積勾配ともに小さくなる．直線の集積点から $\pi/36$ (rad) 以上はなれた点を集積境界点とすれば，集積境界では線分長による影響はほとんどなく，集積度数 5 以下，集積勾配 4 以下となっている．

また，曲線の集積点における集積度数，集積勾配は曲線上の各点における曲率により変化をする．Fig. 5.11は，半径 r の円に対するハフ変換像に対して，曲線の集積点の集積度数，集積

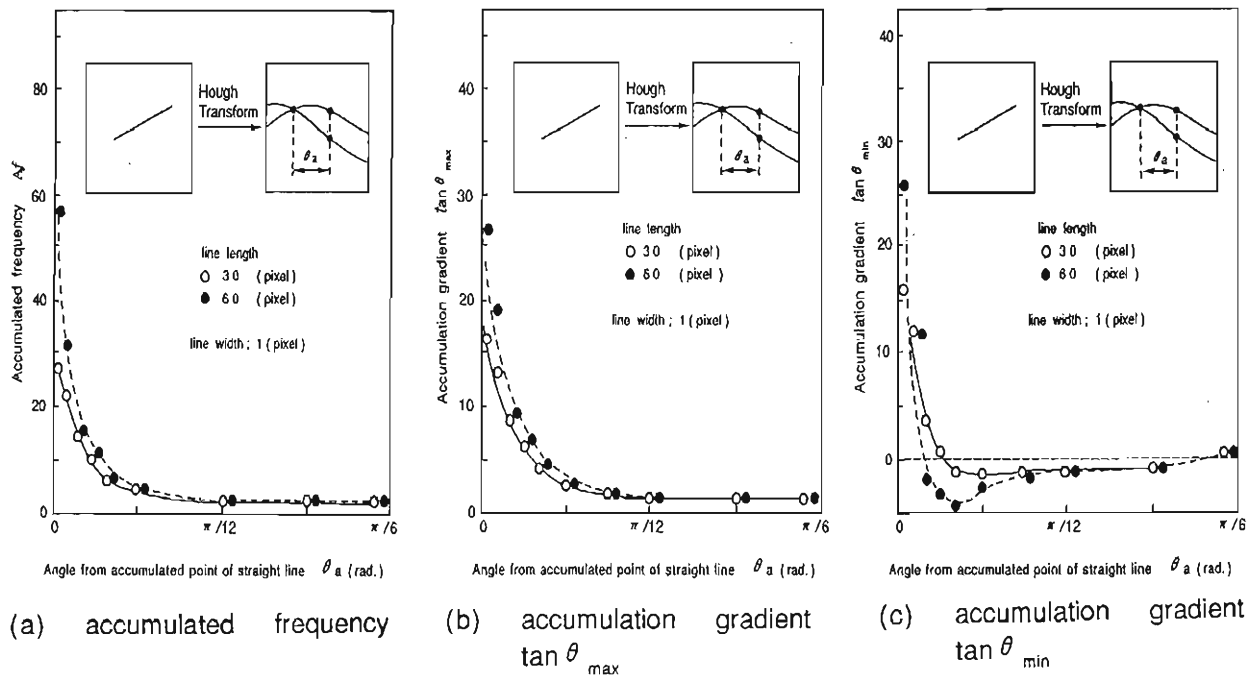


Fig.5.10 Transition of accumulation according to angle from accumulated point of straight line.

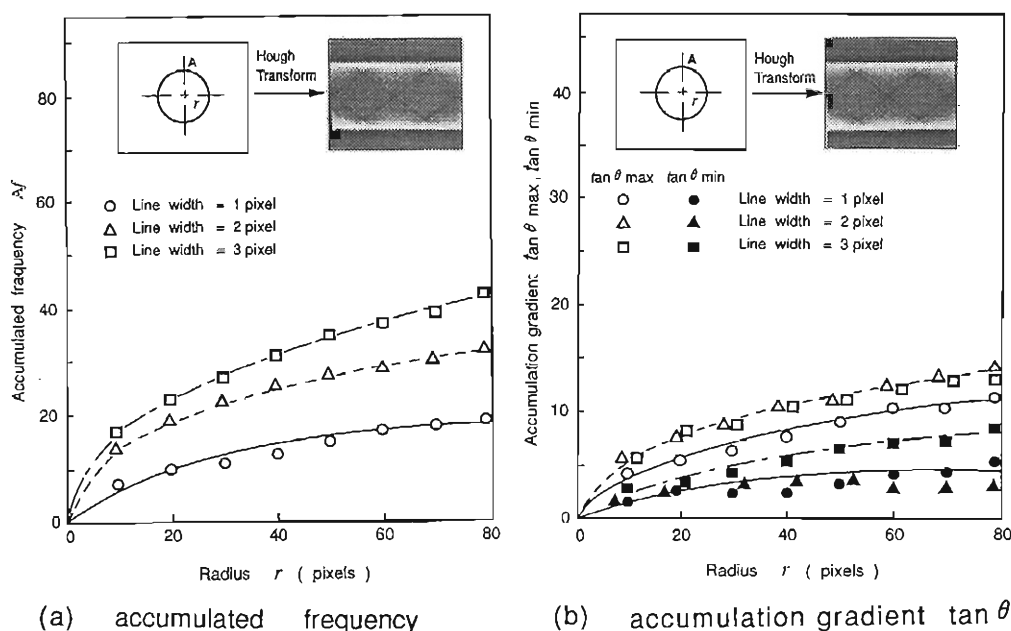


Fig.5.11 Relation between radius of curved line segment and accumulation degree.

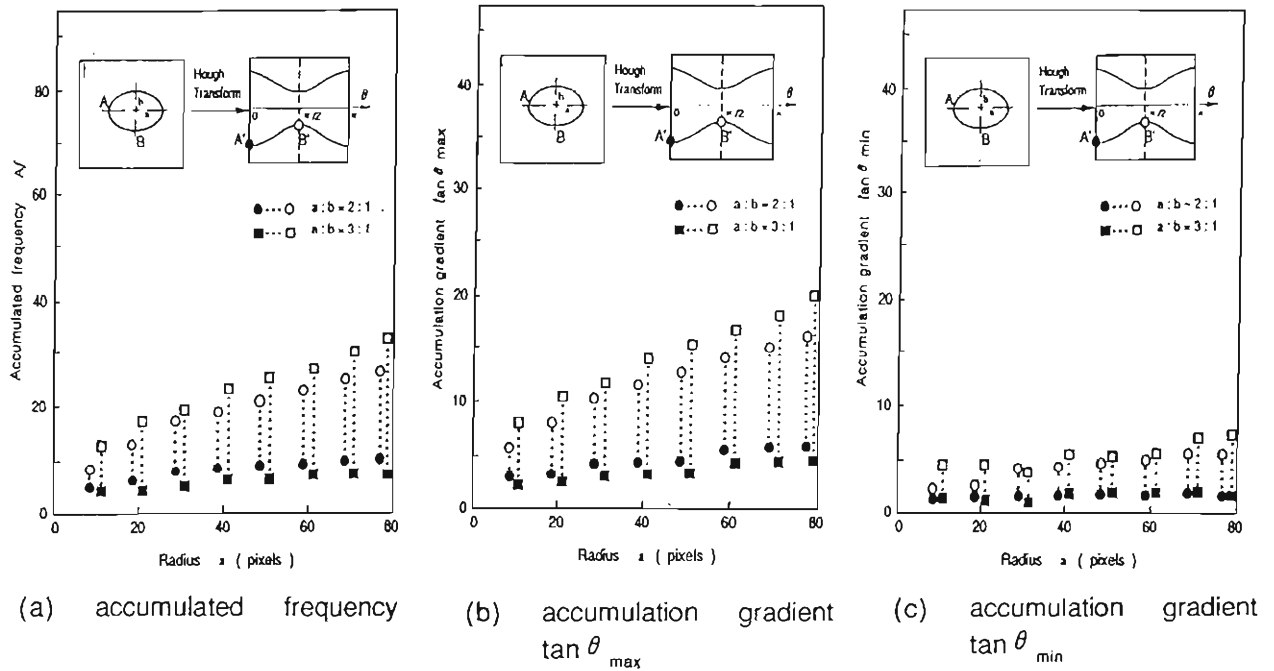
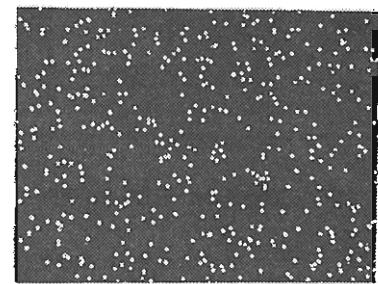


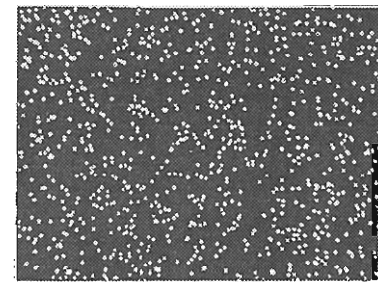
Fig.5.12 Relation between radius of ellipse line and accumulated degree.

勾配を調査したもので、曲線の曲率と集積度数、集積勾配の関係を示したものである。なお、各曲線は標準化画像上に描画したものであり、標準化に伴うデータのばらつきを有している。これらの図から分かるように、曲率の大きな曲線ほどハフ変換画像上での曲線の集積点における集積度数、集積勾配が大きくなる。Fig. 5.12は、長軸径 a と単軸径 b の比が $2:1$ と $3:1$ の楕円曲線における曲線の集積点での集積度数、集積勾配を示したものである。楕円曲線の場合、長軸上の点 A で最小曲率となり、短軸上の点 B で最大曲率となる。このため、曲線の集積点の集積度数、集積勾配はこれら2点に対する値の間の値を取ることになる。この図からわかるように、単軸上の点 B において、集積度数、集積勾配が大きくなる。

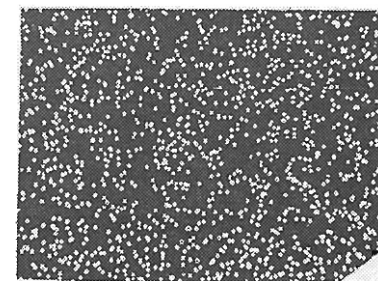
次に問題となるのは、直線、曲線の集積点抽出の阻害要因となる線画画像上におけるノイズ点である。このノイズ点によるハフ変換画像での影響を調べるため、Fig. 5.13に示すごま塩雑音ノイズを画像上に生成し、これらの画像をハフ変換して得られるハフ変換画像における集積度数、集積勾配を調べた結果がFig. 5.14である。



(a) 1%



(b) 2%



(c) 3%

Fig.5.13 Additional noise.

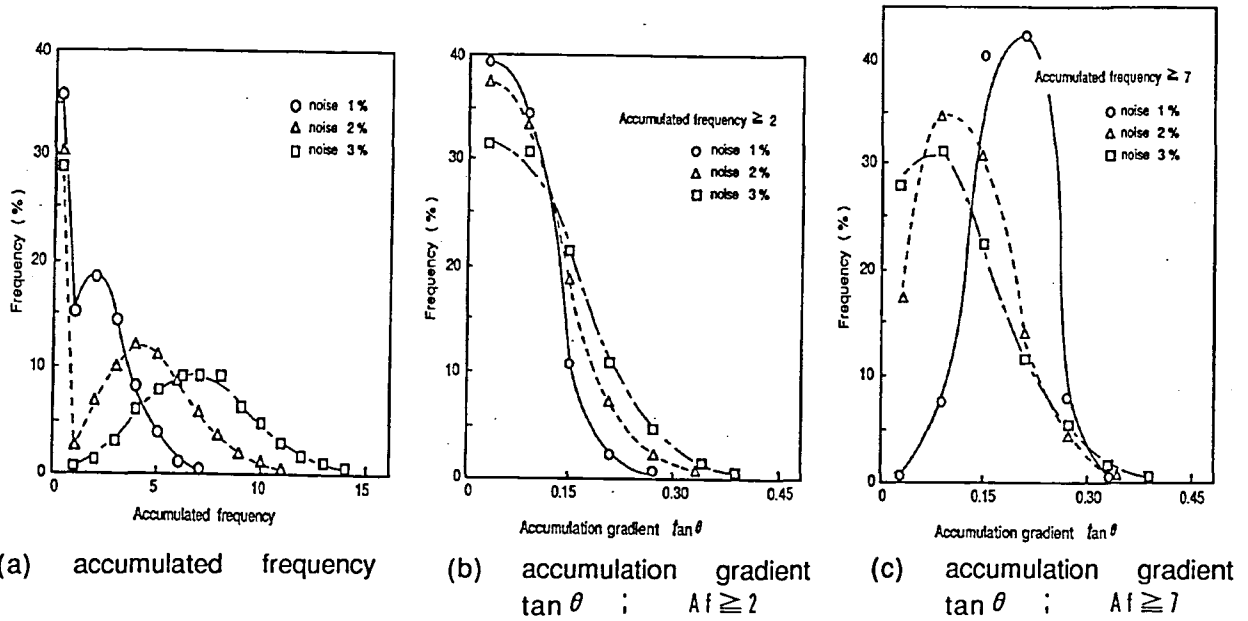


Fig.5.14 Accumulated degree for point transformed by noise elements.

集積勾配は、ノイズ点による集積度数が 2 以上の点、7以上の点における集積勾配値の度数分布として示している。これらのごま塩雑音ノイズによる集積度数は、

$$\begin{aligned}
 & \text{ノイズ1\% 集積度数} \leq 6 \\
 & \text{ノイズ2\% 集積度数} \leq 10 \\
 & \text{ノイズ3\% 集積度数} \leq 13
 \end{aligned}
 \tag{5.44}$$

である。また、集積勾配はノイズの量により多少の変化はあるが、1~3%のノイズ量においては、集積勾配は 0.6 以下となっている。

以上の結果を整理したものが Fig. 5.15 である。なお、直線線分は線分長 30(pixel)以上、線分がたつき 0.35 (pixel²)以下の線分であり、曲線は曲率半径 20(pixel)以上の曲線の値を示したものである。この図からわかるように、

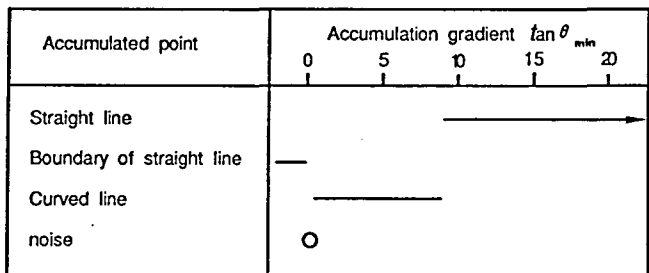
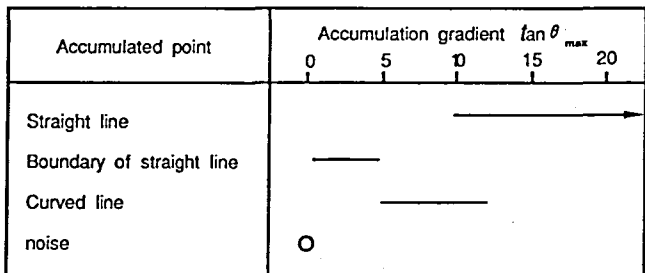
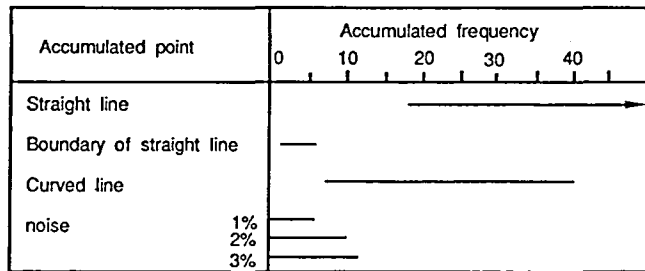


Fig.5.15 Comparison of accumulated degree between each elements.

$$\begin{aligned}
 \text{直線の集積点} & : \text{集積度数} \geq 18, \quad \tan \theta_{\max} \geq 10, \quad \tan \theta_{\min} \geq 8 \\
 \text{曲線の集積点} & : 12 \geq \text{集積度数} \geq 5, \quad 12 \geq \tan \theta_{\max} \geq 5, \quad 8 \geq \tan \theta_{\min} \geq 1 \quad (5.45) \\
 \text{直線の集積境界点} & : 6 \geq \text{集積度数} \geq 1, \quad 5 \geq \tan \theta_{\max} > 0, \quad 1 \geq \tan \theta_{\min} \geq -4
 \end{aligned}$$

となり、 $\theta - \rho$ 平面におけるハフ変換画像の各点の集積度数および集積勾配から各集積点を区別して抽出することが可能となることを示している。なお、長さ30(pixel)以下の直線線分および曲率半径80(pixel)以上の曲線を完全に分離抽出することは困難である。

5.3.2 θ 方向重み付フィルターおよび集積度数分散値に基づく直線の集積点抽出

前項において、集積勾配値を用いた直線と曲線の集積点分離抽出方法を示した。この集積度数値、集積勾配値の閾値処理により抽出される直線の集積点は、直線のパラメータを表す本来の集積点一点のみが抽出されるのではなく、この集積点を含む近傍領域が抽出される。ノイズや線分のがた付きがない線分の場合、抽出領域内の最大集積点を抽出すればよい。しかし、一般の対象画像においては、ノイズや線分がた付きを有しており、Fig. 5.16に示すように、最大集積点が線分パラメータを表す点とならないことがある。これは、線画上のノイズや線分がた付きがハフ変換平面上でのノイズとなるため

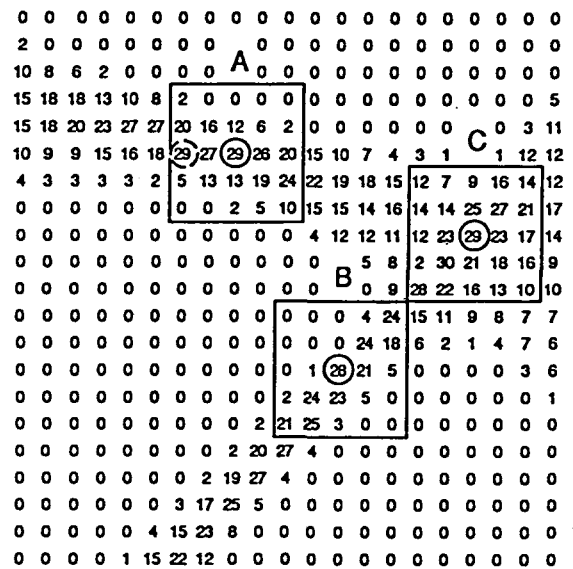


Fig.5.16 Accumulation for line segments.

である。また、図中のCの領域はA、Bで示される2直線のハフ変換軌跡の交差部であり、閾値処理では集積点領域として誤って抽出される。このため、直線の集積点抽出に対し、ノイズ成分の平滑化フィルター処理および集積点と集積交差部の判断処理を検討する必要がある。

まず、ノイズ成分を平滑化させるためのフィルター処理について検討する。

フィルター処理としては、一般の濃淡画像でよく用いられる8近傍平滑処理 (Fig. 5.17(a))と θ 方向にのみ平滑化を行う θ 方向フィルター (Fig. 5.17(b))、および、この θ 方向フィルターに度数重み付けをした θ 方向重み付けフィル

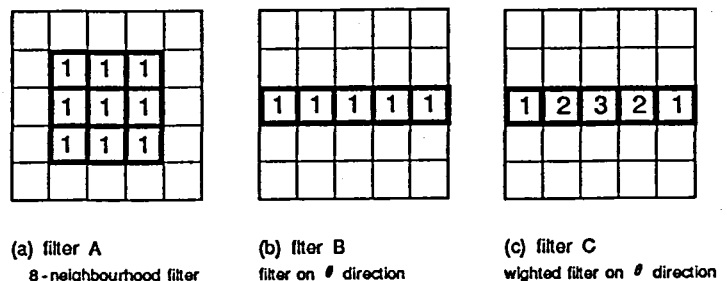


Fig.5.17 Filter for detection of accumulated point for straight line.

ター (Fig. 5.17(c)) を用いている。この θ 方向フィルターは、直線のハフ変換軌跡の特性に基づいて設定したものである。即ち、直線のハフ変換画像は Fig. 5.2 に示したように、 θ 方向に帯状に集積し、直線のパラメータを表す集積点の ρ 方向には集積しない。このため、 ρ 方向に対する平滑化は、本来の集積点の集積度数を減ずる方向に働く。このことから、直線の集積点抽出のためのフィルターとしては θ 方向のみを考慮するのがよいと考えられる。

Fig. 5.18, Fig. 5.19 は、各種の線分長、線分がた付きの線分に対して、集積点を抽出したときの集積点の抽出位置誤差と集積点の抽出度を示したものである。図 (a), (b), (c) は、各々線分の直線度で分類して示したものである。(a) は直線度が 0.0~0.1 の線分に対する結果である。また、(b) は直線度 0.1~0.2, (c) は直線度 0.2~0.3 の線分に対する結果である。なお、直線度は前述したように、標準化画像における線分点列の回帰直線からの個々の点のズレの分散値で示している。Fig. 5.18 からわかるように、いずれのフィルターを用いた場合も線分長が長くなるほど集積点の抽出位置誤差が小さくなっている。また、 θ 方向重み付けフィルターを用いることにより、30 pixel 長以上で、線分がた付き 0.3 以下の線分に対して、抽出誤差 0.8 pixel 以下の高精度な抽出がされている。また、Fig. 5.19 からわかるように、線分長が長くなるほど集積点の未抽出が少なくなる。さらに、 θ 方向重み付けフィルターを用いることにより、線分長 30 pixel 以上、線分の直線度 0.2 以下の線分の集積点を確実に抽出可能である。

Fig. 5.20 は、図に示すような交角 θ_1 で交わる 2 直線の各フィルターによる分離抽出度を示したものである。 θ 方向重み付けフィルターを用いることにより、ハフ変換平面上で交角の小さな連続する 2 直線の分離抽出度が良いことがわかる。

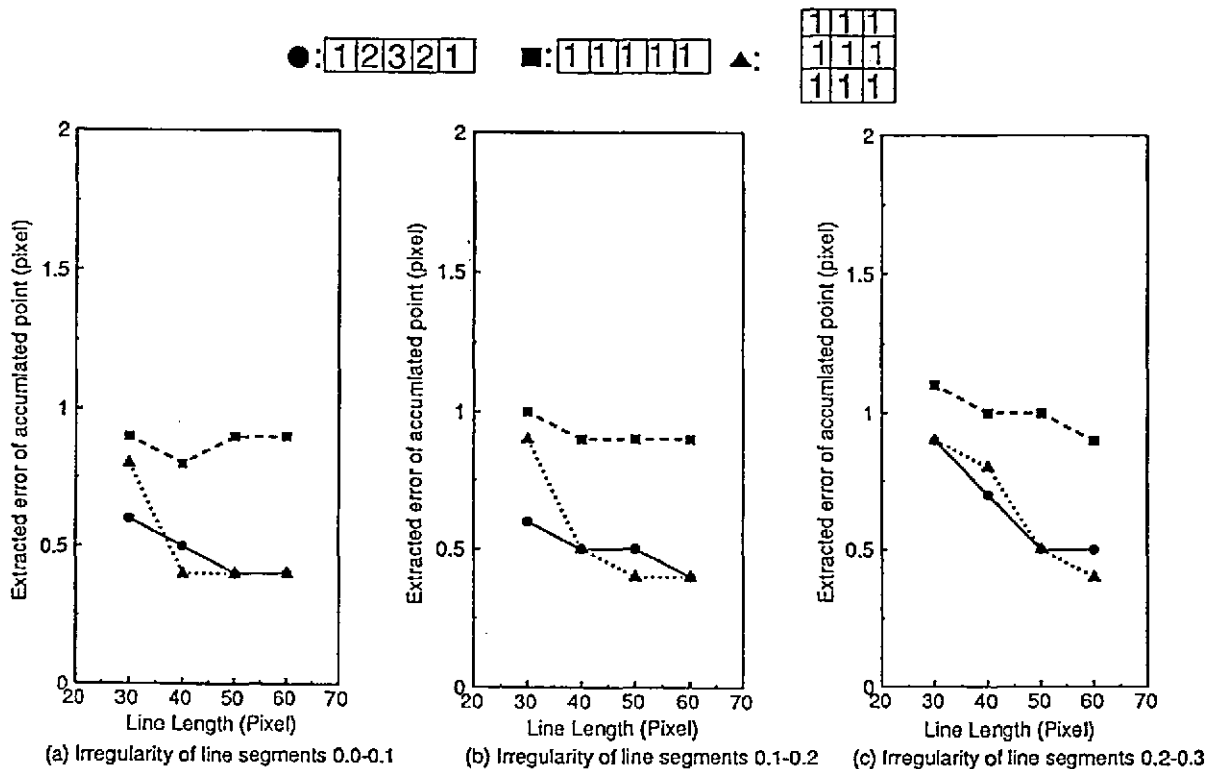


Fig.5.18 Extracted error of accumulated point for straight line.

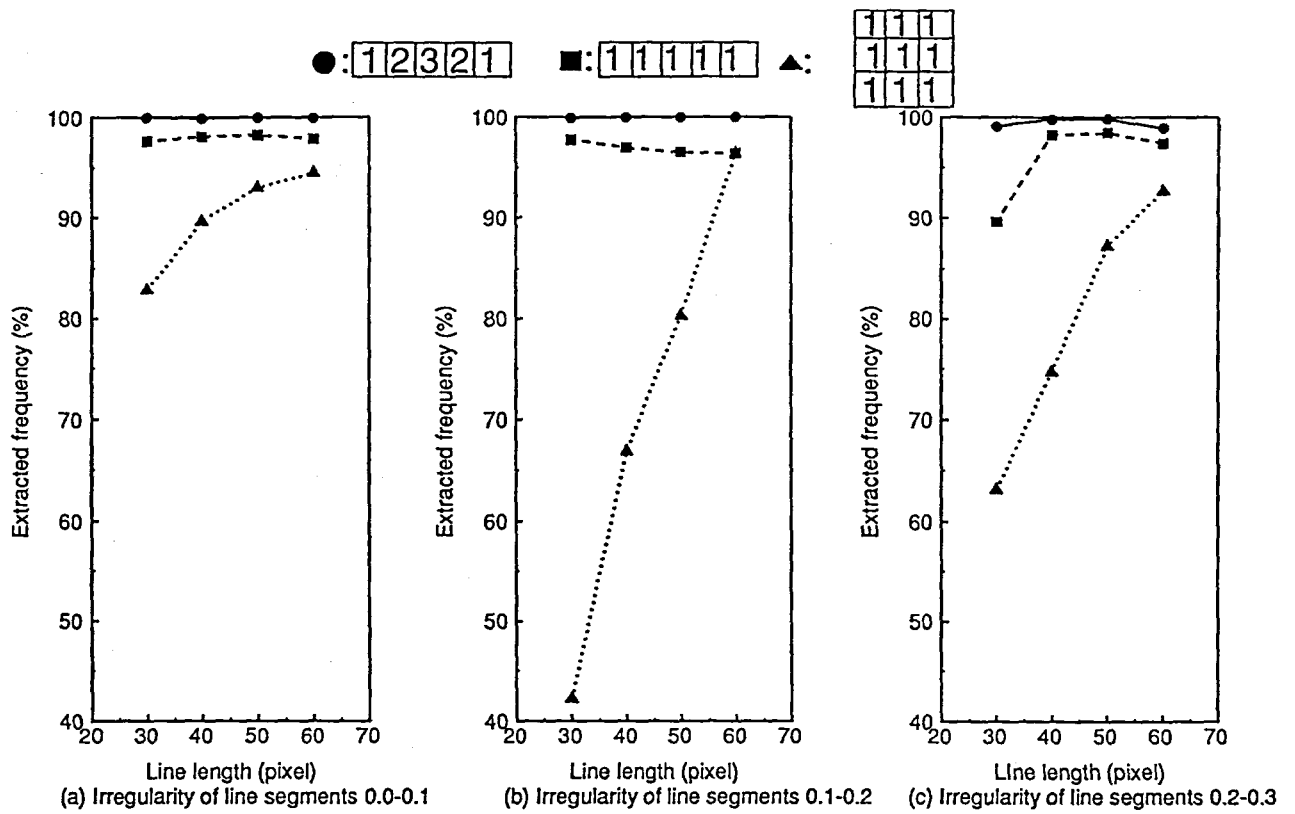


Fig.5.19 Extracted frequency of accumulated point for straight line.

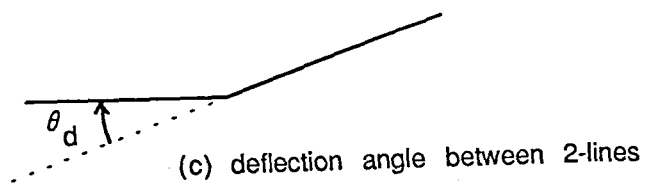
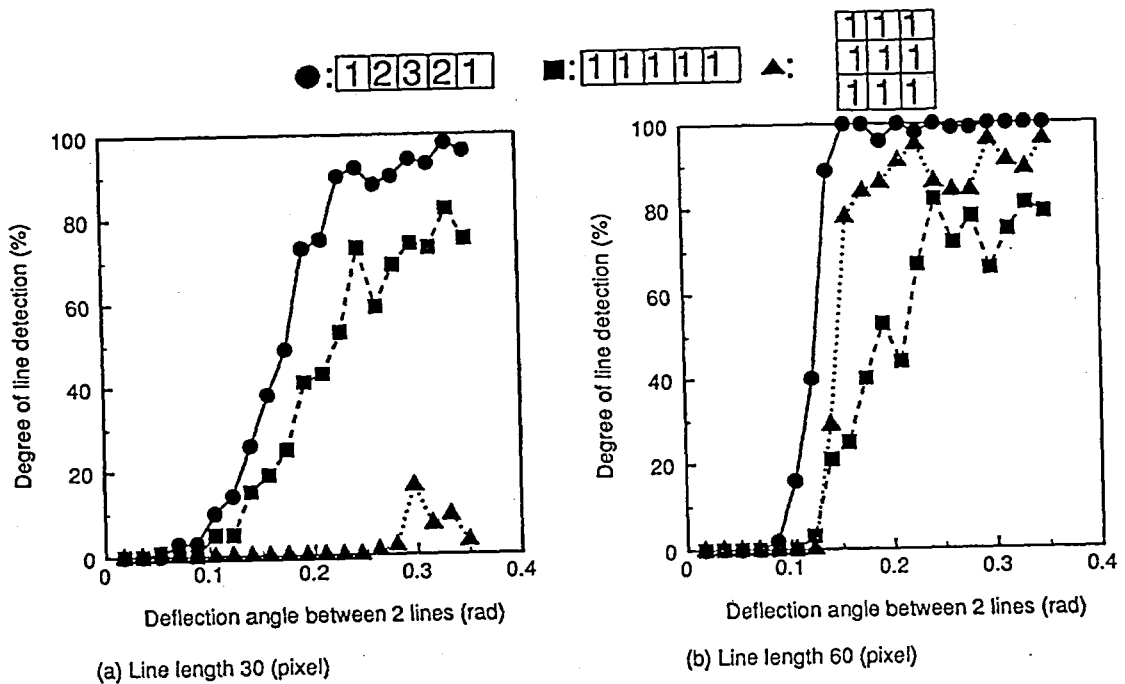
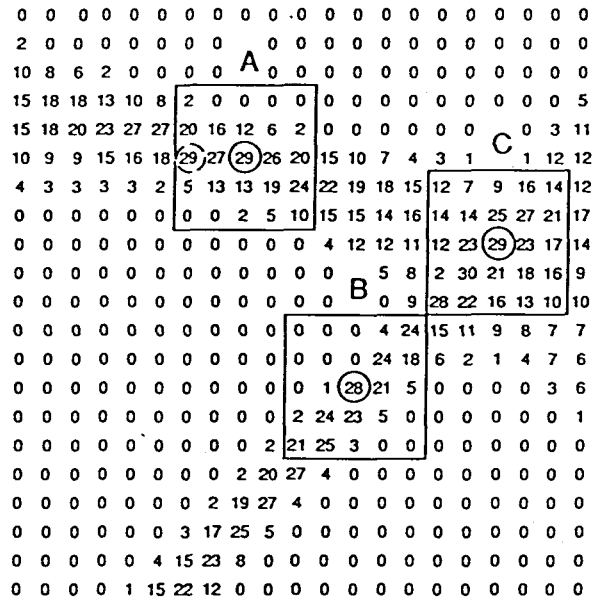


Fig.5.20 Degree of line detection of 2-lines with deflection angle θ_d .



Accumulated frequency on Hough plane

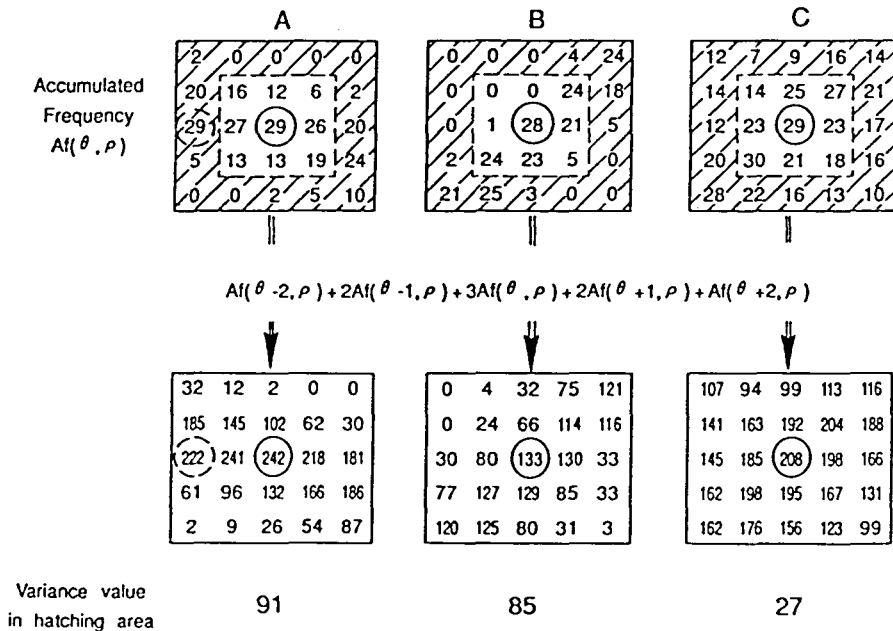


Fig.5.21 Judgement for accumulated point for straight line.

次に、直線の集積点と集積交差部の判定について検討する。

Fig. 5.16からもわかるように、直線の集積点軌跡領域は帯状に形成されるため、この帯に対する直交方向では、集積度数が低くなる。このため、集積点近傍領域内の度数分散値が高くなる。Fig. 5.21は、Fig. 5.16に示した各領域において、フィルター処理を施した後、斜線部の領域における度数分散値を算出した結果である。直線の集積点であるA、Bでは、分散値が91、85であるのに対し、直線の帯領域の交差部であるCでは、分散値が27と小さくなっている。このように、集積点近傍における度数分散値を用いることにより、集積交差部の判定ができ、誤って抽出することを防ぐことができる。

5.3.3 集積点の抽出方法および抽出結果

前項で示したように、直線、二次曲線の集積点はその点における集積度数および集積勾配で分離抽出ができる。Fig. 5.22は直線、二次曲線の集積点を区別して抽出するためのアルゴリズムを示したものである。

即ち、以下の手順で、直線の集積点と曲線の集積点を分離抽出し、線分パラメータ算出に使用する。

[手順1] ハフ変換画像を順次走査し、集積度数があるしきい値 (Th_{Af}) 以上の点を抽出する。

[手順2] 手順1で抽出された点に対して、集積勾配 ($\tan \theta_{max}, \tan \theta_{min}$) を算出する。

[手順3] 集積勾配値に応じて式(5.45)に準じて、直線の集積点候補と曲線の集積点を区別して抽出する。

[手順4] 直線の集積点候補として抽出された点の近傍において、 θ 方向重み付けフィルターおよび集積度数分散値により直線の集積点を決定・抽出する。

なお、集積度数のしきい値としては、実験結果に基づき、 $Th_{Af} = 5$ を選んでいる。このしきい値は、線画画像に含まれるごま塩ノイズによる集積点および直線の集積点から $\pi/36$ (rad) 以内の直線の集積境界を抽出しない集積度数値である。

Fig. 5.23は、以上の処理により (a) 図に示す線画画像から直線の集積点および楕円の集積点を抽出した一例を示したものである。図(b)は、(a) 図の線画画像をハフ変換した結果である。図(c), (d) は、集積勾配値を画像化して表したものである。さらに、図(e), (f) は、(b), (c), (d) 図に示された集積度数、集積勾配を基に抽出した直線の集積点(e)と曲線の集積点(f) を示したものである。これより、集積勾配が直線の集積点、曲線の集積点の集積特徴を良く表しているのがわかる。

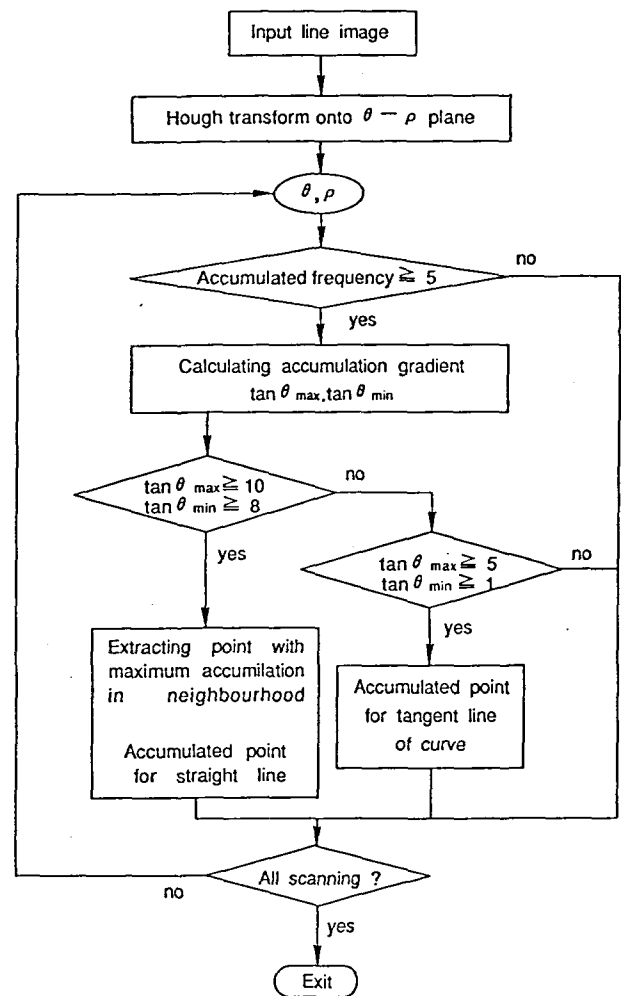
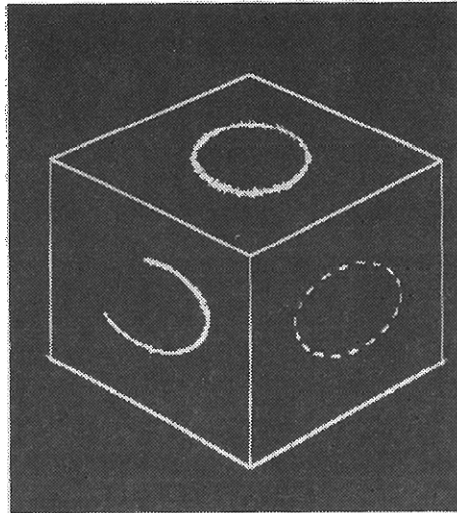
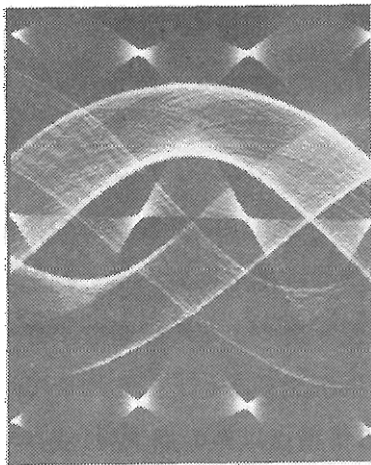


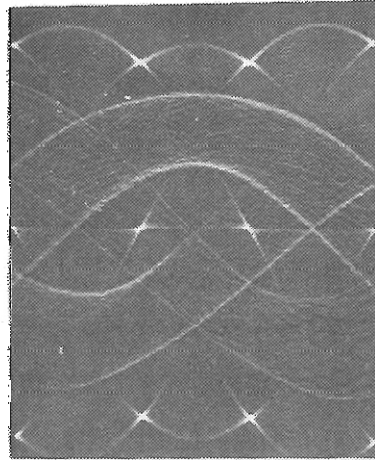
Fig.5.22 Algorithm for extraction of accumulated points.



