

Title	距離画像の計測と認識に関する研究
Author(s)	佐藤, 宏介
Citation	大阪大学, 1988, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/383
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

距離画像の計測と認識に関する研究

佐藤 宏介

1988年4月

目次

第1章 総論	1
1-1 距離画像とは	1
1-2 距離画像の計測	3
1-3 距離画像の特徴と濃淡画像との違い	4
1-4 距離画像の認識	5
1-5 本研究の意義と論文の構成	8
第2章 距離画像の高速計測	10
2-1 光投影三次元計測	10
2-1-1 光飛行時間測定法	11
2-1-2 ステレオ画像法	13
2-1-3 単・複スポット光投影計測法	13
2-1-4 単・複スリット光投影計測法	14
2-1-5 濃度変調光・カラー変調光投影法	15
2-1-6 符号化パターン光投影法	15
2-1-7 時系列空間符号化光投影法	15
2-1-8 モアレ計測法	16
2-1-9 光干渉縞法	16
2-2 グレイコードパターンによる時系列空間符号化	16
2-2-1 三次元位置の算出	17
2-2-2 測定空間の分割と空間符号	19
2-2-3 グレイコードの特性	19
2-3 計測処理の基本手順	20
2-4 投影パターンの二値化	21
2-4-1 相補パターン投影	21
2-4-2 二値化手法の比較実験と検討	23
2-5 計測例	24
2-6 計測法のまとめと今後の課題	26
第3章 距離画像の高精度計測	28
3-1 計測精度決定の要因	29
3-2 半ピッチずらしによる倍精度パターン化	29
3-3 空間符号の内挿	31

3-4	パターン境界の内挿	32
3-4-1	標本化誤差	32
3-4-2	濃淡情報によるパターン境界位置の推定	32
3-4-3	位置推定の評価	34
3-5	各高精度化手法の総合評価	34
3-6	高精度化のまとめ	35
第4章	距離画像計測システム	37
4-1	システムの構成	38
4-2	画像プロセッサによる高速処理の実現	41
4-2-1	画像プロセッサの高速画像処理機能	42
4-2-2	空間符号化処理	43
4-2-3	パターン境界内挿処理の付加	43
4-3	液晶光学シャッタによるパターン光投影	45
4-3-1	パターン光プロジェクタに求められる条件と液晶光学シャッタ	46
4-3-2	液晶光学シャッタの仕様	46
4-3-3	液晶光学シャッタの半ピッチずらし	49
4-4	システムパラメータのキャリブレーション	49
4-5	計測時間	50
4-5-1	計測時間を決定する要因	50
4-5-2	システムの計測時間	51
4-5-3	高速化へのシステムアーキテクチャ	51
4-6	計測システムのまとめと今後の課題	52
第5章	距離画像に基づく局面物体の記述	54
5-1	光投影法によるシーン記述とモデル表現	56
5-1-1	光投影三次元計測に基づくシーンの記述	56
5-1-2	三次元物体のモデル表現	58
5-2	エッジの認識	59
5-2-1	エッジの種類	59
5-2-2	エッジの検出	61
5-2-3	エッジの記述	62
5-3	局所形状の認識	63
5-3-1	法線ベクトル	64
5-3-2	ガウス曲率・平均曲率による認識	64
5-4	分割・膨張によるセグメンテーション	65

5-4-1	領域成長による分割	65
5-4-2	領域膨張による併合	66
5-5	二次曲面の特性に基づく分割面の特徴抽出	67
5-5-1	二次曲面の分類	67
5-5-2	二次曲面の中心と主軸	69
5-6	分割面の存在領域	70
5-6-1	平面の存在領域	70
5-6-2	二次曲面の存在領域	70
5-6-3	分割面の記述	70
5-7	実験例	71
5-7-1	エッジ	72
5-7-2	法線ベクトル分布	72
5-7-3	ガウス曲率・平均曲率	72
5-7-4	局所形状の分類	72
5-7-5	領域成長	72
5-7-6	分類、中心、主軸	73
5-7-7	存在領域	73
5-7-8	ネットワーク記述	73
5-7-9	対象シーンの再構成	73
5-8	曲面物体の記述のまとめと今後の課題	77
第6章	シーンの認識	79
6-1	シーンの階層構造	80
6-1-1	物体と面の階層構造	80
6-1-2	シーン多重モデル	82
6-2	知識処理による解釈	83
6-2-1	プロダクションルールによる解釈	84
6-2-2	プロダクションシステム処理系	85
6-3	認識ルール	86
6-3-1	画像処理ルール	86
6-3-2	物体木構築ルール	87
6-3-3	形状属性導出ルール	87
6-3-4	意味属性導出ルール	88
6-3-5	リンク導出ルール	89
6-4	ワーキングメモリエlement	89
6-4-1	面のElement表現	90

6-4-2 エッジのエレメント表現	90
6-5 実験例	90
6-6 シーン認識のまとめと今後の課題	93
第7章 結論	95
謝辞	97
参考文献	98
付録A 同次座標系表現による光投影法のシステムパラメータ	104
付録B 法線ベクトル	109
付録C ガウス曲率・平均曲率	111
付録D 二次曲面の性質	113
付録E 距離画像データベースPRIMULA	118
付録F OPS 83ルールの実際	120

距離画像の計測と認識に関する研究

佐藤 宏介

第1章 総論

1-1 距離画像とは

人間の両眼は、進化の過程で獲得した各種の視覚機能を融合する優れたハイブリットカメラシステムである。網膜にはマルチチャネルのガウシアンバンドパスフィルタから、ノイズ除去やエッジ検出などを行う機能があり [Marr 82]、虹彩には入力ダイナミックレンジを広げるためのオートアイリス機能がある。コンピュータ科学の側面から、これらの生体機能は、すべてデジタル画像処理の研究対象とされ、濃淡画像処理、カラー画像処理の一つの大分野を築いている [Rosenfeld 82] [Ballard 82] [Sato 86b]。水晶体は、それを支える筋肉の収縮から奥行き知覚を誘起し、両眼はステレオ視差により奥行きを認知している。前者は、レンズの焦点ボケによる距離計測法 [Kanamori 86] を導き、スチールカメラの自動焦点調節 [Sakano 83] に広く利用されている。後者は、ステレオ画像のマッチングに基づく距離計測法 [Yokoya 77] [Ohta 87] を生み出し、今なお対応点決定問題がコンピュータビジョンの重要課題になっている [Ito 87]。

また、エンジニアリングの側面から、大量生産を指向した工場のオートメーション化の要求があり、最も機械化が遅れていた生産工程である、目視による計測や検査 [IEBJ 84a]、ワークの位置決めなどを自動化するために、専用ハードウェア化を指向した二値画像処理 [Takano 84] の分野が発生した。専用処理装置の開発 [Kidode 80] [Sato 83, 86a] や製品化が進み、産業経済的に大きな成果を達成することとなった。産業構造が多品種小量生産に遷りかわり、組立ロボットの導入によるインテリジェントFA [Tokumaru 87] の実現が期待されている。さらに、宇宙や原子炉など極限作業のための無人走行車 [Kanade 87] や移動ロボット [Tazumi 85] に対するニーズも新たに生じてきた。このような目的には、環境を認識する視覚センサ [Pugh 83] [Yachida 84] が必須であり、なおかつ、そのセンサには何よりも高い信頼性を有することが必要条件となっている。このため、奥行きを直接計測する機能をロボットの視覚に与え、あいまいさのない三次元シーンの認識を行おうとする研究動向が誕生した [Shirai 76] [Sugihara 84] [Yamamoto 87] [Sato 84b]。ここにおいて、この奥行き情報を計測し二次元画像情報化したものを**距離画像**と呼び、コンピュータビジョンに新しい研究分野が

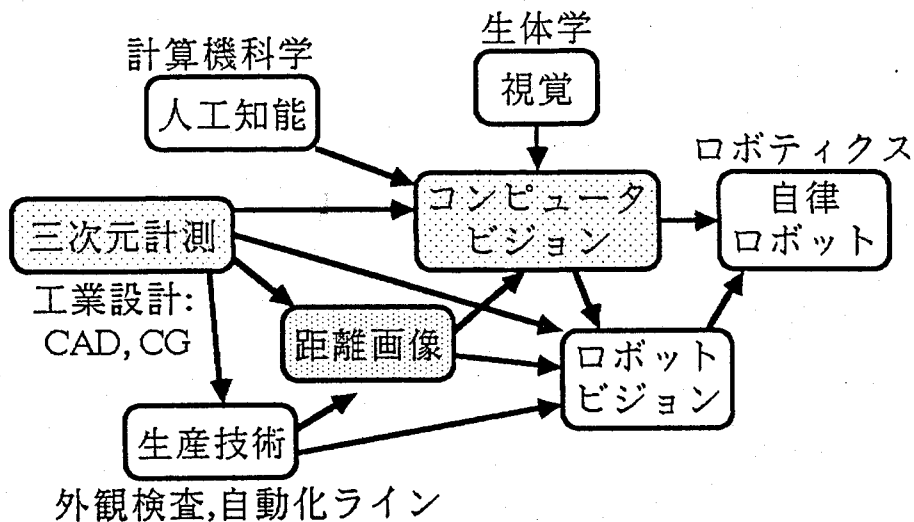


図1-1 距離画像とその関連分野

発生することになった[Shirai 87] (図1-1)。

図1-2に示すように、濃淡画像では、視点から観測したときの対象表面の色や明るさに関する情報が画素ごとに蓄えられているのに対して、距離画像は、視点と対象表面までの距離に関する情報を画素が蓄えている。このとき、カメラの位置や視線方向が既知であれば、距離情報は三次元座標に変換が可能である。そのため、距離画像は、名が表しているように画像と考えるよりは、三次元位置の二次元分布と考えた方がより適切である。したがって、距離画像に含まれる情報は、シーンの三次元構造を直接反映したものであり、あいまいさを含んでいない。