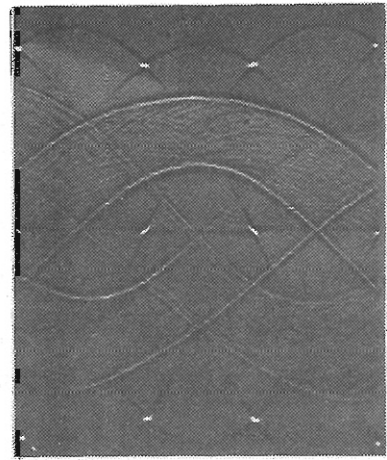
(a) line image for processing



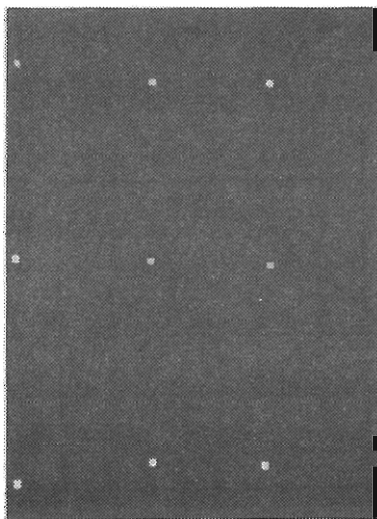
(b) Hough transformed image



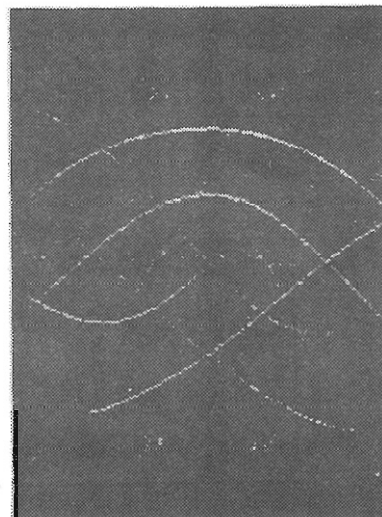
(c) image of accumulation gradient $\tan \theta_{\max}$



(d) image of accumulation gradient $\tan \theta_{\min}$



(e) extracted points for straight line segments.



(f) extracted points for curved line elements.

Fig.5.23 Extracted result of accumulated points.

5.4 直線線分のパラメータ抽出方法

第5.2節で示したように、 θ - ρ ハフ変換平面における極大集積点から直線の傾きと切片が求まり、変換軌跡の境界線がその直線の端点の軌跡を表している。このことから、前節で抽出した集積点をもとに直線線分のパラメータ（傾き、切片、両端点）を求めることができる。

Fig.5.24(a)に示した直線線分 l_{AB} の端点 $B(x_B, y_B)$ の θ - ρ ハフ変換平面上で、(5.3)式より、

$$\rho = x_B \cos \theta + y_B \sin \theta \quad (5.46)$$

で表される曲線 l_B (Fig.5.24(b))に変換される。この変換曲線上の2点 $C(\theta_c, \rho_c)$ 、 $D(\theta_D, \rho_D)$ は、 x - y 平面において l_C 、 l_{AB} に相当する。この2直線の交点が x - y 平面における直線線分の端点 B となる。つまり、直線線分の端点 $B(x_B, y_B)$ は(5.46)式より、

$$x_B = \frac{\rho_D \sin \theta_c - \rho_C \sin \theta_D}{\sin(\theta_c - \theta_D)} \quad (5.47)$$

$$y_B = \frac{\rho_C \sin \theta_D - \rho_D \sin \theta_c}{\sin(\theta_c - \theta_D)}$$

と算出される。つまり、直線線分の端点は θ - ρ ハフ変換平面における直線の変換軌跡の集積境界線上の任意の2点から容易に算出可能である。しかし、集積境界線抽出において、抽出点の位置誤差を含んでいるため、(5.47)式から算出される端点も誤差を持つ。この誤差を小さくするため、本方法では、集積境界線上の点の1点として、直線の集積点である P_S を用いている。この場合、(5.47)式から求められる端点の位置誤差は、直線の集積点以外の点 P_C に依存する。Fig.5.25は、直線の集積点 P_S を基準としたときの点 P_C の θ 値($\theta_{An\pm}$)と端点算出最大誤差のシミュレーション結果である。これは、集積境界線の ρ 値に ± 0.5 画素の誤差を与えたときの結果である。これからわかるように、端点算出誤差は $\theta_{An\pm}$ が大きいほど小さくなる。また、元の直線の θ 値が小さいほど算出誤差は小さくなる。このように、集積境界線を利用した場合、

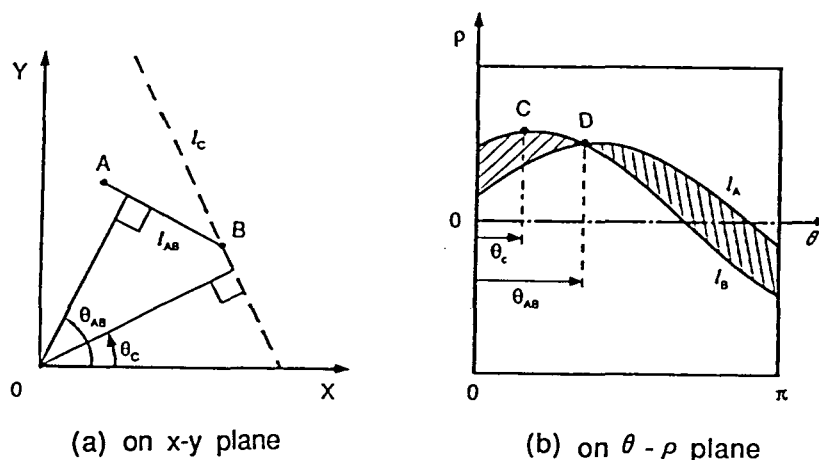


Fig.5.24 Decision of end points of straight line from boundary of accumulated area for straight line.

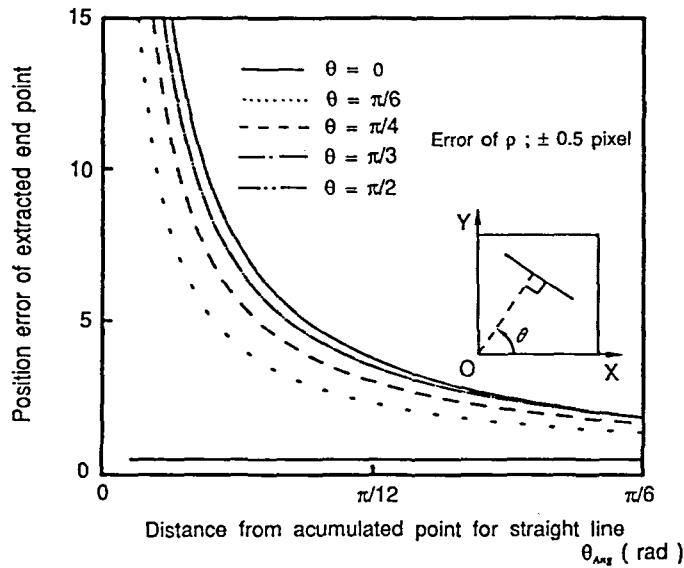


Fig.5.25 Relationship between distance from accumulated point for straight line and position error of extracted end point.

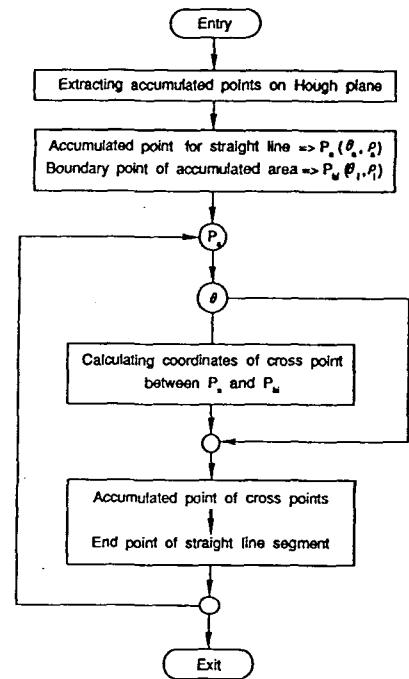


Fig.5.26 Algorithm for extracting parameters of straight line.

1対の P_s , P_c 点から端点を算出した場合、算出誤差を有し、さらに複数の線分が混在する画像から境界線上の組み合わせを決定することは困難である。このため、点 P_c を集積境界上で移動させ、各 P_c 点に対する端点を算出し、算出された端点の解算出集積度の高い点を端点として抽出している。この直線線分パラメータ抽出のアルゴリズムを示したものが、Fig. 5. 26 である。即ち、

[手順1] $\theta - \rho$ ハフ変換平面において、集積点を抽出する。

[手順2] 直線の集積点を $P_s(\theta_s, \rho_s)$ とし、 θ 値が

$$\theta_s - \pi/6 \leq \theta \leq \theta_s - \pi/12$$

または、

$$\theta_s + \pi/12 \leq \theta \leq \theta_s + \pi/6$$

を満足する集積境界上の点すべての点に対して、(5.47)式から交点(端点の候補点 (x_{e1}, y_{e1}))を算出する。

[手順3] 算出された端点候補から集積度数の高い点を直線線分の端点とする。

[手順4] [手順2], [手順3]をすべての直線の集積点に対して行う。

Fig. 5. 27は、この方法で、直線線分のパラメータを抽出した結果である。(a)図に示す線画をハフ変換した結果が図(b)である。このハフ変換画像から直線の集積点を抽出した結果が(c)図で、この集積点を基に Fig. 5. 26 の手順に従って直線の端点を抽出し、線画を復元した結果が図(d)である。この直線線画の復元において、端点の位置誤差を2画素程度有しているが、良好に線分が抽出・復元されている。

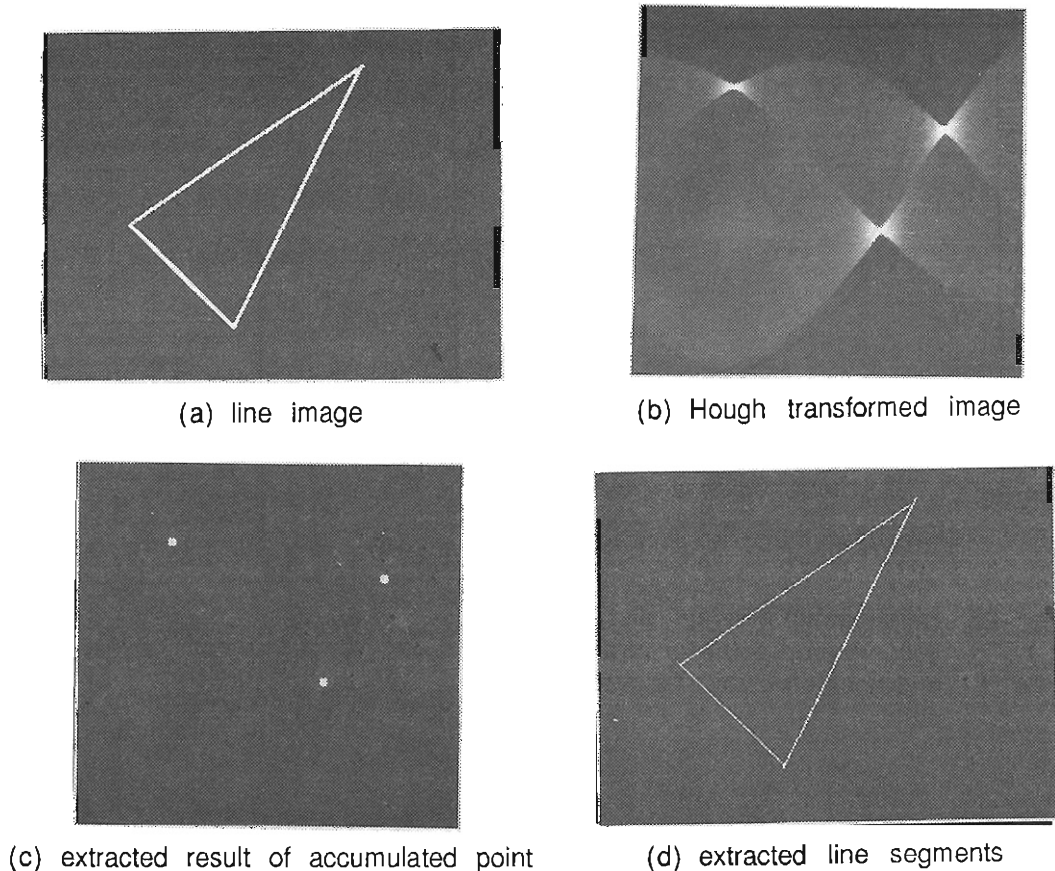


Fig.5.27 Example of parameter extraction for $\theta - \rho$ Hough transform for straight line image.

5.5 2次曲線のパラメータ抽出方法

5.5.1 抽出アルゴリズム

前述したように、2次曲線上の各点の接線を呈示する $\theta - \rho$ ハフ変換画像の集積点軌跡上の軸対称点に相当する (θ, ρ) 値から2次曲線のパラメータが算出できる。2次曲線が1本だけの線画の場合、軸対称点1対からだけでパラメータは決定可能である。しかし、処理対象画像は、 $x-y$ 、 $\theta-\rho$ 両平面とも画像標準化を行っており、さらに、 $x-y$ 平面上における線画にはノイズを含んでいる。このため、軸対称点1対のみから解を算出した場合、パラメータ抽出精度が悪くなる。さらに、線画像に複数の2次曲線が混在している場合、1つの (θ, ρ) 値に対して、2次曲線の数を n とすると、楕円、双曲線で $2n$ 通り、放物線で n 通りの解算出のための組合せが存在する。この組合せの中で、正規の解が得られるのは1通りだけであり、他の組合せによる解は不要解となる。ここで、同一の2次曲線に対する $\theta - \rho$ 平面上の集積点軌跡に対するパラメータ解は同一になるため、 $\theta - \rho$ 平面上での集積点抽出と同様、 $0 < \theta_0 < \pi/2$ で θ_0 を変化させ、各 θ_0 に対する算出解を整数化し、度数累積を行う。この度数累積において、累積度数極大点を持って解の同定をおこなう。

本方法では、累積度数極大点を算出パラメータ値±2の範囲内の度数合計値および分散値から判定している。

Fig.5.28は、このことを考慮して構築したパラメータ抽出アルゴリズムである。処理手順は以下の通りである。

- [手順1] 線画を θ - ρ 平面にハフ変換する。
- [手順2] ハフ変換画像から集積点を抽出する。
- [手順3] この集積点データに対して、 $0 < \alpha < \pi/2$ の各 α に対して、式(5.19), (5.20)から各 θ_α ($0 < \theta_\alpha < \pi/2$)に対する解 x'_0, y'_0 を算出し、2次元配列 $[\alpha, x'_0], [\alpha, y'_0]$ に個々に度数累積を行う。
- [手順4] 2次元配列データ内で、度数極大値を解の候補とする。
- [手順5] 同一の α に対して、解 x'_0, y'_0 が抽出されたものは、2軸を有する楕円または双曲線のパラメータ候補とする。一方、ある α に対して、解が x'_0, y'_0 の片方だけ抽出されたものは、1軸しか持たない放物線のパラメータ候補とする。

次に、楕円、双曲線に対しては、式(5.25)~(5.28)からパラメータ(a, b)を算出する。また、放物線に対しては、式(5.39), (5.40)に基づいてパラメータ(a, y_0)を算出する。

- [手順6] x'_0, y'_0 の算出解に対し、 θ - ρ 平面上の各 θ_α ($0 < \theta_\alpha < \pi/2$)に対する (θ, ρ) 値から解 a, b (放物線の場合は a, y_0)を算出し、2次元配列 $[a, b]$ (放物線の場合は $[a, y_0]$)に度数累積を行う。
- [手順7] 2次元配列データ内で、度数極大値を解(a, b) (放物線の場合は (a, y_0))として算出決定する。

以上の手順で、2次曲線のパラメータ x_0, y_0, a, b, α が決定される。この時、[手順4]で抽出された x_0, y_0 の解の内、誤って抽出された解に対しては、(a, b)の解が抽出されず、解から削除される。

以上のように、解の算出累積度数の大きいものを抽出することで、信頼度の高いパラメータ抽出が出来ると考えられる。

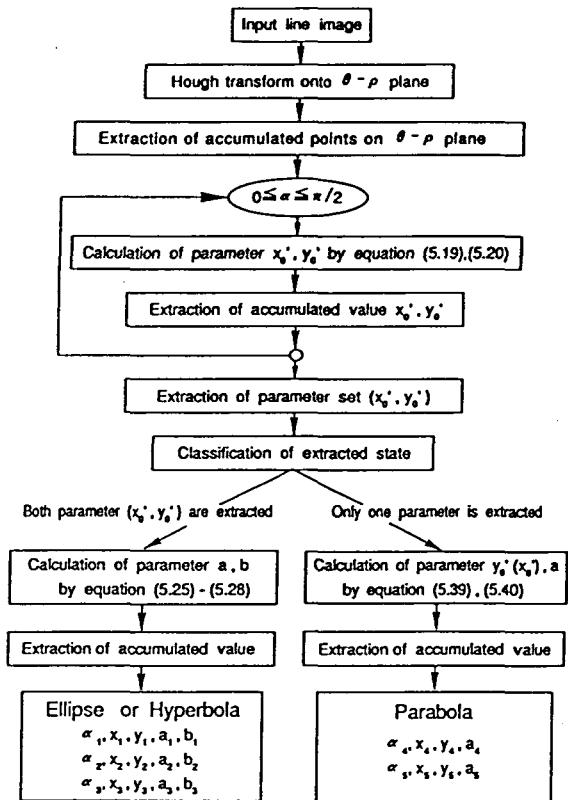


Fig.5.28 Algorithm for extracting parameters of 2nd. order curve.

5.5.2 パラメータの集積点分布

本手法では、パラメータの集積値から2次曲線のパラメータを決定している。このため、パラメータ決定に対して最も重要な点はパラメータの集積度である。

Fig.5.29は、図中に示す同じ軸の傾き $\alpha (= \pi/4)$ を有する3個の楕円に対して本手法を適用したときのパラメータ x_0' (x_0) の集積度数を示したものである。なお、この結果は ρ 値の誤差が $\theta - \rho$ 平面上で ± 0.5 以下の誤差(画素誤差)を含むものに対して処理したものである。また、 θ_s は $\pi/9 \sim \pi/3$ までを40等分した点を処理対象としたものである。パラメータ集積値は 14, 21, 50 であり、処理楕円のパラメータ x_0' 値 14.1, 21.2, 49.5 にほぼ一致している。

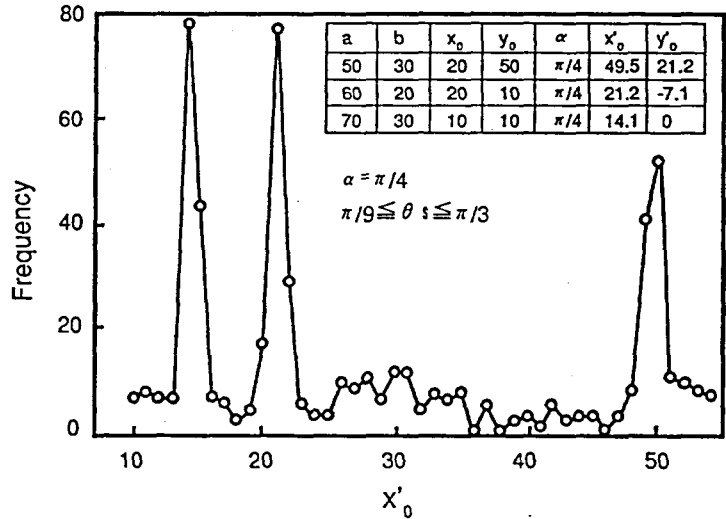


Fig.5.29 Accumulated frequency of the parameter.

この条件下では、図に見られるように本来の x' 値で度数が高くなっており、容易にパラメータが抽出されるのがわかる。この集積度は ρ 値の誤差および θ_s の取り方で大きく変化する。

Fig.5.30はある1個の楕円に対して、 ρ 値を

$$\begin{aligned} \rho_c(\pi/2 + \theta_s) &= \rho(\pi/2 + \theta_s) + \Delta\rho \\ \rho_c(\pi/2 - \theta_s) &= \rho(\pi/2 - \theta_s) - \Delta\rho \end{aligned} \quad (5.48)$$

として誤差を与えたときの各 θ_s に対する抽出パラメータ x_0' の誤差を示したものである。これからわかるように、 ρ 値の誤差 $\Delta\rho$ が大きいほど、また、 θ_s 値が小さいほど抽出パラメータの誤差が大きくなる。つまり、集積分布が急峻ではなくなり、集積抽出が困難となる。特に θ_s が $0 \sim \pi/18$ の間では、パラメータ算出誤差が大きくなるため、パラメータ算出においては、 θ_s を

$$\theta_s > \pi/18 \quad (5.49)$$

と設定するのが好ましい。

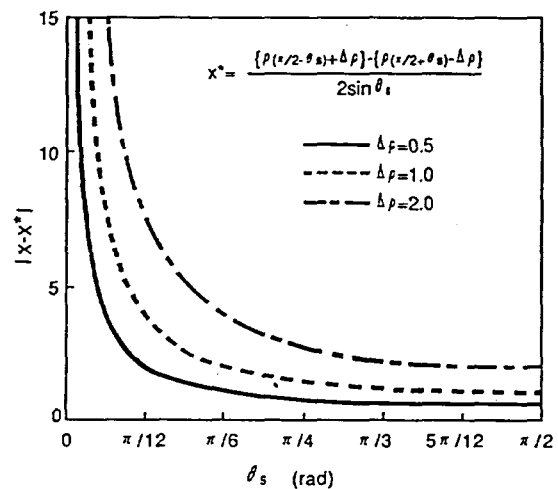


Fig.5.30 Influence of θ_s value or error of ρ value on error of calculated parameter value.

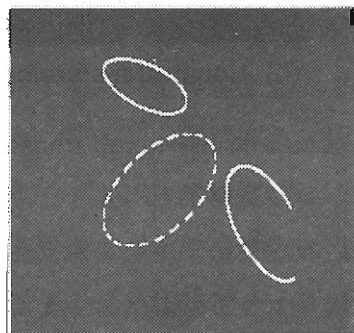
5.5.3 パラメータ抽出結果の考察

本項では、本研究で提案した2次曲線のパラメータ抽出方法を部分楕円を含む複数楕円の線画像に対して適用した結果について考察する。

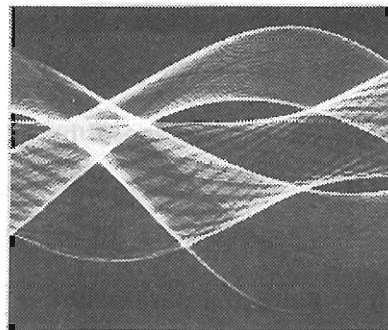
Fig. 5.31(a)に示す3個の楕円を $\theta-\rho$ 平面上にハフ変換した画像が同図(b)である。また、パラメータ抽出結果をTable 5.1に示す。これから分かるように、本手法では、軸対称点が全体の半分程度の部分楕円に対しても十分適用可能であり、さらに複数楕円群から各々の楕円パラメータを容易に抽出することができる。なお、楕円が1個だけの画像を対象とした場合には、軸対称点が全体の1/10程度でも十分パラメータ抽出は可能である。

また、パラメータ抽出精度は楕円の一部が部分的に欠落したような楕円においては、実験結果からも分かるように、抽出誤差(1, 2画素程度)を有している。これは、本実験において、 $\theta-\rho$ 平面での集積点、パラメータ演算結果をすべて整数化しており、パラメータ演算の組合せ点が楕円の存在部分に偏ったためである。しかし、完全楕円や全周にわたる局所欠落した楕円に対しては、精度の良い抽出となっている。

	x_0	y_0	a	b	α	x_0'	y_0'
Partial Ellipse	50	-40	20	40	$\pi/6$	23.3	-59.6
Broken Ellipse	-20	-20	45	25	$\pi/4$	-28	0
Fine Ellipse	-30	50	15	30	$\pi/3$	28.3	51



(a) Line image



(b) Hough transformed image

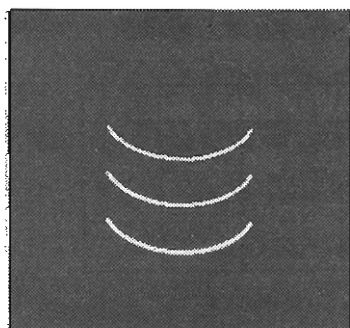
Fig.5.31 Line image of ellipses and its Hough transform onto $\theta-\rho$ plane.

Table 5.1 Comparison between original parameter and extracted parameter.

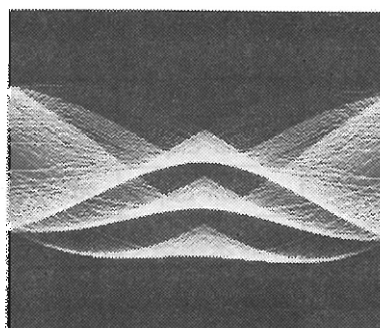
Original parameter					Extracted parameter				
α	x_0	y_0	a	b	α	x_0	y_0	a	b
$\pi/6$	50	-40	20	40	$\pi/6$	49	-39	19	38
$\pi/4$	-20	-20	45	25	$\pi/4$	-20	-20	45	25
$\pi/3$	-30	50	15	30	$\pi/3$	-30	50	15	30

次にFig. 5.32に示す長軸を境界に片側しか存在しない楕円($10\pi/9 \leq \phi \leq 17\pi/9$)に対して処理した結果をTable 5.2 に示す. なお, ϕ は楕円の軸からの回転角で楕円の存在範囲を示している. この場合, 長軸に対する対称点が存在しないので, 長軸成分 y_0' は抽出されず, 短軸成分 x_0' しか抽出されない. この為, 放物線に対するパラメータ抽出が適用され, y_0' , a が表に示されているように抽出される. Fig. 5.33は抽出された放物線を元の楕円上に上書きさせたもの

Partial Ellipse					
x_0	y_0	a	b	α	ϕ
0	30	50	30	0	$10\pi/9 \leq \phi \leq 17\pi/9$
0	0	50	30	0	$10\pi/9 \leq \phi \leq 17\pi/9$
0	-30	50	30	0	$10\pi/9 \leq \phi \leq 17\pi/9$



(a) line image



(b) Hough transformed image

Fig.5.32 Line image of partial ellipses and its Hough transform onto $\theta - \rho$ plane.

Table 5.2 Extracted parameter.

Extracted parameter (x_0, y_0)		
α	x_0	y_0
0	0	non-extracted

↓

Extracted parameter a, y_0 as parabola	
a	y_0
0.008	0
	-30
	-60

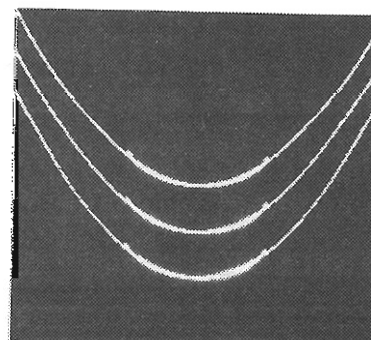


Fig.5.33 Overlapping of extracted parabola onto line image of partial ellipses.

である。このように、多少のずれはあるものの元の楕円に近い形で放物線が抽出されている。このように軸に対して半分しか存在しない楕円に対しても放物線として近似したパラメータ抽出が可能であり、この抽出パラメータから元の楕円曲線を容易に復元される。

以上に示したように、軸対象点の集積点からのパラメータ抽出は、直線の抽出に用いられる $\theta - \rho$ 2次元パラメータ空間からの2次曲線のパラメータ抽出が可能であり、必要とするメモリー容量も 256×256画素の線画画像に対して、約 136kバイトと非常に小さくてすむ。

5.6 結論

本章では、ノイズや線画の乱れを含む線画画像から直線線分と二次曲線（特に楕円）の線分パラメータを $\theta - \rho$ ハフ変換平面から同時に抽出する新たな方法を示した。以下に本研究で得られた結果を要約する。

- 1) 数本の直線線分からなる線画画像に対しては、 $\theta - \rho$ ハフ変換画像上の直線の集積点および集積境界線から直線線分のパラメータ（傾き、切片、両端点）が抽出可能であり、元の線画画像情報を必要としない。
- 2) 二次曲線（楕円、双曲線、放物線）の接線軌跡を示す $\theta - \rho$ 平面へのハフ変換曲線（集積点軌跡）上における二次曲線の軸上点 ($\theta = \pi/2 + \alpha, \pi + \alpha$) に対する対称点の (θ, ρ) 値から二次曲線のパラメータ x_0, y_0, a, b, α を容易に抽出できる。
- 3) 線分長 30(pixel), 線分がたつき 0.3(pixel²)以下の直線線分, 曲率半径20(pixel)以上の曲線線分に対するハフ変換画像上での集積点において,
直線の集積点 ; 集積度数 ≥ 18 , $\tan \theta_{\max} \geq 10$, $\tan \theta_{\min} \geq 8$
曲線の集積点 ; $12 \geq$ 集積度数 ≥ 5 , $12 \geq \tan \theta_{\max} \geq 5$, $8 \geq \tan \theta_{\min} \geq 1$
直線の集積境界点 ; $6 \geq$ 集積度数 ≥ 1 , $5 \geq \tan \theta_{\max} > 0$, $1 \geq \tan \theta_{\min} \geq -4$
であり、3%以下のごま塩雑音ノイズの含まれる線画画像に対して、ハフ変換画像上の集積度数、集積勾配値から線分長 30(pixel), 線分がたつき0.3(pixel²)以下の直線線分, 曲率半径 20(pixel)以上の曲線線分を分離抽出可能である。
- 4) 直線のパラメータを表すハフ変換画像上での集積点抽出において、集積度数、集積勾配の閾値処理で抽出された点の近傍において、 θ 方向重み付けフィルターによる平滑化処理を施すことにより、線分長 30 pixel 以上、線分がたつき 0.3 (回帰直線からの距離分散値) 以下の線分に対して、抽出位置誤差 0.8 pixel以下と高精度に抽出可能である。また、集積点近傍の集積度数分散値から集積交差部の誤抽出を防ぐことができる。
- 5) 本提案方式による線分パラメータ抽出方式は以下の特徴を有する。
 - ① 本方式は、同一の処理系ですべての直線線分、二次曲線に対するパラメータ抽出が可能である。
 - ② 本方式による楕円パラメータ抽出では、軸対称部分が存在しておれば部分曲線で

もそのパラメータ抽出ができる。さらに、長軸または短軸に対して片側だけの部分楕円に対しても放物線としてパラメータ抽出することにより楕円当てはめをおこなうことができる。

- ③ 256×256画素の線画画像に対して、約 136 Kバイトと小さなメモリーで処理が可能である。

第6章 濃淡画像とモアレ縞画像併用3次元視覚システムの構築

6.1 はじめに

3次元視覚システムでは、TVカメラで撮像した3次元対象物体に対する画像情報から、物体の形状を規定する面分、稜線、頂点の位置、形状およびそれら相互の幾何学的つながりを抽出・記述する必要がある。前章までに示した濃淡画像からの縁辺情報の抽出、パターン画像のパターン情報の抽出は、各々の画像内に含まれる形状を表す線要素の抽出である。このため、対象物体の形状記述を行う場合、特に、面分、稜線、頂点個々の抽出・記述とそれら相互の幾何学的つながりの記述が必要となる。

また、第2章で示したように、形成原理の異なる濃淡画像とパターン投光画像を併用することにより、形状情報の取得範囲の拡張および信頼度のより高い形状情報の取得が期待できるが、異種画像併用視覚システムの構築においては、これら2種の画像から得られる形状情報の取扱い方を検討する必要がある。

そこで、本章では、両者において、画像の特性、得られる形状情報の質、形状情報取得範囲が異なることに注目し、これらの特性を考慮した形状情報抽出・記述アルゴリズムについて検討するとともに、濃淡画像とパターン画像併用の3次元視覚システムの構築をしている。

6.2 視覚システムの構築

6.2.1 ハードウェア構成

Fig.6.1 は本研究で構築した視覚システムのハードウェア構成を示したものである。システムは、画像情報を得るための撮像系、画像形成のための投光系、および得られた画像データの処理と撮像系、投光系の制御を行うための処理系とに分かれている。各系の構成は以下のようになっている。

(1) 撮像系

撮像系はTVカメラ、画像入力装置からなる。

(a) TVカメラ

撮像管；1インチ電磁集束・電磁偏向型撮像管（カルニコン）

解像度；中心解像度 600 TV本

周辺解像度 500 TV本

(b) 画像入力装置

画像メモリ； 8 bit 4 plane 256×256画素

オーバーレイメモリ； 1 bit 4 plane

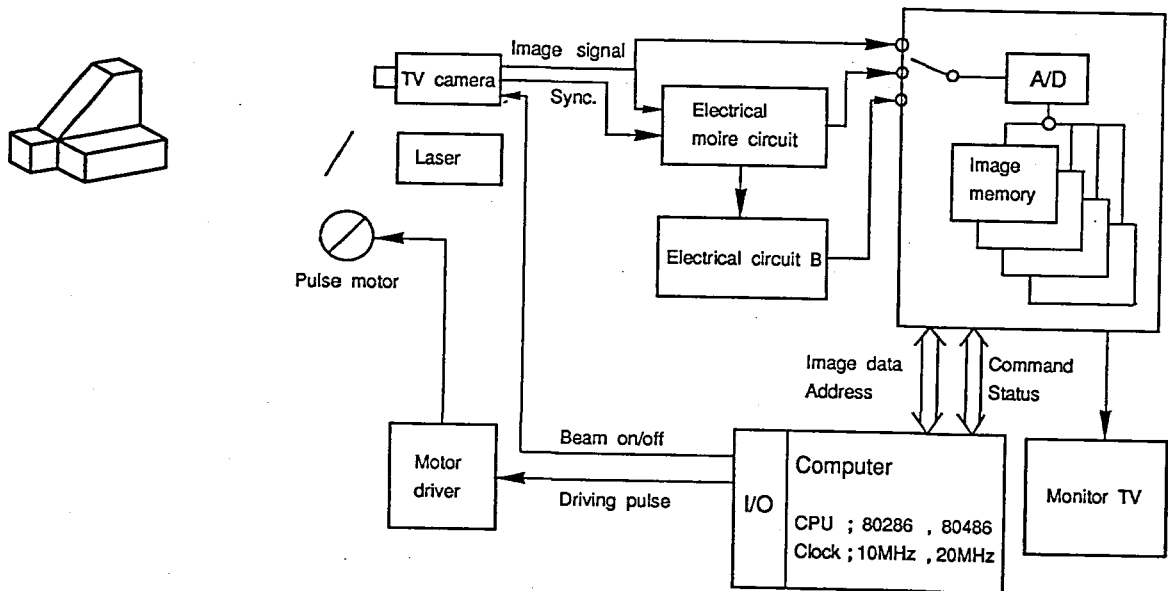


Fig.6.1 Hardware of vision system.

(2) 投光系

投光系は濃淡画像形成用の照明装置とスリットレーザ光走査投光のためのレーザ，走査駆動装置およびミラーからなる。

(a) 照明装置

前面にアクリル板を配した40W蛍光灯×6

(b) 駆動装置 (ステッピングモータ)

回転角 ; 0.0072° /pulse

繰返し精度 ; ± 0.0014°

(3) 処理系

CPU ; 80286 (クロック 10MHz), 80287 (クロック 10MHz)

80486 (クロック 20MHz), 80487 (クロック 20MHz)

メモリ ; 640 kbyte

6.2.2 処理の流れ

本研究で構築した異種画像併用視覚システムにおける形状情報抽出アルゴリズムをFig. 6.2に示す。処理手順は以下の通りである。

- [手順1] TVカメラで対象物体を撮像し，その濃淡画像を画像メモリに取り込む。
- [手順2] 分散型オペレータにより物体の縁辺点を検出する。
- [手順3] 縁辺検出画像を $\theta - \rho$ 平面へハフ変換し，線分パラメータを算出する。
- [手順4] 抽出された線分パラメータを基に，対象物体の2次元投影線画における面分，稜線，頂点を抽出し，それら相互の幾何学的つながりの抽出・記述を行う。

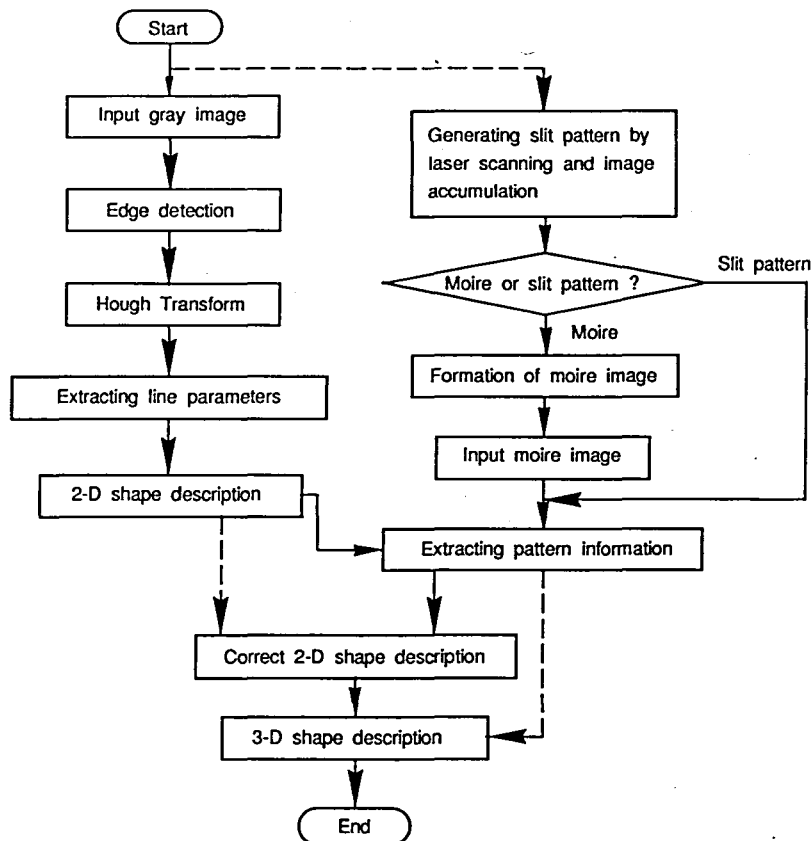


Fig.6.2 Flow of processing in vision system.

〔手順2〕から〔手順4〕の処理中に対象物体にスリットレーザを走査投光し、モアレ縞画像を形成させる。

〔手順5〕 縁辺線上で領域分けされた各面分におけるパターン情報を抽出する。

〔手順6〕 縁辺情報とパターン情報から2次元形状記述データの修正を行う。

〔手順7〕 パターンデータを基に各面の空間方程式（面の傾き）および頂点の3次元座標を算出し、3次元形状データ構造に格納する。

以上の処理で、3次元対象物体の形状情報を抽出し、Fig. 6.3 に示す階層型データ構造に格納することにより形状記述が行われる。このデータ構造は、物体、面分、稜線、頂点の4階層構造となっており、各々の形状データと各階層間のつながりが記述されている。

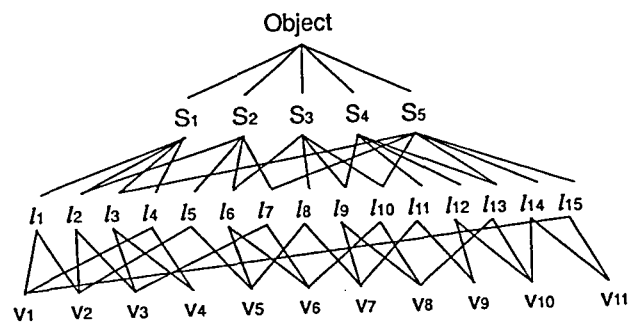
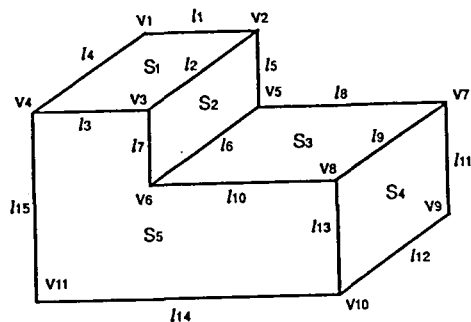


Fig.6.3 Hierarchical structure of shape data for 3-D object.