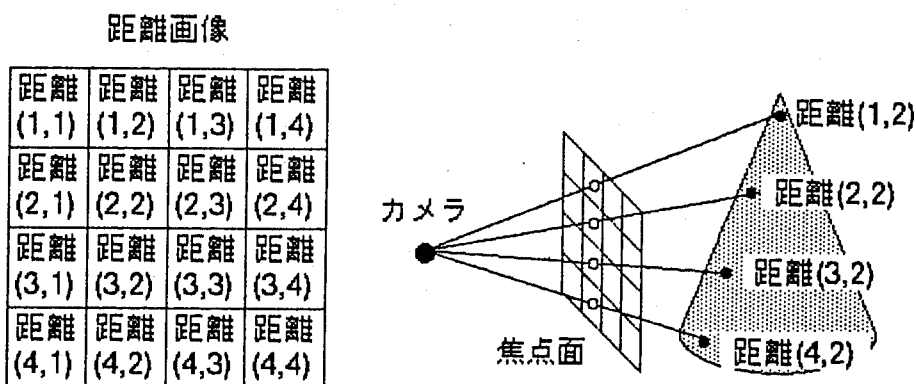


図1-2 距離画像の定義

1-2 距離画像の計測

濃淡画像を計測する場合、光の信号を電気的な信号に変換する物理効果は、光導電効果、光起電力効果、焦電効果など多様に存在している [IEEJ 84b]。これに対して、対象の奥行きを直接電気信号に変換する物性を持ったデバイスはない。さらに、銀塩写真 [Uemura 79] のように、情報を保存し中継できるデバイスもなく、必ず対象の前に測定装置を配置することによって計測しなければならない [Sato 84a]。

人間の視覚に学び、その機能をそのまま機械に置き換えるという立場からは、ステレオ画像による視差の計測が最も自然なアプローチとなる。しかし、現時点では計測の信頼性の面から十分ではなく、人間とは異なった何等かの工学的な距離計測手段を有効に活用する必要がある。計測工学の分野では、光の飛行時間を測定する方法 [Kuroiwa 74] が土木や測量の分野で発達し、モアレ縞を利用した測定 [Takasaki 70] が人体計測の分野で発展を遂げている。図 1-3 [Inokuchi 87] に距離画像計測が必要とされる分野を表している。組立ロボットや屋内移動ロボットのための視覚センサを主たる応用と考えた場合、数mmから数十mの計測範囲を1mm程度の誤差で計測することが要求される。距離の測定を画像全体にわたって同時に計測することができなくても、一方向に関して距離計測する装置を、二次元的に空間を走査させることで距離画像計測を行うことも可能である。しかしながら、このような範囲の距離計測には、従来より直接ゲージを当てて測定する接触型の計測装置

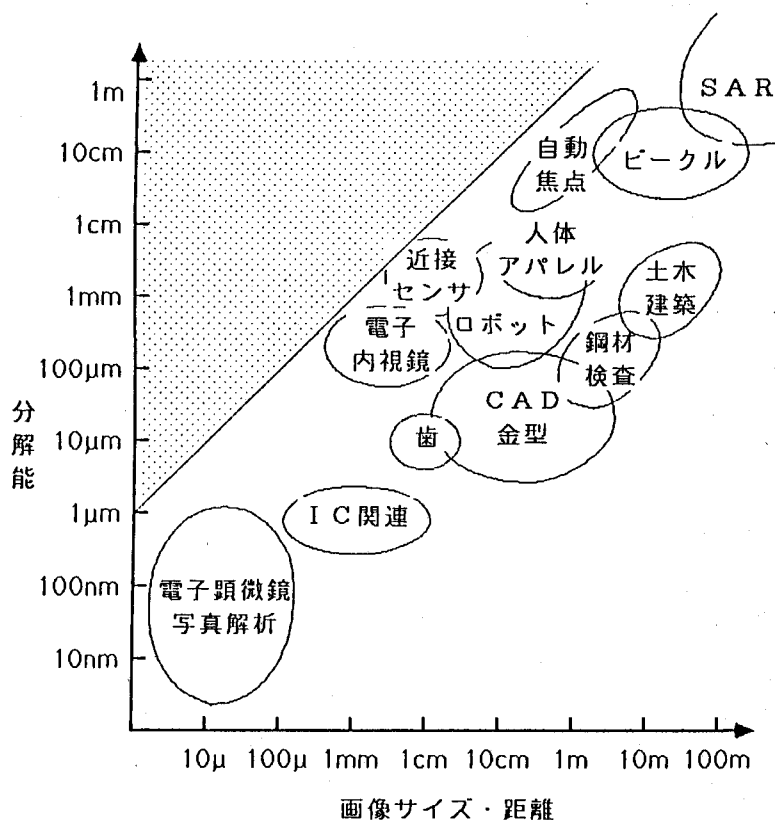


図 1-3 距離画像計測の応用分野 [Inokuchi 87]

[Shimizu 87]が多く利用されているように、コンピュータビジョンに適切な計測法を他の物理計測分野から見出すことは難しい。

距離画像の計測を、コンピュータビジョンにおける視覚情報の入力の一つと見る以外にも、計測そのものは、

- (1) NCマシンやCAD、CGへの形状データの入力[Sato 87]
- (2) 検査のための寸法、外形の非接触測定
- (3) マニピュレーションのための近接センサ

として幅広く応用があり、実用的な距離画像計測システム[Sato 85]を実現するだけでも工業的に大きな意義がある。

1-3 距離画像の特徴と濃淡画像との違い

コンピュータビジョンを想定した距離画像計測は、ロボットビジョンとして応用されることが主目的であり、リアルタイムの計測が望まれている。当然、空間分解能が高く、距離精度もよいものが望まれる。以下に、距離画像の計測方法に対する評価基準[Yamamoto 87]を、濃淡画像の計測と比較して表す。

(1) 空間分解能

これは、濃淡画像の空間分解能に相当するものであり、画像の微細構造を検出するためには、高ければ高いほどよい。

(2) 計測時間

一枚の画像を得るための所用時間は、濃淡画像の一フレーム時間に相当するが、これも短ければ短いほどよい。

(3) 距離分解能

これは、濃淡画像の濃度分解能に相当するが、これも対象の細かな形状変化を検出するためには、高ければ高いほどよい。

(4) ハードウェア

信頼性の高い計測を行うため、機械機構がなく単純なものがよい。

(5) 対象への能動性、受動性

これは、濃淡画像における照明条件に相当するが、特殊な照明装置などによって、対象に働きかけをしないものが望ましい。

(6) 画像処理、三次元位置計算の処理コスト

これは、濃淡画像における濃淡補正、色補正に相当するが、処理アルゴリズムの計算コストは低く、ハードウェア化しやすいものがよい。

(7) 通常照明下での計測性

暗室でなければ計測できないのではなく、通常の照明の下で安定に計測できることが望ましい。

(8) 物体表面のテクスチャに対する計測の安定性

白色無模様の物体に計測対象が限定されることなく、様々な表面模様（テクスチャ）を持った対象でも安定に計測できることが望ましい。

(9) 不可視領域の有無

画像中に距離情報が計測できない領域が無い方がよい。

(10) 距離情報の稠密性

すべての画素が、距離情報を有している方がよい。

(11) 距離情報の連続性

物体表面の連続性が距離画像から確認できることが望ましい。

(12) 距離画像と濃淡画像の同時・同アングル取得

まったく同じ撮像方向から、距離画像と濃淡画像が同時に入力できることが望ましい。

(1) から (6) は、距離画像計測、濃淡画像計測ともに共通しているものであるが、(7) 以降は距離画像計測に特有な評価基準である。

1-4 距離画像の認識

距離画像を介した三次元シーンの認識とは、一体どのような形態を取るのか、図 1-4 にその直感的な概念を思考実験の形で表してみる。観測者は、ある一面の壁にピンホールが空いている暗黒な密室に閉じ込められていると仮定する。濃淡画像を介した認識を表した (a) では、観測者はピ