6.3 濃淡画像からの2次元形状記述

前章に示したように、直線のパラメータ（傾きと切片）および2次曲線のパラメータ（中心座標，軸長，軸の傾き）が線画画像を $\theta - \rho$ 平面にハフ変換したハフ変換画像における集積点から容易に抽出することができる。また、直線線分のみの画像においては、画像に含まれる線分数が数本の場合には、直線線分の端点も集積点情報から得ることが可能である。しかし、部分曲線や線分数の多い画像における直線線分に対しては、直線，二次曲線のパラメータは抽出できるが、線分としての端点は $\theta - \rho$ 平面における情報からでは抽出できない。このため、縁辺検出画像から対象物体の面分，稜線，頂点およびそれらの位相構造を抽出し，形状記述するには，まず，各物体の頂点となる線分端点を抽出する必要がある。

6.3.1 線分パラメータマスクによる線分混在画像からの線分抽出

$\theta - \rho$ 平面から得られた直線，二次曲線のパラメータから線画上の各線分の存在範囲（線分端点）を抽出するには，Fig. 6.4 に示すように，抽出された直線，二次曲線のマスクを元の線画画像に重ね合わせ，マスク内の線要素存在範囲を抽出すればよい。このパラメータマスクによる線分抽出で検討しなければならない点は，マスクングの方法とマスク内の線分要素判定の2点である。

Fig. 6.5 は，直線(a)，曲線(b)に対するマスクのかけ方を示したものである。

まず，直線線分 l に対しては，図示するように，幅 W_{mask} のマスクを元の線画画像に重ね合わせ，このマスク内を抽出直線に沿って画素オーダーで等分割し，この分割領域内での線分要素点の有無を図に示す配列に格納する。つまり，線分要素が存在する領域に相当する配列の値を"1"とし，存在しない領域に相当する配列値を"0"とする。

次に，2次曲線の場合は，(b)図に示すように，ハフ変換により抽出されたパラメータを基に直線の場合と同様，幅 W_{mask} のマスクを元の線画画像に重ね合わせ， $\theta_n = 0$ から等分割し，配列を対応させている。線分の存在範囲はこの配列データから抽出できる。

実際の線画では，ノイズ点が存在しており，さらに，マスク内には他の線分要素も含まれている。また，線分が一部欠落していることもある。このため，これらのことを考慮した判定基準が必要となる。ここではFig. 6.6 に示すように，線分要素"1"の存在幅を $W_{(1)}$ ，非線分要素"0"の幅を $W_{(0)}$ としたとき，各々の幅により次のように判定している。

ノイズ要素の判定は，Fig. 6.6(a) に示すように，"0"要素に挟まれた"1"要素において，次の条件を満たすとき，その線分要素をノイズ要素として消去している。

$$W_{(1)} \leq W_{th1} \quad \text{AND} \quad W_{(0)} \geq W_{th2} \quad (6.1)$$

実験によると，縁辺検出画像上でのノイズ点の大半の連結長さが3 pixel以内，マスクを横切る他の線分との交差角が $1/3$ rad. 以内で交差線分長が5 pixel 以下である。このことから，

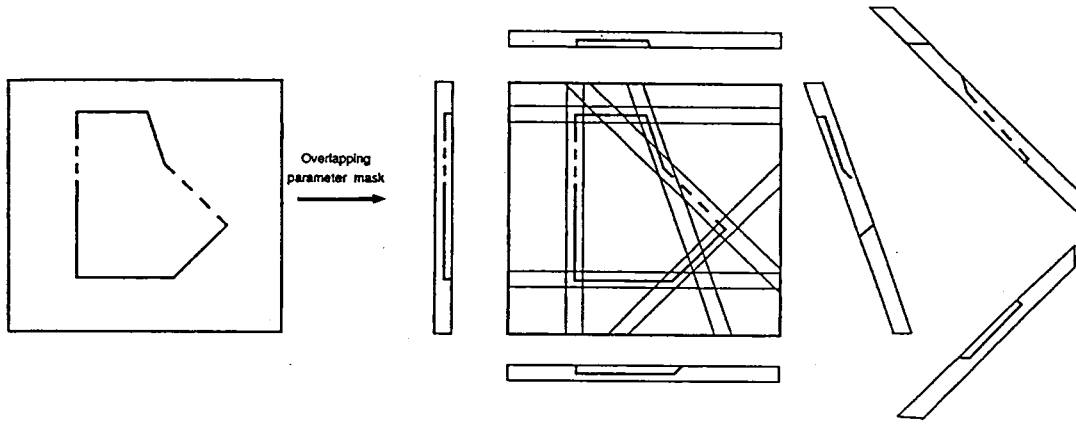


Fig.6.4 Extraction of line elements by parameter mask.

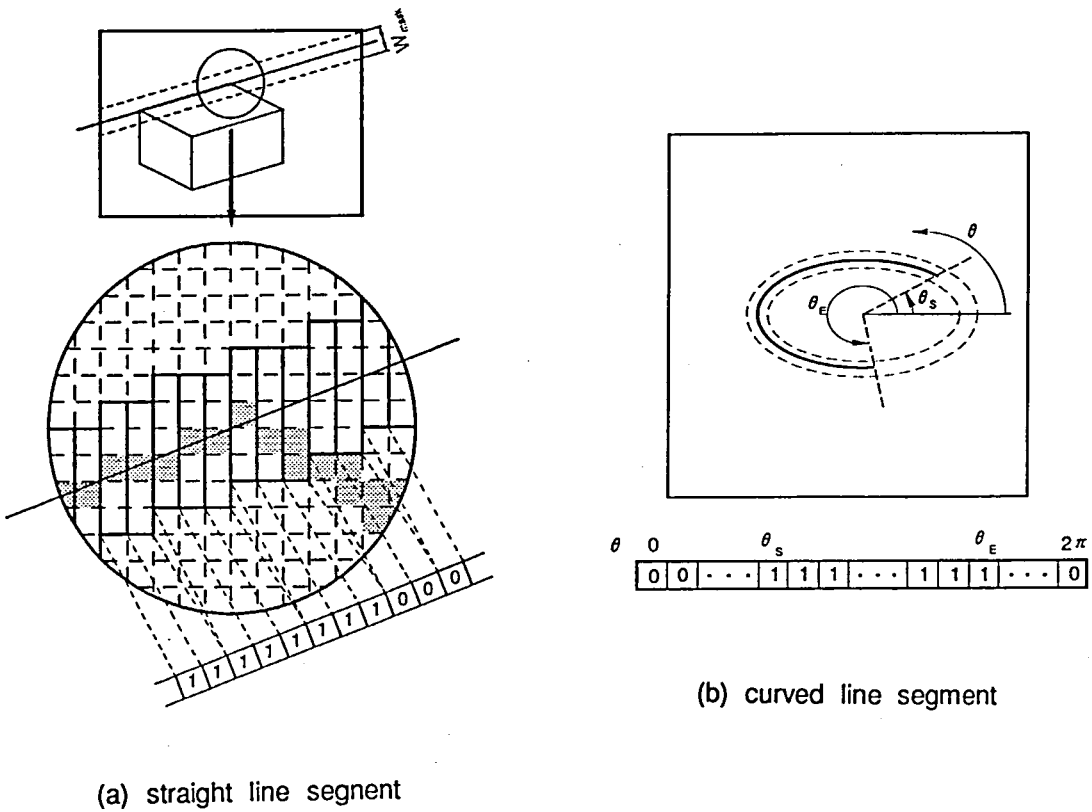


Fig.6.5 Parameter mask and data storage of line elements.



Fig.6.6 Judgement for noise element or lack of line segment.

本システムにおけるノイズ要素判定しきい値 W_{th1} , W_{th2} を 5(pixel) としている。

また、線分の途切れ判定は、Fig. 6.6(b) に示すように、“1”要素に挟まれた“0”要素において、次の条件を満たすとき、その“0”要素を線分の欠落要素とし、連続した線分として取り扱う。これを満足しないとき、各線分要素を異なった線分として取り扱う。

$$W_{(0)} \leq W_{th3} \quad \text{AND} \quad W_{(1)} \geq W_{th2} \quad (6.2)$$

本研究では、256×256画素の標本化画像を処理画像としており、画像に含まれる線分長が 80 pixel 以内であり、縁辺検出画像における縁辺の途切れが 10 pixel 以内であることから、線分途切れ判定のしきい値 W_{th3} を 10(pixel) としている。

線分抽出処理において、まず、(6.1)式のノイズ要素の判定処理を行い、ノイズ要素の除去を行っている。次に、(6.2)式の線分途切れ判定を行い、線分連結処理をして、最終的に各線分の端点を抽出している。

6.3.2 抽出線分データ連結による2次元形状記述

前項に示した処理により各線分の抽出が行われる。しかし、この段階では、各線分が Fig. 6.7 に示したように本来1点(頂点)で連結しているべきものが分断されていたり、交差した状態にある。この線分情報を図に示すように、1点で交差するように線分の端点座標を修正する必要がある。パラメータマスクによる線分端点の抽出では、2~4画素程度の誤差が生じる。このため、端点間の距離が小さな端点を同一端点(線分の交点)として処理している。ここでは、この連結条件を次のように設定している。

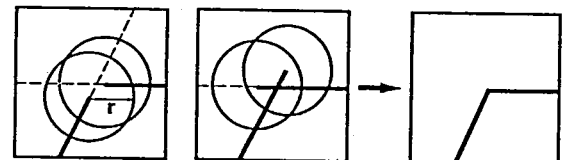
- 異なる2線分 (l_1, l_2) の端点間の距離が r より小さいとき、連結しているものと判断し、端点をその線分の交点とする。

(Fig. 6.7(a))

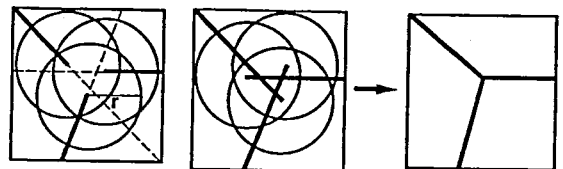
- 異なる3線分 (l_1, l_2, l_3) 以上の端点間の距離が r より小さいとき、それらの線分は連結しているものと判断し、端点をそれらの線分間の交点の重心とする。

(Fig. 6.7(b))

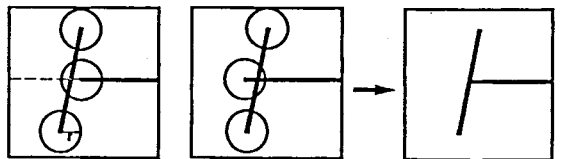
- ある線分 (l_1) の端点と他の線分 (l_2) 間の距離が r より小さいとき、それらの線分が連結していると判断し、その端点を線分の交点とする。(Fig. 6.7(c))



(a) connecting pattern A



(b) connecting pattern B



(c) connecting pattern C

Fig.6.7 Connecting of line segments and decision of vertexes.

以上の処理で、各線分の端点が頂点となり、

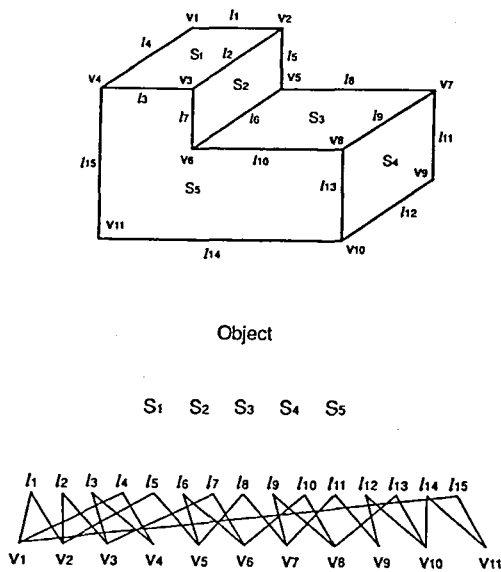


Fig.6.8 Description of edge lines and vertexes.

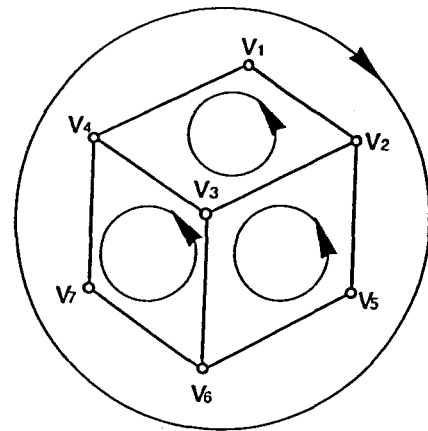


Fig.6.9 Tracking method of surface contour and object contour.

この条件を満たさない端点は，孤立端点として処理される。

次に，各線分間のつながりはFig. 6.8 に示すように，頂点を介して記述される．さらに，この線分と頂点のデータから面分，輪郭線の抽出を行う．抽出の考え方は，Fig. 6.9 に示すように面分はその面を左にみて反時計回りに線分，頂点の追跡を行い，輪郭線は面を右にみて時計回りに線分，頂点の追跡を行う．なお，この処理では，各線分が2度追跡されることになり，各線分の2回の追跡を終了条件とする．この処理により，Fig. 6.3 に示した階層データ構造が作成される．

6.4 パターン情報の抽出とそれによる3次元形状記述

6.4.1 2次元形状記述情報に基づいた各面の縞情報の抽出

第2章で示したように，格子パターンを投光した平行格子投光画像およびそれから形成されるモアレ縞画像において，各平面で縞間隔，縞の傾きが均一であり，この縞の間隔，傾きから各面分の3次元的な情報を抽出できる．このため，各面ごとに縞情報を抽出すればよい．この縞は，平面上では平行直線縞となり，また，円柱側面では平行楕円縞となる．このことは，縞情報抽出には前章で示したハフ変換の利用が有効であることを示している．

Fig. 6.10 は，物体の各面分ごとのモアレ縞のハフ変換方法を示したものである．対象物体の各面分の境界線は，前節に示した濃淡画像から得られる縁辺検出画像を基に記述されている．この面分記述データを基に各面分内の縞を $\theta - \rho$ 平面にハフ変換する．

次に，面分記述データを基にパターン画像からその面分内の画像データを走査する方法を

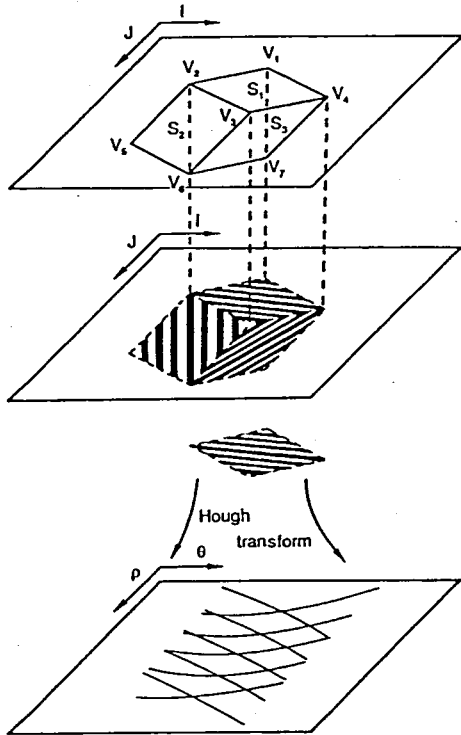


Fig.6.10 Hough transform of moiré fringe in each surface.

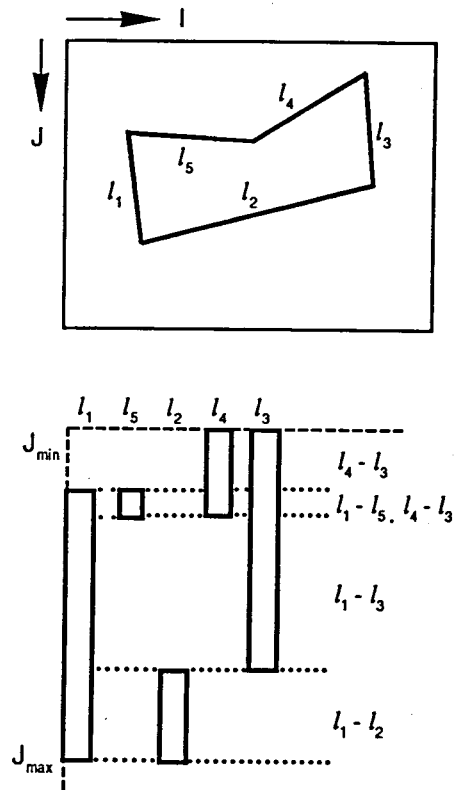


Fig.6.11 Scanning method in each surface by utilizing 2-D shape description data.

Fig. 6.11 に示す．図に示すように，面の境界線である各稜線の端点（頂点）の座標を標準化画素番地である (I, J) 番地表示とし，この各稜線を図(b)に示すように，端点の I 座標値の小さい順に J 軸投影表示で整理する．このように表現された稜線データにおいて，奇数番目の稜線から偶数番目の稜線の間が面分内の点となり，容易にかつ効率よく面分内の画像データを走査することができる．

6.4.2 両画像から得られる形状情報の相互補完

縞情報を抽出したとき，Fig. 6.10に示したように，個々の面分内に1種類の縞情報が含まれている場合は，この縞情報を基に2次元形状記述データに3次元形状情報を付加すればよい．しかし，第2章で示したように，縁辺検出画像の不完全さから抽出された面分内に複数の縞パターンが存在したり，隣接面分において同一の縞パターンが抽出されることがある．また，縁辺画像から得られる面分内にパターン像が形成されない場合もある．このため，両画像から得られる形状情報の不一致時の処理を検討しなければならない．

(1) 縁辺画像における面間の縁辺欠落

平行直線縞をハフ変換した場合，各直線を極座標表示した場合の θ 値は同一であるため，ハフ変換画像上での各直線に対する集積点は同一 θ 値上に並ぶ．従って，縁辺検出画像から得ら

れた2次元形状記述データに基づいて、面内の縞をハフ変換したときFig.6.12 に示すように、直線の集積点が2種類の θ 値に対して形成された場合は、この面内には2つの面が存在していることを示している。つまり、ハフ変換平面上で容易に縁辺検出画像における縁辺欠落を判断できる。

面間の境界線（縁辺）となる線分の候補は、Fig.6.13 (a)のように、面を構成する頂点の中、の2頂点を結んだ線分の内、輪郭線とならない線分である。抽出データに誤差が含まれない場

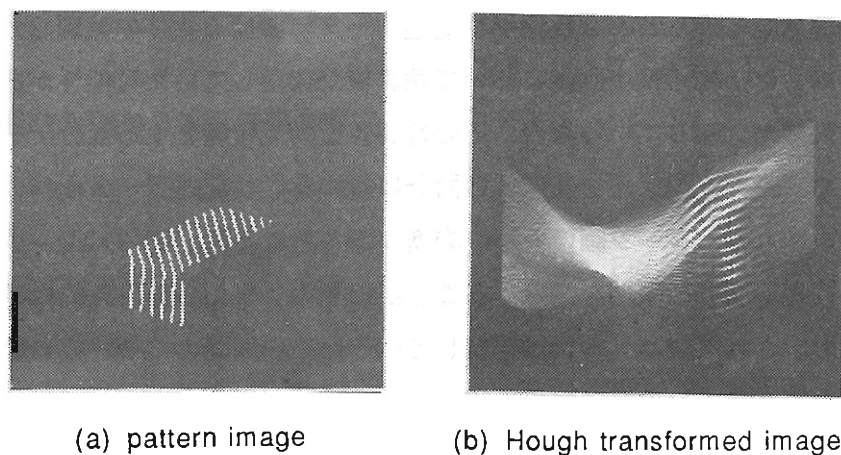


Fig.6.12 Hough transformed image for projected pattern image on adjacent 2-planes.

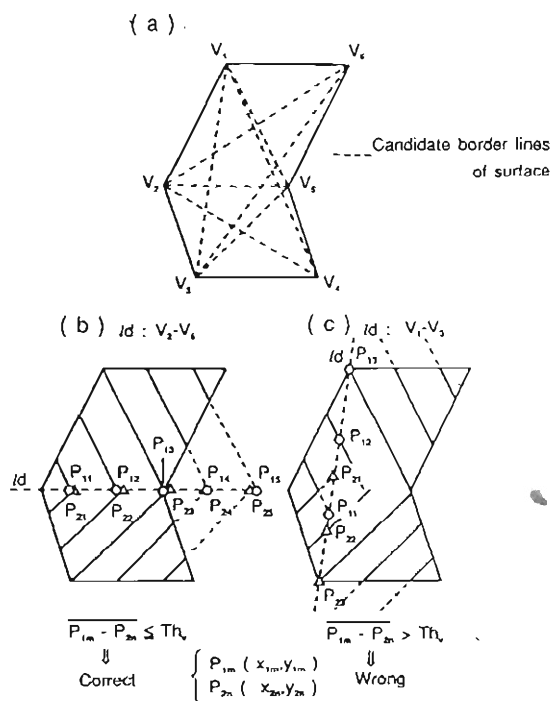


Fig.6.13 Decision of boundary line between surfaces by moire fringe.

合，ハフ変換平面から抽出された2種類の線群は，ある一境界候補線上で交点を結ぶ．しかし，現実には抽出データに誤差を含む．このため，その誤差を考慮して，Fig. 6.13(b), (c)に示すように，境界の候補線 Q_d と抽出線群との交点 P_{11} , P_{21} 間の距離が設定閾値 Th_v 以下ならば一致と判断することとし，その一致交点数がパターン画像に含まれる縞の数と同数の時，それを新しい境界線として面の頂点，辺の並びの情報を修正している．

(2) 縁辺画像における輪郭線の欠落

縁辺検出画像を基に作られた2次元形状記述データにおける物体の輪郭線外に縞パターンが存在している場合は，縁辺検出画像において輪郭線が欠落していた可能性がある．2次元形状記述段階で輪郭線が欠落している場合，その輪郭線を構成稜線とする面分データは形状記述されていないため，パターン情報を基にその面分に対する形状記述データを作成する必要がある．

輪郭外に形成されたパターン画像をハフ変換することにより，同一パターンの形成領域を抽出することができ，面分の領域を想定することができる．また，3次的に連続する面間において，そこに形成される縞パターンは連続しているため，面間の接続状態も縞パターンから抽出可能である．縞パターンの連続性の判定は，基本的には，面間の境界線の欠落の場合と同じである．つまり，Fig. 6.14 (a)に示すように，縁辺検出画像において輪郭線が欠落しており，パターン画像は全ての面分に対してパターン像が形成された場合，面分の抽出されなかった面上の縞と他の面の縞との交点が何れの面分境界上に形成されるかで，縞パターンの連続性が判断される．つまり，輪郭線外に形成された縞パターンと各面分に形成された縞パターンの交点とその面分の境界線（稜線）で交点を有する場合，その稜線で面が連続している．

なお，3次的には連続しない面間において，2次元投影図上では隣接した面として記述されることがある．この場合には，縞パターンの連続性がないので，3次的には連続していないと判断することができる．

(3) 縁辺画像における不要縁辺

Fig. 6.15 に示すように，縁辺検出画像を基に2次元記述された隣接する2面 (S_1 と S_2) におけるパターン情報が一致 ($\theta_{m1} = \theta_{m2}$, $S_{x1} = S_{x2}$) した時，その2面は同一平面と判断で

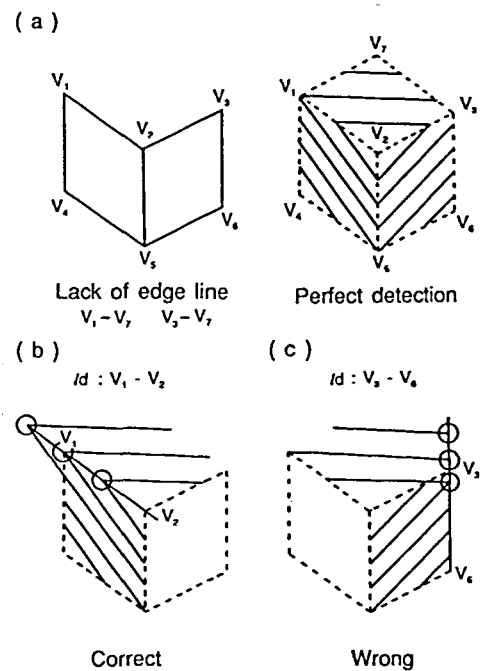


Fig.6.14 Decision of contour line by moire fringe.

き、その共有面分境界線である $V_3V_7V_6$ が消去され、新たに面分記述される。立方体を2つ積み重ねたような場合には、同一平面上で隣接した2面が存在する。この場合には、この隣接2面に隣接する面においても、同様な関係がある。これを満足しない場合は、この稜線がT型頂点を構成する。本システムでは、同一平面上の2面と判断された場合の境界線がT型頂点を構成するか否かで同一面判定を行っている。

(4) モアレ縞情報欠落面の3次元情報の推定

縁辺検出画像を基に記述された面分内にパターン画像が形成されていない場合、この面に含まれる頂点のうち、他の面の縞情報を基に既に3次元位置情報を持っている3点から以下の式に基づいて、幾何学的に面の方程式を決定する。

いま、既に3次元位置情報を持っている頂点を $V_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $V_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $V_3(x_3, y_3, z_3)$ とすると、求める面の方程式は

$$x + B y + C z = D \quad (6.3)$$

$$\text{但し, } B = \frac{(x_2 - x_3) z_1 + (x_3 - x_1) z_2 + (x_1 - x_2) z_3}{(y_2 - y_3) z_1 + (y_3 - y_1) z_2 + (y_1 - y_2) z_3}$$

$$C = - \frac{1}{z_1 - z_2} \{ (x_1 - x_2) + (y_1 - y_2) B \}$$

$$D = x_1 + B y_1 + C z_1$$

で求まる。

6.4.3 3次元形状データの記述手順と信頼性を考慮したデータ構造

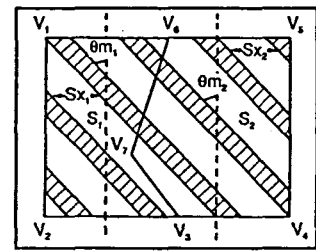
前項に示したように、形成原理の異なる濃淡画像とパターン画像を併用することにより、相互に欠落した形状データを補い、また、誤って抽出された形状情報の判断が行われ、信頼性の高い形状記述が行われる。

ここで、抽出・記述された形状データの信頼性としては、

- 1) 形状抽出の信頼性
- 2) 位置データとしての信頼性

の2つの信頼性がある。

まず、形状抽出の信頼性であるが、濃淡画像とパターン画像の両画像において一致した形状データは最も信頼性が高いと言える。両者の形状データが一致しなかった場合は、より信頼性



	S_1	S_2
Vertex row	V_1, V_2, V_3, V_7, V_6	V_3, V_4, V_5, V_6, V_7
Pattern data	Sx_1, θ_{m_1}	Sx_2, θ_{m_2}

$$\begin{aligned} Sx_1 &= Sx_2 \\ \theta_{m_1} &= \theta_{m_2} \end{aligned}$$

	S_1
Vertex row	V_1, V_2, V_4, V_5
Pattern data	Sx_1, θ_{m_1}

Fig.6.15 Delete of unnecessary surface boundary.

が高いと考えられるデータを基に形状記述されるが、両者の画像の形状情報が一致した形状データに比べて情報の信頼性は低下する。

一般に、視覚システムは、単に対象物の3次元形状を抽出することだけが目的であるのではなく、その抽出された形状データを照合認識やロボットの位置制御などに使用することを前提としている。画像から抽出された各情報に信頼性の度合をもたせることができれば、その情報の使用時に、必要に応じて信頼性の高いものから取り出すことも可能となる。

これらの理由から、データが不一致であったときの処理を施した面の情報には、そのことを記すことは情報の確からしさを示す上で重要である。本システムでは、両画像からの形状データが一致しなかった場合、記述データに形状不一致を示すフラグを付加している。

次に、位置データとしての信頼性について検討する。

本システムでは、3次元形状情報を各面に形成されるパターン像の縞情報からその面の傾き α 、 β を算出し、この面の傾きと縁検出画像から作成される投影図上での頂点の2次元座標から各頂点の3次元座標を算出している。この頂点座標算出の基本アルゴリズムをFig.6.16に示す。まず、視野中央付近に投光されたスリット光をもとに、物体上の任意の点の3次元座標を測定する。次に、この点を含む面のパターン情報からその面の方程式を算出し、その面に属する頂点の3次元座標を算出する。ここで決定された頂点が、その頂点を含むまだ方程式が求まっていない面の方程式の決定に使用される。この繰り返しによって、基準面、基準面に隣接する面、その他の面の順に3次元形状が決定されていく。

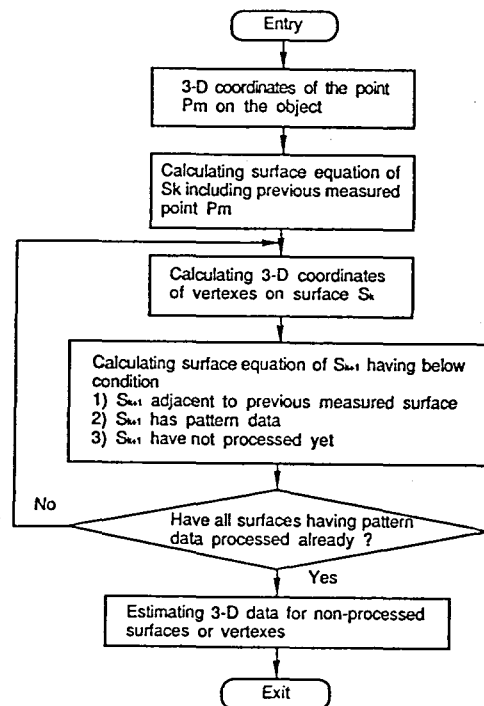


Fig.6.16 Algorithm for calculating 3-D data.

このように、物体を構成する頂点を順次算出していくため、算出順序の後になる面に属する頂点の3次元座標値には誤差が蓄積されていく。また、面の傾きと2次元形状記述データにおける頂点の投影座標値から頂点の3次元座標値が決定される。このため、得られる位置誤差は、面の傾きの計測誤差と2次元記述における頂点の位置誤差の両者により決定され、相互の誤差が見積もられれば、個々の点の計測誤差も予想される。以上の点を考慮して、本システムでは、頂点座標算出の面上の基準点をできるだけ誤差が小さいと予想される点を選定し、算出順位ができるだけ小さくなるようにしている。このような処理を施した上で、頂点算出順序および予想頂点位置誤差を記述データに付加することにより、頂点位置データの信頼性の尺度にしている。

6.5 3次元対象物体に対するシステムの適用とその性能

前節までに、本研究で構築した異種画像併用視覚システムにおける形状情報の抽出とその記述処理について検討した。本節では、構築した異種画像併用視覚システムを3次元多面体対象物体に適用した結果およびその性能を評価する。

Fig. 6.17 は直方体の上に円柱を載せた3次元対象物体に対する適用結果である。(a), (b)が対象物体に対する処理画像である濃淡画像とモアレ縞画像である。(c), (d)は各々、縁辺検出画像と凹凸判定画像を示す。これらの画像から得られた3次元形状記述データを(d)に示す。このように、本システムにより、物体を構成する面分、稜線、頂点の幾何学的つながりおよび3次元形状データが得られる。この適用結果は、両画像において全ての形状データが得られた場合の一例である。

Fig. 6.18, Fig. 6.19 は、縁辺検出画像において縁辺が検出されなかった場合の適用結果を示す。

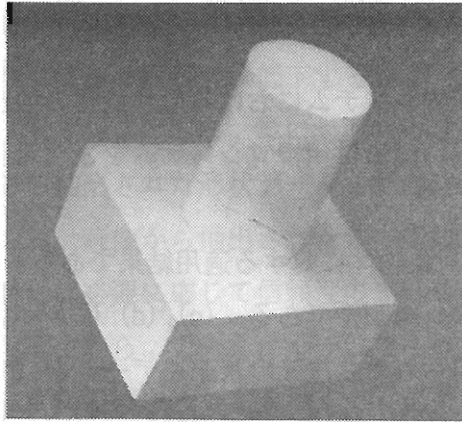
Fig. 6.18は、照明方向を変えて撮像した濃淡画像をもとに縁辺検出した結果、(a-1), (a-2)に示すような2種類の縁辺検出画像が得られた。この両者の縁辺検出画像と(c)図に示すモアレ縞画像(細線化を施してある)を基に形状記述した結果が(d)である。

Fig. 6.19は、パターン画像として平行格子投光画像を用いた結果である。図(a)が対象物体に対する濃淡画像で、この縁辺検出結果が図(b)である。この縁辺検出画像をハフ変換し図(c)、集積点抽出により図(d)に示す線画画像を得るとともに、この線画情報が2次元形状を記述している。この各面分に対して、パターン情報のハフ変換が行われる。図に示したものは、縁辺が欠落して2面が1面として抽出された面分に対するパターン像(f)とそのハフ変換像(g)である。このハフ変換画像において、異なる2つの θ 値に集積点が存在しており、この面分が2面であると判定され、(h)に示すような記述画像に修正される。このようにピッチの小さく、面の境界で縞の傾きの差が小さい平行格子投光画像からも良好に面分分割が可能である。

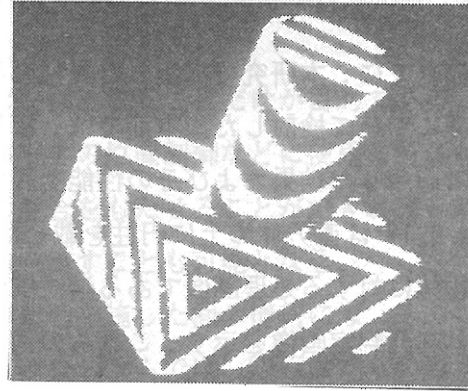
以上に示したように、異種画像を併用した本視覚システムは、両画像の特徴を生かした情報取得範囲が広く、抽出情報の信頼性の高い視覚システムとなっている。

次に、計測精度であるが、濃淡画像を基にした2次元形状記述時の投影図上での頂点の座標値において、2 pixel 以内の誤差となっている。また、パターン画像を基にした各面分の傾きの計測誤差は、各面の傾きとそこに形成される縞の長さにより変化する。

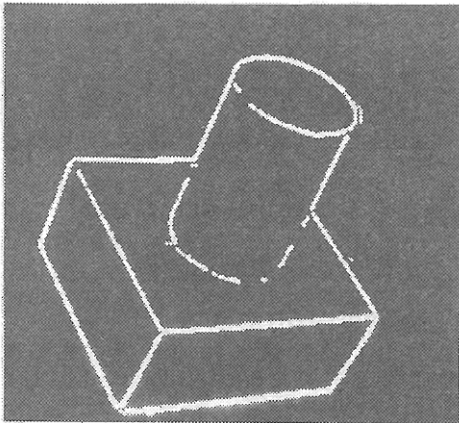
Fig. 6.20 は、モアレ縞画像からの面の傾きの計測結果を示したものである。図(a)は、モアレ縞の長さが標本画像(256×256)上で40画素分のものに対してモアレ縞の間隔 nS_x 、傾き θ_m から対象面の傾き α 、 β を求めた時の α 、 β の計測誤差を示したものである。また、Fig. 6.20(b)は、 $\alpha = \beta = 40^\circ$ の面に対して縞の長さを変化させた時の α 、 β の計測誤差を示したものである。これらから分かるように、縞の長さが30画素と短いものでは計測誤差は $\pm 2^\circ$ 程度と大きくなっているが、縞の長さが40画素以上のものでは 1° 以内の精度で対象面の傾き



(a) gray image



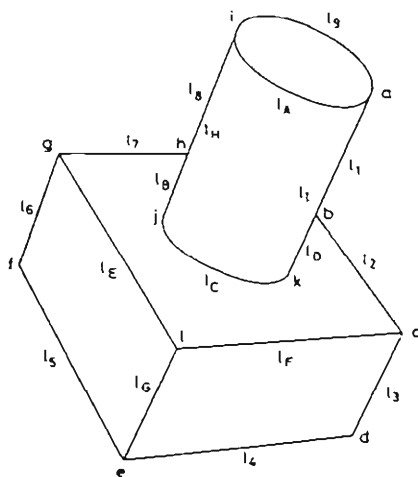
(c) moire image



(b) edge detected image



(d) judgement image for surface gradient



(e) result of 3-D shape description

	Monitor address		3-D coordinates (mm)		
	I	J	x	y	z
a	175	72	1003.6	195.9	75.9
b	174	120	1156.5	163.0	3.5
c	207	166	1093.3	218.0	-71.7
d	188	207	1147.8	179.2	-146.0
e	99	217	1032.9	22.9	-148.7
f	58	140	1130.3	-62.4	-32.6
g	73	96	1075.8	-23.6	41.7
h	123	96	1142.5	65.2	44.3
i	143	44	991.6	107.9	113.1
j	114	121	1073.4	49.7	1.6
k	163	144	1085.3	137.7	-35.6
l	120	173	978.4	61.7	-74.4

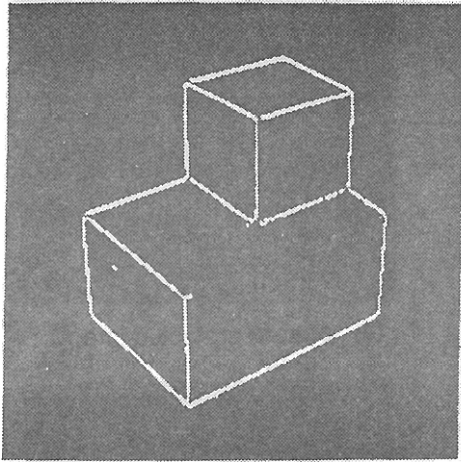
	Parameter of each surface						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	-0.545	0.388	0.743	84.0	-	-	-
S2	-0.546	0.389	0.742	1084.6	97.17	97.17	-15.00
S3	-0.545	0.388	0.743	-564.6	-	-	-
S4	0.623	0.780	0.050	654.3	-	-	-
S5	0.593	-0.448	0.669	503.1	-	-	-

Plane : $P_1x + P_2y + P_3z = P_4$

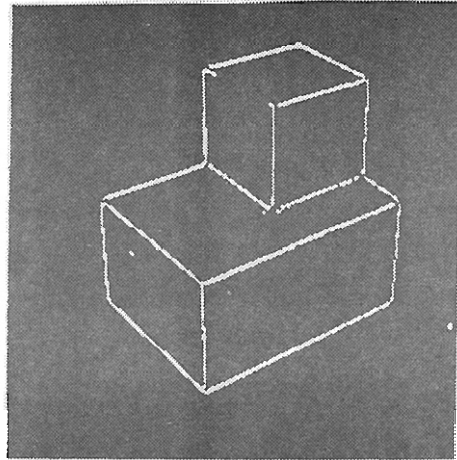
Column : Center axis : $\frac{x-P_4}{P_1} = \frac{y-P_5}{P_2} = \frac{z-P_6}{P_3}$

Radius : P_7

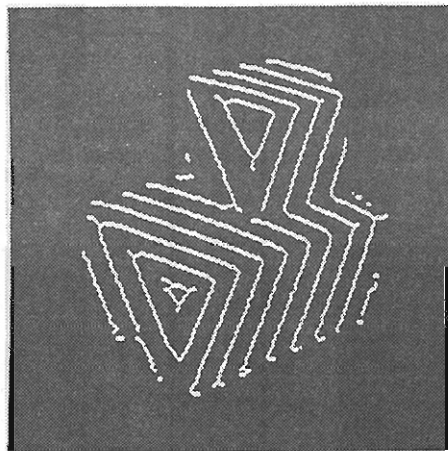
Fig.6.17 Processing result for 3-D object.



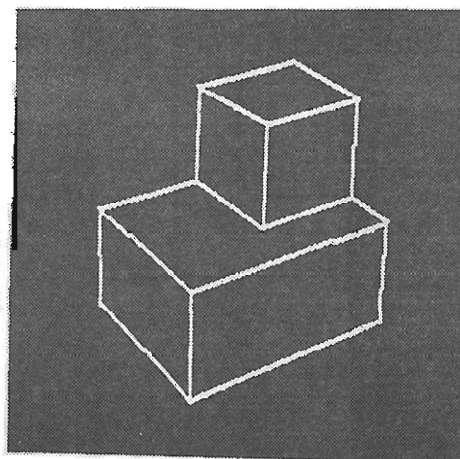
(a-1) edge detected image



(a-2) edge detected image



(b) moire image



(c) 2-D shape description
corrected by moire image

Fig.6.18 Processing result for 3-D object.