ンホールの反対側の壁に映った二次元の像から、明るさや色を手がかりに外界の三次元構造を推測する。それに対して距離画像を介した認識である（b）では、観測者はピンホールに細い棒を通して外界をつつ突くことにより三次元構造を推理する。どちらが三次元空間に置かれた物体を正しく認識できるであろうか。少なくとも（b）の方が、物体間の前後関係を誤ることなく判定できるであろう。

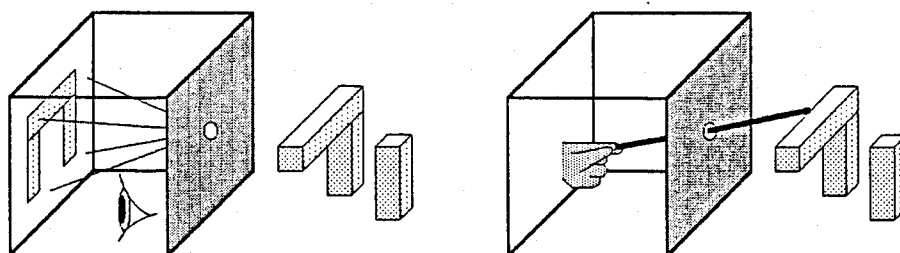


図1-4 距離情報による三次元世界の認識
(a) 濃淡画像の場合、(b) 距離画像の場合

(b)の観測者は、外界をくまなく棒で突き回ることにより、外界の形状の複製を仮想的に作る事ができる。この複製が距離画像に相当する。この段階での距離画像に対する処理は、視覚というよりも手の触覚に相当していると考えられ、この考えを図1-5に明らかにする。距離画像におけるエッジ抽出、例えば多面体の稜線は、指先に受ける「とがり感」から尾根に沿ってなぞって行けば発見できる。同様に、面の発見は掌を当てることで判別できる。これは、突然未知の暗い部屋の中に放り込まれた人間が、手探りで部屋の様子を推測することに等しいことと思われる。

床と壁は、水平と鉛直の感覚から簡単に認識できる。ここで、彼がまったく知らない花瓶に手を触れたとする。掌を指し当てることで、膨らんでいる部分、くびれている部分が分かり、一つの曲面物体が床の上に置かれていることを知る。彼は最終的に、部屋の中に幾つ物体が置かれ、その位置関係、形状を説明できるであろう。これが、本論文で用いるところの「距離画像によるシーンの認識」であり、以上の過程を計算機で実行させることが、距離画像を三次元シーンの入力形態とするコンピュータビジョンと考える。

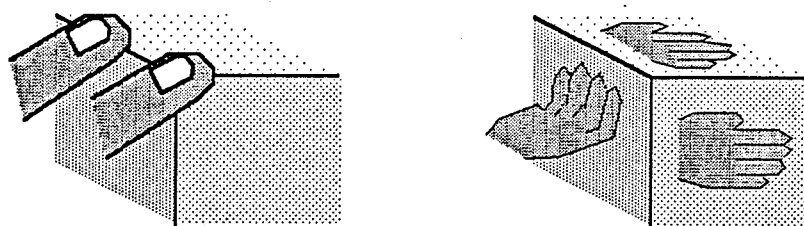


図1-5 距離画像における物体の特徴抽出
(a) エッジの抽出、(b) 面の抽出

彼が自分の部屋に置かれた場合はどうであろうか。彼の頭には部屋の中に置いてある物を知っている。つまり、シーン中にある物体が既知であり、物体の三次元モデルが判明している。彼はすみずみまで調べることなく、全体の様子を知ることができ、これが、モデル駆動によるシーンの認識に相当する。しかし、本論文ではこの立場を取らず、すべて未知の物体からなるシーンを対象とする。

距離画像によるシーンの認識は、以下の処理過程を必ず踏まえている。

- (A) 対象シーンの距離画像の取得
- (B) 距離画像のセグメンテーション
- (C) 分割された各領域の特徴抽出
- (D) 対象シーンの記述の作成
- (E) 記述の解釈

この一連の処理過程を図1-6に示す。ブロックはデータの形式を示し、矢印は処理を示している。上向き矢印は入力情報の処理の流れを表し、下向き矢印はモデル情報の流れを表している。

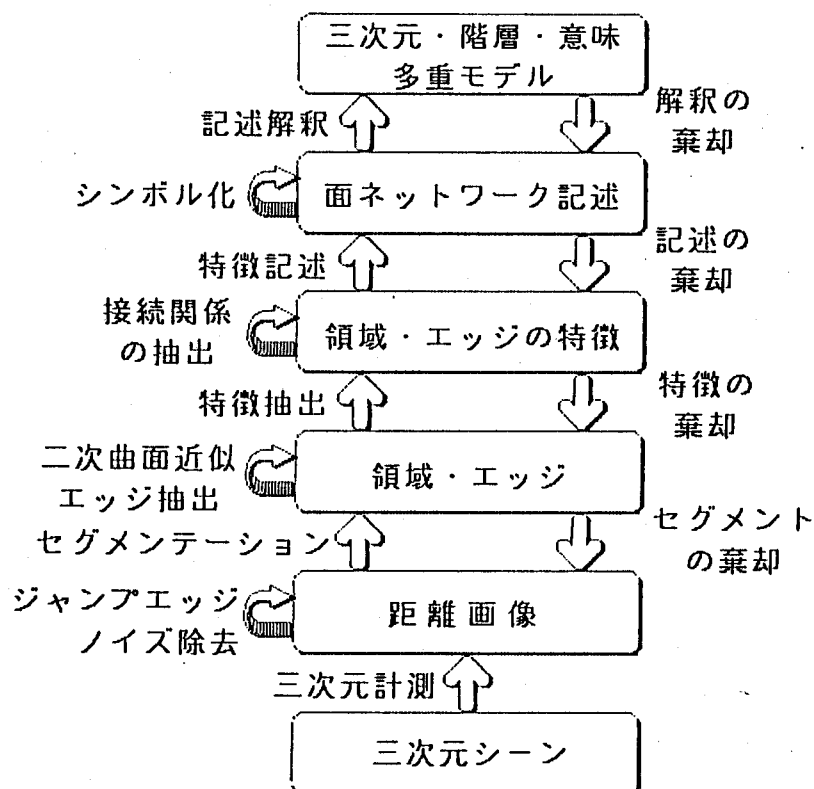


図1-6 距離画像によるシーン認識の処理の流れ

入力画像から出発し下から上に処理を進め、情報のレベルを抽象化、統合化していく。このとき、実際に計測された距離画像には、量子化誤差やノイズなど種々の計測誤差が含まれており、(b)のセグメンテーション処理も満足に行えない場合が多い。中間段階においても、あいまいさを持った入力データより、そのままあいまいさを含んだ出力データを導き出す。最終的に処理の結果を蓋然性という判定基準で総括するには、三次元の物理シーンに関する種々の常識や知識の利用が不可欠である。シーンの認識において必要とされる知識を、大別すると次のようになる。

- (ア) 画像の特性や照明といった撮像における拘束条件
- (イ) エッジや領域といった局所的な画像特徴を、大局的な特徴に構造化するための法則
- (ウ) 認識の対象となる物体に関するモデル
- (エ) 重力や安定性といった物理法則
- (オ) 一般か特殊かを判断する常識

これらの知識を人間は内包しているからこそ、単眼でも三次元の物体を認識でき、二次元の写真からでも三次元の姿を類推できる [Kitahashi 87]。しかし、このような深い知識を計算機上に構築することは難しく、知識表現、知識獲得 [Ishizuka 88] など解決されていない問題も山積している。さらに、知識を用いるだけでは人間が「だまし絵」にだまされるように間違った認識をしてしまう可能性も考えられる。

1-5 本研究の意義と論文の構成

これまでの、距離画像処理・認識の研究の大半は、計測なら計測、距離画像が計測されたという前提から記述なら記述、距離画像よりシーンが記述されたという前提から認識なら認識というように、それぞれの研究項目ごとに独立に行われてきた。本研究では、計測から認識まで一貫した処理を示すことにより、距離画像の有効性を実証し、コンピュータビジョン研究の一層の発展に寄与するとともに、環境を理解するロボットのための有効な視覚サンサを実現することを目指すものである。

実用に供することのできる距離画像計測法としてスリット光投影法がその立場を占めている。しかし、スリット光を走査する精密な機械機構が必要であり、メカニクスに堪能な画像処理研究者以外には、計測システムの製作が難しい。本研究では、誰にでも簡単に製作でき暗室の必要や対象物体の限定などのない距離画像計測システムが、本来のあるべき姿と考え、新たな計測原理と計測システムを開発するものである。また、計測装置単体でもCADの入力 [Fujita 87] や形状検査に応用できる高い実用性を目指す。

三次元シーンの認識は、コンピュータビジョンの最終目標であり、シーンの記述法とヒューリスティクスを利用した認識法に関して一例を提出し、距離画像に基づくアプローチをビジョン研究の

中で位置づけするものである。

本論文は7章からなり、主題は第2章から第6章に記す。前半第2～4章では、距離画像の計測の観点から、計測法、高精度化法、計測システムについて研究の成果を述べる。それを踏まえて、後半第5～6章では距離画像の認識の観点から、主に曲面物体からなる三次元シーンの記述と認識のアルゴリズムについて述べる。

第2章では、ロボットビジョンの応用目的に最も適合している距離画像の計測法として、数mmから数mの計測範囲に適し非接触かつ信頼性の高い手法である「構造が制御された光」を対象に投影する計測法を対象とする。唯一実用されているスリット光投影法で最も問題とされる計測時間について、その原理から高速化の限界を検討する。そして、その解決法として、投影光の構造を工夫することにより計測時間を大幅に改善する新しい計測法を提案する。照明光や表面の模様などの影響についても、計測の安定性の観点から重視する。

第3章では、第2章で考案したパターン光投影の計測法について、その高精度化の手法を述べる。微細加工のマスクパターンの製作限界に対して、簡単なハードウェア機構による倍精度化と、デジタル画像の量子化限界に対してソフトウェアによる内挿手法と、ハード・ソフト両面から高精度計測について考究する。

第4章では、この計測原理に基づく計測システムを実際に構築するにあたり、計測時間を決定する要因について考究し、液晶光学シャッタによるパターン光の投影と高速画像プロセッサによる画像計測から実現した、実用的な高速距離画像計測システムの開発について述べる。

第5章では、濃淡画像に基づく処理では認識が非常に困難な対象である、二次曲面の滑らかな接合で構成されている曲面物体を取り上げ、シーンの記述に関して距離画像の優位性について考究する。局所形状に基づく曲面・平面のセグメンテーション法と、二次曲面とその境界の特徴解析から面をノードとしエッジをアークとする面ネットワークによる記述法について述べる。

第6章では、得られた面ネットワークの解釈に関して、実世界に対するヒューリスティクスをIF-THEN型ルール化する知識表現および、プロダクションシステムによる推論とその計算機上での実現について言及する。複数の曲面物体を含むシーンに対して、特定の面、物体の構成と形状、物体間の位置関係の認識について述べる。

最後に、結論となる第7章では、計測から認識まで一貫した距離画像に関する本研究の成果を大局的な観点から総括し、コンピュータビジョンにおける距離画像のあるべき姿を検討する。

第2章 距離画像の高速計測

対象の色や明暗を二次元な広がりを持った画像情報として、計算機に入力するためには、ITVカメラとAD変換器を内蔵した画像フレームメモリがあればよく、通常、映像信号の一フレーム時間でリアルタイム入力できる[Azetsu 87]。オフラインでよければ、写真を介してイメージスキャナから読み取ることもできる。いずれも、簡単な装置で簡便に入力することができる。これは、光導電効果に基づく撮像管、光起電力効果に基づくシリコンフォトセンサなど、光を電気に変換するセンシングデバイス[IEEJ 84]が活用できるためである。また、銀塩フィルムやイメージングプレートには、色や明暗情報のセンシング機能もあるうえ保存機能も有している。

これに対して、距離画像の入力には、対象との奥行きを電気信号に変換する必要があるが、決定的なセンシングデバイスはない。NCマシンの形状データの入力に用いられているプローブ型三次元ディジタイザ[Nakamura 87]は、直接物差しを当てるといふかたちで計測し、距離画像と等価なデータを得ることもできる。しかし、視覚情報により対象を理解することを最終目標としているコンピュータビジョンでは、このような接触型入力装置を利用することはできない。そのため、非接触に奥行き情報を得るため、さまざまな手法が試みられてきた[Yamamoto 87]。一方、土木建築工学での測地測量や物理計測の分野から、距離・奥行き・高さを測定する技術が発達している。そこで多く用いられているような、一方向に関して距離を計測する装置を、二次元的に空間を走査させることで距離画像計測を行うこともできる。

本章では、まず始めにこれまで開発されてきた距離画像計測の手法を概説する。続いて、新しい高速計測手法を提案する。

2-1 光投影三次元計測

表面の反射特性や形状、模様が異なる種々の物体を対象とし、様々な状況下で信頼性高く三次元計測するためには、単にカメラ入力による受動的な方法よりも、エネルギー（光、音波など）を対象に投射して、その挙動（伝播時間、変位など）を計測するという能動的な方法が有利であり、特に産業応用では一般的な手法となっている。

能動的な方法も、色々な計測原理に基づいたものが研究開発されてきた。以下に、計測原理を分類する[Inokuchi 84]。

A：エネルギー波の伝播時間の測定に基づくもの（レーダ）

〔波動の種類〕

- ・音波（超音波）★
- ・電波★
- ・光波

〔レーザ光の種別〕

- ・パルスレーザ★
- ・変調レーザ（位相差）★

B：三角測量に基づくもの

〔参照光投影の有無〕

（・受動式（ステレオ画像法）▲）

- ・能動式（構造化光投影法）

〔参照光の形態〕

- ・単スポット光★
- ・複スポット光▲
- ・単スリット光▽
- ・複スリット光▲
- ・濃度変調光▲
- ・カラー変調光▲
- ・符号化パターン光▲
- ・時系列空間符号化光▲

C：モアレ縞の測定に基づくもの▲

D：光干渉縞の測定に基づくもの▲

★、▽、▲の各印は、それぞれ、点計測、線計測、面計測を表している。点計測の場合は二次元走査が、線計測の場合は一次元走査が必要となる。この分類に基づき、過去発表されてきた距離画像計測装置の計測原理、特性、データの性質について述べる。

2-1-1 光飛行時間測定法

奥行きに関する情報を直接に計測するためには、上記Aのように空間を一定の速度で伝播する波動の飛行時間（Time of flight）を測定すればよい。このような波動の飛行時間を計測して二点間の距離を計測する方法は、古くより利用されているが、波動を細いビーム状にし空間を走査することにより、対象の各点までの距離を測定し、距離画像を得ることができる。

しかし、音波、電波、光波いずれの波動も、このような目的に必ずしも好ましい性質を持っているとはいえない。音波は、細いビームに絞ることが難しく、十分な空間分解能が得られない最大の欠点がある [Chihara 87]。電波は、三次元レーダとして実用されているが、電波を反射する対象に限られるうえ、長距離の測定に限定される。この両者は、合成開口レーダのようなホログラフィックな方法やチャープ技術で、空間分解能を向上させることも行われているが限界がある。

このような点で光は有利であるが、伝播速度が極めて高速であるために飛行時間を精度よく計測するのに、高度なデバイス技術が必要である。

◆光パルス飛行時間測定法

光パルスを発射して対象物に反射し戻って来るまでの時間から、距離を求める方法は、測地や軍事用測距儀はじめ野外計測の分野で利用されている [Kuroiwa 87]。これを物体形状の計測に利用しようとする、例えば 1 cm の距離分解能を得るには約 0.07 ns の時間分解能が必要で、現在のデバイス技術では実現が非常に困難である。反射光は対象物の反射率や距離によって大きく変化し、測定誤差が生じやすく、スキャナを用いて空間を二次元走査する必要があり長時間の計測時間を必要とする。そのうえ、システムには専用の複雑な光学系やエレクトロニクス装置を必要とする。

米 JPL (ジェット推進研究所) が開発したシステム [Lewis 77] では、受光強度に比例して変化する閾値回路と高速な時間-パルス高変換回路を用いて、多数回の測定の平均化処理から約 2 cm の測距精度を実現している。ただし、128×128画素の距離画像を得るのに約 3 分 (100 点/秒) を要している。Jarvis も 64×64画素の距離画像を 4 秒で入力できるロボットアイを作っている [Jarvis 83]。ヒューズ研究所では、市街地のビルや道路の形を調べることに、この方式を利用している [Lynch 81]。

◆光位相差測定法

正弦波のような一定周期の繰り返し波形では、時間遅れは位相差として観測できる。光パルスの帰還時間といった瞬時の計測より、波形全体を観測して、その位相差を求めるほうが精度の高い計測が期待できる。この考え方から、SRI (米スタンフォード研究所) で試作されたシステム [Nitzan 77] では、AGC フィードバックを受けた光変調器により連続発振 HeNe レーザを高周波で強度変調し対象物に照射する。受光された反射光と照射光との位相差は、ネットワークアナライザを用いて、0.01 度の精度で測定する。9 MHz で変調しており、変調波の 1 波長は約 33 m である。0.01 度の位相差は 1 mm に相当し、多数回の平均化で優れた測距精度を実現している。しかし、このシステムは計測時間を犠牲にしており、128×128画素の距離画像を得るのに約 2 時間を必要とする。

ALV (Autonomous Land Vehicle) 用測距センサとして、BRIM 社が開発した距離画像計測装置は、半導体レーザを 7 MHz でパルス変調し、反射光で PLL (Phase Locked Loop) を駆動し、デジタル位相検出を行っている [Zuk 85]。一波長は約 43 m であり、これを 256 クロックで位相検出するため、分解能は 8 cm となる。高速入力性を持ち、256×64画素の距離画像を 0.5 秒で入力できる。