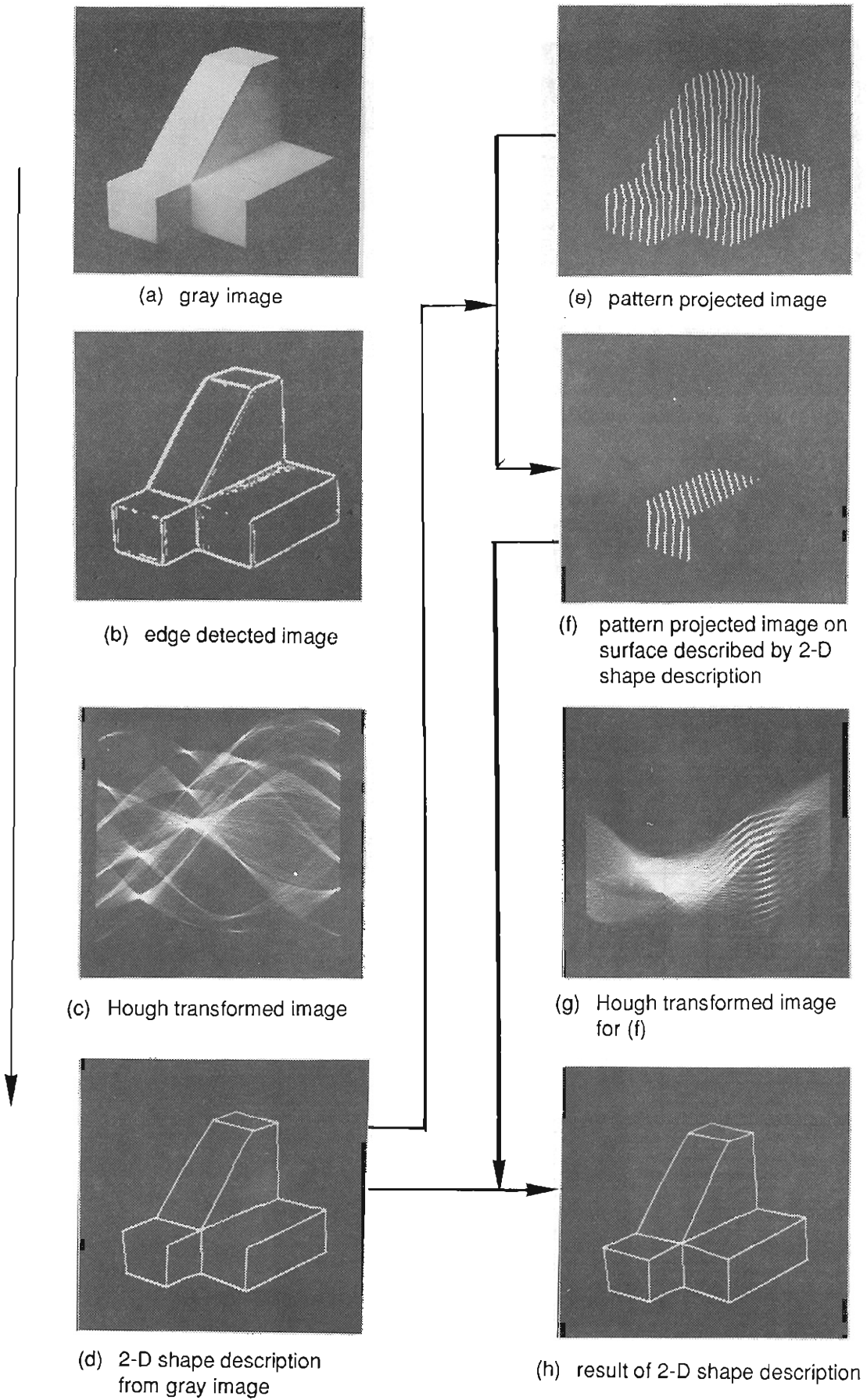


Fig.6.19 Processing result for 3-D object.

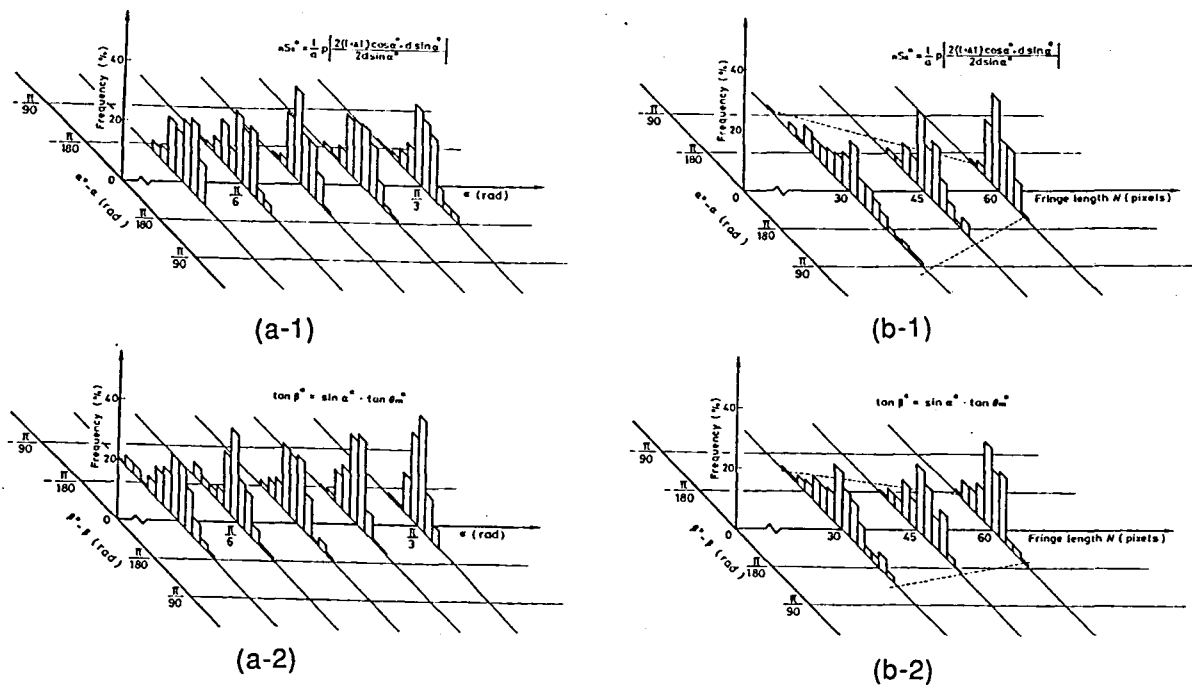


Fig.6.20 Measuring accuracy of surface gradient.
 (a) influence of surface gradient
 (b) influence of fringe length

が計測できている。

また、円柱の場合，Fig.6.17 に示したモアレ縞画像に対しては，円柱の中心軸 \vec{n} の傾きの計測誤差は約 1° 以内であった。

対象物体上の各点の3次元座標値の計測誤差は，物体の個々のサイズ，面の傾き等により変わり，一意的に表現できないが，本実験で適用した物体におけるサイズの計測値として，視野サイズの2%程度であった。

画像入力から3次元形状記述までの本システムの処理時間は，全体で約11秒かかっている。

なお，この処理時間は，CPUが80486のパーソナルコンピュータで処理した結果である。処理時間の内訳をTable 6.1に示すが，ハフ変換に8.3秒，縁辺検出に2.0秒要している。この2つの処理以外の形状情報抽出・記述処理としては，約1秒となっている。ハフ変換処理および縁辺検出処理は関数変換処理なので，専用プロセッサ化が可能である。

Table 6.1 Processing time.

Processing		Processing time (s)
Edge detection		2.0
Hough Transform	Edge image	2.3
	Pattern image	6.0
Parameter extraction		0.2
Shape description		0.3
Scanning each surface		0.6

(Processing CPU; 80486, 20MHz)

6.6 結論

形成原理の異なる濃淡画像とパターン投光画像を併用することにより、各々の長所を生かした抽出情報の信頼性の高い3次元視覚システムを構築した。以下に本システム構築に当たり明らかにした点およびシステムの性能を要約する。

- (1) 濃淡画像とパターン投光画像はその形成原理が異なり、各々から得られる形状情報、および、形状情報の抽出できない範囲が異なる。本システムでは、特に、
 - (a) パターン画像の面境界でのパターンの変化が面境界線に沿って離散的であるのに対し、濃淡画像における濃淡変化は連続的であり、縁辺の検出には濃淡画像が優れている。
 - (b) 濃淡の変化は、形状の変化だけではなく対象面の面質によっても異なるのに対し、パターン投光画像におけるパターンは形状の変化によってのみ変化をする。このため、抽出された形状情報の信頼性はパターン画像の方が優れている。ことに着目し、濃淡画像からの縁辺検出画像を基にまず2次元形状記述を行い、この記述データを基にパターン情報を抽出して、2次元形状記述データの見直し、欠落データの追加を行う形状情報抽出アルゴリズムを構築した。このアルゴリズムにより、形状情報の取得されい状況を少なくすることができ、信頼性の高いシステムが構築された。
- (2) 本システムにおける計測精度は、2次元投影図上での頂点位置誤差が2画素以内、面の3次元の傾き α 、 β の計測誤差が約 1° となっており、各頂点の3次元座標値の計測誤差は、視野サイズの2%程度である。
- (3) 本視覚システムの画像形成から3次元形状記述までの処理時間は、パーソナルコンピュータ（CPU 80486, 20 MHz）を用いて約11秒である。この処理時間の中で、ハフ変換の占める割合が8割以上（約8秒）である。

第7章 CADモデルデータに基づく3次元物体形状・姿勢の照合・認識

7.1 はじめに

前章までに示したように，形成原理の異なる濃淡画像とパターン画像を併用し，信頼性の高い形状情報抽出と相互の形状情報の補填・補正による情報取得範囲が広く，かつ，信頼性の高い3次元視覚システムを構築した．この3次元視覚システムの製造分野における応用としては，

- 1) 作業対象既知のマテリアルハンドリング，組立て，溶接などにおける位置・姿勢計測センサー
- 2) 目的とする作業物体を複数の作業対象の中から選別・抽出するための形状情報抽出などがある．

本章では，視覚システムから得られた形状情報をもとに，無作為に置かれた3次元対象物体が何であり，どのような姿勢に置かれているかを同定する形状認識への応用について検討する．

形状の認識では，人間が知識を基に目で見たとものを認識するように，予めコンピュータ内に蓄積された対象物体の幾何学的設計データと対比・照合するモデルベースビジョンが有効である^{143) -147)}．文字，地図，プリント基板上の配線などの2次元平面内に書かれたものの識別やパーツフィーダーなどで規定の姿勢に固定された3次元物体（2次元としての取扱い）の形状認識は各方面で研究されており，すでに実用化されている^{148) -170)}．また，3次元物体の形状認識に関しても，2次元視覚情報からの照合・認識^{171) -184)}，3次元視覚情報を用いた照合・認識^{185) -196)}が研究されている．

この3次元物体の形状照合・認識は2次元物体の形状照合・認識と比べて，

- (1) 物体の置かれ方や撮像する方向により，見え方が異なり，得られる形状情報が異なる．
- (2) 視覚データの不確実さ，不完全さが相対的に大きい．

の2点が大きく異なっている．つまり，3次元物体の形状認識においては，

- I) 視線方向による見え方の変化の効率的な抽出方法
- II) 見え方の変化に対処可能な形状データ表現，データ構造の確立および効率的形状照合方法
- III) 視覚情報の不確実さ，不完全さに対処可能な形状照合方法

などを検討する必要がある．

本章では，多面体対象物体を対象にした3次元物体形状・姿勢の照合・認識における上記課題について検討している．また，本章で取り扱っている投影形状は正写影を前提としている．

まず，第Iの課題である3次元物体の投影形状（見え方）の分類法としては，従来より2種類の方法が提案されている．1つは，視点球の均一分割を利用する方法^{197)・198)}，他方は，アスペクトグラフを用いる方法である^{199) -208)}．このうち，視点球の均一分割を利用する方法は，

対象となる物体の形状に制約されない利点を有している。しかし、その見え方の分類は物体形状に対する分割の細かさに依存する。一方、アスペクトグラフに基づく方法は、物体の形状に即した方法であり、正確に見え方を分類することができる。しかし、このアスペクトによる分類は、視点球（ガウス球）を使って表現しているため、同じ見え方をする視線領域および視線領域間の関係を表現するのが難しい。このアスペクトによる分類では、見え方の変化点が重要であり、各種の観点から、この見え方の変化点の抽出方法が検討されている。Gigus と Malik は、物体の縁辺と頂点の投影の一致および隣接しない3縁辺の投影が1点で交差する点が隠れ関係による見え方の変化点としてとらえ、見え方分類のアルゴリズムを提唱している²⁰⁴⁾⁻²⁰⁶⁾。彼らは、まず、物体をワイヤフレーム構造としてとらえ、見え方の変化する点を算出し、その後で、ソリッドモデルとして不都合な箇所を削除して見え方の分類を行っている。しかし、この方法では、演算回数が非常に多くなり、処理が複雑となる。

本章では、視点球における視線ベクトルを極座標表示したときの偏角(α , β)で表わされる直交座標平面上に同じ見え方をする視線領域を描画・表現し、見え方の変化点をソリッドモデルにおける面間の隠れ関係から抽出する方法について提案・検討している。

次に、第Ⅱの課題は、3次元物体に対する視覚データが視線方向により変化することによる照合対象データの大幅な増加に対する課題である。つまり、3次元物体が異なった見え方となる視線方向は非常に多く、面数10~20の簡単な形状の物体においても数百の異なった見え方を有する。このため、このすべての見え方を照合対象データとして持たせると、データ量が莫大になるだけでなく、照合回数が非常に多くなり、照合効率が問題となる。この3次元物体の見え方の変化への対処については、3次元物体の視線方向による見え方の分類に基づき、類似の見え方を階層化することで、見え方の変化に対処し、かつ、照合効率の改善をはかる方法が提案されている¹⁸⁰⁾⁻¹⁸⁴⁾。しかし、処理対象モデル数が多くなったり、形状が複雑になれば、モデルデータ量が莫大になる。

人間が物体を認識する時、まず、その物体を特徴づける形状で照合する。本研究における照合法もこの物体の特徴形状による照合に立脚し、まず、特徴形状によりモデルとの対応をとり、その後で、その対応された形状を重ね合わせたときの全体形状の一致度（照合度）から最終的に形状の照合・認識判定を行う2段階照合法について検討している。また、モデルデータ量の圧縮、照合の効率化のための形状要素の階層化についての検討も行っている。

最後の課題である視覚データの不完全さ、不確実さとしては、濃淡画像からの縁辺検出時の縁辺欠落と抽出線分、頂点の位置誤差がある。本研究では、縁辺欠落に対しては、形状モデルデータに縁辺の欠落想定データを持たせ、また、抽出位置誤差に対しては、視覚から得られる形状データにおいて抽出位置誤差を考慮することにより、視覚データの不確実さに対する対応について検討している。この縁辺欠落に対処させるための隣接面形状データは物体を特徴づける面となる可能性が高く、照合の対応数が少なくなるため、照合の効率化に対しても有効であると考えられる。

7.2 CADモデルデータに基づく3次元物体の形状照合の考え方と処理の流れ

Fig. 7.1 に示すような作業空間に置かれた物体(Object)に対して、視覚システムにより得られた物体の形状情報(Image)とコンピュータ内に格納されている物体モデル(Model)とを照合する場合、考慮しなければならない点は、

- 1) 照合効率
- 2) 照合の信頼性

の2点である。

3次元物体を規定する形状要素としては Table 7.1 に示すように、物体レベル、面レベル、稜線レベル、頂点レベルと種々あり、これらの形状要素の値は視線方向により変化する。3次元物体の形状照合において、信頼性の高い照合を行うには、最終的には、視覚システムにより得られたある一視線方向からの投影形状(縁辺線画像)とモデルの投影像(線画像)との一致判定(稜線、頂点レベルでの照合)を行う必要がある。しかし、形状照合を最初の段階から稜線や頂点レベルで行うと、照合の組み合わせが非常に多くなる。さらに、視覚により得られる

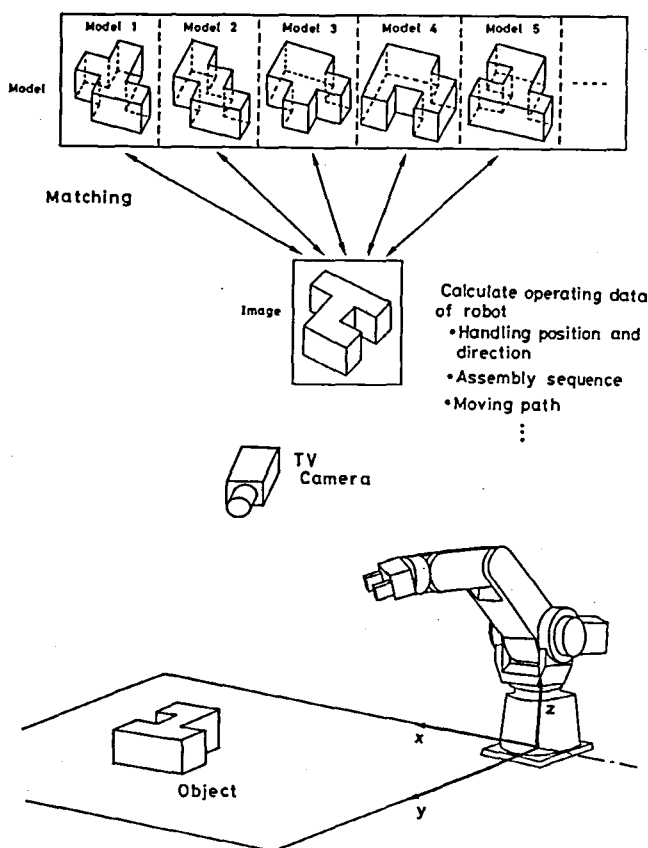


Fig.7.1 Object recognition in assembly process.

Table 7.1 Shape factor.

Level	Shape factor
Object level	Number of surfaces Number of edge lines Number of parallel edge lines Number of vertexes Number of convex vertexes Number of concave vertexes Link between elements Volume Superficial area Periphery shape (cf. surface level) . .
Surface level	Area Gradient Principal axis Moment of inertia Aspect ratio Contour length Number of concavities Number of edge line Number of parallel edge lines Number of straight edges Number of curved edges Number of vertexes Number of convex vertexes Number of concave vertexes Concavo-convex row of vertexes Planar surface or curved surface Existence of hole Shape of hole (cf. surface level) . .
Edge line level	Length Gradient . .
Vertex level	Coordinates Vertex angle . .

形状データは、デジタル画像処理上の標本化誤差，検出性能に伴う形状データの不完全さ，不正確さを有しており，サイズにともなう形状要素での一致判定は非常に複雑となる。

また，視覚システムにより得られたある一視線方向からの形状データに一致するモデル内の形状要素を Fig. 7.2 に示すように，視覚で得られた各面 S_i の形状とモデル内の各面 S_i^j の形状の一致を判定し，視覚で得られた全ての面形状が一致するモデルを抽出する無作為逐次対応方法は，照合回数が非常に多くなり効率が悪くなる。

人間が3次元物体を認識する場合，まず，目でとらえた物体の概略形状で物体を限定し，その限定された物体に対して細部の形状データを照合することにより，視覚により得られた物体を特定している。従って，コンピュータビジョンによる形状照合認識においても，視覚により得られた形状データの中の最も特徴的な形状データからモデルおよびモデル内の形状要素候補を選出し，この選出されたモデルデータと視覚から得られた形状データを照合する Top-down 的照合方法が照合効率上有効であると思われる。この Top-down 的照合では，形状照合を次の2つの過程で行うことになる。即ち，

- (1) 視覚で得られた形状情報の中の特徴的形状データを有するモデルデータを選出する過程。
- (2) 形状特徴から選出されたモデルデータと視覚データとの形状データの全体照合過程。

まず，照合過程1を効率良く行うには，モデルデータにおける形状要素のグループ化が必要となる。Fig. 7.3 に示すように，同じ要素値を持つものをグループ化すれば，視覚で得られた形状に相当するモデルデータ候補の抽出が容易であり，さらに，同一グループに属する要素数

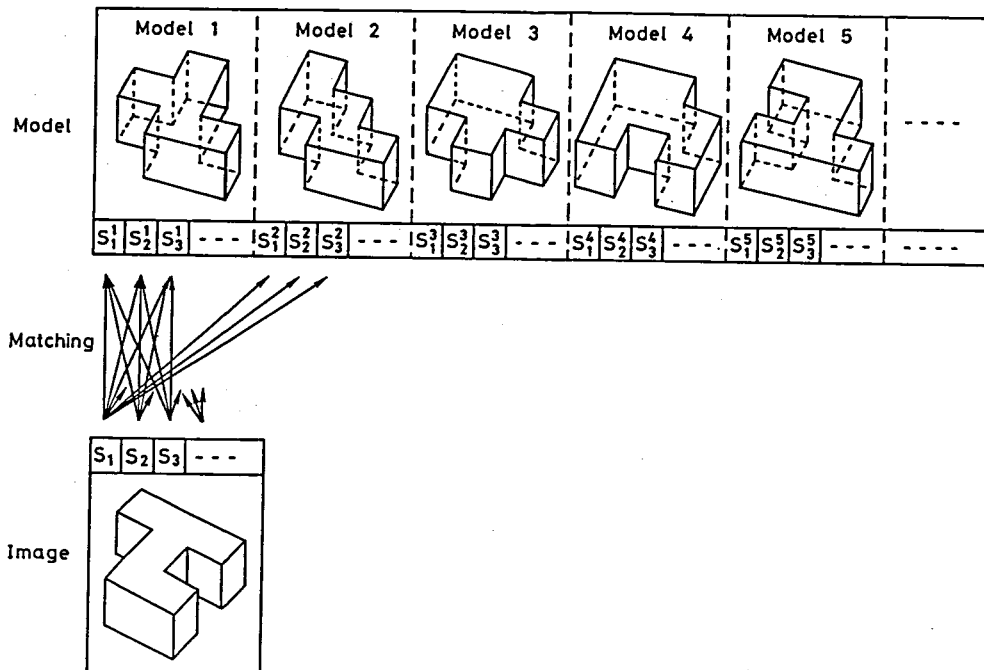


Fig.7.2 Non-hierarchical shape matching.

により、形状の特殊度（特徴的な形状）を明確にすることができる。稜線の長さや面分の面積のようなサイズを伴う形状要素は視線方向により大きく変化するため、形状要素のグループ化には、Table 7.1 に示した形状要素の内、面を構成する頂点数、面の凹部数、穴の有無、平行稜線数、などのサイズを伴わない形状要素が適している。

次に、照合過程2では、照合過程1で特徴的な形状データから抽出されたモデルデータに対して、視覚から得られた形状データすべてに対して一致しているかを調べる過程であり、そのためには、辺の長さや面の面積などのサイズを伴う形状要素での照合が必要となる。一般に、照合に用いる形状要素は、処理

対象物体、視覚システムから得られる形状情報により変わる。つまり、曲面、曲線を含む物体を対象とする場合、形状特徴での照合（照合過程1）では、形状のグループ化に曲線数等の曲線、曲面に関する形状要素を考慮することが必要となることがある。また、穴を有する物体を対象とする場合、個々の面の形状データとして、穴の有無、穴の形を考慮することが必要となることがある。

視覚システムから得られる形状情報としては、第2章で示した縁辺検出画像から得られる2次元投影形状データと第3章で示したパターン画像から得られる3次元形状データがある。3次元視覚システムから得られる形状情報は、2次元視覚システムから得られる2次元投影形状データとその個々の要素（面、稜線、頂点）の3次元形状値（面の傾き、面積、稜線の長さ、頂点の3次元座標など）が同時に得られる。これらの3次元形状値は、面、稜線、頂点などの形状要素対応がとれたときの視線方向の算定、および、細部の形状照合に利用できる。しかし、3次元形状データが得られる視覚システムにおいても、一般にある一視線方向からの形状データであり、CADモデルデータのように物体全体の形状データは抽出されない。

本章では、基本的な処理対象物体としては、Fig. 7.2 に示したような穴を有しない多面体対

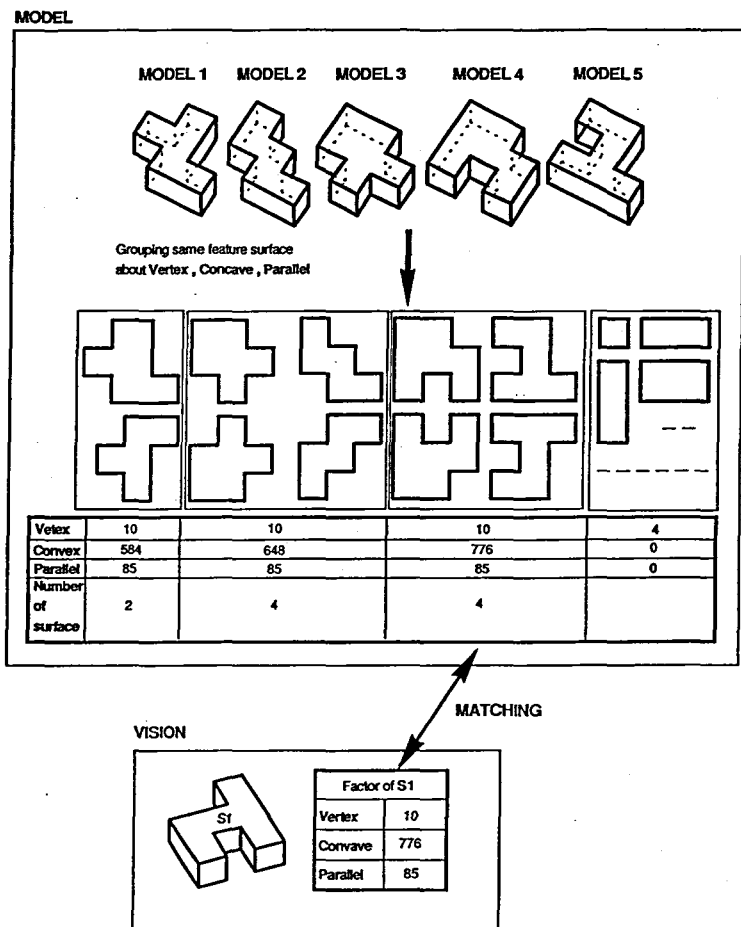


Fig.7.3 Effective matching by grouping of shape.

象物体を対象とし，ボルト穴等の存在する物体の場合には，視覚システムによる形状データ抽出において，曲線を抽出しないようにしている．照合過程1における形状要素による形状データのグループ化，形状特徴による照合に用いる形状要素としては，物体形状を特徴づける面の2次元投影形状要素を用いている．照合過程2では，照合過程1で抽出された視覚データとモデルデータ間の対応面を一致させるようにモデルデータの座標変換を行い，両データを重ね合わせるにより稜線の一致をもって照合を行っている．つまり稜線レベルでの形状要素照合を行っている．

Fig.7.4 は，本研究で採用したCADモデルデータに基づく3次元物体の形状照合処理の流れを示したものである．ここで，形状照合の基になるデータは，CADシステムで設計された処理対象物体のモデル設計データと視覚システムから得られるTVカメラで撮影した対象物体の形状データである．図にみるように，処理は2つの処理系からなる．第1番目の処理系は，CADモデルデータを照合に適したデータに変換する処理で，モデル処理系と呼ぶ．この処理は，照合処理を行う前準備の過程，つまり，オフライン処理であるため，処理時間（効率）はあまり問題とならない．第2番目の処理系は，視覚で得られた形状データとモデル処理系で作られたモデル形状データとを照合する過程で，照合処理系と呼ぶ．この照合処理系はオンライン処理であり，処理時間（効率）が非常に問題となる．

本照合処理では，照合効率の観点から前述のように，まず，物体の投影面形状から対応面（対応する物体）を抽出する．3次元物体の場合，この投影形状は視線方向により変化する．このため，モデル処理系では，視線方向の変化にともなう投影形状の自動抽出が必要となる．また，面の投影形状での対応を取るため，モデルデータを面の投影形状で階層化した構造にする必要がある．

さらに，照合処理系では，面の投影形状からモデル内の対応する面を抽出（Surface level matching）し，視覚データ内の注目面と対応されたモデル内の面とを重ね合わせて，線分レベルでの一致度（Edge level matching）から形状照合を行う．このため，照合手順及び照合判定方法が非常に重要となる．

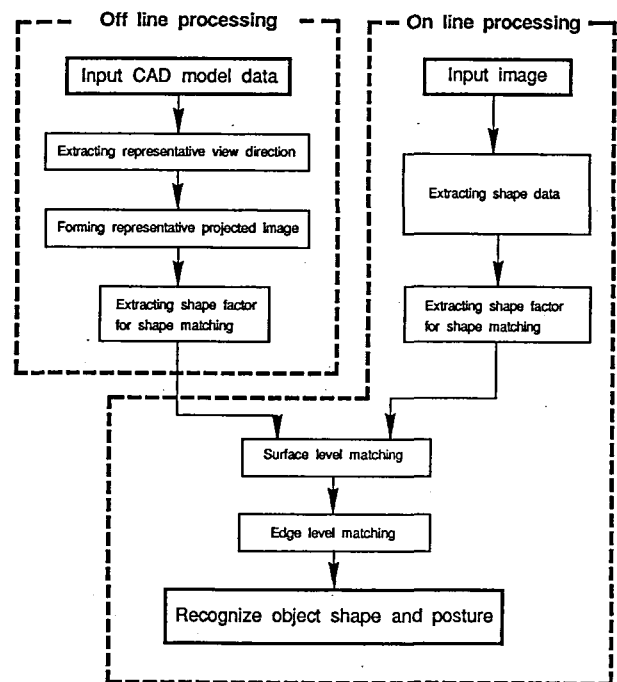


Fig.7.4 Algorithm for 3-D shape matching.

7.3 3次元CADモデルデータからの投影形状分類

7.3.1 視線方向による投影形状の変化

3次元物体において、形状要素値を考える場合、問題となるのが視線方向による見え方の変化である。つまり、視線方向により形状要素値が変わる。このため、照合のためのモデルデータにおいて、すべての見え方を抽出する必要がある。

Fig.7.5(a)のように3次元物体が置かれているとする。この時、この物体を見ることのできる視点空間を示しているのが図中の半球である。いま、視点1、視点2からこの物体を見ると、物体の見え方は図(b-1)、(b-2)に示すように異なる。このように、視点空間内のさまざまな方向から物体を見ると、物体にはその視線方向つまり視点の位置の数だけの見え方が存在することになる。しかし、個々の投影形状を比較すると、大部分のものは形状が似通っている。

なお、本章で使用している”見え方の変化”とは、頂点数やその頂点の頂角が凸角であるか凹角であるかといったサイズを伴わない形状変化のことである。また、同じ見え方となる視線方向は視点空間においてある領域を有し、この同じ見え方を呈する視線領域の代表点を”代表視線方向”，代表視線方向に投影したときの投影形状を”代表的投影形状”と呼んでいる。さらに、物体を構成している各面の相互間における投影時の重なり関係を”面間の隠れ関係”と呼んでいる。

一般に、視線方向の変化に伴って見え方が変化するのは、物体の見えている面が変わった場合と面間の隠れ関係によってである。

ここで、まず、面間の隠れ関係について検討する。多面体において、その構成面 S_1 と S_2 の2面だけを取り出した時、面 S_1 が面 S_2 を隠す見え方を呈するのは、面 S_1 に含まれる頂点のうち、少なくとも1つの頂点が面 S_2 よりも物体の外側に存在し、かつ、面 S_1 の内側に面 S_2 に含まれる頂点が少なくとも1つ存在していることである。つまり、

$$\begin{aligned} \vec{n}_2 \cdot \frac{\vec{V}\{S_1\} - \vec{V}\{S_2\}}{\|\vec{V}\{S_1\} - \vec{V}\{S_2\}\|} < 0 \\ \vec{n}_1 \cdot \frac{\vec{V}\{S_1\} - \vec{V}\{S_2\}}{\|\vec{V}\{S_1\} - \vec{V}\{S_2\}\|} < 0 \end{aligned} \quad (7.1)$$

\vec{n}_1 (\vec{n}_2) ; 面 S_1 (面 S_2) の法線ベクトル

$V\{S_1\}$ ($V\{S_2\}$) ; 面 S_1 (S_2) に属する頂点

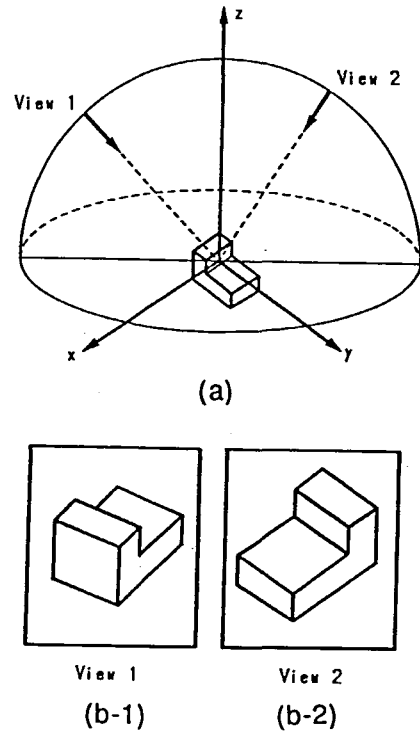


Fig.7.5 Object appearance from different view direction.

を満たしているならば視線方向により、面 S_1 は面 S_3 を隠すことがある。

しかし、この隠れ関係は判定した2面だけが存在している場合である。実際には、この2面以外の面も存在しており、上述の隠れ関係を呈する2面間に他の面が存在している場合、この隠れ関係を呈する投影が成り立たないことがある。

本研究で取り扱っている多面体対象物体の場合、面間の隠れによる見え方の変化は、隠す面 S_a 上の頂点が隠される面 S_b の内部に投影されるか、外部に投影されるかにより生じる。このため、面間の隠れによる見え方の変化点の抽出は、式(7.1)で判定された面間で、隠す面 S_a 上の頂点 $V_1 \{S_a\}$ と隠される面 S_b の輪郭を結ぶ直線 $\overline{V_1 \{S_a\} P_j \{S_b\}}$ 上に他の面が存在しないとき、この視線を境界に見え方が変化をする。この直線上に他の面が存在するとき、頂点 V_1 の面 S_b 上への投影は存在しない。

Fig. 7.6 に示す物体に対して、判定式(7.1)に基づいて面間の隠れ関係の判定を行った結果、隠される面として S_1, S_2 の2面が抽出された。この場合、面 S_1 は面 S_3, S_4, S_6, S_7 に属する頂点 V_3, V_4, V_9, V_{10} が面 S_1 上に投影される形で隠れ関係を呈する。面 S_2 も同様に、面 S_0, S_5, S_6, S_7 に属する頂点 V_0, V_1, V_6, V_7 が面 S_2 上に投影される形で隠れ関係を呈する。しかし、頂点 V_9, V_{10} の面 S_1 上への投影、および、頂点 V_0, V_7 の面 S_2 上への投影を考えた場合、これらの間に他の面が存在し、この投影は実際には存在しない。このため、この多面体対象物体においては、頂点 V_3, V_4 の面 S_1 上への投影、頂点 V_1, V_6 の面 S_2 上への投影により隠れ関係を呈することになる。

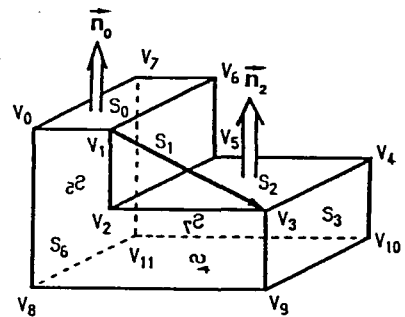


Fig.7.6 Phase relation between surfaces.

7.3.2 視線ベクトル領域図の作成

物体をモデル座標系における視点球から見た時、その視線ベクトル(単位ベクトル)として Fig. 7.7 に示すように、極座標表示したときの偏角 (α, β) を視線方向ベクトルの方向角として用いる。この時、視線ベクトル $\vec{v}(\ell, m, n)$ と視線方向角 (α, β) の関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} \ell &= \cos \alpha \cos \beta \\ m &= \sin \alpha \cos \beta \\ n &= \sin \beta \end{aligned} \quad (7.2)$$

視線方向角 (α, β) で表される直交座標平面上に

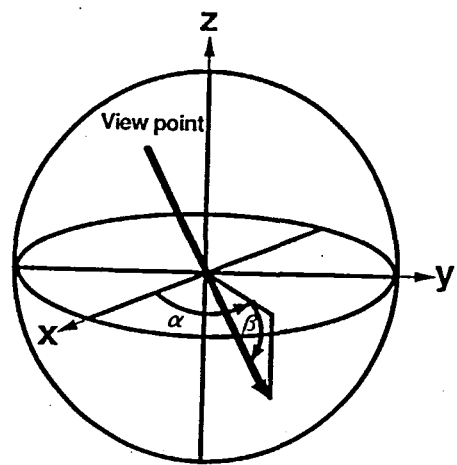


Fig.7.7 Representation of viewing vector in 3-D view space.

同一の見え方をする領域を描画したものを視線ベクトル領域図とする。

物体の投影形状が変化する一つの原因として、物体の構成面のうちどの面が見えているかということが挙げられる。Fig. 7.8(a)に示す物体の面 S_1 の可視空間は図中の S_1 上に描かれた半径 r の半球上のすべての点である。この半球上の視線方向範囲は視線方向ベクトルを \vec{v} 、面 S_1 の法線ベクトルを \vec{n}_1 とすると、 \vec{n}_1 を法線ベクトルとしてもつ面を見ることのできる視線方向の条件は、

$$\vec{n}_1 \cdot \vec{v} < 0 \quad (7.3)$$

を満たす角度範囲である。ここで、

$$\vec{n}_1 = (\ell, m, n) \quad (7.4)$$

$$\vec{v} = (\cos \alpha \cos \beta, \sin \alpha \cos \beta, \sin \beta) \quad (7.5)$$

とおくと、 \vec{v} の満足すべき条件は式(7.3)より、

$$\ell \cos \alpha \cos \beta + m \sin \alpha \cos \beta + n \sin \beta < 0 \quad (7.6)$$

となる。つまり、個々の面に見える視線領域は各面の法線ベクトルに対して(7.6)式を満足する領域を描画すれば良い。Fig. 7.8(a)の面 S_1 を見ることのできる視線領域を示したものがFig. 7.8(b)である。

このように、物体の各面に対して、可視空間の視線方向角を同一の視線ベクトル領域図上に描画すると、領域図内に見える面に応じたいくつかの領域ができる。この領域の数だけの見え方が存在することになる。

凸多面体の場合には、面間の隠れ関係は存在しないので、この個別の面に見える領域描画で、異なる見え方となる視線領域が描画される。

次に、隠れ関係にともなう見え方の変化であるが、前述したように面間の隠れ関係は物体上の頂点と面間の位相関係できまる。隠れ関係にある頂点と面の組合せにおいて、隠す可能性のある頂点がそれにより隠される可能性のある面への投影位置により物体の見え方が変化する。つまり、

Fig. 7.9(a)に示すような物体の場合には、隠す可能性のある頂点 V_1 がそれにより隠される可能性の

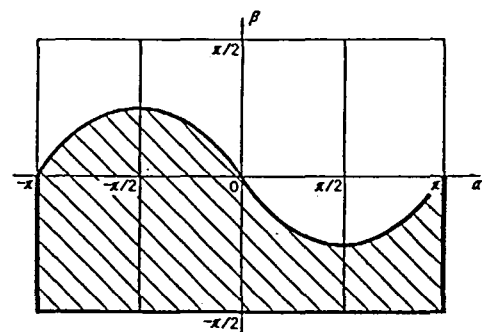
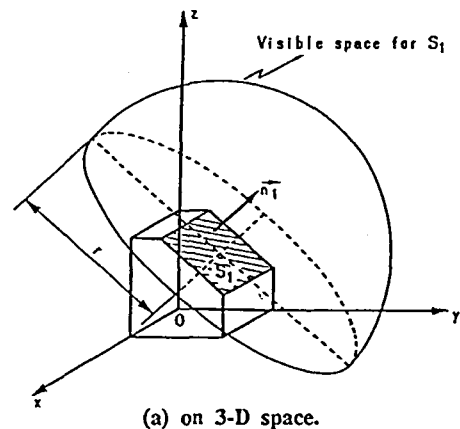


Fig.7.8 Visible space for surface S_1 .

ある面 S_2 の内部に投影されるか外部に投影されるかで見え方が変化する。この見え方の変化点を視線ベクトル上に描画するには、隠される面 S_2 の稜線上に動点 V_p をとり、この点 V_p を面 S_2 の稜線に沿って一周させたときの $\vec{V_1V_p}$ ベクトルの偏角 (α, β) 、即ち、隠す点 V_1 が隠される面 S_2 の稜線上に投影される場合の視線方向角を描画すればよく、図(b)に示すような領域図が得られる。

このようにして、面間の隠れ関係にある頂点と面すべての組み合わせに対して、同一の視線ベクトル領域図に描画すると、いくつかの閉領域ができる。この閉領域の数だけ面間の隠れ関係による見え方が存在することになる。

Fig. 7.10は、個々の面が見える領域と、隠れ関係を呈する領域の両者を一枚の領域図として描画した視線ベクトル領域図である。各領域内の視点から物体を見た場合、物体の見え方は同一になっている。

この視線ベクトル領域図では、領域の数が14、境界線の数は32で境界線の交点は19あり、この物体を特徴づける代表視線方向は全部で65点にもなる。なお、各境界線上の点は隠れ関係を呈する場合の隠す側の頂点が隠される側の面の境界線上に投影される場合、および個々の面が見えなくなる境界を示している。これらの見え方の得られる視線方向は全視線空間の極一部である。

なお、多面体対象物体の中には立方体のような形状の対称な物体がある。立方体の代表的な見え方は3通り（1面だけが見えている場合、2面が見えている場合、3面が見えている場合）だけである。しかし、形状の対称性を考慮しない場合、1面だけが見える見え方は6通り、2面が見える見え方は12通り、3面が見える見え方は8通りある。

同一の見え方を引き起こす形状の対称性は回転対称である。このため、形状の対称性を考慮する場合、同一の見え方となる回転周期から視線ベクトル図の描画範囲を制限すれば良い。立方体の場合、ある1面をFig. 7.5 に示す視点空間内の $x y$ 平面に置いたとき、 α 方向、 β 方向に各々 $\pi/2$ の回転周期で同一形状となる。このため、 $0 \leq \alpha, \beta < \pi/2$ の範囲で視線ベクトル図を描画することにより、形状の回転対称性による同一の見え方を除外することができる。

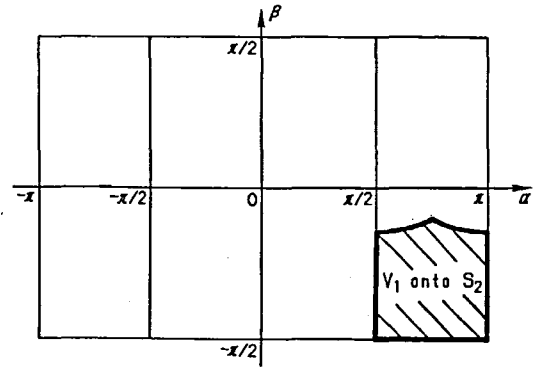
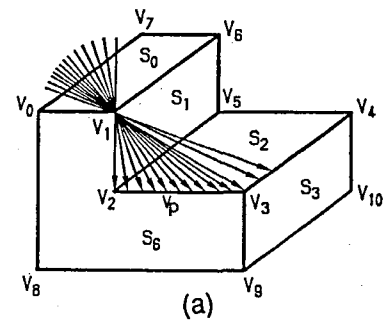


Fig.7.9 Drawing method of view area in occluding state.