以上二つの方法で得られる画像は、正方格子をなしているうえ、光源と受光点が同軸上に存在し

ている点で不可視領域がなく、真の意味で距離画像となっている。しかし、過去に発表されたものは、精度や計測時間の面で大きな欠陥を持っていたり、システムが複雑であったりし、広く普及するには問題点が多い。

2-1-2 ステレオ画像法

紀元前より三角測量法は、最も一般的な測距の方法として用いられてきた。対象物を異なる位置から目測し、各々の視線方向が定まれば、三角測量の原理から容易に対象までの距離が計算できる。

ITVカメラなどの視覚センサを二つ左右に並べて両眼立体視（ステレオ視）する方法は、人間の両眼のようにあるがままの世界を観測する受動的計測法の代表である。この方法が、測地測量における写真測量の分野を築いた。しかし、人間のオペレータが簡単に行うのと異なり、二つの入力画像中から対応点を発見することは、計算機にとって非常に困難を含んだ処理である [Sato 85b, 86a]（対応点決定問題）。計算量が膨大であるうえ、明暗が変化する箇所（特徴点）しか対応点が決定できず、テクスチャ（表面模様）がない対象に対してはあいまい不確定になる。この点で、工業計測に対して用いられることは少ない。

受動的方法での対応点決定の困難さを避けるため、一方の視覚センサを光を投影するプロジェクタに置き換えたものが能動的といわれる方法である。対象とする物体が遠方にある場合や、物体表面の反射率が低い場合、鏡面反射の生じる場合には適用できないが、対応点決定にあいまいさがないなど工業用の三次元位置計測センサとしては有効な方法である。

能動的方法は、投影する方向を精密に制御したり、巧妙な光のパターンの参照光を用いる点で、**構造化光投影法** (Structured Light Projection Method) とも呼ばれている。これは、参照光の形態に応じて細かく分類できる。

2-1-3 単・複スポット光投影法

参照光としてレーザスポットを投影する方法は、ビームを細く絞りスポット径を小さくすることができるうえ、スポットが通常照明の下でも十分に明るいため、安定高精度に対応点が求まる。空間の一点に対してしか計測できないので、距離画像の計測を行うためには、スキャナでビームを二次元的に走査する必要があり計測時間を制限している。また、スポット輝点を検出するために、入力画像全体を探索する必要がある。

高速化する方法として、ファイバグレイティングにより多数の二次元ドット状の複スポット光を投影する方法 [Nakazawa 85] も試みられているが、再び対応点決定の問題が生じ、非常に限定された利用しか行えない。

受光素子には色々なものが利用され、ランダムアクセス可能なイメージディセクタで、スポット輝点を対象物体の境界に沿って追跡するもの [Ishii 76] や、リニアイメージセンサを組み合わせた

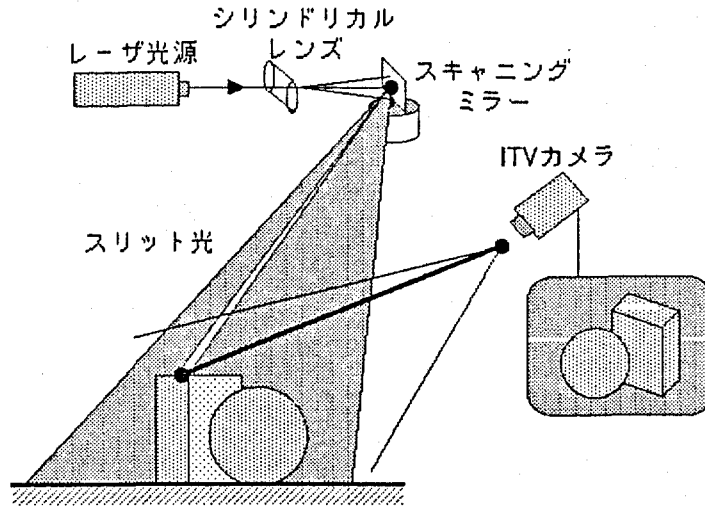


図2-1 スリット光投影による距離画像計測

ものもある[Kiessling 76][Faugeras 83, 84][Nishikawa 81]。二次元PSD (Position Sensitive Device) により、スポット輝点位置を高速に検出しているシステム[Kanade 81]もある。

2-1-4 単・複スリット光投影法

スポット光の代わりに、図2-1のように細いスリット状の光を用いると、スリット光輝線上の三次元位置データの計測が同時に一つの入力画像から行える。ITVカメラを用いれば、一フレーム時間内に一輝線分のデータの処理が可能である。スリット光がなす平面で対象物体を輪切りにしていると見なせるので、光切断法とも呼ばれている[Yamamoto 86a, b]。

能動的な方法として、最も古くなおかつ広く用いられており[Besl 85]、白井らの物体認識の研究が先駆をなしている[Shirai 71]。実用化を目指し、スリット輝線位置を専用ハードウェアで検出するシステム[Ozeki 86]も多く発表されている。

スリット光投影法はスポット光投影法に比べれば大幅に高速化されているが、空間全体に対しては、なおスリット光を一次的に走査する必要があり、リアルタイム計測[Sato 88]は行えない。スポット光と同様に、ストライプ状の複スリット光を投影して高速化を図った方法も試みられているが、再び対応点決定の問題が生じている[Aoki 85]。

スポット光、スリット光投影法とも、輝点、輝線のある箇所しか三次元位置データが得られない。参照光の走査間隔を狭めれば、稠密な距離画像が得られるが、画素値は単に三次元位置データの並びに過ぎず、物体の表面の連続性と関連を示すものではない。

2-1-5 濃度変調光・カラー変調光投影法

スリット光投影法の高速度を図るため、投影する光を一次元的なスリット光から二次元的に広がった光へと拡張し計測の大幅な高速化を図る研究が進められ、濃度変調や、カラー変調をかけたもの、符号情報を特殊な光パターンの局所形状や色に埋め込んだもの、時系列的に順次細分していくような光パターンなどが提案されている。

スリット光の投影角に応じて、照度を連続的に変化させたグレースケール状の光 [Bastuscheck 86] や、色を連続的に変化させた虹状の光 [Tajima 86] を投影するものは、投影光の濃度や色を観測することによって、ただちに投影角を知ることができ高速計測に優れた方法である。一回の参照光の投影のみで、不可視領域を除くすべての画素が三次元データを有する距離画像が計測できるうえ、画像計測処理も単純なルックアップテーブル処理で済む。しかし、画像センサとして濃度分解能が高くS/Nの良いカメラが不可欠である点や、シーン中に複数の物体がある場合、他の物体からの反射光の影響で誤差が大きくなる点、通常照明や物体表面のテクスチャに影響を受けやすい点など多くの欠点があり、応用計測には不向きである。

2-1-6 符号化パターン光投影法

投影角に関する情報を、一枚の光パターン内の局所的な形状変化の組合せや色の組合せで符号情報として埋め込んだものである。符号化には、スポット光の有無で"0"・"1"の二進情報を表し、隣接した数スポットでM系列符号化したもの [Morita 86] や、ストライプパターンの太さ [Yonezawa 78] ・色 [Hall 82] [Boyer 87] で符号化したものがある。

この方法は、連続した物体表面を仮定しなければ復号化できず、輪郭付近や入り組んだ物体を計測することはできない。さらに、符号情報を入力画像の光パターンから抽出する画像処理と復号化処理が煩雑なものになり、計測時間を要する。

2-1-7 時系列空間符号化光計測法

参照光の投影角を、時系列的な複数の光パターンの組み合わせで符号化するものである。一回投影する参照光の光パターンの有無で1 bitの情報を表し、n回の投影で投影角をn bitで表現する。図2-2に概念を表す。

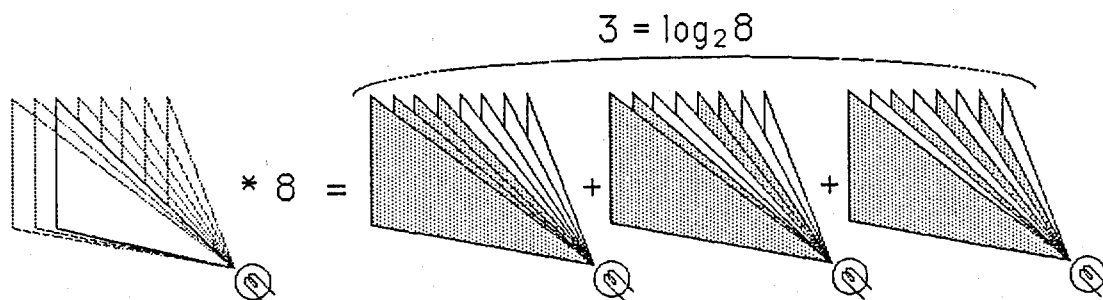


図2-2 スリット光の時系列符号化による高速計測

複スリット光を用いたものは、純二進符号のビット情報がスリット光の有無に対応した参照光を時系列的に投影する [Ueda 81]。プロジェクタにPLZT電気光学シャッタを利用し、複スリット光を電子制御で投影するシステム [Mino 81] もある。複スポット光を用いたものでは、同じくPLZT電気光学シャッタによりスポット光の点滅に変え二進符号化を行っている [Altshuler 81] [Posdamer 82]。