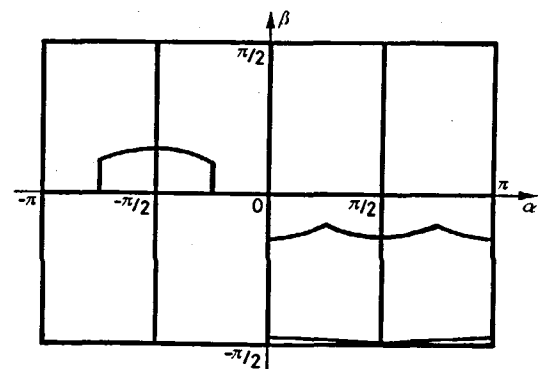


Fig.7.10 Viewing vector map for the object shown by Fig.7.9.

7.3.3 代表投影形状の抽出

視線ベクトル領域図から各見え方を代表する視線方向を抽出するには、各領域、境界線、境界線の交点を抽出し、抽出された各閉領域、各境界線、各交点から一点ずつの代表視線方向角 (α, β) を選び出せば良い。

この一連の処理の流れを示したのがFig. 7.11である。描画された各視線領域の境界線は、基本的には線幅1の線画像であるが、視線ベクトル角算出時の整数化により、線幅が1でない箇所が生じる。このため線分追跡を容易に行うため、まず細線化処理²⁰⁹⁾を行っている。この前処理を行った後、各領域の追跡処理を行い、境界線、境界線の交点を抽出する。その後、抽出された各領域の境界線上の各点の視線方向角から代表視線方向角を抽出する。この代表視線方向角は、領域の内部点で、かつ、できるだけ領域の中心に近い点を抽出するのがよい。

まず、各領域の内部点抽出であるが、本研究では各領域の追跡点列 (α_1, β_1) から領域内部の候補点 $P_p(\alpha_p, \beta_p)$ を選出し、その候補点が今追跡した閉領域の内部点であるかを調べ、領域の外部点であれば次の優先順位候補点を算出し、同様に領域の内外判定を行う。以上の手順で領域の内部点を抽出している。

内部点の候補点は以下の式に基づいて選出している。内部点の候補点は式(7.7)、(7.8)に基づいて選出している。第1候補点は領域の重心で、第2候補以降は境界線上の点列の中の $n/2$ 離れた2点(n は境界線上の点列数)を結ぶ直線の内分点(1:3, 1:1, 3:1)としている。

$$\text{候補1} ; (\alpha_p, \beta_p) = (\sum \alpha_i / n, \sum \beta_i / n) \quad (7.7)$$

$$\begin{aligned} \text{候補 } m ; \alpha_p &= k(\alpha_h + \alpha_{n/2+h}) / 4 \\ (m \geq 2) \beta_p &= k(\beta_h + \beta_{n/2+h}) / 4 \end{aligned} \quad (7.8)$$

m	2	3	4	5	6	7	8	9	...
k	1	2	3	1	2	3	1	2	...
h	0	0	0	5	5	5	10	10	...

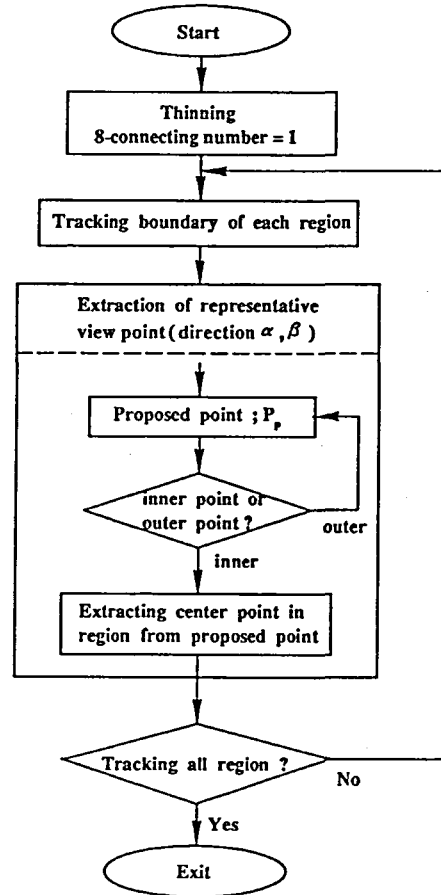


Fig.7.11 Algorithm for detecting representative view angle.

領域の内部点が抽出されると、次に、この点を領域の中心に移動させる処理を行う。Fig. 7.12に示すように領域の内部点Aから α 方向へ直線を引き、境界線との交点 A_1, A_2 の中点をB点とし、このB点から β 方向に直線を引き、境界線との交点 B_1, B_2 の中点をC点とする。この処理を順次 α, β 方向に繰り返すことにより、任意の内部点から、領域中心を抽出することができる。

なお、本研究では、 α, β 各方向に1回ずつ行っている。このようにして、得られた各領域内の点を代表視線方向角とする。

この手順によって抽出された各領域ごとの代表視線方向角がTable 7.2の領域番号1から14である。この各番号に対する視線ベクトル領域図上の領域と、その各々の投影形状を示したのがFig. 7.13(a)である。なお、表中の面積比(Area ratio)とは、全視線領域に対する各視線領域の割合(見え方の出現度合)の概算値を示したものである。視線領域面積は、厳密には視点球上で算出しなければならない。しかし、球面上での領域面積を算出するのは困難である。ここでは、2次元で表現した視線領域図上での領域面積比を球面上での面積比の概算値として考えて算出している(Table 7.2中の面積比)。各視線領域の面積は、

$$S = 0.5 \times | \int (\alpha d\beta - \beta d\alpha) | \quad (7.9)$$

で求まる。なお、 (α, β) は視線ベクトルを極座標表示したものを直角座標で表示しているため、各 β に対する α 値を補正しなければならない。つまり、

$$\begin{aligned} \alpha^* &= \alpha \cos \beta \\ \beta^* &= \beta \end{aligned} \quad (7.10)$$

また、 α, β は、領域図上では離散値なので、

$$S = 0.5 \times | \sum (\alpha_i \beta_{i+1} \cos \beta_i - \beta_i \alpha_{i+1} \cos \beta_{i+1}) | \quad (7.11)$$

となる。各領域面積を S_i とすると、面積比 R_i は、

$$R_i = S_i / \sum S_i \quad (7.12)$$

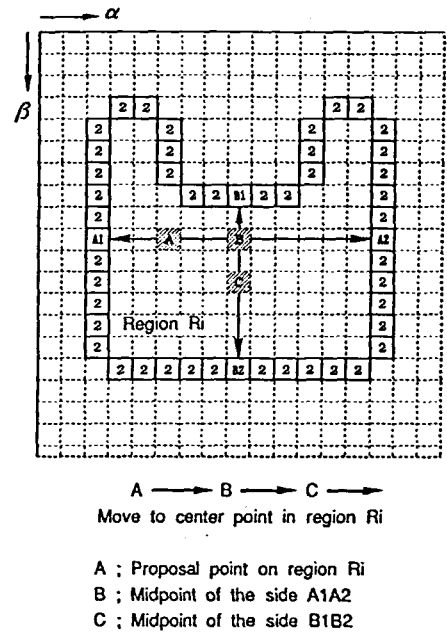


Fig.7.12 Moving to center point in each viewing region.

Table 7.2 Extracted representative view angle.

Area name	View angle [rad]		Area ratio
	α	β	
1	2.35	1.09	0.08438
2	-0.78	1.09	0.08319
3	0.78	0.79	0.12501
4	2.35	0.79	0.12501
5	-2.35	-0.78	0.12593
6	-0.78	-0.78	0.12579
7	-0.78	-1.07	0.05520
8	2.35	-1.07	0.05544
9	-1.95	0.21	0.02531
10	-1.18	0.21	0.02489
11	0.78	-0.17	0.04332
12	2.35	-0.17	0.04347
13	0.44	-1.54	0.00010
14	2.70	-1.54	0.00010
15	0.46	-0.42	/
16	1.19	-0.43	
17	1.57	-0.46	
18	1.95	-0.43	
19	2.68	-0.42	
.	.	.	
.	.	.	

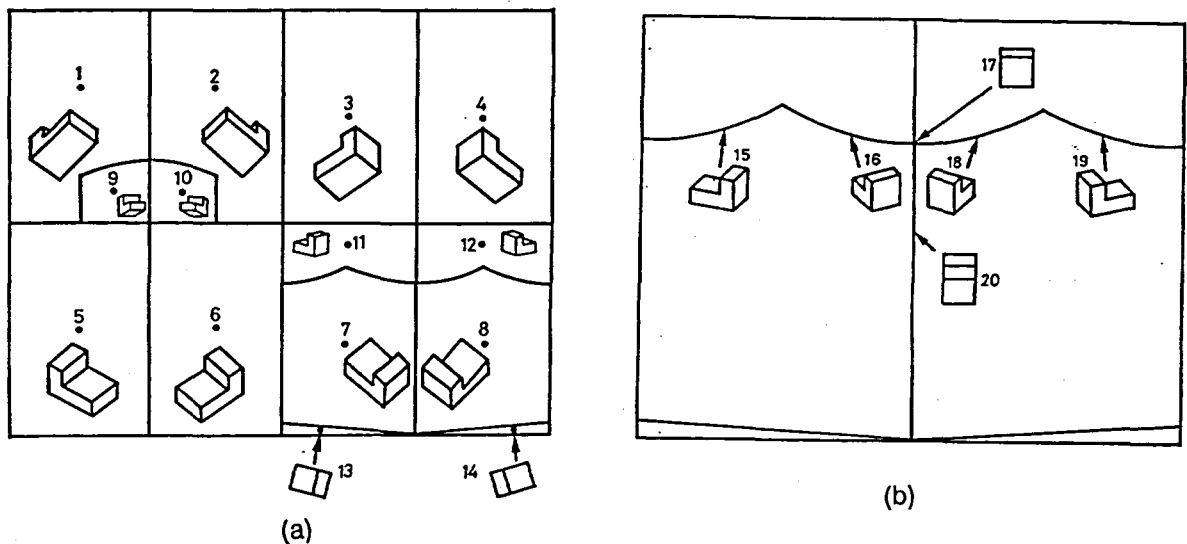


Fig.7.13 Representative projected shape in each viewing region.

となる。

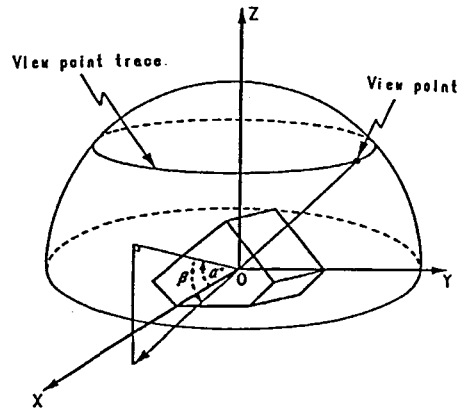
また，視線ベクトル領域図における境界線上や境界線の交点に対する代表的投影形状の一部を示したのがFig. 7.13(b)である．なお，この各々に対する視線方向角を示しているのがTable 7.2の領域番号15から19である．

7.4 物体の安定姿勢を考慮したときの代表投影形状抽出

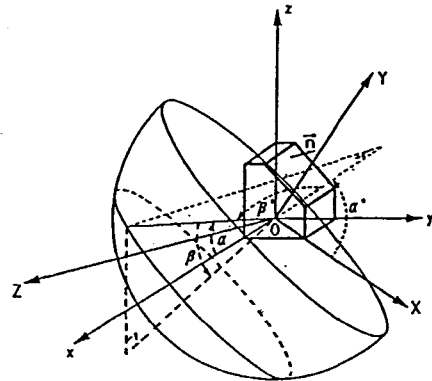
視線ベクトル領域図の各領域から抽出された代表視線方向角は物体をあらゆる方向から見た場合の見え方の代表形状をとらえている．このため，Fig. 7.6(a)に示したような単純な物体の場合でも，特異な見え方を含めると65通りの代表視線方向がある．面数の多い物体になれば，この領域数は何百通りにもなってしまう．しかし，一般に物体はその物体に固有な何通りかの安定姿勢で置かれている．さらに，この物体をTVカメラで撮影するとき，Fig. 7.14(a)に示すように，TVカメラが床面から β' の方向に設置されているため，視線方向は図に示すようになる．このように，TVカメラの配置および物体の安定姿勢を考慮することによって，物体の代表的投影形状を大幅に減らすことができる．本節では，この物体の安定姿勢を考慮したときの代表投影形状の抽出方法について検討する．

7.4.1 視点軌跡の視線ベクトル領域図への描画

Fig. 7.14(b)は物体が置かれている作業座標系(XYZ座標系)における視線方向角(α' , β')とモデル座標系(xyz座標系)における視線方向角(α , β)との関係を示したものである．安定姿勢を考慮したときの視線方向の描画は，この作業座標系(XYZ座標系)における視線方向角(α' , β')をモデル座標系(xyz座標系)における視線方向角(α , β)に変換して描画すればよい．



(a) stable posture of object work



(b) model coordinate system and world coordinate system

Fig.7.14 Viewing direction for stable posture.

まず, $x y z$ 座標系における基本ベクトルを $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$, $X Y Z$ 座標系における基本ベクトルを $(\vec{e}_1^*, \vec{e}_2^*, \vec{e}_3^*)$ とする. また, 安定姿勢で置かれているときの設置面の法線ベクトルを $\vec{n} = (\ell, m, n)$ とし,

$$\begin{aligned} p &= \sqrt{(\ell^2 + m^2)} \\ q &= \sqrt{(\ell^2 + m^2)(\ell^2 + m^2 + n^2)} \\ r &= \sqrt{(\ell^2 + m^2 + n^2)} \end{aligned} \quad (7.13)$$

$$\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{e}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7.14)$$

とおき, 更に $(\vec{e}_1^*, \vec{e}_2^*, \vec{e}_3^*)$ を

$$\begin{aligned} \vec{e}_1^* &= -\frac{1}{p} \begin{pmatrix} -m \\ \ell \\ 0 \end{pmatrix} \\ \vec{e}_2^* &= -\frac{1}{q} \begin{pmatrix} -\ell n \\ -m n \\ \ell^2 + m^2 \end{pmatrix} \\ \vec{e}_3^* &= -\frac{1}{r} \begin{pmatrix} \ell \\ m \\ n \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7.15)$$

と定義すると $\vec{e}_3^* // \vec{n}$ となる. さらに両座標系の基本ベクトルの間には次のような関係が成立している.

$$\begin{aligned}
\vec{e}_1^* &= -\frac{m}{p}\vec{e}_1 + \frac{q}{p}\vec{e}_2 \\
\vec{e}_2^* &= -\frac{qn}{q}\vec{e}_1 - \frac{mn}{q}\vec{e}_2 + \frac{(q^2+m^2)}{q}\vec{e}_3 \\
\vec{e}_3^* &= \frac{q}{r}\vec{e}_1 + \frac{m}{r}\vec{e}_2 + \frac{n}{r}\vec{e}_3
\end{aligned}
\tag{7.16}$$

よって、XYZ座標系における点 (X, Y, Z) をxyz座標系における点 (x, y, z) に変換する一次変換の行列 A は次のようになる。

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{m}{p} & \frac{qn}{q} & \frac{q}{r} \\ \frac{q}{p} & -\frac{mn}{q} & \frac{m}{r} \\ 0 & \frac{q^2+m^2}{q} & \frac{n}{r} \end{pmatrix}
\tag{7.17}$$

以上の結果より、XYZ座標系における視線方向角 (α', β') をxyz座標系における視線方向角 (α, β) に変換するためには、以下の3段階の過程をそれぞれの点に対して行えば良い。

まず、 (α', β') を (X, Y, Z) に変換する。つまり、

$$\begin{aligned}
X &= \cos \beta' \cos \alpha' \\
Y &= \cos \beta' \sin \alpha' \\
Z &= \sin \beta'
\end{aligned}
\tag{7.18}$$

次に、 (X, Y, Z) を (x, y, z) に変換する。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}
\tag{7.19}$$

さらに、 (x, y, z) を (α, β) に変換する。

$$\beta = \sin^{-1} \frac{z}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}}
\tag{7.20}$$

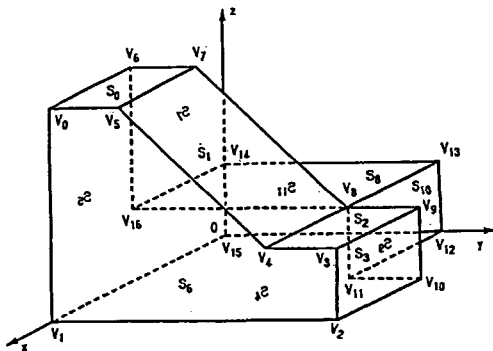
$$\alpha = \frac{y}{|y|} \cos^{-1} \frac{\frac{z}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}}}{\cos \beta}
\tag{7.21}$$

物体をカメラで撮像する場合、前述したように、その設置角度は一定なので、視点軌跡は Fig. 7.14(a) に示すように、XYZ座標系において、 $\beta' = \text{一定}$ で α' を $-\pi$ から π まで変化させたときのxyz座標系での α と β を描画すれば良いことになる。

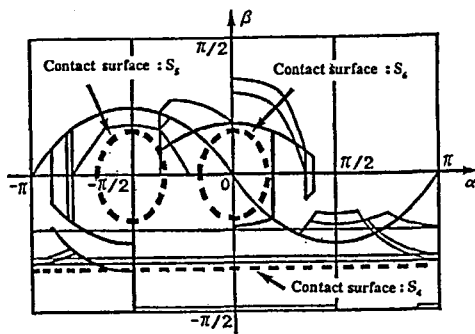
7.4.2 代表投影形状の抽出

安定姿勢を考慮したときの異なった見え方をする代表視線方向を抽出するには、視線ベクトル領域図上にFig. 7.14に示した視線軌跡を描画し、視線軌跡の通過する領域、境界線上の点を抽出すればよい。

Fig. 7.15は図(a)に示す物体に対し、面 S_4, S_5, S_6 を設置面として置かれた安定姿勢に対して、物体の各安定姿勢に対する視線軌跡を視線ベクトル領域図（細実線）上に描画したものである。図中の太破線が視線軌跡（太破線）である。3種類の視線軌跡は各々、面 S_4, S_5, S_6 が設置面となったときの場合について示したものである。Fig. 7.16はFig. 7.14の設置面が S_6 の場合の代表視線方向抽出結果である。Fig. 7.17はこの各点に対する物体の投影形状を示したものである。



(a) object model.



(b) view point trace.

Fig.7.15 View point trace for each stable posture.

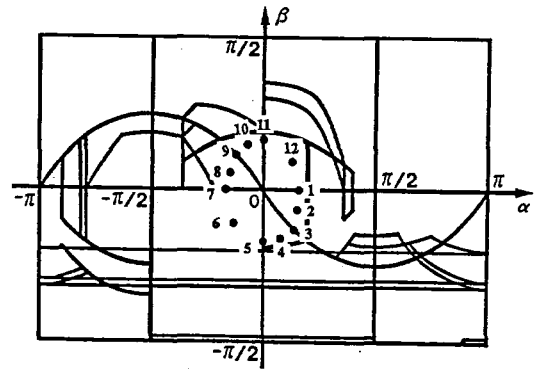


Fig.7.16 Extracted representative viewing points.

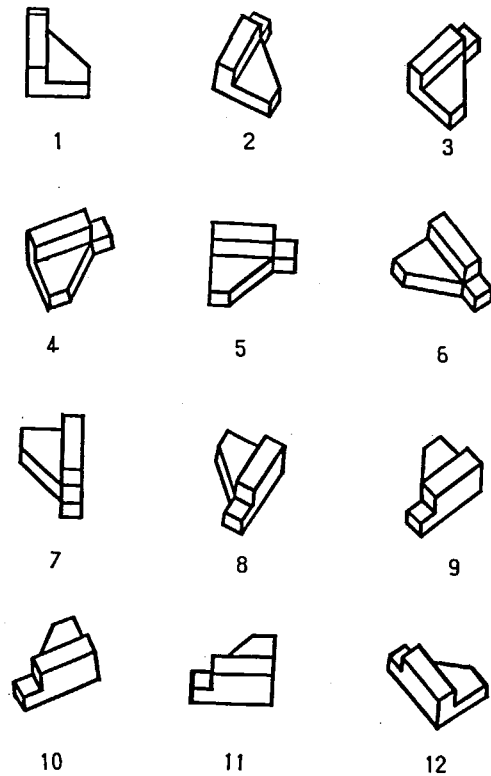


Fig.7.17 Projected shape at each representative view point shown by Fig.7.16.

Fig. 7.14に示した物体の視線ベクトル領域図を描画すると71の領域, 160の境界線, 90の境界交点ができる。つまり, この物体においては, 321 の異なった見え方が存在することになる。しかし, 物体固有の安定姿勢を考慮すると, 図に示した物体の場合, 抽出される代表視線方向は S_4 が設置面のとき10通り, S_5 が設置面のとき12通り, S_6 が設置面の場合には12通りである。このように, 物体の安定姿勢を考慮にいと3次元物体の代表的投影形状は大幅に削減される。

7.5 面の形状特徴による対応面照合抽出

7.5.1 2次元投影形状の面形状の表現

CAD等で作成された対象物体モデルと視覚システムから得られた処理対象物体の形状照合を行う際, まず, 照合に用いるモデルの形状要素データを抽出する必要がある。

面対応を取るための照合要素として, ここでは, 各面を構成する頂点数, 頂点の凹凸並びと平行稜線数を採用している。頂点の凹凸並びについては次のように表現する。Fig. 7.18(a)に示すように, 面を構成する各頂点において,

$$\begin{aligned} (\overrightarrow{V_1 V_j} \times \overrightarrow{V_j V_k}) \cdot \overrightarrow{n_{S_1}} > 0 & \Rightarrow \text{凸頂点} \\ (\overrightarrow{V_1 V_j} \times \overrightarrow{V_j V_k}) \cdot \overrightarrow{n_{S_1}} < 0 & \Rightarrow \text{凹頂点} \end{aligned} \quad (7.22)$$

と定義し, 面の境界線(縁辺)を反時計回りに追跡したときの凹凸を区別した頂点並びで表現する。つまり, 凸頂点を"0", 凹頂点を"1"で表現して, 頂点並びをまず2進数表現する。この表現法を用いるとFig. 7.18(b)の面 S_1 の場合, (c)に示すように,

$$Sf = \{000100\} \quad (7.23)$$

という表現となる。しかし, これでは同一な形状の面に対して, 各種の要素値が存在することになる。このため, (d)に示すように, 凹頂点を有する面に対しては, 第1要素にその凹頂点"1"を置く。つまり,

$$Sf = \{100000\} \quad (7.24)$$

と表現する。この凹凸並びデータは, Fig. 7.18に示すように,

- 1) 頂点数
- 2) 凹部数 ((0 1... 1 0)のように凸頂点に挟

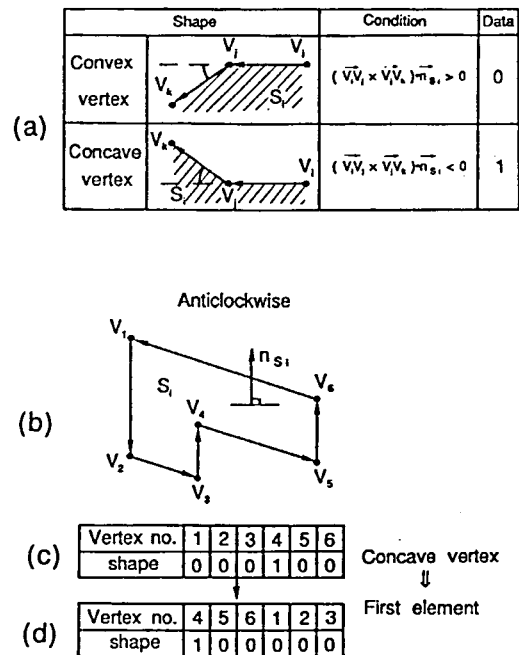


Fig.7.18 Definition of convex vertex and concave vertex.

まれた凹頂点の存在する部分の数)

3) 凹頂点数

4) 同じ並びの現れる個数

という情報を含んでいる。

ここで、凹頂点が2個以上存在するときはFig. 7.19のように、複数の並びが存在する。この頂角の凹凸並びを2進数データとみなし、この2進データを10進数表現したとき、最大値となる凹凸並びを、このモデルの凹凸並びデータと決定することにより、唯一決定される。例えば、Fig. 7.19では、凹頂点が2個あり、凹頂点を第1要素とすると凹凸並びは、2進数と10進数で表現すると、

$$\begin{aligned} Sf_1 &= \{10100000\}_2 = \{160\}_{10} \\ Sf_2 &= \{10000010\}_2 = \{130\}_{10} \end{aligned} \quad (7.25)$$

になる。10進数値の最大数は160なので、この面の凹凸並びは、

$$Sf = \{10100000\}_2 = \{160\}_{10} \quad (7.26)$$

となる。

次に平行稜線のデータを16bitのデータとして定義する。Fig. 7.20に示す面 S_1 の場合、この面には平行な辺の組が2組 (l_1, l_3, l_6) 、 (l_2, l_7) あり、それぞれ2本、3本の平行線からできている。これを

$$\begin{aligned} 16進数で & \{0_H \ 0_H \ 2_H \ 3_H\} \\ 10進数で & \{35\}_{10} \end{aligned}$$

と表現する。ただし、1平行稜線組に14本までのデータしか持たせず、それを越えたものは F_H で定義する。また、平行稜線組数も4組しかデータに入れず、それを越えたものは $F_H F_H F_H F_H$ で表現する。

Fig. 7.21は、Fig. 7.17で示したモデルの代表的見え方の中の視線方向2の投影形状における各面の形状とその形状要素値を示したものである。また、Table 7.3は、この各視線方向の投影形状に対する面の形状要素値の抽出結果を示したものである。

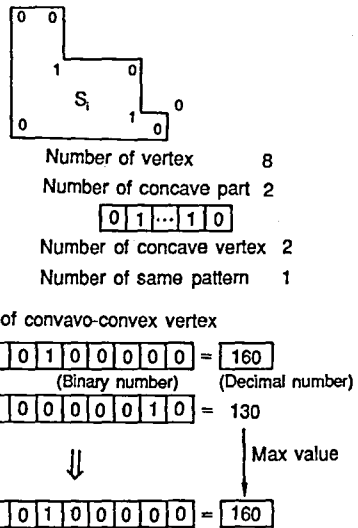


Fig.7.19 Neumerical depression of concavo-convex row of vertices.

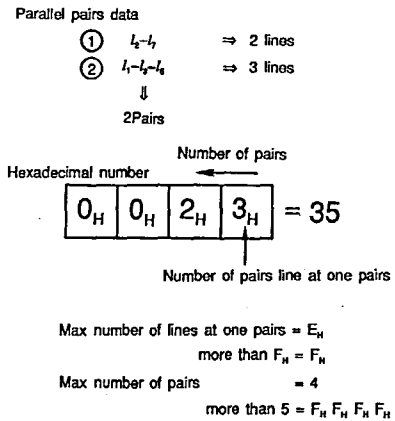
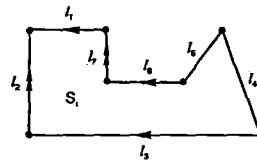


Fig.7.20 Neumerical depression of parallel pairs in edge elements.

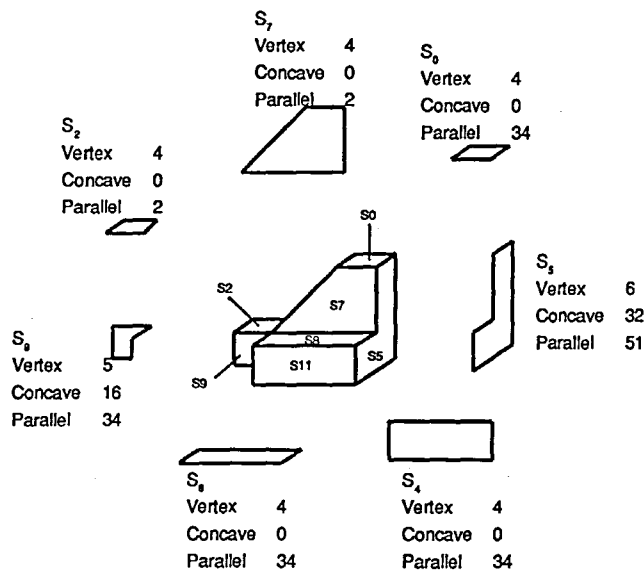


Fig.7.21 Surface shape and its shape factor of projected shape viewd from view direction 2 shown by Fig.7.17 .

Table 7.3 Shape factor of projected shapes viewed from all view direction shown by Fig.7.17 .

View direction	Surface No.	Number of Vertex	Concavo-convex row of vertexes	Parallel pairs of contour line segment
View direction 1	S5	6	32 (10000)B	51 (0033)H
	S7	4	0 (0000)B	2 (0022)H
	S9	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S11	4	0 (0000)B	34 (0022)H
View direction 2	S0	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S2	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S5	6	32 (10000)B	51 (0033)H
	S7	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S8	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S9	5	16 (10000)B	34 (0022)H
View direction 3	S0	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S2	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S5	6	32 (10000)B	51 (0033)H
	S7	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S8	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S9	5	16 (10000)B	34 (0022)H
View direction 4	S0	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S1	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S2	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S5	6	32 (10000)B	51 (0033)H
	S7	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S8	4	0 (0000)B	34 (0022)H
View direction 5	S0	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S1	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S2	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S7	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S8	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S9	4	0 (0000)B	34 (0022)H
View direction 6	S0	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S1	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S2	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S3	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S7	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S8	4	0 (0000)B	34 (0022)H
View direction 7	S1	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S3	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S7	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S9	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S10	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S11	4	0 (0000)B	34 (0022)H
View direction 8	S1	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S3	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S4	6	32 (10000)B	51 (0033)H
	S7	5	16 (10000)B	2 (0002)H
	S9	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S10	4	0 (0000)B	34 (0022)H
View direction 9	S3	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S4	6	32 (10000)B	51 (0033)H
	S7	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S9	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S10	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S11	4	0 (0000)B	34 (0022)H
View direction 10	S3	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S4	6	32 (10000)B	51 (0033)H
	S7	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S9	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S10	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S11	4	0 (0000)B	34 (0022)H
View direction 11	S4	6	32 (10000)B	51 (0033)H
	S7	4	0 (0000)B	2 (0002)H
	S9	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S11	4	0 (0000)B	34 (0022)H
View direction 12	S4	6	32 (10000)B	51 (0033)H
	S5	6	32 (10000)B	51 (0033)H
	S7	5	16 (10000)B	2 (0002)H
	S9	5	16 (10000)B	34 (0022)H
	S11	4	0 (0000)B	34 (0022)H

7.5.2 視覚情報の不完全さに対応する面形状要素

認識対象物体をTVカメラで撮像して得られる濃淡画像から縁辺を検出して得られる投影形状データには、Fig. 7.22に示すような縁辺欠落や頂点（稜線）の位置誤差を有する。これらの形状の不完全な視覚データに対しても正確に照合ができる必要がある。

縁辺欠落のうち面間の稜線が欠落する場合、図に示すように、隣接する2面 (S_1, S_2) が1面 (S_1-S_2) として抽出される。このため、照合用のモデルデータに、稜線の欠落を想定し、隣接する面が1面となった場合の隣接面の形状情報を個々の面の形状情報と同様に持たせることにより、稜線の欠落した視覚データにも適用できるようになる。各投影面形状における隣接面は、各面における共有稜線から容易に抽出される。なお、投影形状における個々の面を単独面、隣接する2面間の境界線の削除から生成される面を隣接2面としている。また、視覚データにおいては、形状データ抽出時において、稜線欠落が生じていることがあるが、この抽出された状態の個々の面を視覚における単独面、抽出された形状データからさらに稜線を削除して得られる隣接面形状を視覚の隣接面とする。

Fig. 7.23は、Fig. 7.21に示した投影形状における隣接2面形状とその面形状要素値を示したものである。また、Table 7.4 は、Fig. 7.17に示した各投影形状における隣接面の形状要素値抽出結果を示したものである。

モデルデータに隣接面データを持たせることにより、形状データ量は増大するが、これらの形状データ値からわかるように、隣接面データは特殊な形状となる場合が多く、面照合における特徴面となる可能性が多く、処理効率上も有益であると考えられる。

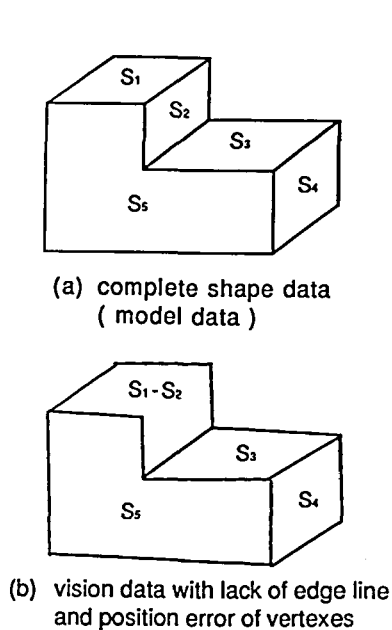


Fig.7.22 Uncompleteness of vision data.

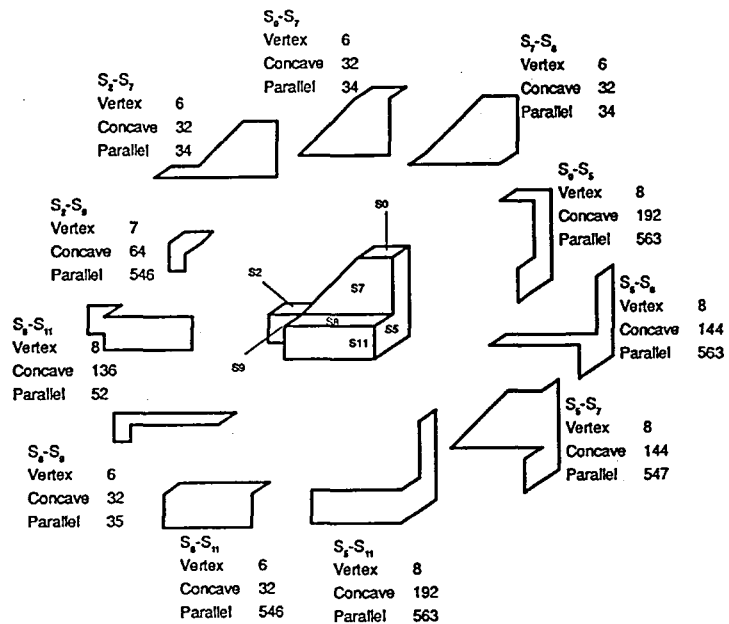


Fig.7.23 Adjacent surface shape and its shape factor of projected shape viewed from view direction 2 shown by Fig.7.17 .

Table 7.4 Adjacent shape factor of projected shapes viewed from all view direction shown by Fig.7.17 .

View direction	Surface No.	Number of vertex	Concavo-convex row of vertexes	Parallel pairs of contour line segment
View direction 1	S5 - S7	6	32 (100000)B	35 (0023)H
	S5 - S11	6	32 (100000)B	51 (0033)H
	S7 - S11	8	136 (10001000)B 2	52 (0034)H
	S9 - S11	4	0 (0000)B	34 (0022)H
View direction 2	S0 - S5	8	192 (11000000)B	563 (0233)H
	S0 - S7	6	32 (100000)B	2 (0002)H
	S2 - S7	6	32 (100000)B	2 (0002)H
	S2 - S9	7	64 (1000000)B	546 (0222)H
	S5 - S7	8	144 (10010000)B	35 (0023)H
	S5 - S8	8	144 (10010000)B	563 (0233)H
	S5 - S11	8	192 (11000000)B	563 (0233)H
	S7 - S8	6	32 (100000)B	34 (0022)H
	S8 - S9	6	32 (100000)B	35 (0023)H
	S8 - S11	6	32 (100000)B	546 (0222)H
	S9 - S11	8	136 (10001000)B 2	52 (0034)H
	View direction 3	S0 - S5	8	192 (11000000)B
S0 - S7		5	16 (10000)B	2 (0002)H
S2 - S7		6	32 (100000)B	2 (0002)H
S2 - S9		6	32 (100000)B	546 (0222)H
S5 - S7		8	144 (10010000)B	547 (0223)H
S5 - S8		8	144 (10010000)B	563 (0233)H
S5 - S11		8	192 (11000000)B	563 (0233)H
S7 - S8		5	0 (00000)B	34 (0022)H
S8 - S9		6	32 (100000)B	35 (0023)H
S8 - S11		6	32 (100000)B	546 (0222)H
S9 - S11		8	136 (10001000)B 2	52 (0034)H
View direction 4		S0 - S1	6	32 (100000)B
	S0 - S5	8	192 (11000000)B	563 (0233)H
	S0 - S7	6	36 (100100)B 2	34 (0022)H
	S1 - S2	6	32 (100000)B	546 (0222)H
	S1 - S7	6	32 (100000)B	34 (0022)H
	S2 - S9	7	64 (1000000)B	546 (0222)H
	S5 - S7	8	144 (10010000)B	547 (0223)H
	S5 - S8	8	144 (10010000)B	563 (0233)H
	S5 - S11	8	192 (11000000)B	563 (0233)H
	S7 - S8	6	0 (000000)B	34 (0022)H
	S8 - S9	6	32 (100000)B	35 (0023)H
	S8 - S11	6	32 (100000)B	546 (0222)H
S9 - S11	8	136 (10001000)B 2	52 (0034)H	
View direction 5	S0 - S1	6	32 (100000)B	546 (0222)H
	S0 - S7	5	16 (10000)B	34 (0022)H
	S1 - S2	6	32 (100000)B	546 (0222)H
	S1 - S7	6	32 (100000)B	34 (0022)H
	S2 - S9	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S7 - S8	5	0 (00000)B	34 (0022)H
	S8 - S9	6	32 (100000)B	51 (0033)H
	S8 - S11	4	0 (0000)B	34 (0022)H
	S9 - S11	8	136 (10001000)B 2	68 (0044)H
	View direction 11	S4 - S9	6	32 (100000)B
S4 - S11		6	32 (100000)B	51 (0033)H
S7 - S11		6	32 (100000)B	35 (0023)H
S9 - S11		8	136 (10001000)B 2	68 (0044)H
View direction 12		S4 - S5	10	544 (1000100000)B
	S4 - S9	7	64 (1000000)B	547 (0223)H
	S4 - S11	8	136 (10001000)B 2	563 (0233)H
	S5 - S7	7	64 (1000000)B	546 (0222)H
	S5 - S11	8	136 (10001000)B 2	563 (0233)H
	S7 - S11	8	136 (10001000)B 2	51 (0033)H
S9 - S11	8	136 (10001000)B 2	52 (0034)H	

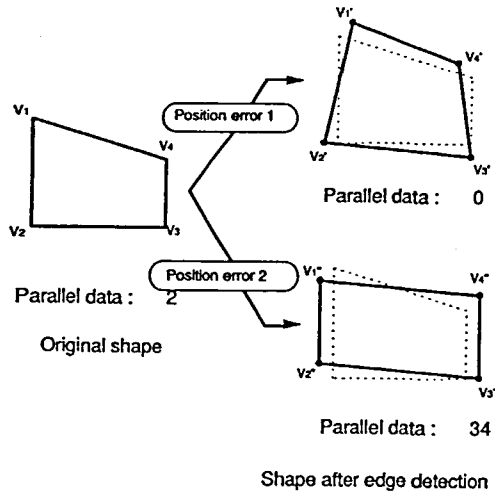


Fig.7.24 Change of parallel state between contour lines caused by position error.

次に，視覚形状情報における頂点（稜線）の位置誤差への対応について検討する。

視覚データにおける頂点位置誤差により，

Fig. 7.24に示すように，平行であった稜線の平行関係が崩れたり，平行でなかった稜線が平行となる

ことがある．2辺間の平行判定は，Fig. 7.25に示すように，2辺間の交角により行う．このため，視覚で得られた形状データにおける平行判定の閾値を図に示すように，複数用意し，各閾値で平行判定を行って得られた形状要素値をデータとして持たせることにより，頂点位置誤差による平行関係の崩れをなくすことができる．この平行判定の閾値は，視覚システムにおける頂点位置抽出精度から決まるものであり，ここでは，前章で示した視覚システムの抽出位置精度（2 Pixel）を考慮して，0.03 rad.，0.13 rad. の2段階閾値を採用している．

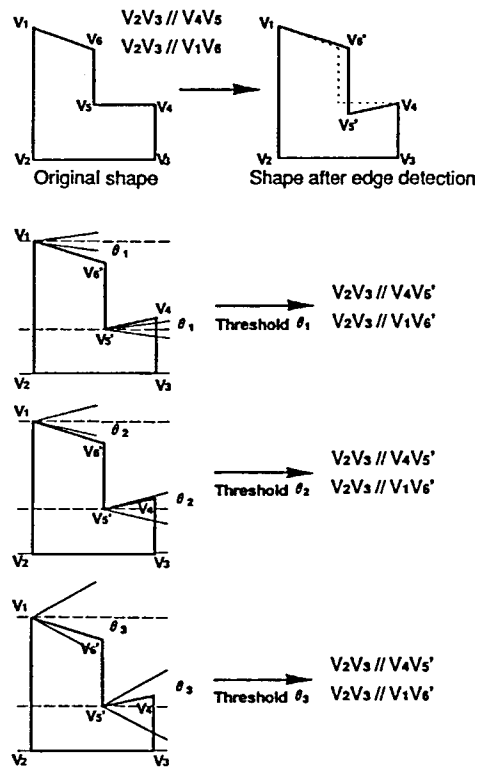


Fig.7.25 Change of parallel relation according to threshold level.

7.5.3 面形状データの階層化構造によるデータ圧縮

Table 7.3, Table 7.4 に示したように，各視線方向の投影形状における面形状データをモデルデータとして，コンピュータに持たせた場合，個々の面において，面形状要素値3種類とその面の名前，構成頂点データの格納が必要となる．個々の面において平均6個の頂点を有していると仮定すると，面形状要素数 N_{factor} は，

$$N_{factor} = 10 \times \sum_{i=1}^n (S_i + A_i) \quad (7.27)$$

n : 代表視線方向数

S_i : 視線方向 i における単独面数

A_i : 視線方向 i における隣接2面数

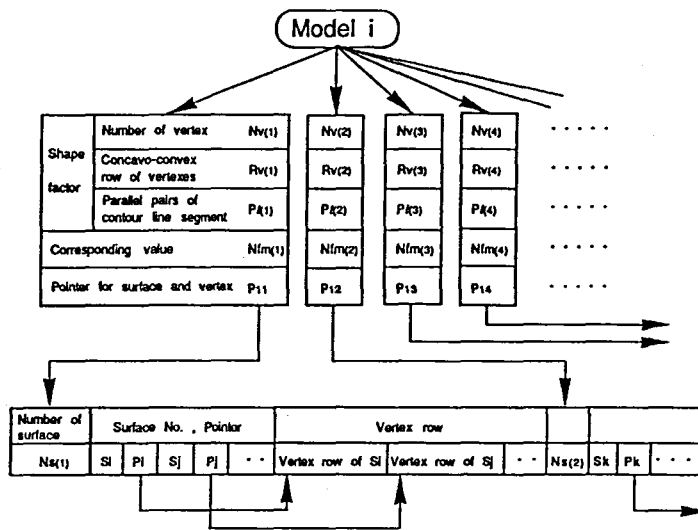


Fig.7.26 Data structure for shape matching on surface level.

となる。

例えば、Fig. 7.17に示した物体の場合、特殊な見え方を除外して 71 の見え方が存在する。各視線方向における面数の平均を単独面数7，隣接面数10とすると，

$$N_{factor} = 10 \times 71 \times (7 + 10) = 12070$$

となる。このように、各視線方向ごとの面形状データをモデルデータとして格納した場合、データ容量が莫大になるだけでなく照合効率も著しく悪くなる。Table 3, Tabel 4 からわかるように、各視線方向ごとの面形状データには同一形状要素値を有する面が重複している。このため、Fig. 7.26に示すように、すべての面形状データを面形状要素値で整理し、その面形状要素値を有する面番号とその頂点並びデータをポインターを介して格納することにより、データ量を大幅に圧縮することができ、面形状照合探索も効率化されると考えられる。

Fig. 7.27は、3次元CADモデルデータから照合用モデル形状データを作成する処理の流れを示したものである。処理手順は以下の通りである。

[手順1] 視線領域図を用いて代表視線方向を抽出する。

[手順2] 座標変換，陰線処理により各視線方

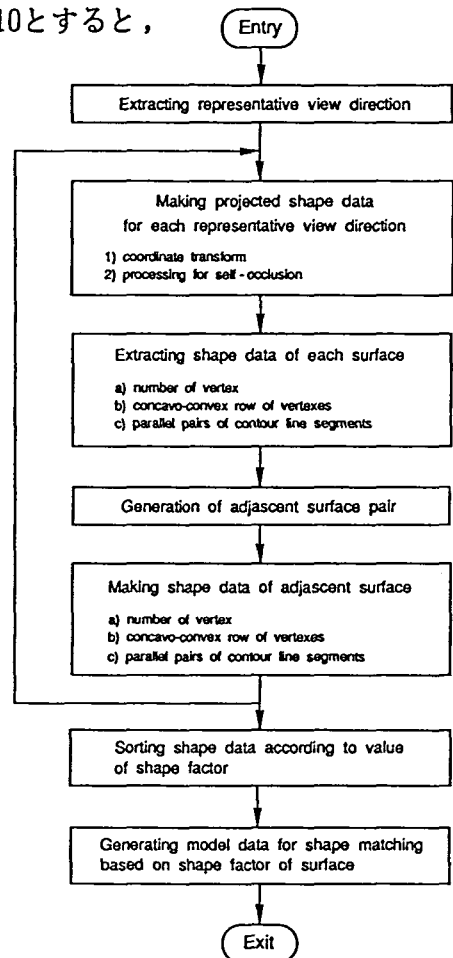


Fig.7.27 Algorithm for generating shape matching data shown by data structure (Fig.7.26).

向に対する投影形状を作成する。

- [手順3] 単独面の面形状要素（頂点数，頂点の凹凸並び，平行稜線）値を抽出する。
- [手順4] 隣接面を抽出する。
- [手順5] 隣接面に対する面形状要素値を抽出する。
- [手順6] [手順2] から [手順5] を全ての代表視線方向に対して行う。
- [手順7] 形状要素値の小さい順に並べ変えを行う。
- [手順8] 形状要素値ごとに Fig.7.26 に示すデータ構造に格納する。

Table 7.5, Table 7.6は, Table 7.3, Table 7.4 に対して形状要素値ごとの並べ変えを行った結果である。この表からわかるように, 形状要素の種類は単独面で5種類, 隣接面で27種類となっている。

Fig.7.28は, この物体に対する照合用データとして Fig.7.26 に示すデータ構造を用いたときの視線方向数とデータ格納に必要な記憶容量の関係を示したものである。なお, 参考データとして, 形状要素データにその形状が得られる視線方向データを加えた場合の結果 (▲) を併せて示してある。これからわかるように, 視線方向数が 40 程度までは, 視線方向数に応じてメモリ容量が増えているが, 視線方向数が 40 を越えると, 必要メモリ容量はあまり変化しない。これは, 視線方向数が増加してもそれにより新たな面形状が現れない限り形状要素データ

Table 7.5 Shape matching data for surface level matching for single surface generated from model data shown by Table 7.3 .

	Number of Vertex	Concavo-convex row of vertexes	Parallel pairs of contour line segment	Number of factor for matching	Surface No.	Vertex row
Shape factor 1	4	0	2	24	S1 S2 S7	V5 V- V8 V7 V3 V9 V8 V- V6 V7 V8 V16 V6 V7 V13 V- V6 V7 V- V- V6 V7 V- V14
Shape factor 2	4	0	34	36	S0 S1 S2 S3 S8 S9 S10 S11	V0 V5 V7 V6 V4 V8 V7 V5 V3 V9 V8 V4 V2 V10 V9 V3 V8 V13 V14 V16 V9 V10 V12 V13 V8 V9 V10 V11 V8 V11 V12 V13 V12 V15 V14 V13
Shape factor 3	5	16	2	2	S7	V- V- V6 V7 V8 V14 V16 V6 V7 V-
Shape factor 4	5	16	34	2	S9	V13 V8 V9 V10 V- V12 V- V9 V10 V11
Shape factor 5	6	32	51	2	S4 S5	V11 V10 V2 V1 V15 V12 V16 V14 V15 V1 V0 V6

Table 7.6 Shape matching data for surface level matching for adjacent surface generated from model data shown by Table 7.4 .

	Number of vertex	Concavo-convex row of vertexes	Parallel pairs of contour line segment	Number of factor for matching	Surface No.
Shape factor 6	4	0	2	1	S1 - S7
Shape factor 7	4	0	34	4	S2 - S9 S3 - S9 S8 - S11 S9 - S11
Shape factor 8	5	0	34	1	S7 - S8
Shape factor 9	5	16	2	1	S0 - S7
Shape factor 10	5	16	34	1	S0 - S7
Shape factor 11	6	0	34	1	S7 - S8
Shape factor 12	6	32	2	2	S0 - S7 S2 - S7
Shape factor 13	6	32	34	3	S0 - S7 S1 - S7 S7 - S8
Shape factor 14	6	32	35	3	S5 - S7 S7 - S11 S8 - S9
Shape factor 15	6	32	51	4	S4 - S9 S4 - S11 S5 - S11 S8 - S9
Shape factor 16	6	32	546	10	S0 - S1 S1 - S2 S1 - S9 S2 - S3 S2 - S9 S3 - S9 S8 - S10 S8 - S11 S9 - S10 S10 - S11
Shape factor 17	6	36	34	1	S0 - S7
Shape factor 18	7	64	35	2	S1 - S7 S7 - S10
Shape factor 19	7	64	51	1	S7 - S10 S7 - S11
Shape factor 20	7	64	546	2	S2 - S9 S5 - S7
Shape factor 21	7	64	547	1	S4 - S9
Shape factor 22	7	72	546	1	S1 - S9
Shape factor 23	8	136	51	1	S7 - S11
Shape factor 24	8	136	52	2	S7 - S11 S9 - S11
Shape factor 25	8	136	68	1	S9 - S11
Shape factor 26	8	136	563	2	S4 - S11 S5 - S11
Shape factor 27	8	144	35	1	S5 - S7
Shape factor 28	8	144	52	1	S7 - S11
Shape factor 29	8	144	547	1	S5 - S7
Shape factor 30	8	144	563	3	S4 - S9 S4 - S10 S5 - S8
Shape factor 31	8	192	563	4	S0 - S5 S3 - S4 S4 - S11 S5 - S11
Shape factor 32	10	544	820	1	S4 - S5

が増えないためである。この形状要素データ格納に必要なメモリ容量は、物体形状に依存する。Fig. 7.15に示した物体と同程度の面数の多面体の場合、ほぼ 3 kbyte 程度のメモリ容量で、データを格納可能である。Table 7.3 に示した各視線方向ごとの面形状データを格納した場合、前述したように、視線方向数に比例したメモリ容量が必要であり、Fig. 7.15に示した物体の場合、全視線方向数は 71で、必要メモリ容量は約 24 kbyte 必要である。このように、形状要素データ値で整理した場合、照合のためのモデルデータ格納のためのメモリ容量が少なくてすむ。また、これにより面形状検索の高速化（高効率化）がはかれる。この傾向は対象物体形状の面数が多くなるほど、また、異なった見え方を呈する視線方向数が多いほど顕著になる。

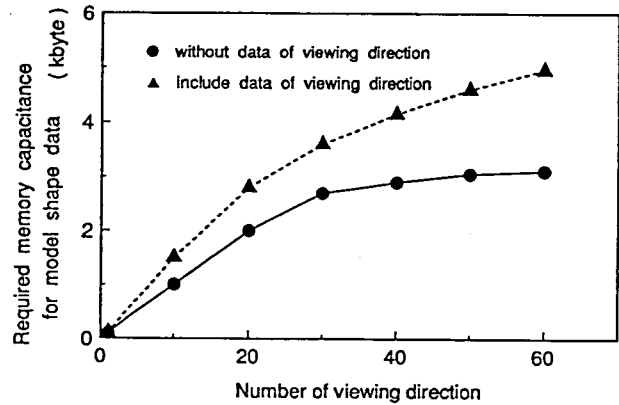


Fig.7.28 Relationship between number of view direction and required memory capacitance.

7.5.4 視覚照合面の選定とその対応モデル面の抽出方法

モデルデータと視覚データを照合する場合、視覚データ内のデータと一致しているモデルデータを抽出することになる。このとき、前述したように、特殊な形状データのものから照合を行うのが効率的である。ここで、特殊な形状データとは、モデルデータ内、視覚データ内で同一の形状要素値を有するデータ量が少ないものである。そこで、まず同一形状要素値を有するデータ量を表現する値として面形状対応数を次のように定義する。即ち、各モデルデータにおける面形状対応数 $N_{fm}(i)$ 、視覚データにおける面形状対応数 $N_{fv}(i)$ を、それぞれ次式のように定義する。

$$N_{fm}(i) = n \times N_{sp}(k) \tag{7.28}$$

$$N_{fv}(i) = n \times N_{sp}(k) \tag{7.29}$$

n ; 同一形状要素値に属する面の数

$N_{sp}(k)$; 同一形状要素値になる凹凸頂点並び数

ここで、同一形状要素値となる頂点の凹凸並び数とは、頂点の凹凸並びにおいて複数の凹頂点が存在するとき、そのいずれの凹頂点から並べても同一形状要素値になる頂点並びの数である。

なお、凹頂点の存在しない凸多角形の場合、いずれの頂点から並べても同一頂点並びとなるので、この場合の N_{sp} 値は頂点数となる。

この要素数が大きいものはモデルと視覚データの対応がとれた場合でも、線分レベルでの最終照合時の組み合わせ数が多くなる。このため、この面形状対応数が面照合時の優先順位に関連する数値となる。

この面形状対応数 $N_{fm}(i)$ 、 $N_{fv}(i)$ は個々の物体のモデルデータ、視覚データにおける面形状の特殊度を示すものであり、この値の小さい面が個々の物体、視覚データ内での特徴的な面となる。このモデルデータの面形状対応数 $N_{fm}(i)$ と視覚データの面形状対応数 $N_{fv}(i)$ の積が面形状による形状照合における対応の組み合わせ数（対応数）となる。この対応数の最も小さい面が面形状照合における特徴面となる。

この対応数算出過程を示したものが Fig. 7.29 である。

- [手順1] 視覚システムにより得られた形状データから Fig. 7.26 に示したデータ構造に形状要素データを格納する。
- [手順2] 視覚データにおける各形状要素値をモデルデータ内で探索する。
- [手順3] 探索された各モデルデータにおける面形状対応数 $N_{fm}(i)$ の総和 $\sum N_{fm}(i)$ を算出する。
- [手順4] 視覚データ内の各形状要素値に対して、面形状対応数 $Nf(i) (= \sum N_{fm}(i) \times N_{fv}(i))$ を算出して格納する。
- [手順5] 面形状対応数が少ない順に並び変えを行う。

以上の手順で、視覚データを面形状照合における対応数が算出され、特徴面形状順に並び変え

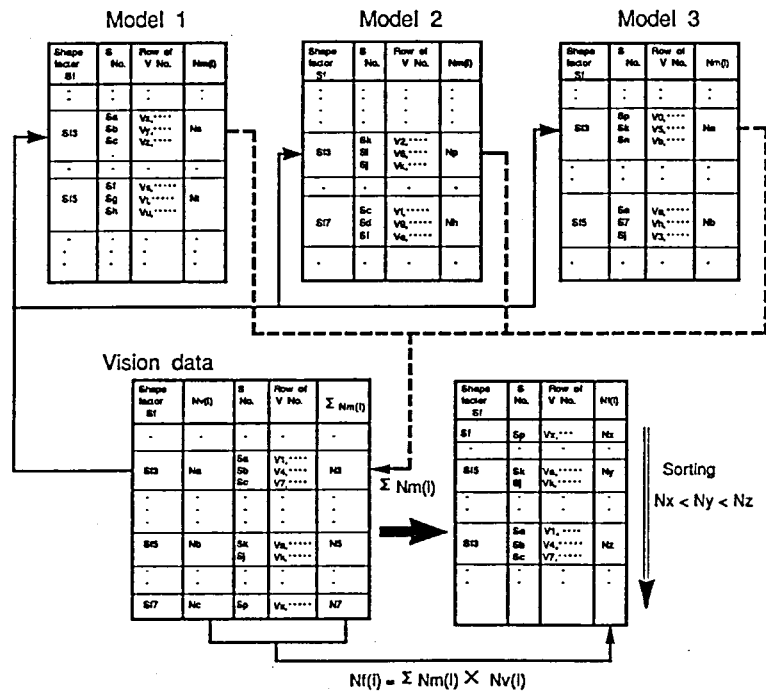


Fig.7.29 Calculating method of number of combination for matching on line segments.

が行われる。

第1照合過程である面照合は、視覚システムから得られた物体形状情報全体の形状照合における照合の組合わせを限定する過程である。このため、基本的には、Fig. 7.29に示した各形状要素値に対する面形状対応数から算出された対応数 $Nf(i)$ の最も小さい特徴面を照合面として、この形状要素値を有するモデルデータを探索抽出するのが効率的である。しかし、この過程で抽出されたモデル面を視覚で得られた面とを重ね合わせることにより、最終的な形状照合を行うため、面照合過程で誤った対応をすれば、逆に非効率となる。また、視覚データに含まれる位置誤差に基づく面分間の重ね合わせ精度が以後の照合性能を左右する。このため、照合面は得られた面分内で、できるだけ大きな面で、かつ、隣接面であることが望ましい。

以上の点から、照合面順位決定を

- 1) 視覚で得られる面分の面積がある一定値以上であること。
- 2) 照合対応数 $Nf(i)$ が小さいこと。
- 3) 単独面よりも隣接面を優先する。

に基づいて算出している。この基準を基に順位付けされた面分に対して、モデルデータ内で一致する面分を抽出する。

ここで、視覚データにおける面データの中には、縁辺欠落により隣接2面が1面として得られていることがある。このため、視覚データにおける照合面とモデルデータとの対応には、以下の3種類がある。

[第1対応] 視覚データにおける照合面 S_1^V に対応するモデルの単独面 S_m^M

[第2対応] 視覚データにおける照合面 S_1^V に対応するモデルの隣接2面 $S_p^M S_q^M$

[第3対応] 視覚データにおける照合面 $S_a^V S_b^V$ (隣接2面) に対応するモデルの隣接2面 $S_r^M S_s^M$

なお、縁辺欠落は前述したように、物体上の2面が1面となる欠落のみを考慮したものであり、3面以上の面が欠落により1面となることは想定していない。

これらの対応において、モデルデータの抽出を行い、これにより抽出されたモデルデータに対して、次節に示す投影形状照合を行う。しかし、これらの対応において対応数が多い場合、視覚データにおける照合面の隣接面データの対応を考慮する必要がある。つまり、

[第4対応] 視覚データにおける照合面 S_1^V の隣接面 S_{1j}^V に対応するモデルの単独面 S_n^M

[第5対応] 視覚データにおける照合面 S_1^V を含む隣接2面 $S_1^V S_j^V$ に対応するモデルの隣接2面 $S_v^M S_w^M$

を抽出し、第1対応で抽出されたモデルの面 S_m^M と第4対応で抽出されたモデルの面 S_n^M が第5対応で抽出された隣接2面 S_v^M と S_w^M に一致する視覚データにおける特徴面 S_1^V とモデルの面 S_m^M を抽出する。

以上に示した対応は、面データにおける単独面と隣接2面とを考慮した対応である。これをさらに、隣接3面、隣接4面と拡張することは可能であるが、モデルデータ量が多くなる。また、この面形状対応では、投影形状の輪郭形状を同様に扱うことが可能である。

Fig.7.30, Fig.7.31は、この照合面選定と対応面抽出アルゴリズムおよびその過程の一例を示したものである。これにみるように、まず、視覚データの各単独面、隣接面の面積を算出し、頂点位置誤差の影響を大きく受ける微小な面積の面を除外する。次に、この面積の閾値以上の面に対して、視覚データの形状要素テーブルを単独面と隣接面に分けて作成し、モデルの形状要素テーブルから同一の面形状要素を検索する。これから、視覚データにおける各形状要素の面形状対応数を算出し、小さい順に順位付けを行う。この順位付けをもとに照合面の順位付けがされる。

ここで、同一面形状要素の探索時に、視覚データの形状要素値に対して一致したモデルデータの形状要素にポインター設定を行っている。このため、視覚データにおける照合面順位付けが行われた時点で、視覚データとモデルデータとの面間での対応付けが行われたことになり、面照合が終了する。

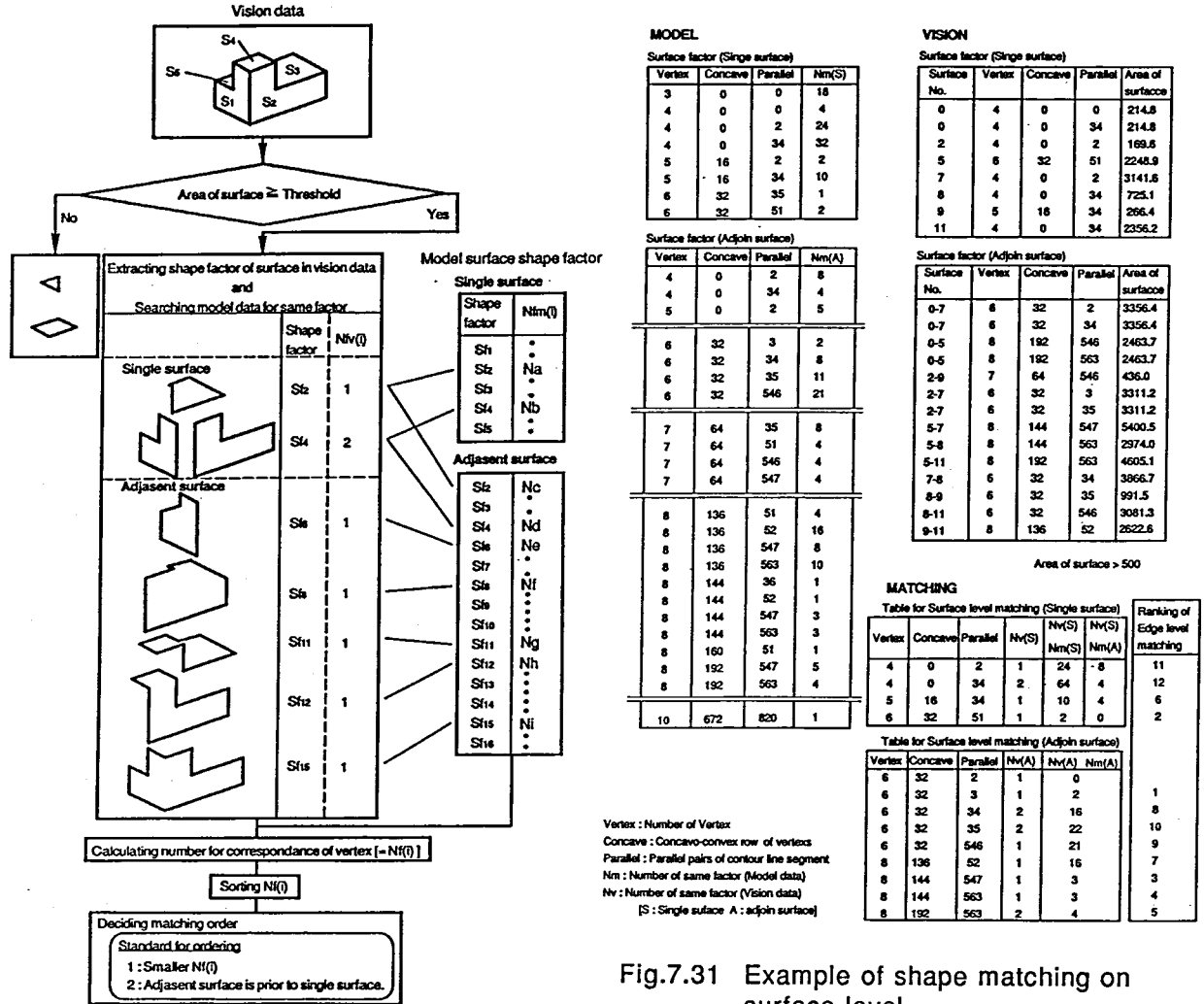


Fig.7.31 Example of shape matching on surface level.

Fig.7.30 Algorithm for shape matching on surface level.

7.6 線分対応による形状・姿勢照合

前節では視覚により得られた対象物体中の特徴面が、コンピューター内にあらかじめ格納されているモデル内のいずれの面に対応するかという対応面の抽出方法を示した。この対応のとれた面同志を一致させた時に、他の形状も一致している時、視覚により撮像した物体とモデル物体とが照合されたことになる。つまり、視覚により得られた形状データとモデルの投影形状データを重ね合わせたときの線分の一致度から物体レベルでの形状照合を行うことができる。

ここでは、まず、対応面の投影面上での重ね合わせを検討し、次いで線分照合による形状一致の判定を検討する。

7.6.1 対応面の投影面上での重ね合わせ

視覚により得られた像とモデルの像において、対応のとれた面同志を一致させるには、モデルに対する視線方向が必要となる。第5章で示したように、3次元視覚システムの場合、各面の傾き情報が得られるため、この面の傾きからモデルに対する視線方向は容易に求まる。つまり、Fig. 7.32に示す視覚データ上の面 S^V_1 に対し、モデルデータ上の S^M_1 が照合されたとき、面 S^M_1 の法線ベクトル \vec{n}_M が視覚により得られた面 S^V_1 の法線ベクトル \vec{n}_V となる座標回転角 (α, β) が視線方向となる。

それぞれの法線ベクトル \vec{n}_V, \vec{n}_M は、

$$\begin{aligned} \vec{n}_V &= (l^V, m^V, n^V) \\ \vec{n}_M &= (l^M, m^M, n^M) \end{aligned} \quad (7.30)$$

で表される。モデル座標系における点 (x, y, z) の α, β 回転後の座標値 (X, Y, Z) は、

$$[X \ Y \ Z \ 1] = [x \ y \ z \ 1] \begin{pmatrix} R\alpha \\ R\beta \end{pmatrix} \quad (7.31)$$

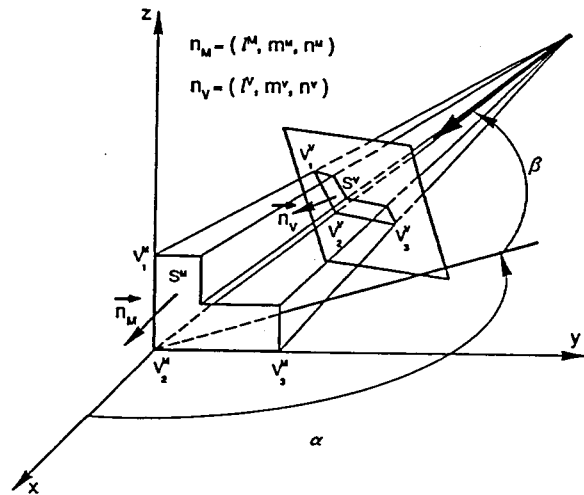


Fig.7.32 Geometrical relation between 3-D model and vision data.

$$\begin{pmatrix} R \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} R \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cos \beta & \sin \alpha \cos \alpha (\cos \beta - 1) & -\cos \alpha \sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \cos \alpha (\cos \beta - 1) & \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

これより,

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\ell^V + m^M}{\ell^V - m^M} \quad (7.32)$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{\ell^M (\ell^V \cos \alpha + m^V \sin \alpha) + n^M n^V}{\ell^{M2} + n^{M2}}$$

となり, 視線方向角を容易に算出できる. なお, これは視覚システムにより3次元形状情報が得られた場合であるが, 視覚システムから得られる形状情報が縁辺検出画像から得られる2次元形状データのみの場合においても視線方向角 (α , β) は算出可能である.

Fig. 7.32に示すように, 面を構成する縁辺の頂点 (V^M_1, V^M_2, V^M_3) が投影面上で, $V^V_1(y_1', z_1')$, $V^V_2(y_2', z_2')$, $V^V_3(y_3', z_3')$ と得られたとすると, 三角形の相似より, その各々の視覚系での3次元座標値 $V^M_1(x_1, y_1, z_1)$, $V^M_2(x_2, y_2, z_2)$, $V^M_3(x_3, y_3, z_3)$ は,

$$\begin{aligned} (x_1, y_1, z_1) &= \{x_1, (y_1'/\ell) \cdot x_1, (z_1'/\ell) \cdot x_1\} \\ (x_2, y_2, z_2) &= \{x_2, (y_2'/\ell) \cdot x_2, (z_2'/\ell) \cdot x_2\} \\ (x_3, y_3, z_3) &= \{x_3, (y_3'/\ell) \cdot x_3, (z_3'/\ell) \cdot x_3\} \end{aligned} \quad (7.33)$$

と表される. ここで, $y_1', z_1', y_2', z_2', y_3', z_3'$ は視覚によって得られた2次元座標より既知であるが, x_1, x_2, x_3 は未知であるために, これらの値を算出できれば, この3点の3次元頂点座標が求まることになる.

ここで, 縁辺の長さは面がいかに移動, 回転しても変化しないことより,

$$\begin{aligned} (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 &= \ell_{12}^2 \\ (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2 &= \ell_{23}^2 \\ (x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2 &= \ell_{31}^2 \end{aligned} \quad (7.34)$$

の3式が得られる. ここで, $\ell_{12}, \ell_{23}, \ell_{31}$ はモデル情報より計算される各辺の長さである. (7.34)式に(7.33)式を代入して x_1, x_2, x_3 に関する3元連立方程式を解くことにより, 3点の頂点位置が計算される.

この3頂点で作られる2辺のベクトル積がその面の法線方向となる。つまり、法線ベクトル \vec{n} は

$$\vec{n} = \{ (y_1 - y_2)(z_3 - z_2) - (z_1 - z_2)(y_3 - y_2), (z_1 - z_2)(x_3 - x_2) - (x_1 - x_2)(z_3 - z_2), (x_1 - x_2)(y_3 - y_2) - (y_1 - y_2)(x_3 - x_2) \} \quad (7.35)$$

と表せる。この面が基準面に対して α, β 回転しているとする、その回転後の2辺のベクトル積は、 α, β を用いて、

$$\begin{aligned} (y_1 - y_2)(z_3 - z_2) - (z_1 - z_2)(y_3 - y_2) &= -|\vec{n}| \cos \alpha \cos \beta \\ (z_1 - z_2)(x_3 - x_2) - (x_1 - x_2)(z_3 - z_2) &= |\vec{n}| \sin \alpha \cos \beta \\ (x_1 - x_2)(y_3 - y_2) - (y_1 - y_2)(x_3 - x_2) &= |\vec{n}| \sin \beta \end{aligned} \quad (7.36)$$

と表せる。これより、視覚システムにより得られた3頂点の座標値より(7.36)式を演算すれば視線方向 α, β が算出される。なお、視覚で得られる投影面データとモデルの面形状データをもとに、対応する1組の3頂点からはFig. 7.33に示すように、2組の視線方向角が得られる。正しい視線方向角を特定するには、同一平面上にない2組の3頂点から各々視線方向角を算出し、一致する視線方向角を抽出すれば良い。この観点からも面対応時に隣接面が選定されているのが良い。

一般に、視覚システムから得られる形状情報には、位置誤差を含んでいるため、(7.33)式の解は正確には求まらない。ここでは、視線方向を算出するのに、軸回転の近似解を算出することにより、位置誤差を含んだ視覚データから視線方向角を算出決定している。この場合、視線方向算出のための3頂点の選定方法が重要となる。算出誤差を小さくするには、(7.33)式からもわかるように、3辺の長さができるだけ長くなる3頂点を選定する必要がある。まず、面照

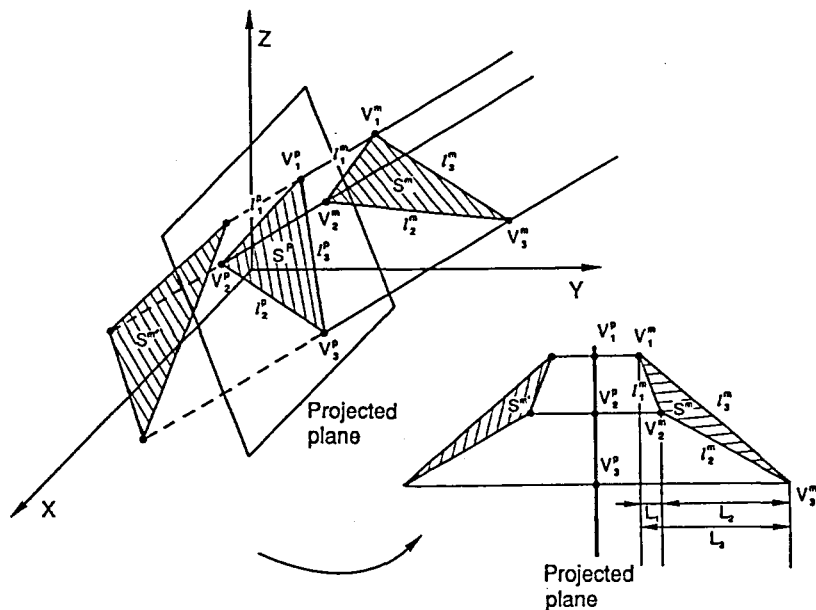


Fig.7.33 Surface in 3-D space calculated by projected shape data.

合で抽出される照合面として，視覚システムから得られた面分の内，面積が 500以上の面を特徴面候補としている．この対応抽出された特徴面に含まれる頂点から，以下の条件を基に 3 頂点を選出している．

- 1) T頂点は除外する．
- 2) 各頂点間距離が一定値以上のもの．
- 3) 面内の 3 頂点の組み合わせの中で頂点間距離の総和が長いもの．

なお，T頂点とは，投影図上で線分がT字形状で交わる点であり，これは面の隠れ関係により形成されることが多いため，このT頂点を 3 頂点から除外している．

Fig. 7.34は，対応 3 頂点の選出例を示したものである．視覚データとモデルデータにおいて，面照合が行われた時点で，相互の面間での対応した頂点も抽出される．この各頂点間で上述の基準を満たす 3 点として，図に示す 3 頂点を選出される．この選出された対応 3 頂点から，視線方向が算出される．

この算出された視線方向は，カメラの光軸を考慮されたものではないので，Fig. 7.35に示すように，この視線方向からの投影形状 (Model data) を視覚により得られた形状データ (Vision data) に重ねた場合，対応面は一致しない．線分対応で照合する

には，この対応面を一致させる必要がある．つまり，モデルの投影形状形成において，カメラの光軸まわりの補正を行う必要がある．補正はFig. 7.35に示すように，光軸まわりの回転，平行移動により行う．まず，回転の補正として，視線方向算出で選出された対応面上の 3 頂点で

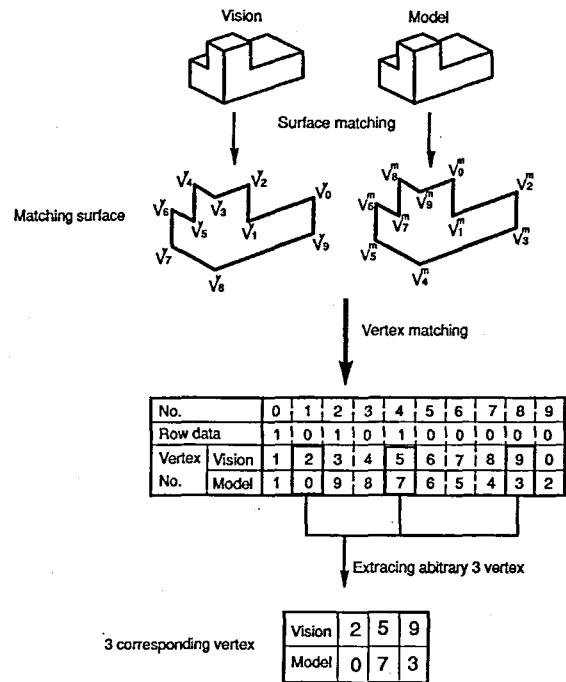


Fig.7.34 Extracting corresponding 3-vertexes on matched surface.

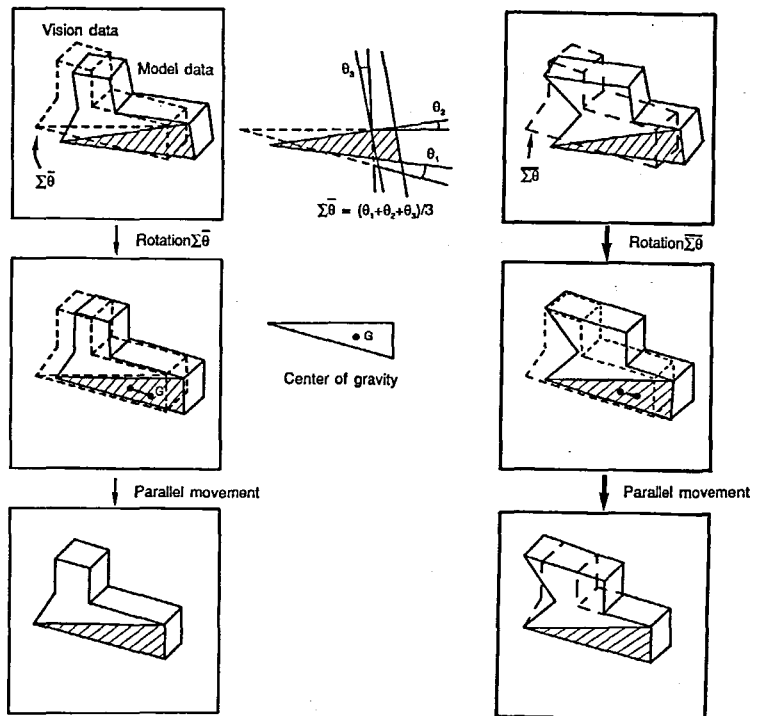


Fig.7.35 Overlapping method between vision image and projected model image.

形成される3角形（斜線部）における3辺からそれぞれの傾きのずれを平均したもの（ $\Sigma \theta$ ）を求める。これにより、回転の対応をとる。つぎに、平行移動の補正をおこなう。これは、対応面の3頂点からなる3角形の重心 G を求め、この重心のずれを補正する事により一致させる。

7.6.2 線分照合による形状一致判定

前項で示した処理により、抽出されたモデルの2次元投影形状と視覚データを重ね合わせた場合、視覚データに抽出位置誤差を含んでいるため、完全に一致することはない。また、面分照合では、物体を構成するある1面を対比することで、対応モデルを抽出しているため、抽出された面分は一致していても、それ以外の形状が一致しているとは限らない。ここでは、視覚データと抽出されたモデルの2次元投影形状間での線分レベルの一致度合いを算出・評価し、最終的な一致判定を検討する。

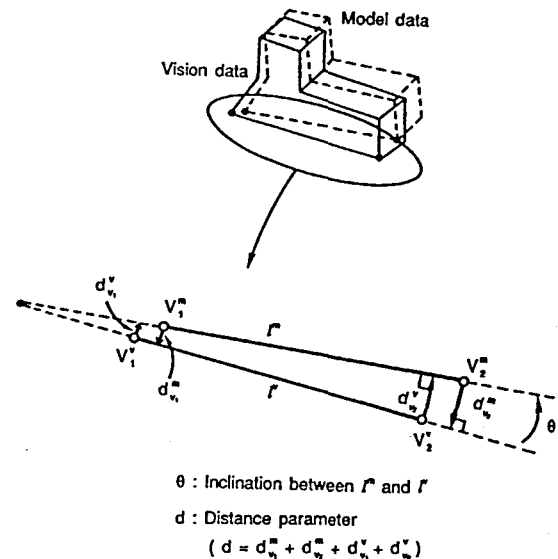


Fig.7.36 Definition of parameter for matching of line segments between vision data and model data.