この方法は、単に入力画像を二値化することで復号化できるので、安定に計測が行なえる利点があり、しかも、 n 回のパターン光の投影で、 2^n 回のスリット光を投影したのと等価な情報が得られ、スリット投影法に比べて非常に高速な距離画像入力が行える。しかし計測原理は、複スポット光、複スリット光の中の一つ一つに識別番号を付加しているのみであるから、基本的にスポット光、スリット光投影の欠点をそのまま受け継いでいる。それは、輝点、輝線のある箇所しか三次元位置データを取得することができず、稠密な距離画像や物体の表面の連続性に関連する情報は得られない点である。

2-1-8 モアレ計測法

モアレ縞法は、格子縞光を対象に投影し、格子スリットを通して画像入力することで、対象物の等高線パターンを得る方法である [Takasaki 70] [Suzuki 74] [Idesawa 77]。人体計測の分野で広く用いられている。一回の参照光の投影で計測が完了するため高速計測に向いているが、等高線の相対位置しか得られず、絶対的な三次元位置が得られないところに最大の問題がある。

2-1-9 光干渉縞法

対象物体からの反射光を基準光と干渉させて距離情報を得るものであり、光路差によって生じる干渉縞の計数からずれ量を計測する。ニュートン縞のように、物体表面の変形度は干渉縞のパターンとして現れ、距離画像を得ることができる。しかし、微細な物理計測に限定され、現時点ではコンピュータビジョンの応用目的と容入れることはない。

2-2 グレイコードパターンによる時系列空間符号化

新しく提案するグレイコードパターン光投影による時系列空間符号化法 [Sato 84, 85a] の位置計測の原理を、図2-3に示す。プロジェクタは、図2-4に示すグレイコードに従ったマスクから二値のパターン光を生成し測定空間に投影する。カメラは、その投影光を受けている対象を異なった位置から観測する。

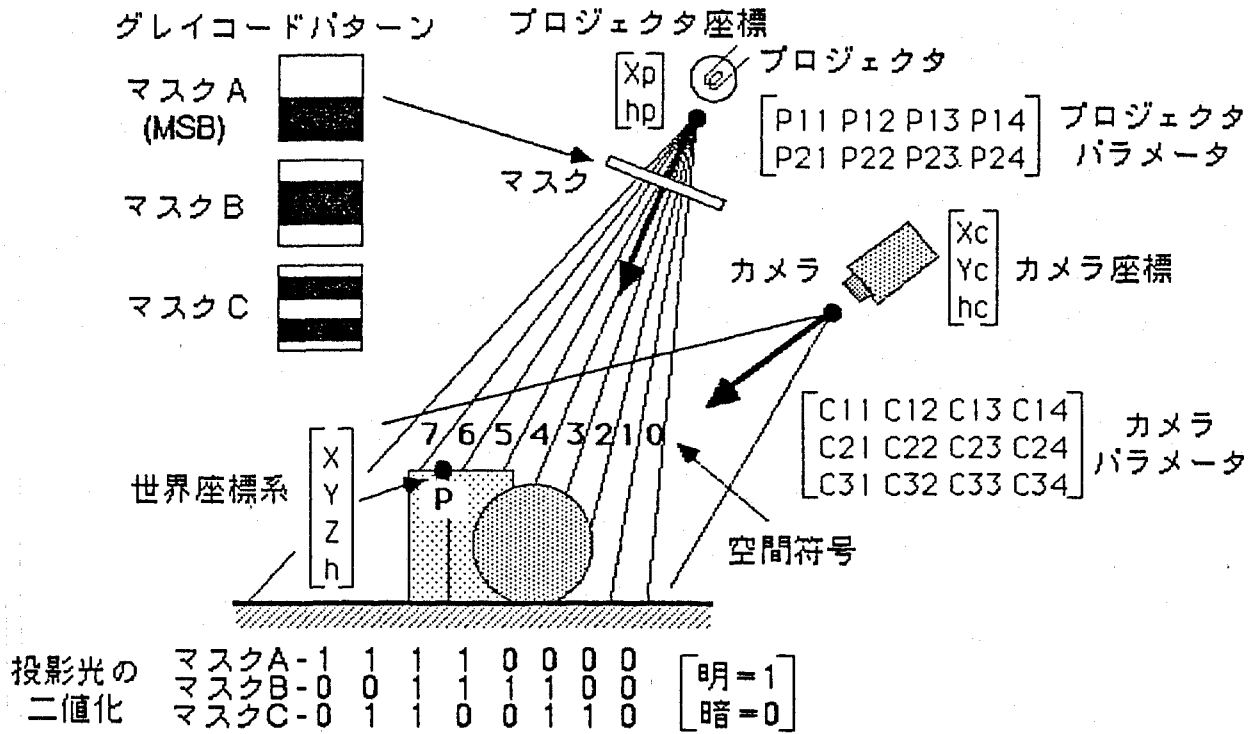


図2-3 グレイコードパターン光投影による時系列空間符号化

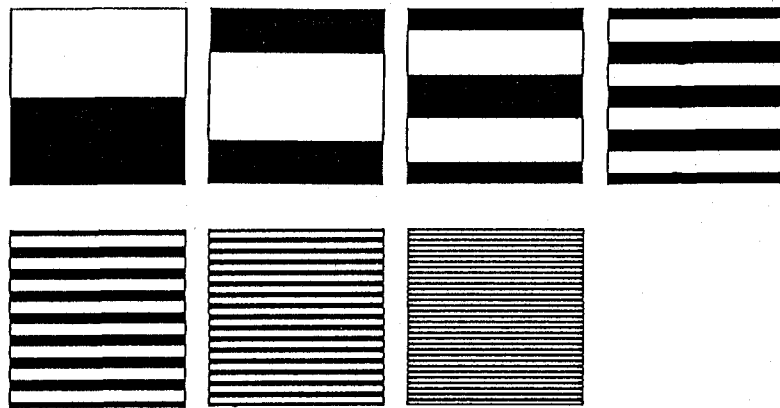


図2-4 グレイコードパターン (7 bit)

2-2-1 三次元位置の算出 (付録A参照)

プロジェクタに固定した座標系 (一次元: プロジェクタ座標系) とカメラに固定した座標系 (二次元: カメラ座標系) は、世界座標系 (三次元) とそれぞれ 3×4 、 2×4 の同次座標系表現 [Ballard 82] による変換行列で、次のように関係づけられている。ここで、(2-1) 式の 3×4 行列をカメラパラメータ、(2-2) 式の 2×4 行列をプロジェクタパラメータと呼び、これらを二つを合わせてシステムパラメータと総称す [Yamamoto 85] 。

$$\begin{bmatrix} H_c X_c \\ H_c Y_c \\ H_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

$$\begin{bmatrix} H_p X_p \\ H_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

(2-1) 式はスリット光がつくる平面を、(2-2) 式はカメラの視線のなす直線を表現している。したがって、計測される世界座標は、この平面と直線の交点として求められる。交点の三次元座標 (X, Y, Z) は、注目画素のカメラ座標 (X_c, Y_c) とその画素におけるプロジェクタ座標 (X_p) の三つのパラメータから、次に示す行列演算から得ることができる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = Q^{-1} \cdot F \quad (2-3)$$

ただし、F、Qは以下の通りである。

$$F = \begin{bmatrix} X_c C_{34} - C_{14} \\ Y_c C_{34} - C_{24} \\ Y_p C_{34} - C_{24} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

$$Q = \begin{bmatrix} C_{11} - C_{31} X_c & C_{12} - C_{32} X_c & C_{13} - C_{33} X_c \\ C_{21} - C_{31} Y_c & C_{22} - C_{32} Y_c & C_{23} - C_{33} Y_c \\ P_{11} - P_{21} X_p & P_{12} - P_{22} Y_p & P_{13} - P_{23} Y_p \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

ここで、(X_c, Y_c) は入力画像における注目点の二次元座標値であり、二次元配列化されたデジタル画像の添字と等価となる。このため、簡単に求めることができる。これに対して (X_p) は、参照光の投影角を表している座標値である。スリット光の投影では、プロジェクタの走査ミラーの回転角などから機械的に同定することができた。しかし、本空間符号化法は、この (X_p) の値を時系列的に投影される二進化パターン光の明暗から求めるところに最大の特徴がある。