視覚データとモデルの投影データを対応面で重ね合わせた場合、各線分間にFig.7.36に示すようなズレを生じる。ここで、この線分間のズレを距離偏差 Δd 、中点距離偏差 Δd_c 、傾き偏差 $\Delta \theta$ で表す。距離偏差 Δd は、対応線分間の端点と線分との距離の総和

$$\Delta d = d^m v_1 + d^m v_2 + d^v v_1 + d^v v_2 \quad (7.37)$$

として算出する。また、中点距離偏差 Δd_c は、対応線分間での中点間距離である。

視覚データにおける線分 ℓ_1^v に対応するモデルデータの線分として、偏差が

$$\begin{aligned} \Delta \theta &\leq \theta_{Th} \\ \Delta d_c &\leq C_{Th} \\ \Delta d &\leq d_{Th} \end{aligned} \quad (7.38)$$

を満たす線分において、 Δd が最小となるものを抽出する。ここで、線分対応判定の閾値 θ_{Th} 、 C_{Th} 、 d_{Th} は、視覚システムにおける頂点位置誤差から選定される値である。ここでは、視覚システムにおける頂点位置誤差 δ を有する線分と頂点位置誤差を伴わない線分（モデル）との各偏差

$$\theta_{Th} = 2 \sin^{-1} \frac{2\delta}{\ell_{Th}} \quad (7.39)$$

$$C_{Th} = 4 \times 2\delta$$

$$d_{Th} = 2\sqrt{2}\delta$$

δ : 視覚システムにおける頂点位置誤差

ℓ_{Th} : 線分対応させる最小線分長 (本システムでは 20 pixel)

を用いて閾値の設定を行っている。

Fig. 7.37は、視覚システムでの頂点位置誤差 2 pixel, を想定し, モデルデータと $\sigma=1.0$ の誤差を与えた視覚データ間での線分対応シミュレーションを行った結果である。式(7.39)から算出される閾値は θ_{Th} が 0.4, C_{Th} が 10, d_{Th} が 20 となり, 図からわかるように, この閾値設定において, 95%において線分対応率 100% となっており, 閾値設定が妥当であるといえる。

このようにして抽出された対応線分の組を N_{MAT} , 視覚データにおける総線分数 N_v とし, 照合度を評価するパラメータとして, 線分対応率 R_c と線分照合度 M_d を定義する。これらは,

$$\text{線分対応率 } R_c = \frac{N_{MAT}}{N_v} \times 100 \quad (\%) \quad (7.40)$$

$$\text{線分照合度 } M_d = \frac{\theta_{ERR}}{\theta_T(i)} \times \frac{d_{ERR}}{d_T(i)}$$

$$\theta_{ERR} = \sum \theta / N_v$$

$$d_{ERR} = \sum d / N_v$$

$\theta_T(i)$, $d_T(i)$: 視覚システムの頂点位置誤差から算定される誤差裕度

で算出する。

線分対応率 R_c は, 視覚データとモデルデータの各線分間で (7.39)式で設定されたしきい値を満足する線分の対応組の視覚データ上の線分数に対する割合で, Fig. 7.37より, R_c が 80% 以上の場合, 視覚データとモデルデータが線分レベルで一致している候補として選出される。さらに, 対応する個々の線分間での偏差に基づいて算出される線分照合度 M_d の値が 1 以下の場合, 両者が一致していると判定される。

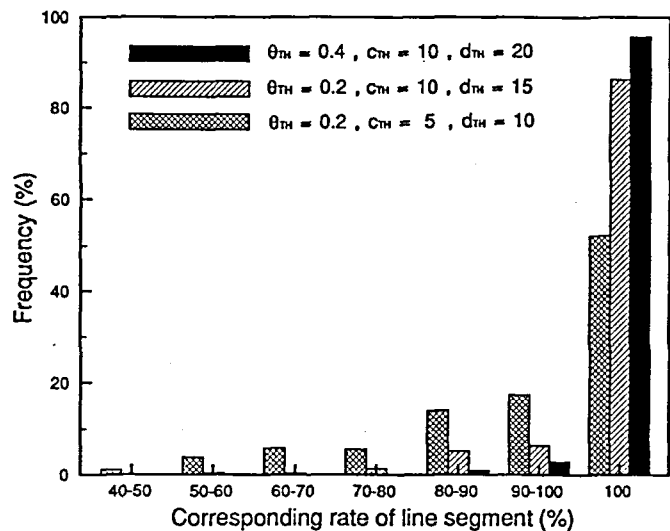


Fig.7.37 Influence of threshold for line matching on matching degree.

7.7 照合・認識システムの適用範囲とその性能

7.7.1 照合判別の閾値選定とそれによる類似形状の識別度

物体形状照合・認識性能において重要な点は、どの程度似通った物体を識別できるかである。また、この識別には照合判定の閾値選定が重要である。

Fig. 7.38は、本システムにおける類似形状の識別性能を評価するために用いたモデル形状を示したものである。このモデルは[Model 100]の物体を基本物体として、サイズが各々 95%, 90%, 85%, 80% に縮小した相似形物体をモデルデータとした。Fig. 7.39は、本シミュレーションで用いた視覚データを示したものである。これは[Model 100]の任意の視線方向での投影形状を抽出したものである。なお、この視覚データと照合モデル間での面照合で抽出された面分および対応3頂点を併せて示してある。視覚システムにおける頂点位置誤差を考慮して、この視覚データに正規分布誤差($\sigma=0.5, 1.0$)を付加させて、各5種類のモデルとの線分照合を各1000回行った結果をFig. 7.40, Fig. 7.41, Fig. 7.42に示す。

この中で、Fig. 7.40は線分対応率を示したものである。これからわかるように、付加した正規分布誤差の σ 値が0.5の場合、線分対応率の閾値を65~75%とすることで、サイズが5%異なるモデルに対しても識別が可能である。また、 σ 値が1.0の場合、線分対応率の閾値を65~85%とすることで、サイズが10%異なるモデルに対しても識別可能である。

Fig. 7.41, Fig. 7.42 は各々、線分傾き偏差 θ_{ERR} と距離偏差 d_{ERR} を示したものである。又、

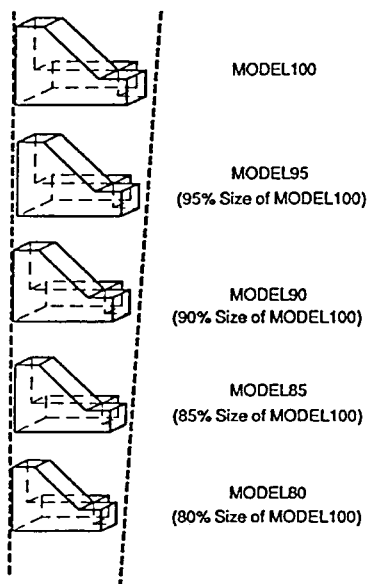


Fig.7.38 Model data used at simulation for evaluation of identification for similar shape.

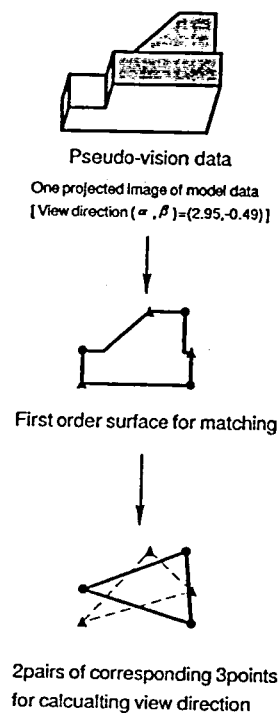
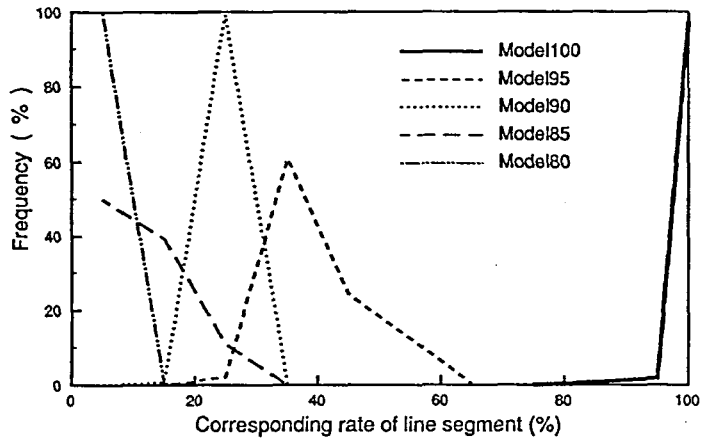
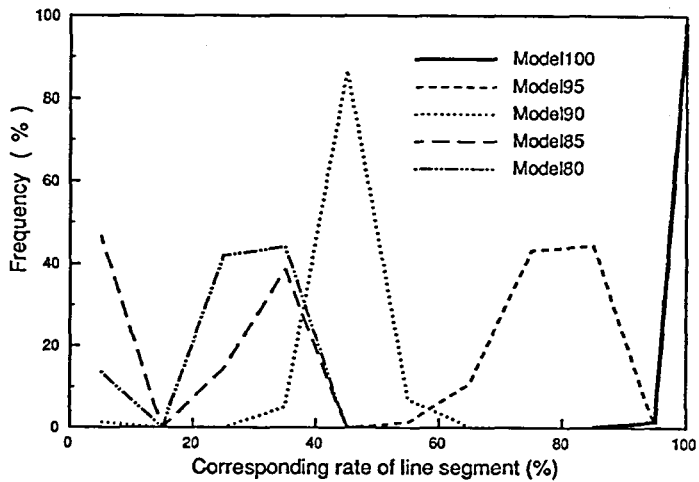


Fig.7.39 Vision data used at simulation for evaluation of identification for similar shape.

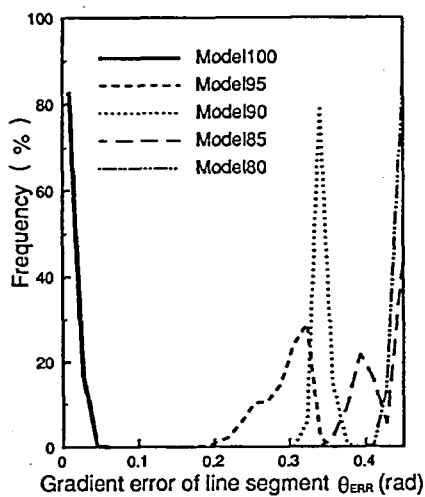


(a) additional position error ; $\sigma = 0.5$

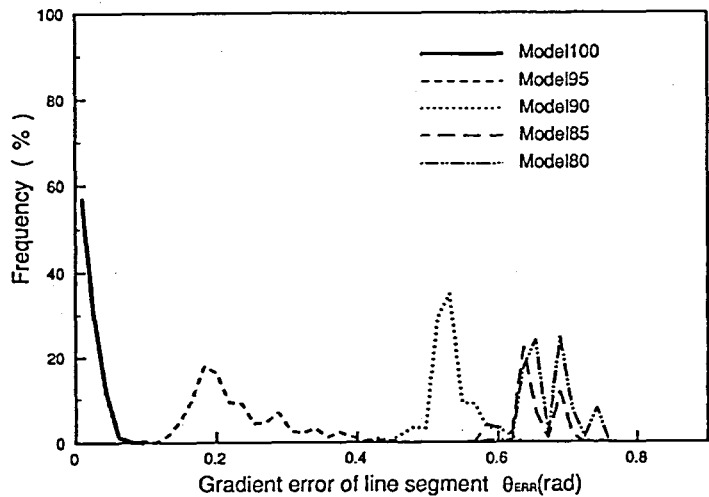


(b) additional position error ; $\sigma = 1.0$

Fig.7.40 Corresponding rate of line segment gotten by simulation for evaluation of identification for similar shape.

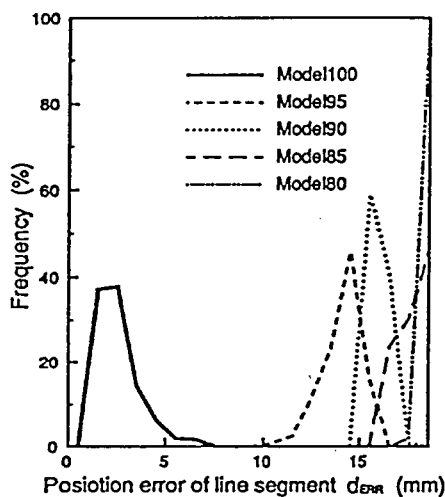


(a) additional position error ; $\sigma = 0.5$

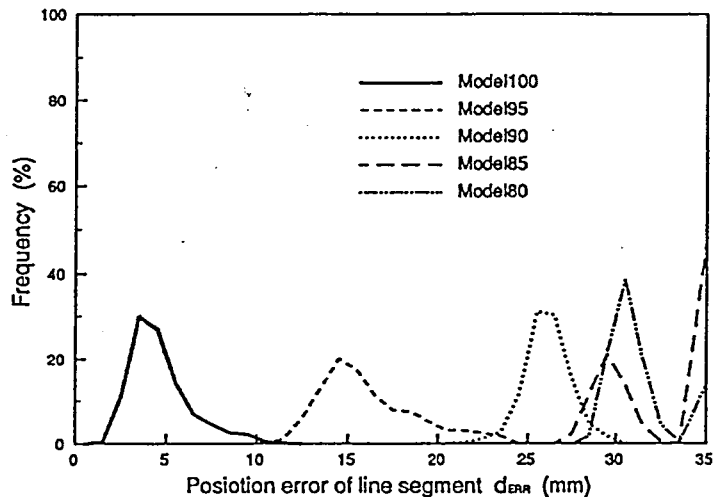


(b) additional position error ; $\sigma = 1.0$

Fig.7.41 Gradient error of line segment gotten by simulation for evaluation of identification for similar shape.



(a) additional position error ; $\sigma = 0.5$



(b) additional position error ; $\sigma = 1.0$

Fig.7.42 Position error of line segment gotten by simulation for evaluation of identification for similar shape.

Fig. 7.43は、各モデルに対する処理結果の一例を示したものである。図中白線で示したものが頂点位置誤差が付加された視覚データであり、赤線で示されているのが各モデルの投影形状である。これらの図からわかるように、線分対応率と同様、 σ 値が 0.5 の場合、サイズが 5%異なるモデルに対して識別可能であり、 σ 値が 1.0 の場合、サイズが 10%異なるモデルに対して識別可能である。

なお、このシミュレーションで与えている頂点位置誤差は、標準偏差 σ の正規分布乱数で与えている。このため、与えられた誤差は 3σ 値内に 99.973%が含まれている。このことから、最大頂点位置誤差を 3σ 値と考えると、視覚データは標本化画像上の座標値で表現されるので、

$$\sigma=0.5 \Rightarrow \text{頂点位置最大誤差} = 1.5 \text{ (Pixel)}$$

$$\sigma=1.0 \Rightarrow \text{頂点位置最大誤差} = 3.0 \text{ (Pixel)}$$

となる。

以上の結果から照合判別の閾値としては、視覚システムにおける頂点位置誤差が 3.0 pixel 以内の場合、線分対応率を 70%とし、線分偏差（距離偏差，傾き偏差）の誤差裕度値 d_T ， θ_T を、

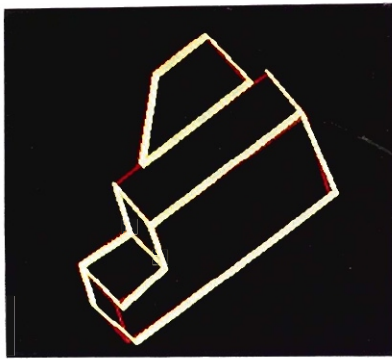
$$\text{頂点位置最大誤差 } 1.5 \text{ pixel } (\sigma=0.5) \text{ の時 } \quad d_T=10 \text{ pixel}$$

$$\theta_T=0.1 \text{ rad.}$$

$$\text{頂点位置最大誤差 } 3.0 \text{ pixel } (\sigma=1.0) \text{ の時 } \quad d_T=20 \text{ pixel}$$

$$\theta_T=0.2 \text{ rad.}$$

と選定することにより、安定にかつ識別度の高い照合ができる。



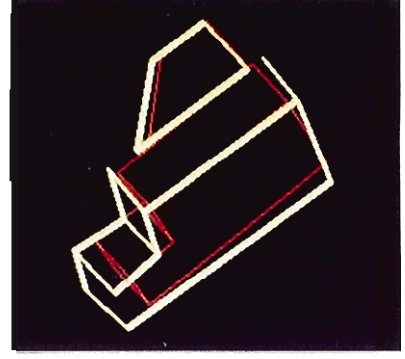
Rc	100.0%
Md	0.05

(a) [Model 100]



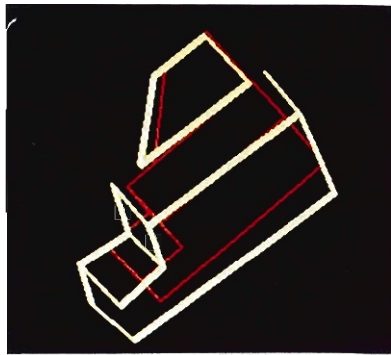
Rc	88.24%
Md	1.24

(b) [Model 95]



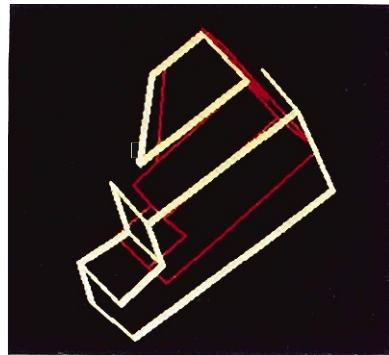
Rc	47.06%
Md	3.35

(c) [Model 90]



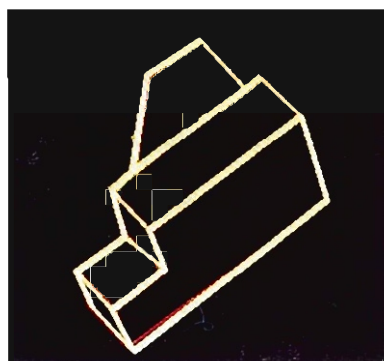
Rc	41.18%
Md	3.85

(d) [Model 85]



Rc	35.29%
Md	4.24

(e) [Model 80]



(f) Confirmation of matching

Fig.7.43 Example of line matching at simulation for evaluation of identification for similar shape

7.7.2 縁辺欠落を有する視覚データに対する形状照合シミュレーション

視覚システムから得られる形状情報には、縁辺欠落、頂点の位置誤差を含むのが一般的である。本形状照合・認識システムでは、これら視覚データの不完全さに対処可能なシステムの構築を行っており、前項に示した類似形状識別度の性能評価の実験では、頂点位置誤差を含む視覚データに対して検討を行い、視覚システムにおける頂点位置の抽出精度に基づく照合判定基準値を明確にした。

本項では、視覚データの不完全さの中の縁辺欠落に対する照合性能についてシミュレーションにより評価する。照合対象としては、前項に示した[Model 100]を用いた。視覚データとしては、この物体のある視線方向からの投影形状に $\sigma=1.0$ の頂点位置誤差を与えたものを用いた。

Fig. 7.44は線分照合結果を示したものである。(a), (b), (c)は各々、最終的に照合抽出されたモデル形状に対する線分対応率(a)、線分間の傾き偏差(b)、線分間の距離偏差(c)である。前項に示した欠落を有しない場合の結果(Fig. 7.40~Fig. 7.42における[Model 100]に対するデータ)と比較してわかるように、誤差が少し大きくなるものもあるが、前項で示した誤差裕度範囲内にあり、縁辺欠落に対する照合性も良いと判断される。Fig. 7.45は、本シミュレーションの結果の一例を示したものである。欠落1は、欠落がない場合の照合面と無関係の縁辺が欠落した場合であり、この場合は、欠落のない場合と同一結果となっている。また、欠落2では、欠落のない場合の照合面に属する縁辺が欠落しており、選定された照合面に対し、2種類のモデルが抽出され、線分照合で一致したモデルが抽出されている。このように、欠落により面照合で誤った対応を抽出することもあるが、線分照合により適合したモデル形状を正確に抽出しているのがわかる。

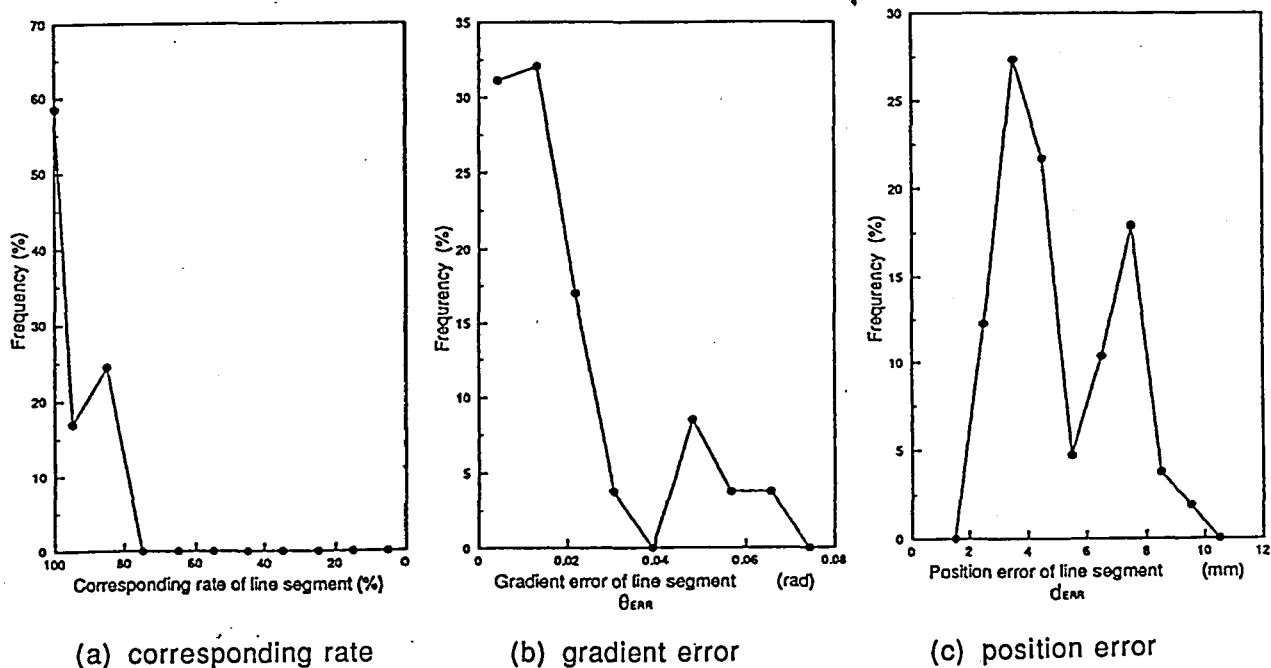


Fig.7.44 Matching result gotten by simulation of shape matching for vision data with edge lack.

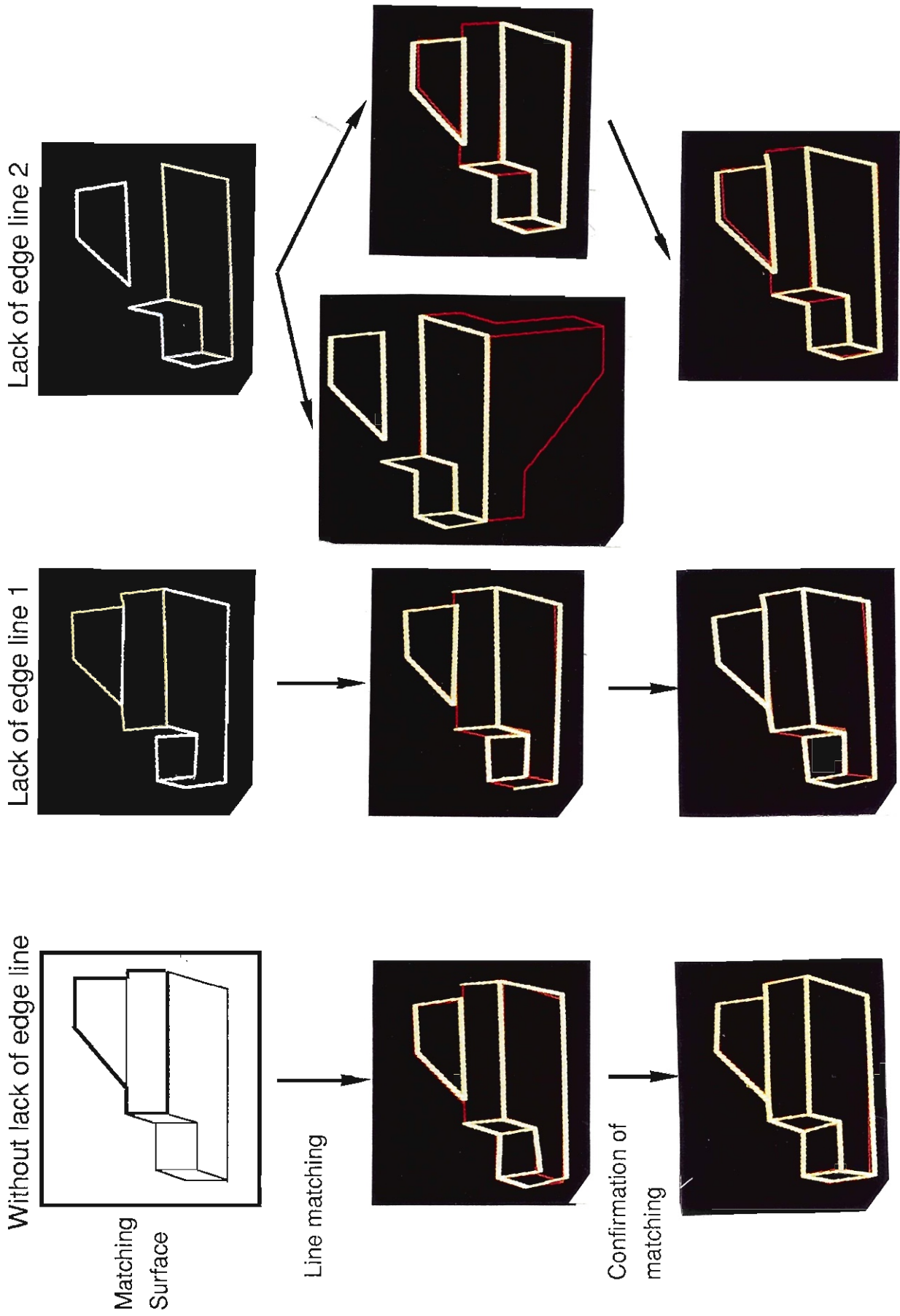


Fig.7.45 Change of matching produce on account of edge lack.

7.7.3 照合効率と物体識別性能の評価

前項までに、本研究で構築した3次元物体形状照合・認識システムを1つの対象物体に対して適用し、形状照合認識の判定基準ならびに、類似形状識別度、視覚データの不完全さへの適用を明らかにした。本項では、複数の物体モデルデータに対して、照合認識を行ったときの物体の識別度および処理時間について性能評価を行う。

Fig. 7.46に示すように、複数の多面体対象物体の形状データを作成しコンピュータに格納したモデルデータに対して、視覚から得られたModel 1の物体に対する視覚データをもとに形状照合を行った結果をFig. 7.47に示す。これは、各種視線方向から撮像して得られた視覚データに対して形状照合を行ったときの面照合後の選択モデルの割合を示したものである。これからわかるように、いずれの視線方向から物体の形状データを抽出しても、面照合後に誤りなくその物体 (Model 1) を抽出しており、Model 3 に対しては、面照合で不適合と判断されている。また、面照合で Model 1 のみが選定される確率が約 0.8 となっており、この程度の形状差の物体に対しては、1面だけの面形状照合だけでも良好に対象物体の選定が行われている。この照合では、線分照合により誤りなく物体の形状および姿勢の照合・認識がなされた。

Table 7.7は、本照合・認識処理の各処理段階での処理時間を示したものである。全処理時間 T は、

$$T = 0.079 + 0.026M + \sum_{i=1}^M O_i (\sum_j 0.037 C_{ij} + \sum_j 0.144 V_{ij}) \quad (7.41)$$

M : モデル数

O_i : モデル i の照合順位

C_{ij} : モデル i の照合順位 j 位の頂点对応の組合わせ数

V_{ij} : モデル i の照合順位 j 位の面形状対応数

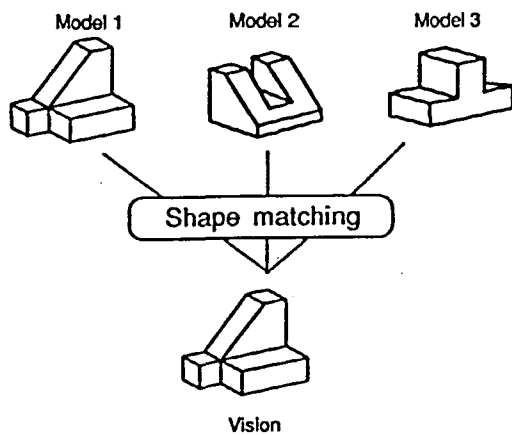


Fig.7.46 Shape matching for several models.

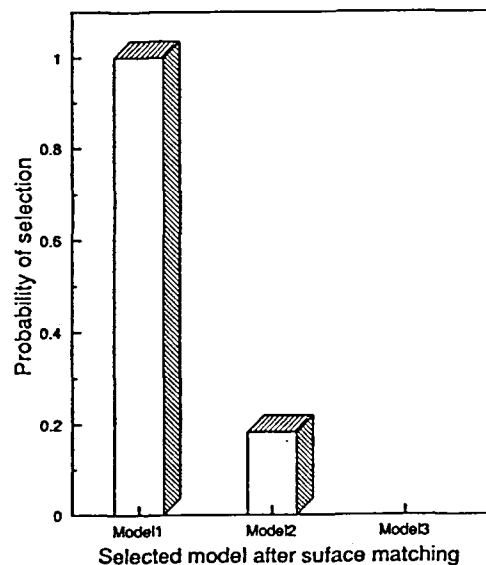


Fig.7.47 Probability of selection after surface matching.

Table 7.7 Disposal time for matching.

	Time (s)
Extracing surface shape factor of vision data	0.079
Surface matching	0.026
Calculating view direction	0.037
Line matching	0.144

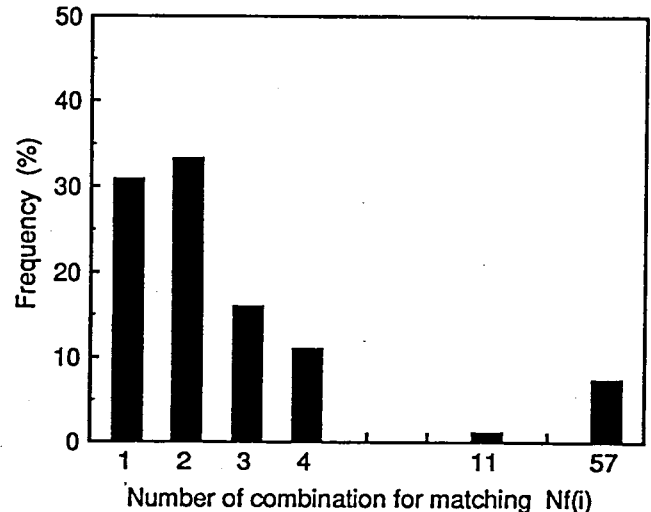


Fig.7.48 Number of combination for correspondence of vertex after surface level matching at various view direction.

となる。これからわかるように、処理時間は、線分照合に最も処理時間を要しており、面照合で抽出される対応頂点の組合わせ数により処理時間が大きく変わる。Fig. 7.48は、Fig. 7.49に示した照合時の面照合後の対応頂点の組合わせ数を示したものである。これからわかるように全体の 80% 以上が線分照合における対応頂点の組合わせ数が4以下であり、処理時間 0.6秒以下で照合処理がなされている。なお、対応頂点数 57 のものは、Model 1 の物体を撮像する方向が視線領域図で示した境界線に相当し、特徴的な面が視覚データに現れなかったものである。しかし、このような場合でも処理時間は5秒とかかっているが、照合は正確に行われている。

7.8 結論

本章では、視覚システムで得られた形状情報をもとにした3次元対象物体の形状認識について検討を行い、視覚システムから得られる形状データの不完全さに対応した3次元形状照合・認識システムを構築した。以下に本研究で得られた結果を要約する。

- 1) モデル座標系において極座標表示したときの偏角(α, β)で視線方向を表し、この視線方向角を $\alpha - \beta$ 直交座標平面上に表現することにより、3次元視線空間を2次元空間表現できる。この直交座標平面上に物体を構成する個々の面の見える領域、および、隠れ関係を呈する視線方向領域を描画して得られる視線ベクトル領域図の各領域が同一の見え方の領域を表す。この各領域内の代表点を抽出することにより、代表視線方向が得られ、代表的な投影形状を漏れなく、かつ、重複なく自動的に抽出される。
- 2) 物体を構成する個々の面の可視空間は、視線方向ベクトルを \vec{v} 、その面の法線ベクトルを \vec{n}_1 とすると、 $\vec{n}_1 \cdot \vec{v} < 0$ を満たす範囲である。

- 3) 隠れ関係にある頂点-面間において、隠す可能性のある頂点がそれにより隠される可能性のある面への投影位置により物体の見え方が変化する。隠す可能性のある頂点 V_i がそれにより隠される可能性のある面 S_j の内部に投影されるか外部に投影されるかで見え方が変化する。この見え方の変化点を視線ベクトル上に描画するには、隠される面 S_j の稜線上に動点 V_p をとり、この点 V_p を面 S_j の稜線に沿って一周させたときの $\overrightarrow{V_i V_p}$ ベクトルの偏角 (α, β) , 即ち、隠す点 V_i が隠される面 S_j の稜線上に投影される場合の視線方向角を描画すればよい。
- 4) 視線領域図上では、同一の見え方を呈する視線範囲が2次元空間上に領域分けされるので、各領域面積を算出することで、その見え方の出現度合の概算値が同時に得られる。このことは、その物体の形状特徴を表現する上で非常に役立つ。
- 5) 産業分野における処理対象物体は、水平作業台上に置かれていることが多く、また、TVカメラの姿勢が既知の場合が多い。このような状況下では、物体の安定姿勢、TVカメラの姿勢を考慮して得られるTVカメラの視線軌跡を視線ベクトル領域図上に描画し、その軌跡が通過する領域、境界線を抽出することにより、容易に安定姿勢に対する代表的投影形状が抽出できる。
- 6) 縁辺欠落を想定した隣接面データを作成し、形状モデルデータとして持たせることにより、視覚システムにより得られる形状データにおける縁辺欠落による情報の不完全さに対処でき、さらに、面の形状が多様化され、形状識別が容易になる。
- 7) 面形状データを数量化表現された形状要素値（頂点の凹凸並びデータと平行稜線データ）で階層化することにより、形状照合のためのモデルデータ量を 1/6程度に圧縮することができる。ただし、この圧縮量は物体形状による。
- 8) 形状要素値で階層化されたモデルデータおよび視覚データにおいて、各形状要素値を有する面の数と頂点並び順の組合せ数から規定される面形状対応数 $N_f(i)$, $N_v(i)$ を求め、視覚データの各形状要素に対するモデルデータと視覚データの線分照合時の頂点对応の組み合わせ数となる面形状対応数 $N_s(i) (= N_f(i) \times N_v(i))$ の小さな形状要素を照合対応面として抽出することにより、形状照合の効率化が計れる。
- 9) 視覚データの照合注目面とその対応モデルデータ面の2次元投影データにおける対応3頂点の投影座標から視線方向が算出可能である。この時、複数の対応3頂点から算出された視線方向の一致度から面対応における誤対応が判断可能である。この時の対応3頂点の選定は、この3頂点で形成される三角形の各辺長ができるだけ大きいものを選定する必要がある。
- 10) 視覚データの照合注目面とその対応モデルデータ面を投影面上で重ね合わせたときの各線分間の一致度として、線分対応率 R_c と線分照合度 M_a 。

$$R_c = \frac{N_{MAT}}{N_v} \times 100 (\%)$$

$$M_d = \frac{\theta_{ERR}}{\theta_T(i)} \times \frac{d_{ERR}}{d_T(i)}$$

θ_{ERR} ; 線分間の平均距離偏差

d_{ERR} ; 線分間の平均傾き偏差

$\theta_T(i), d_T(i)$; 視覚システムの頂点位置誤差から算定される誤差裕度

を定義し、視覚システムにおける検出位置精度を考慮した誤差裕度 $d_T(i)$, $\theta_T(i)$ を導入することにより、視覚システムの性能に応じた照合判定が可能となる。

- 11) 類似形状の識別性能として、視覚システムにおける頂点位置誤差が標本化画像上で 2 pixel 程度の場合でも、10 %サイズの異なる相似形物体も識別が可能である。
- 12) 2次元投影図上で 10~20 本程度の縁辺を有する対象物体において、任意の 2 本が縁辺欠落しているような視覚データからでも形状照合認識が可能である。
- 13) 本研究で扱った多面体対象物体において、80 %以上は処理時間 0.6 秒以内でモデルの同定および姿勢の同定が可能であった。

第8章 結 論

本研究は、生産工程で取り扱われる3次元対象物体の形状・位置計測に用いられる視覚システムにおいて、形状情報取得の向上を目的とし、形成原理の異なる濃淡画像とパターン投光画像を併用した異種画像併用視覚システムの構築を行ったものである。さらに、視覚システムで得られる形状情報からの対象物体の形状・姿勢認識における課題である視線方向にともなう見え方の変化および視覚システムで得られる形状情報の不完全さに対応した形状・姿勢認識方法を提示した。

本研究では、まず、本視覚システムにおける形状情報取得画像である縁辺検出画像およびパターン投光画像において、画像に含まれるノイズや環境光などの外乱を考慮した新たな縁辺検出法ならびにパターン画像（モアレ縞画像）形成法を提案した。また、対ノイズ性の良好なハフ変換法において、直線抽出に用いられている $\theta - \rho$ ハフ変換画像から直線と2次曲線を抽出する新たな方法を導出した。これらの画像形成・処理方法を基に濃淡画像とパターン投光画像（モアレ縞画像）を併用し、相互の特徴を生かした異種画像併用視覚システムを構築した。さらに、この視覚システムから得られた形状情報の利用方法として、形状モデルデータとの照合による3次元対象物体の形状照合・認識法について検討を行った。

以下に、本研究で得られた主要な結論を列挙する。

- (1) TVカメラの光軸に対して $\pm \pi/4$ の方向に拡散照明を配置し、両者の強度比を2:1としたとき、縁辺での輝度レベルの変化が広い範囲で得られ、さらに、縁辺検出時の検出阻害因子となる影や局部反射等における輝度レベル変化度合いと縁辺での輝度レベル変化度合いを区別することが可能である。
- (2) 標本化画像（ $N \times N$ 画素）内における小領域（ $n \times n$ 画素、 $n \ll N$ ）内の輝度レベルの分散値および2次分散値を基にした縁辺検出法は、対ノイズ性が良好で、影や局部反射等における急峻なランプ変化を抽出しない。また、この縁辺検出法は、縁辺点判断の2値化の閾値が固定であるため、処理画像によって閾値を選定する必要がない。
- (3) スリットレーザ光を等間隔に精度良く走査投光し、撮像管の電荷蓄積特性を利用することにより、環境光の存在下において、反射特性の悪い面に対しても容易に格子像の形成が可能であり、これにより、良好なモアレ縞画像が形成される。
- (4) モアレ縞画像を形成する元になる平行格子投光画像の格子間隔が対象面の傾きと1対1の対応関係があることから、この平行格子投光画像のTV信号を波形成形して対象面の傾きの正負で領域分けされた2値画像をモアレ縞画像形成と並列に形成させることができる。この画像を用いることにより、モアレ縞画像を用いた3次元計測で問題となる凹凸判定を極めて容易に行うことができる。

- (5) 2次曲線を規定する最も重要な要素は、2次曲線の軸成分であり、2次曲線の軸はその2次曲線の軸対称点における接線の角の2等分線である。また、2次曲線を $\theta - \rho$ パラメータ平面へ写像して得られる $\theta - \rho$ ハフ変換画像において、その度数極大点はもとの2次曲線上の各点の接線を表している。このことに基づき、2次曲線（楕円，双曲線，放物線）の接線軌跡を示す $\theta - \rho$ 平面へのハフ変換曲線（集積点軌跡）上における2次曲線の軸上点（ $\theta = \pi/2 + \alpha, \pi + \alpha$ ）に対する対称点の（ θ, ρ ）値から2次曲線のパラメータ x_0, y_0, a, b, α を容易に抽出できる。これにより、直線のパラメータ抽出に用いられている $\theta - \rho$ 2次元パラメータ空間から直線と曲線の混在する線画画像における両者の線分パラメータを容易に抽出可能である。
- (6) $\theta - \rho$ ハフ変換画像上で、直線の集積点と曲線の集積点で集積度数，集積勾配が異なり、これらの値から容易に両者の集積点を分離抽出できる。
- (7) 濃淡画像から縁辺検出を行ったときの縁辺欠落とパターン投光におけるパターン画像の形成されない箇所が一致しない。また、パターン画像において、パターン情報が変化するのには形状変化によるのみである。このため、両者から得られる形状情報を相互に補い合う形状情報取得アルゴリズムを構築することにより、情報欠落が少なく、信頼性の高い視覚システムの構築が可能である。
- (8) 3次元対象物体は、撮像する方向により見え方（投影形状）が変化をする。視線方向を極座標表示したときの偏角（ α, β ）で表し、この視線方向角を $\alpha - \beta$ 直交座標平面上に表現することにより、3次元視線空間を2次元空間表現できる。この直交座標平面上に物体を構成する個々の面の見える領域、および、隠れ関係を呈する視線方向領域を描画して得られる視線ベクトル領域図の各領域が同一の見え方の領域を表す。この各領域内の代表点を抽出することにより、代表視線方向が得られ、代表的な投影形状を漏れなく、かつ、重複なく自動的に抽出される。さらに、物体の安定姿勢を考慮した視線方向を視線ベクトル領域図に描画することにより、容易に物体の安定姿勢にたいする見え方を抽出することができる。
- (9) 視覚で得られる形状情報には、縁辺欠落などの形状情報の欠落や計測誤差が含まれている。視覚で得られた形状情報とモデル形状データを照合する場合、モデル形状データに形状情報の欠落想定データを持たせ、さらに、視覚データにおいては、形状判定を複数の閾値で行うことで、視覚データの不完全さに対応した形状照合が可能となる。
- (10) 3次元物体の形状照合において、物体形状を面形状要素で整理することで、すべての3次元物体の見え方に対する形状データをコンピュータに持たせても、少ないメモリ容量（約3 kbyte/モデル）で格納可能である。また、照合を面形状による照合と線分レベルでの照合の2段階で行うことにより高速に、かつ、信頼性良く照合ができる。

謝 辞

本研究は、大阪大学教授 仲田周次博士の御指導と御教示のもとに遂行し得たものである。本論文の作成にあたっては、大阪大学教授 西口公之博士、丸尾 大博士、井上勝敬博士により有益な御助言と御討論を賜った。

実験および画像処理ソフトウェア開発の遂行にあたり、大阪大学工学部生産加工工学科（溶接工学科）仲田研究室の卒業生である黒木英一氏、松永知也氏、中岡 久氏、木村 悟氏、岩田剛治氏、木本正人氏、古市 充氏、小野木幸雄氏をはじめ、多くの卒業生ならびに在学生の方々より多大な御支援、御協力を得た。

また、視覚システムの試作にあたっては、大阪大学工学部技官 川辺了一氏をはじめ、生産加工工学科共通掛の技官の方々から多大な御協力を頂いた。

さらに、論文作成にあたり、仲田研究室の小川佳美事務補佐員に多大な御協力を得た。

本研究は、以上の方々をはじめ数多くの方々の御指導、御援助を得てなされたものであり、本論文を終えるにあたり、これらの方々に深甚の謝意を表する次第であります。

参 考 文 献

- 1) 大西利美 :,"自動車産業におけるニューコンセプト", 溶接学会誌, Vol.59, No.1, pp.30-34, (1990)
- 2) 長尾 真 監訳:,"デジタル画像処理", 近代科学社, (1978)
- 3) A.G.Makhlin :,"Westinghouse visual inspection and industrial robot control system", Proceedings of the 1st. International Conference on Robot Vision and Sensory Controls, (1981)
- 4) T.Asano, S.Maeda, and T.Murai :,"Vision system of an automatic inserter for printed circuit board assembly",Proceedings of the 2nd. International Conference on Robot Vision and Sensory Controls, (1982)
- 5) Y.Nitta :,"Visual identification and sorting with TV-camera applied to automated inspection apparatus", 10th International Symposium on Industrial Robots, p.141-152, (1980)
- 6) M.Bernasconi, R.Delazer and M.Gini :,"Precision measurement by stereo vision system", 10th International Symposium on Industrial Robots, pp.349-360, (1980)
- 7) M.Akkermans, M.V.Thillo, L.V.Gool and A.Oosterlinck :,,"An algorithm for the extraction of line drawings for polyhedral scenes and their use in stereo vision", Proceedings of 3rd. International Conference on Robot Vision & Sensory Controls, pp.99-105, (1983)
- 8) H.K.Nishihara :,,"Prism:a practical realtime imaging stereo matcher",Proceedings of 3rd. International Conference on Robot Vision & Sensory Controls, pp.121-129, (1983)
- 9) G.Hobrough and T.Hobrough :,,"Stereopsis for robots by iterative stereo image matching",Proceedings of 3rd. International Conference on Robot vision & Sensory Controls, pp.285-293, (1983)
- 10) 伊藤日藝, 宮内 新, 小沢慎治 :,,"移動ロボットのための単眼視による距離情報の抽出", 電子通信学会論文誌, Vol.J67-D, No.3, pp.265-272, (1984)
- 11) R.J.Fryer :,,"Archie-an experimental 3d vision systems", Proceedings of 4th. International Conference on Robot Vision & Sensory Controls, pp.197-208, (1984)
- 12) A.G.Makhlin :,,"Stability and sensitivity of servo vision systems", Proceedings of 5th. International Conference on Robot Vision & Sensory Control, pp.79-89, (1985)

- 13) Z.Houkes :, "Distance measurement by stereo vision", Proceedings of 5th. International Conference on Robot Vision & Sensory Control, pp.393-416, (1985)
- 14) 久野敦司, 山口芳徳, 政木俊道, 坂 和彦 :, "2値画像による多面体の位置・姿勢計測", 電子通信学会論文誌, Vol.J69-D, No.3, pp.410-416, (1986)
- 15) 洪 海, 川嶋稔夫, 青木由直 :, "照度差ステレオ法による三次元物体の形状と位置情報の復元", 電子通信学会論文誌, Vol.J69-D, No.3, pp.427-433, (1986)
- 16) 巽 英一, 泉 正夫, 福永邦雄, 笠井 保 :, "画像の線分構造に基づいたステレオ画像法", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J70-D, No.4, pp.770-776, (1987)
- 17) 丸山 稔, 阿部 茂 :, "立体視に基づく面の抽出と面内ベクトルの認定による多面体構造の抽出", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J70-D, No.12, No.12, pp.2581-2589, (1987)
- 18) 巽 英一, 福永邦夫, 笠井 保 :, "曲線を考慮した線構造に基づいたステレオ画像法", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J71-D, No.11, pp.2327-2334, (1988)
- 19) R.Houraud and T.Skordas :, "Stereo correspondence through feature grouping and maximal cliques", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No.11, pp.1168-1180, (1989)
- 20) K.Ikeuchi :, "Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-3, No.6, pp.661-669, (1981)
- 21) 北川博雄, 鈴木幹男, 藤田広一 :, "濃淡画像からの物体面の傾き抽出", 電子通信学会論文誌, Vol.J66-D, No.1, pp.65-72, (1983)
- 22) 越川和忠 :, "反射偏光を利用する面方向検出法", 計測自動制御学会論文誌, Vol.18, No.10, pp.1031-1033, (1981)
- 23) C.A.Mcpherson :, "Three-dimensional robot vision", Proceedings of 3rd. International Conference on Robot Vision & Sensory Controls, pp.167-177, (1983)
- 24) 郭 亨礼, 谷内田正彦, 辻 三郎 :, "平面状物体の3次元座標と方向の計測", 電子通信学会論文誌, Vol.J67-D, No.11, pp.1372-1378, (1984)
- 25) M.Bogaert and O.Ledoux :, "3D perception in industrial environment", Proceedings of 3rd. International Conference on Robot Vision & Sensory Controls, pp.149-156, (1983)
- 26) James.C.Lin and Zuo-Chen Chi :, "Accuracy analysis of a laser/camera based 3-D measurement system", Proceedings of 3rd. International Conference on Robot Vision and Sensory Controls, pp.179-191, (1983)
- 27) 毛利尚武, 大島康次郎, 伊 昌朝 :, "レーザー光を用いたICチップの姿勢角制御", 計測自動制御学会論文誌, Vol.17, No.8, pp.49-72, (1981)

- 28) Y. Sato, H. Kitagawa and H. Fujita :, "Shape measurement of curved objects using multiple slit-ray projections", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-4, No. 6, pp. 641-647, (1982)
- 29) 中川康夫 :, "光切断法の生産自動化への応用", 精密機械, JSPE-51-04, pp. 41-43, (1985)
- 30) 小関 修, 中野倫明, 山本 新 :, "光切断法を用いた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)
- 31) 成瀬 央, 野村由司彦, 山本俊雄 :, "スリット光投影法による高精度距離・姿勢計測", 電子通信学会論文誌, Vol. J69-D, No. 12, pp. 1888-1895, (1986)
- 32) T. Echigo and M. Yachida :, "A fast method for extraction of 3-D information using multiple stripes and two cameras", 9th. International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 1127-1130, (1985)
- 33) 青木則夫, 谷内田正彦, 辻 三郎 :, "パターン投影法と2台のカメラを用いた3次元物体の計測", 電子通信学会論文誌, Vol. J68-D, No. 3, pp. 384-391, (1985)
- 34) M. C. Chiang, J. B. K. Tio and E. L. Hall :, "Robot vision using a projection method", Proceedings of 3rd. International Conference on Robot Vision and Sensory Controls, pp. 113-120, (1983)
- 35) B. F. Alexander and K. C. Ng :, "A liquid crystal projection system for 3D imaging", Proceedings of 5th. International Conference on Robot Vision & Sensory Controls, pp. 211-222, (1985)
- 36) 弓場芳治, 平井 宏, 堤 喜代司, 松村 明 :, "市松格子投影による三次元物体の計測", 電子通信学会論文誌, Vol. J69-D, No. 12, pp. 1936-1942, (1986)
- 37) K. L. Boyer and A. C. Kak :, "Color-encoded structured light for rapid active ranging", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 1, pp. 14-28, (1987)
- 38) D. Wei and M. Gini :, "The use of taper light beame for object recognition", International Trends in Manufacturing Technology Robot Vision, pp. 143-153, (1983)
- 39) 馬 開華, 杉原厚吉, 杉江 昇 :, "多数の円錐光束を利用した三次元情報抽出法", 電子通信学会論文誌, Vol. J68-D, No. 9, pp. 1697-1704, (1985)
- 40) 大谷 涼 :, "リングパターン法を用いるロボット用物体認識センサ", 電子通信学会論文誌, Vol. J69-D, No. 3, pp. 269-278, (1986)
- 41) 中沢和夫, 中島真人, 小林 寛 :, "ファイバグレーティングを用いた3次元形状計測システムの開発", 電子通信学会論文誌, Vol. J69-D, No. 12, pp. 1929-1935, (1986)
- 42) P. H. Winston 編, 白井良明, 杉原厚吉 訳 :, "コンピュータビジョンの心理", 産業図書(株), p. 123-172, (1979)

- 43) J.M.S.Prewitt :, "Object enhancement and extraction", Picture Processing and Psychopictorics, Academic Press., p.75-149, (1970)
- 44) R.Kirsch :, "Computer determination of the constituent structure of biological images", Computer Biomedical Research, Vol.4, p.315-328, (1971)
- 45) A.Rosenfeld and M.Thurston :, "Edge and curve detection for visual scene analysis", IEEE Trans. on Computers, Vol.C-20, No.5, pp.562-569, (1971)
- 46) A.Rosenfeld, M.Thurston, and Y.-HAN LEE :, "Edge and curve detection : Further experiments", IEEE Trans. on Computers, Vol.C-21, No.7, pp.677-715, (1972)
- 47) Ramakant Nevatia and K.Ramesh Babu :, "Linear feature extraction and description" Computer Graphics and Image Processing, Vol.13, pp.257-269, (1980)
- 48) D.Marr and E.Hildreth :, "Theory of edge detection", Proc. R. Soc. Lond. B 207, pp.187-217, (1980)
- 49) W. H. H. J. Lunscher, and M. P. Beddoes :, "Optimal edge detector design I: Parameter selection and noise effects", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-8, No.2, pp.164-177, (1986)
- 50) W.H.M.J.Lunschier and M.P.Michael :, "Optimal edge detector design II : Coefficient quantization", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-8, No.2, pp.178-187, (1986)
- 51) John Canny :, "A computational approach to edge detection", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-8, No.6, pp.679-698, (1986)
- 52) J. S. Chen, A. Huertas, and G. Medioni :, "Fast convolution with Laplacian-of-Gaussian masks", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-9, No.4, pp.584-590, (1987)
- 53) V.Berzins :, "Accuracy of laplacian edge detectors", Computer Vision ,Graphics and Image Processing, Vol.27, p.195-210, 1984
- 54) Manfred H. Hueckel :, "An operator which locates edges in digitized pictures", Journal of the Association for Computing Machinery, Vol.18, No.1, pp.113-125, (1971)
- 55) Manfred H. Hueckel :, "A local visual operator which recognizes edge and lines", Journal of the Association for Computing Machinery, Vol.20, No.4, pp.634-647, (1973)
- 56) J.R.Fram and E.S.Deutsch :, "On the quantitative evaluation of edge detection schemes and their comparison with human performance", IEEE Trans. on Computers, Vol.C-24, No.6, pp.616-628, 1975

- 57) T.Peli :, "A study of edge detection algorithms", Computer Graphics and Image Processing, Vol.20, p.1-21, 1982
- 58) E. J.Delp and C.H.Chu :, "Detecting edge segments", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-15, No.1, pp.144-152, 1985
- 59) Anil K. Jain and Edward Angel :, "Image restoration, modelling, and reduction of dimensionality", IEEE Trans. on Computers, Vol.C-23, No.5, pp.470-476, (1974)
- 60) Anil K.Jain :, "A semicausal model for recursive filtering of two-dimensional images", IEEE Trans. on Computers, Vol.C-26, No.4, pp.343-350, (1977)
- 61) Anil K.Jain and Jaswant R.Jain :, "Partial differential equations and finite difference methods in image processing - Part 2: Image restoration", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.AC-23, No.5, pp.817-833, (1978)
- 62) A. K. Jain :, "Partial differential equations and finite-difference methods in image processing, Part 1: Image representation", Journal of Optimization Theory and Applications, Vol.23, No.1, pp.65-91, (1977)
- 63) Anil K. Jain :, "Image coding via a nearest neighbors image model", IEEE Trans. on Communications, Vol.COM-23, No.3, pp.318-331, (1975)
- 64) K.S.Shanmugam, F.M.Dickey and J.A.Green :, "An optimal frequency domain filter for edge detection in digital pictures", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-1, No.1, pp.37-49, (1979)
- 65) E.Persoon :, "A new edge detection algorithm and its applications in picture processing", Computer Graphics and Image Processing, Vol.5, p.425-446, (1976)
- 66) J.W.Modestino and R.W.Fries :, "Edge detection in noisy images using recursive digital filtering", Computer Graphics and Image Processing, Vol.6, p.409-433, (1977)
- 67) N.E.Nahi and S.L.Mora :, "Estimation-detection of boundaries in noisy images" IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.AC-23, No.5, pp.834-845, (1978)
- 68) T.Honghong and M.Shneier :, "Border extraction using linked edge pyramids" IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-12, No.5, pp.660-668, (1982)
- 69) D.B.Cooper and F.P.Sung :, "Multiple-window parallel adaptive boundary finding in computer vision", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-5, No.3, pp.299-316, 1983
- 70) S.Hong :, "An edge extraction technique for noisy images", Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol.25, pp.24-45, (1984)

- 71) Y.T.Zhou, V.Venkateswar, and R.Chellappa :, "Edge detection and linear feature extraction using a 2-D random field model", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No.1, pp.84-95, (1989)
- 72) G.Oster, M.Wasserman, and C.Zwerling :, "Theoretical interpretation of Moire patterns", Journal of Optical Society of America, Vol.54, No.2, pp.169-175, (1964)
- 73) O.Bryngdahl :, "Moire : Formation and interpretation", Journal of the Optical Society of America, Vol.64, No.10, pp.1287-1294, (1974)
- 74) R.H.Katyl :, "Moire screens coded with pseudo-random sequences", Applied Optics, Vol.11, No.10, pp.2278-2285, (1972)
- 75) S.Yokozeki, Y.Kusaka, and K.Patorski :, "Geometric parameters of moire fringes", Applied Optics, Vol.15, No.9, pp.2223-2227, (1976)
- 76) D.M.Meadows, W.O.Johnson, and J.B.Allen :, "Generation of surface contours by Moire patterns", Applied Optics, Vol.9, No.4, pp.942-947, (1970)
- 77) H.Takasaki :, "Moire topography", Applied Optics, Vol.9, No.6, pp.1457-1472 (1970)
- 78) J.Buitrago and A.J.Durelli :, "On the interpretation of shadow-moire fringes", Experimental Mechanics, pp.221-226 (1978)
- 79) J.D.Hovanesian and Y.Y.Hung :, "Moire contour-sum contour-difference, and vibration analysis of arbitrary objects", Applied Optics, Vol.10, No.12, pp.2734-2738, (1971)
- 80) F.heiniger and T.Tschudi :, "Moire depth contouring", Applied Optics, Vol.18, No.10, pp.1577-1581
- 81) R.Ritter :, "A dynamic Moire method for deformation measurement of curved surfaces Experimental Mechanics, pp.145-146 (1979)
- 82) G.Friedrich :, "Error assessment using equidensity fringes in photoelasticity", Experimental Mechanics, pp.276-280, (1979)
- 83) F.P.Chiang :, "Moire methods of strain analysis", Experimental Mechanics, pp.290-308, (1979)
- 84) R.Ritter and H.J.Meyer :, "Vibration analysis of plates by a time-averaged projection-moire method", Applied Optics, Vol.19, No.10, pp.1630-1633, (1980)
- 85) J.Fujimoto :, "Determination of the vibrating phase by a time-averaged shadow moire method", Applied Optics, Vol.21, No.23, pp.4373-4376, (1982)
- 86) R.A.Rooth, H.J.Frankena, and F.H.Groen :, "Moire method to determine separate frequency contributions in vibration patterns", Applied Optics, Vol.22, No.2, pp.233-236, (1983)

- 87) K.G.Harding and J.S.Harris :, "Projection Moire interferometer for vibration analysis", Applied optics, Vol.22, No.6, pp.856-861, (1983)
- 88) O.Kafri and A.Livnat :, "Second and third optical differentiation by double moire deflectometry", Applied Optics, Vol.22, NO.14, pp.2115-2117, (1983)
- 89) O.Kafri, Y.B.Band, T.Chin, D.F.Heller, and J.C.Walling :, "Real-time moire vibration analysis of diffusive objects", Applied Optics, Vol.24, No.2, pp.240-242, (1985)
- 90) E.Keren :, "Immunity to shock and vibration in moire deflectometry", Applied Optics, Vol.24, No.18, pp.3028-3031, (1985)
- 91) H.Takasaki :, "Moire topography", Applied Optics, Vol.12, No.4, pp.845-850
- 92) 高崎 宏 :, "モアレトポグラフィの原理と発展", テレビジョン学会技術報告, ITA 34-1, pp.97-102, (1978)
- 93) Y.Yoshino, M.Tsukiji, and H.Takasaki :, "Moire topography by means of a grating hologram", Applied Optics, Vol.15, No.10, pp.2414-2417, (1976)
- 94) A.T.Andonian :, "Correction for rigid body motion in moire topography", Applied Optics, Vol.21, No.7, pp.1253-1258, (1982)
- 95) R.k.Muller and L.R.Sackel :, "Complete automatic analysis of photoelastic fringes", Experimental Mechanics, pp.245-251 (1979)
- 96) W.R.J.Funnell :, "Image processing applied to the interactive analysis of interferometric fringes", Applied Optics, Vol.20, No.18, pp.3245-3250, (1981)
- 97) T.Yatagai, S.Nakadate, M.Idesawa, H.Sa :, "Automatic fringe analysis using digital image processing techniques", Optical Engineering, Vol.21, No.3, pp.432-435, (1982)
- 98) H.E.Cline, A.S.Holin, and W.E.Lorensen :, "Computer-aided surface reconstruction of interference contours", Applied Optics, Vol.21, No.24, pp.4481-4488, (1982)
- 99) Lawrence Mertz :, "Real-time fringe-pattern analysis", Applied Optics, Vol.22, No.10, pp.1535-1539, (1983)
- 100) 高森 年, 小南真也, 米持政忠 :, "円柱後流渦に関するモアレパターンの画像処理", 計測自動制御学会論文集, Vol.19, No.10, pp.813-818, 1983
- 101) D.W.Robinson :, "Automatic fringe analysis with a computer image-processing system", Applied Optics, Vol.22, No.14, pp.2169-2176, (1983)
- 102) H.E.Cline, W.E.Lorensen, and A.S.Helik :, "Automatic moire contouring", Applied Optics, Vol.23, No.10, pp.1454-1459, (1984)
- 103) M.Idesawa, T.Yatagai and T.Soma :, "A method for automatic measurement of three-dimensional shape by new type of moire topography", Proceedings of 3rd. International Joint Conference on Pattern Recognition, pp.708-712, (1976)

- 104) 浜崎裕司, 丹羽 登 : "TV技術を利用したモアレトポグラフィ", 精密機械, Vol.43, No.4, pp.101-104, (1977)
- 105) M. Idesawa, T. Yatagai, and T. Soma : "Scanning moire method and automatic measurement of 3-D shapes", Applied Optics, Vol.16, No.8, pp.2152-2161 (1977)
- 106) 吉田富士夫, 丹羽 登 : "TV系によるモアレ等高線縞の実時間観測", テレビジョン学会技術報告, ITA 34-4, pp.115-120, (1978)
- 107) 上田照夫 : "電子格子モアレ法とその応用", テレビジョン学会技術報告, ITA34-3, pp.109-114, (1978)
- 108) 木内雄二 : "イメージセンサ", 日刊工業新聞社, (1978)
- 109) G. S. Sidhu and R. T. Boute : "Property encoding : Application in binary picture encoding and boundary following", IEEE Trans. on Computers, Vol.C-21, No.11, pp.1206-1216, (1972)
- 110) 山田 満, 蓮池和夫 : "拡張境界追跡アルゴリズムとその応用", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J71-D, No.12, pp.2587-2595, (1988)
- 111) 李 志広, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, 福村晃夫 : "交差点記述法による2値画像の輪郭追跡と復元", 電子通信学会論文誌, Vol. J65-D, No.10, pp.1203-1210, (1982)
- 112) G. C. Stockman and A. K. Agrawala : "Equivalence of Hough curve detection to template matching", Communications of the ACM, Vol.20, No.11, pp.820-822, (1977)
- 113) 長尾智晴, 安居院猛, 中嶋正之 : "極座標特徴を用いた一定形状図形の抽出手法", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol. J72-D-II, No.2, pp.229-236, (1989)
- 114) P. V. C. Hough : "Method and means for recognizing complex patterns", U.S. Patent, 3069654, (1962)
- 115) 松山隆司, 輿水大和 : "Hough変換とパターンマッチング", 情報処理, Vol.30, NO.9, pp.1035-1046, (1989)
- 116) R. O. Duda and P. E. Hart : "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures", Communications of the AMC, Vol.15, No.1, pp.11-15, (1972)
- 117) C. Kimme, D. Ballard, and J. Sklansky : "Finding circles by an array of accumulators", Communications of the ACM, Vol.18, No.2, pp.120-122, (1975)
- 118) S. Tsuji and A. Nakamura : "Recognition of an object in stack of industrial parts", 4th International Joint Conf. on Artificial Intelligence, pp.811-818, (1975)
- 119) F. M. Wahi and H. P. Biland : "Decomposition of polyhedral scenes in Hough space", Proc. of 8th International Conference on Pattern Recognition, pp.78-84, (1986)
- 120) A. L. Fisher and P. T. Highnam : "Computing the Hough transform on a scan line array processor", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No.3, pp.262-265, (1989)

- 121) K. Hanahara, T. Maruyama, and T. Uchiyama :, "A real-time processor for the Hough transform", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.10, No.1, pp.121-125, (1988)
- 122) F.M. Rhodes, J.J. Daturi, G.H. Chapman, B.E. Emerson, A.M. Soares :, "A monolithic Hough transform processor based on restructurable VLSI", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.10, NO.1, pp.106-110, (1988)
- 123) 大和淳二, 稲葉稔智, 石井郁夫, 牧野秀夫 :, "Hough変換を用いた線分検出の高精度化", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J72-D- II, No.1, pp. 85-92, (1989)
- 124) 輿水大和, 村上和人 :, "直線群検出のためのHough曲線追跡型アルゴリズム", 電子通信学会論文誌, Vol. J-69-D, No. 4, pp. 631-633, (1986)
- 125) 輿水大和 :, "直線パターン検出のためのHough曲線追跡型アルゴリズムについて", 電子通信学会論文誌, Vol. J68-D, No.10, pp.1769-1776, (1985)
- 126) J. Illingworth and J. Kittler :, "The adaptive Hough transform", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No.5, pp. 690-698, (1987)
- 127) 輿水大和, 沼田宗敏 :, "区分的Hough直線による高速Hough変換法PLHTについて", 電子情報通信学会論文誌D- II, Vol. J72-D- II, No. 1, pp. 56-65, (1989)
- 128) 塩野 充 :, "Hough変換の計算における3種類の表参照方式の効率比較実験", 電子情報通信学会論文誌D- II, Vol. J72-D- II, No. 6, pp. 963-966, (1989)
- 129) 木村 茂, 小沢慎治 :, "エッジ追跡型ハフ変換について", 電子情報通信学会論文誌D- II, Vol. J72-D- II, No. 11, pp. 1884-1893, (1989)
- 130) 沼田宗敏, 輿水大和 :, "ソフトウェアによるHough変換の高速実行", 電子情報通信学会論文誌D- II, No. 6, pp. 927-930, Vol. J73-D- II, (1990)
- 131) D. H. Ballard :, "Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes", Pattern Recognition, Vol.13, No.2, pp.111-122, (1981)
- 132) 佐藤 誠, 石瀬裕之, 小川英光 :, "一般化Hough変換の最適性について", 第18回画像工学コンファレンス, pp. 347-350, (1987)
- 133) 村上和人, 輿水大和 :, "Hough変換平面における凸包抽出法について", 電子情報通信学会論文誌, D- II, Vol. J73-D- II, No. 4, pp. 597-605, (1990)
- 134) S. Tsuji and F. Matsumoto :, "Detection of ellipses by a modified Hough transformation", IEEE Transactions on Computers, Vol. c-27, No.8, pp.777-781, 1978
- 135) J. Sklansky :, "On the Hough technique for curve detection", IEEE Trans. on Computers, Vol. C-27, No. 10, pp. 923-926, (1978)
- 136) 富永一成, 森 正寿, 中村 彰, :, "部分楕円を含む図形の検出に関する一考察", 信学技報, IE86-103, pp. 9-14, (1986)

- 137) D. Casasent and R. Krishnapuram:,"Curved object location by Hough transformations and inversions", Pattern Recognition, Vol.20, No.2, pp.181-189, (1987)
- 138) 大和淳二, 入沢和義, 石井郁夫, 牧野秀夫 :,"重み付け中点図形を用いる楕円抽出アルゴリズム", 信学技報, PRU88-95, pp.31-37, (1988)
- 139) 佐藤 博, 袖山 忠 :,"共役直径の傾きを用いた楕円パターンの抽出法", 信学技報, Vol.88, No.489, pp.85-92, (1989)
- 140) 大和淳二, 入沢和義, 石井郁夫, 牧野秀夫 :,"重み付け中点図面を用いた円抽出アルゴリズム", 電子情報通信学会論文誌 D- II, Vol.J72-D- II, NO.7, pp.1009-1016, (1989)
- 141) 恩田邦夫, 渡並 智, 青木由直 :,"Hough変換平面からの円パラメータ決定法", 電子情報通信学会論文誌 D- II, Vol.J72-D- II, No.10, pp.1760-1764, (1989)
- 142) 渡辺孝志, 柴田俊浩 :,"Hough変換と階層化画像を用いた欠損円の検出", 電子情報通信学会論文誌 D- II, Vol.J73-D- II, No.2, pp.159-166, (1990)
- 143) R. T. Chin and C. R. Dyer :,"Model-based recognition in robot vision", Computing Surveys, Vol.18, No.1, pp.67-108, (1986)
- 144) M. O. Shineier, R. Lumia and E. W. Kent :,"Model-based strategies for high-level robot vision", Computer Vision, Graphics, and Image Processing 33, pp.293-306, (1986)
- 145) B. Bhaun :,"CAD-based robot vision", Computer, pp.12-16, (1987)
- 146) P. J. Besl and R. C. Jain :,"Three-dimensional object recognition", Computing Surveys, Vol.17, No.1, pp.75-145, (1985)
- 147) 白井良明 :,"3次元モデルに基づくロボットビジョン", 電子通信学会論文誌, Vol. J68-D, No.4, pp.449-455, (1985)
- 148) R. L. Kashyap and B. J. Oommen :,"A geometrical approach to polygonal dissimilarity", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-4, No.6, pp.649-655, (1982)
- 149) F. Matsuda, T. Iwasaki, S. Hattori and M. Ueda:,"Speed-up of a simple vision system with real time shape Recognition ability", 15th Proceeding of International Symposium on Industrial Robots, pp.367-374, (1985)
- 150) 柏岡誠治, 嶋 好博, 江尻正員 :,"部分パターンマッチングにおける標準パターンの選択方式", 電子通信学会論文誌, Vol. J68-D, No.5, pp.1103-1110, (1985)
- 151) N. Ayache and O. D. Faugeras :,"HYPER: A new approach for the recognition and positioning of two-dimensional objects", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-8, No.1, pp.44-54, (1986)
- 152) L. S. Davis :,"Shape matching using relaxation techniques", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-1, No.1, pp.60-72, (1979)

- 153) R. Horaud, S. Olympieff, J.P. Charras :, "Shape and position recognition of mechanical parts from their outlines", Proceedings of 1st. Robot Vision & Sensory Controls, pp.125-135, (1981)
- 154) 高野英彦 :, "複雑な図形の輪郭形状認識への一提案", 計測自動制御学会論文集, Vol.17, No.3, pp.67-74, (1981)
- 155) S.R. Dubois and F.H. Glanz :, "An autoregressive model approach to two-dimensional shape classification", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-8, No.1, pp.55-66, (1986)
- 156) 高野英彦 :, "族分類値を考慮した平面図形の一識別手法", 計測自動制御学会論文集, Vol.17, No.2, pp.103-108, (1981)
- 157) R.A. Browse :, "Feature-based tactile object recognition", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-9, No.6, pp.779-786, (1987)
- 158) T.W. Sze and Y. H. Yang :, "A simple contour matching algorithm", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-3, No.6, pp.676-679, (1981)
- 159) B. Bhanu and O.D. Faugeras :, "Shape matching of two-dimensional objects", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-6, No.2, pp.137-156, (1984)
- 160) E. Persoon and K.S. Fu :, "Shape discrimination using fourier descriptors", IEEE Trans. on System, Man & Cybernetics, Vol.SMC-7, No.3, pp.170-179, (1977)
- 161) T.P. Wallace, O.R. Mitchell and K. Fukunaga :, "Three-dimensional shape analysis using local shape descriptors", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-3, pp.310-323, (1981)
- 162) F.A. Sadjadi and E.L. Hall :, "Three dimensional moment invariants", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-2, pp.127-136, (1980)
- 163) S.A. Dudani :, "Aircraft identification by moment invariants", IEEE Trans. on Computers, Vol.C-26, pp.39-45, (1977)
- 164) 伊藤豪俊, 平田達也, 石井直宏 :, "フーリエ記述子を用いた部品の形状認識と処理", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J71-D, No.6, pp.1065-1073, (1988)
- 165) T. Caelli and S. Nagendran :, "Fast edge-only matching techniques for robot pattern recognition", Computer Vision Graphics and Image Processing 39, pp.131-143, (1987)
- 166) H. Wechsler and G.L. Zimmerman :, "2-D invariant objects recognition using distributed associative memory", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.10, No.6, pp.811-821, (1988)

- 167) W. E. L. Grimson :, "On the recognition of curved objects", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No.6, pp.632-643, (1989)
- 168) 長尾 真 :, "試行錯誤的形状認識方式とそのハードウェア化", 電子通信学会論文誌, Vol. J68-D, No. 4, (1985)
- 169) R. A. Brooks :, "Model-based three-dimensional interpretations of two-dimensional images", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-5, No. 2, pp. 140-150, (1983)
- 170) H. J. Warnecke and K. Melchior :, "Pattern recognition : An element of automation", 2nd. International Conference on Robot Vision & Sensory Controls, pp.1-8, (1982)
- 171) L. Lieberman :, "Model-driven vision for industrial automation", Advances in Digital Image Processing, Plenum Press, pp.235-246, (1979)
- 172) Y. F. Wang, M. J. Magee and J. K. Aggarwal :, "Matching three-dimensional objects using silhouettes", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6, No. 4, (1984)
- 173) W. H. Tsai and J. C. Lin :, "Curved 3D object recognition using 2D shape analysis techniques", Proceedings of 4th. Robot Vision & Sensory Controls, pp.379-393,
- 174) J. Majumdar, P. Levi and U. Rembold :, "3-D model based robot vision by matching scene description with the object model from a CAD modeller", 3rd. International Conference on Advanced Robotics '87, pp.187-197, (1987)
- 175) W. K. Gu, J. Y. Yang and T. S. Huang :, "Matching perspective views of a polyhedron using circuits", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 3, pp.390-400, (1987)
- 176) I. Walter and H. Tropsch :, "3-D recognition of randomly oriented parts", 3rd. International Conference on Robot Vision & Sensory Controls, pp.193-200, (1983)
- 177) M. Herman :, "Matching three-dimensional symbolic descriptions obtained from multiple views of a scene", Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.585-590, (1985)
- 178) A. K. C. Wong, S. W. Lu and M. Rioux :, "Recognition and shape synthesis of 3-D objects based on attributed hypergraphs", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No. 3, pp.279-290, (1989)
- 179) R. Horaud :, "New methods for matching 3-D objects with single perspective views", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 3, pp. 401-412, (1987)

- 180) F. P. Kuhl, O. R. Mitchell, M. E. Glenn and D. J. Charpentier :, "Global shape recognition of 3-d objects using a differential library storage", Computer Vision Graphics and Image Processing 27, pp.97-114, (1984)
- 181) K. Ikeuchi :, "Precompiling a geometrical model into an interpretation tree for object recognition in bin-picking tasks", Proceedings of Workshop on Image Understanding, pp.321-339, (1987)
- 182) 池内克史, 越川和忠 :, "幾何モデルより導出された解釈木によるビンピッキングタスク中の対象物体の位置姿勢決定", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J70-D, No. 1, pp. 127-138, (1987)
- 183) 久野義徳, 岡本恭一, 沼上英雄 :, "3次元モデルからの物体認識用特徴探索手順の自動生成", 日本ロボット学会誌, Vol. 6, No. 4, pp. 3-13, (1988)
- 184) 福永邦雄, 西村 崇, 川上弘起, 泉 正夫 :, "アスペクトビジョンに基づく物体認識の方法", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J74-D-II, No. 4, pp. 580-584, (1991)
- 185) M. Oshima and Y. Shirai :, "Object recognition using three-Dimensional Information", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-5, No. 4, pp. 353-361, (1983)
- 186) B. Bhanu :, "Representation and shape matching of 3-D objects", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6, No. 3, pp. 340-351, (1984)
- 187) P. Brou :, "Using the gaussian image to find the orientation of objects", The International Journal of Robotics Research, Vol. 3, No. 4, (1984)
- 188) W. E. L. Grimson and T. Lozano-Perez :, "Model-based recognition and localization from sparse range or tactile data", The International Journal of Robotics Research, Vol. 3, No. 3, pp. 3-35, (1984)
- 189) M. J. Magee, B. A. Boyter, C. -H. Chien and J. K. Aggarwal :, "Experiments in intensity guided range sensing recognition of three-dimensional objects", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-7, No. 6, pp. 629-637, (1985)
- 190) M. Dhome and T. Kasvand :, "Polyhedra recognition by hypothesis accumulation", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 3, pp. 429-438, (1987)
- 191) A. K. Jain and R. Hoffman :, "Evidence-based recognition of 3-D objects", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 10, No. 6, pp. 783-802, (1988)
- 192) T. -J. Fan, G. Medioni and R. Nevatia :, "Recognizing 3-D objects using surface descriptions", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 11, pp. 1140-1157, (1989)

- 193) R. Krishnapuram and D. Casasent :, "Determination of three-dimensional object location and orientation from range images", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No.11, pp.1158-1167, (1989)
- 194) C. Hansen and T. C. Henderson :, "CAGD-based computer vision", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine, Vol.11, No.11, pp.1181-1193, (1989)
- 195) W.-Y. Kim and A. C. Kak :, "3-D object recognition using bipartite matching embedded in discrete relaxation", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13, No. 3, pp.224-251, (1991)
- 196) A. Roy and L. Sutro :, "Simulation of two forms of eye motion and its possible implication for the automatic recognition of three-dimensional objects", IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics, Vol.SMC-12, No.3, pp.276-288, (1982)
- 197) G. Fekete and L. S. Davis :, "Property spheres : A new representation for 3-D object recognition", Proceedings IEEE Workshop Computer Vision : Representation and Control, pp.192-201, (1984)
- 198) M. Hebert and T. Kanada :, "The 3D-profile method for object recognition", Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.458-463, (1985)
- 199) J. J. Koenderink and A. J. van Doorn :, "The internal representation of solid shape with respct to vision", Biological Cybernetics, Vol.32, pp.211-216, (1979)
- 200) I. Chakravarty and H. Freeman :, "Characteristic views as a basis for three-dimensional object recognition", Robot Vision, Vol.336, pp.37-45, (1982)
- 201) J. Stewman and K. Bowyer :, "Creating the perspective projection aspect graph of polyhedral objects", Proceedings of International Conference on Computer Vision, pp.494-500, (1988)
- 202) J. H. Stewman and K. W. Bowyer :, "Aspect graphs for convex planar-face objects", Proceed. of IEEE Computer Society Workshop on Computer Vision, pp.123-130, (1987)
- 203) J. Callahan and R. Weiss :, "A model for describing surface shape", Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.240-245, (1985)
- 204) Z. Gigus and J. Malik :, "Computing the aspect graph for line drawings of polyhedral objects", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.12, No. 2, pp.113-122, (1990)
- 205) Z. Gigus and J. Malik :, "Computing the aspect graph for line drawings of polyhedral objects", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1560-1566, (1988)

- 206) Z.Gigus, J.Canny and R.Seidel :,"Efficiently computing and representing aspect graphs of polyhedral", Proceedings of International Conference on Computer Vision, pp.30-39, (1988)
- 207) J.H.Rieger :,"On the classification of views of piecewise smooth objects", Image and Vision Computing, Vol.5, No.2, pp.91-97, (1987)
- 208) J.J.Koenderink and A.J.van Doorn :,"The singularities of the visual mapping", Biological Cybernetics, Vol.24, pp.51-59, (1976)
- 209) 田村秀行 :,"細線化法についての諸考察", 信学技法, PRL75-66 , PP.49-56, (1975)

発表論文

I. 本論文に関連した発表論文

1. 藤本公三, 黒木英一, 松永知也, 中岡 久, 仲田周次: , " レーザスリット光走査による電子格子モアレ縞画像の形成と簡易凹凸判定" , 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.2, pp.154-165 (1989)
2. 藤本公三, 木村 悟, 日野俊樹, 仲田周次: , " 輝度レベルの分散値に基づく縁辺検出" , 日本ロボット学会誌 Vol.7, No.5, pp.453-463 (1989)
3. Kozo FUJIMOTO, Shuji NAKATA :, " Model based vision system for operating the assembly robot " , Proceedings of 2nd. International Conference on Robotics, p.229-244, (1989)
4. 藤本公三, 岩田剛治, 仲田周次: , " $\theta - \rho$ Hough変換平面からの2次曲線のパラメータ抽出" , 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-DII No.9 pp.1184-1191 (1991)
5. 藤本公三, 木本正人, 仲田周次: , " 視線ベクトル領域図による多面体対象物体の代表的投影形状の自動抽出" , 電子情報通信学会論文誌, Vol.J75-D- II, No.2, pp.351-360, (1992)
6. Kozo FUJIMOTO, Eiichi KUROKI, Tomoya MATSUNAGA, Hisashi NAKAOKA, Shuji NAKATA: , " A slit laser scanning moire method and a simple method for distinguishing between depression and elevation " Advanced Robotics, Vol.6, No.2 (1992)
掲載予定

II. それ以外の発表論文

1. 仲田周次, 西川雅弘, 藤本公三, 玉井尚治: , " 高電流密度短時間通電方式スポット溶接の研究(第1報) -高電流密度・短時間通電方式スポット溶接法とその特徴・特質-" 溶接学会論文集 Vol.2, No.1, pp.137-142 (1984)
2. 仲田周次, 藤本公三, 玉井尚治: , " 高電流密度短時間通電方式スポット溶接の研究(第2報) -接合部形成現象の検討および接合条件の選定-" , 溶接学会論文集 Vol.4, No.3, pp.581-586 (1986)
3. Shuji NAKATA, Kozo FUJIMOTO, Shoji TAMAI: , " Selection of Welding Parameters and Suppression of Indentation in Resistance Spot Welding Process with High-Current Density and Short Current Duration " , I I W Doc.III-841, p.1-17 (1986)
4. Shuji NAKATA, Kozo FUJIMOTO, Shoji TAMAI: , " Investigation on Welding Process and Welding Parameters in Resistance Spot Welding Process with High-Current Density

- and Short Current Duration ", Trans. Japan Welding Society, Vol.17, No.2, pp. 152-157. (1986)
- 5 . 仲田周次, 藤本公三, 玉井尚治 ; , " 高電流密度短時間通電方式スポット溶接の研究 (第3報) - 圧痕の形成要因およびその抑制方法 - " , 溶接学会論文集 Vol.5, No.1, pp. 64-69 (1987)
 - 6 . Kozo FUJIMOTO, Toshiki MANABE, Yuichi MASUTANI, Shuji NAKATA ; , " Bondability of Cu Wire Stitch Bonding ", Proceedings oh the 5th. International Symposium of the Japan Welding Society, No.2, p.333-338 (1990)