2-2-2 測定空間の分割と空間符号

グレイコードパターン光を照明された測定空間は、光パターンが照射されて明るい領域"1"と、そうでない暗い領域"0"の二つにパイ型に分けられ、同時に1 bitの符号情報が付加される。次に、異なる光パターンを投影した場合にも、測定空間はさらに、明るい領域"1"と暗い領域"0"の二つに分けられ、あらたに1 bitの符号情報が追加される。二枚の光パターンを合わせると、測定空間は四つの細いパイ領域に分割でき、それぞれの領域は2 bitの符号情報を持っている。このように、次々とn bitの二進数で符号化されたn枚の光パターンを用いれば、測定空間をスリット状に 2^n に細分可能であり、そして各領域にn bitの符号を割り当てることができる。この符号はプロジェクタの投影角に対応しており、プロジェクタ座標をただちに導くことができる。以下、この符号を「空間符号」と呼び、空間符号を画素値とする画像を「空間符号画像」と呼ぶ。空間符号は、連続した物体に対しては、連続した符号となる特徴がある。

例えば、図2-3のP点はパターンAにより明領域"1"に符号化される。同様にパターンBでは"1"、Cでは"0"になる。計三枚のパターンにより、測定空間は $2^3 = 8$ にパイ分割され、P点に付加された空間符号"110"は、P点がスリット領域5に存在していることを示している。この空間符号の値、5="110"がプロジェクタ座標(X_p)になり、(2-3)式に代入される。P点付近は連続した物体表面であるから、P点近傍の画素に付加される空間符号は、4か5か6になる。

ただし、すべての光パターンで暗領域"0"となる箇所は、他の物体の陰などに入り参照光の到達しない領域であり、不可視領域と呼ばれている。この領域に対しては三次元計測を行うことができない。逆に、空間符号が零か否かを調べることにより、不可視領域であるかを確認することができる。

2-2-3 グレイコードの特性

投影する光パターンにはグレイコード(交番二進符号)パターンを用いる。グレイコードは、物理位置-電気信号変換系の符号化(ロータリーエンコーダなど)に用いられているように、隣接値間のハミング距離が必ず1であり、符号境界での符号化誤りを最小化できる特徴がある。

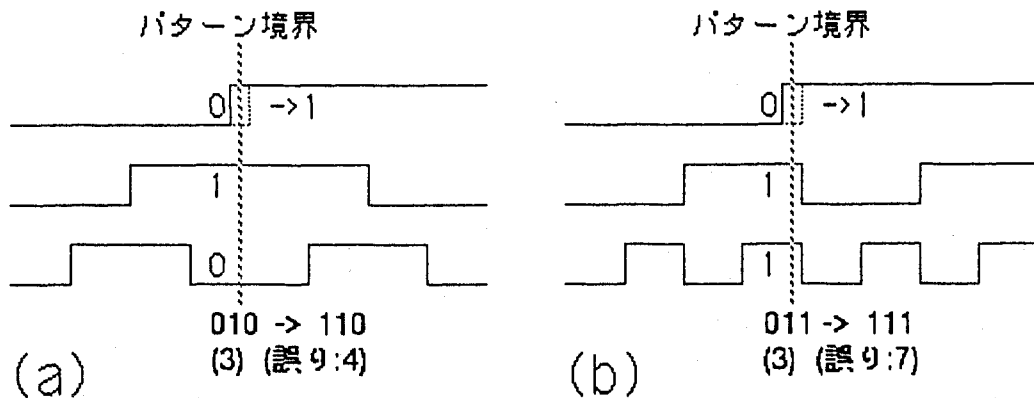


図2-5 パターン境界での符号化誤りの最小化

図2-5に、グレイコードによる符号化誤りに対する能力を示す。なんらかの原因で、MSB符号化パターンがわずかに左にずれた仮定する。破線で示した位置は、(a)の純二進コードでは4から7へと大きく変化するのに対して、(b)のグレイコードでは4から5へと隣値にずれ込むのみである。このようにグレイコードを用いることにより、光パターンの投影の位置ずれや二値化の誤りで生じる符号化誤りを、たかだか±1に抑えることができる。

2-3 計測処理の基本手順

図2-6に、グレイコードパターン光投影法の具体的な計測処理の流れを示す。一枚の光パターンに対して、以下の(1)から(3)までを行う。

- (1) グレイコードパターン光を測定空間に投影する。
- (2) 対象をカメラ入力し、入力画像の明暗から光パターンの有無に二値化する。(これには、次節で述べる相補パターン投影法を用いる。)
- (3) 二値化された画像を、投影パターンに応じてビットプレーンに挿入する。

この手続きをn枚の光パターンについて繰り返し、nbitグレイコード表現の空間符号画像を得る。

- (4) この画像をグレイコードから純二進に変換。
- (5) 空間符号画像から三次元座標を計算する。

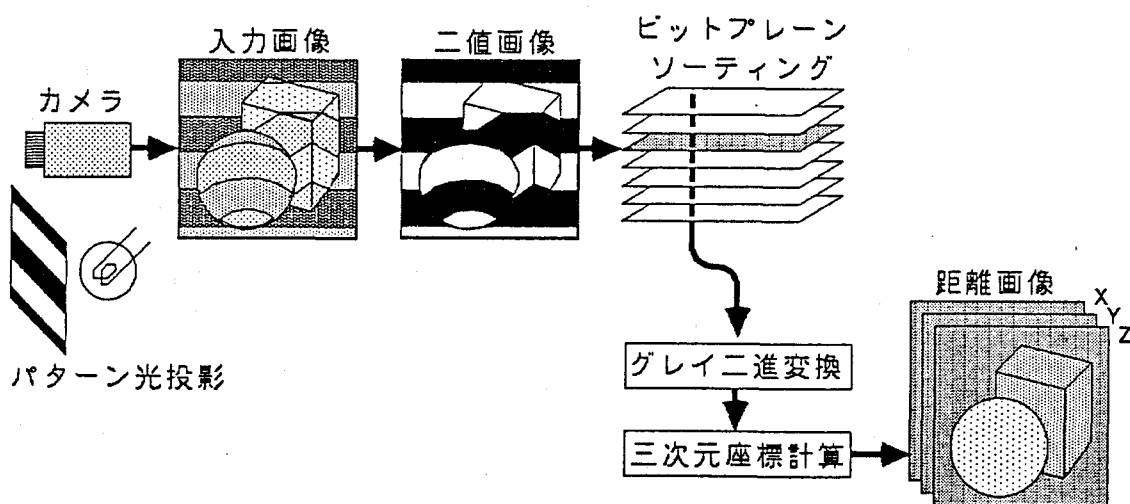


図2-6 グレイコードパターン光投影法の計測処理の流れ

次に(4)より、純二進表現の空間符号画像を得る。空間符号値をプロジェクタ座標値とし、画素の二次元アドレスをカメラ座標値とすることにより、あらかじめキャリブレーションされたシステムパラメータから、(5)の同次座標系演算で距離画像を得られる。

2-4 投影パターンの二値化

実用的な応用計測では、以下の二つの条件が肝要である。

(A) 通常照明の下で計測可能なこと。

(B) 物体表面のテクスチャ(明暗模様)に計測が影響されないこと。

本計測法は測定空間を投影光の有無で二進符号化することに基づいているため、計測の安定性や精度は、入力画像中の投影光パターンの抽出に大きく依存している。つまり、前節(2)における二値化処理の安定性が、とりも直さず三次元計測の安定性となる。

以上の条件を考慮した光パターン抽出法が切望され、ここにあらたな光パターン抽出法を提案する[Sato 86b]。

2-4-1 相補パターン投影

図2-7に、光パターン抽出の原理を従来法と併せて示す。(A)の方法は、パターン光を投影せず通常照明のみの状態でシーンを入力し、パターン光投影画像とこの無投影画像との差分を固定閾値で二値化するものである。これは従来より背景画像除去法として使用されている。(B)の方法は(A)での無投影画像の入力に加えて、さらにプロジェクタのマスクを全開口した光を投影したときの画像を用いる。この全開口光投影画像と無投影画像との中間輝度を、パターン光投影画像の閾値とし、二値化するものである。

(C)が提案する方法であり、全二者と全く異なるものである。一つの二進パターンにつき、ポジのパターン光と相補的に白黒反転したネガのパターン光の二つをシーンに投影する。ポジパターン光の投影画像とネガパターン光の投影画像との間で比較することにより二値化する。それぞれの方法に必要な画像処理量を表2-1に表す。

各方法の得失として、(A)の方法は通常照明の下でも計測が可能とはなるが、テクスチャなど物体表面の反射率の違いで、画像中の光パターンの濃度値が変化するため、光パターンのエッジ中心で二値化できず、エッジが膨張や縮小する問題点がある。また、合理的な閾値が決定できないことも難点である。この点を(B)の方法は、全開口光を投影し光パターンが照射された場合の濃淡値を得ることにより、物体表面の反射率変化を補正している。したがって、物体表面に応じて閾値が変化し、安定に二値化が行える。しかし、画像入力に濃度非線形性がある場合は、閾値の補正が

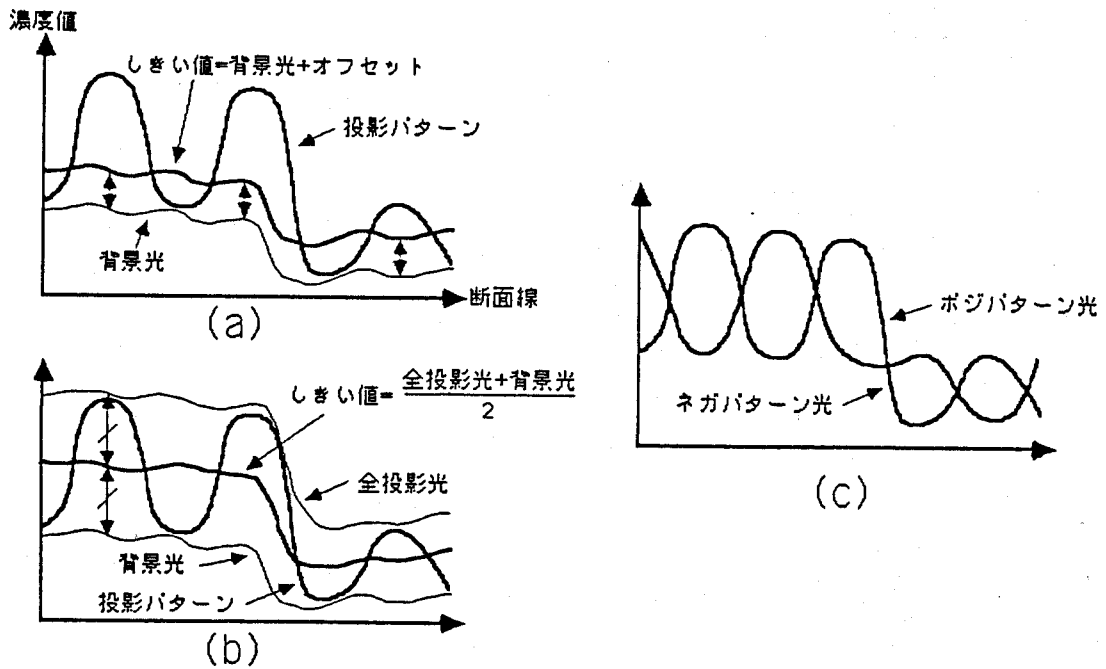


図2-7 投影パターンの抽出 (a) 背景補正による単純二値化
 (b) 背景・全開口光の中間値による二値化
 (c) 相補パターンの比較による二値化

必要となる。(C)の方法は、相補的な光パターンを投影することにより、通常照明や物体表面特性、入力非線形性の影響を打ち消すことができ、非常に安定かつ精確に二値化できる。光投影回数は若干多くなるが、この方法が最も優れたものといえる。以下、「相補パターン投影法」と呼ぶことにする。

表2-1 二値化に必要な画像処理量

ビット数 = n	A	B	C
投影回数	n+1	n+2	2n
画像入力	n+1	n+2	2n
画像間加算	0	1	0
画像間減算	n	n	n
ビットシフト	0	1	0
二値化	n	n	n

2-4-2 二値化手法の比較実験と検討

図2-8、2-9に、三種の二値化方法の比較実験を示す。図2-8が対象画像であり、(a)、(b)それぞれ1:1縞模様の正パターン光、負パターン光、(c)、(d)は全開口光、無投影の投影画像である。図2-9(a)に、各方法に基づいて二値化した画像を示す。図2-9(b)は、二値化結果を縞のデューティ比で表し、ヒストグラムを取ったものである。光パターンのエッジ位置は、閾値や相補パターンと交差する点として、画像の濃度変化をエッジ部の4画素を用いて直線近似し補間して求めている。対象画像中の縞模様は1:1のため、デューティ比は50%になることが期待される。

ヒストグラムの中で、相補パターン投影法が50%にて最も鋭いピークをなしている。縞の幅は約20画素であり、エッジ位置の1画素のずれはデューティ比の約2.5%に相当していることを考慮すれば、極めて良好な二値化結果を示しており、相補パターン投影法が非常に優秀であることが結論できる。

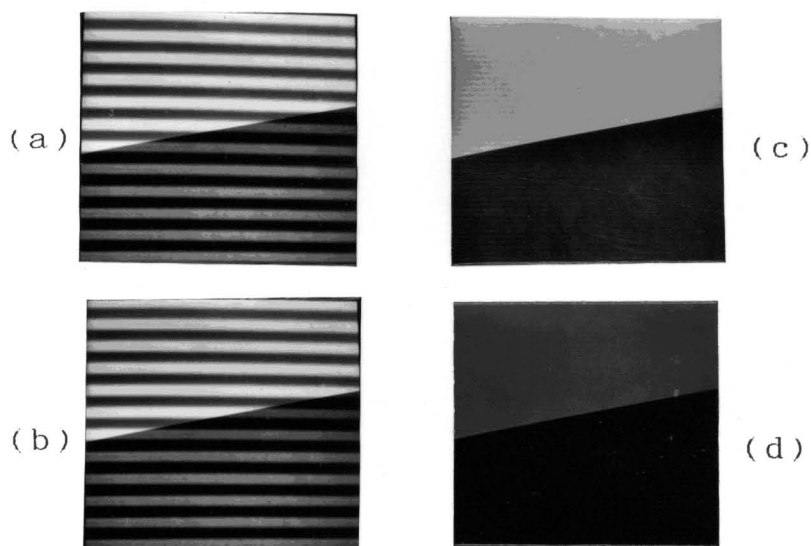


図2-8 二値化手法の比較実験に用いる対象画像(1:1縞模様)

- (a) ポジパターン画像、(b) ネガパターン画像
(c) 全開口光画像、(d) 無投影画像

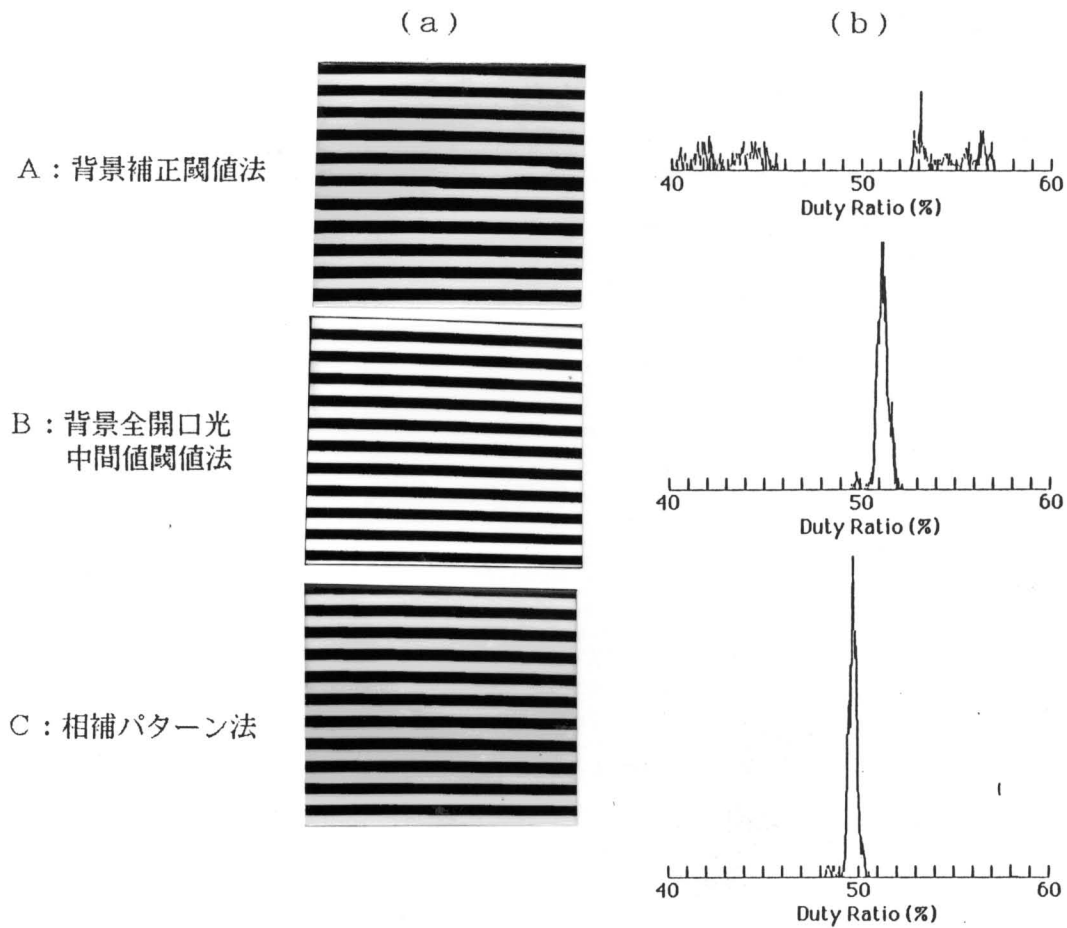


図2-9 二値化手法の比較実験の結果

(a) 二値化された画像、(b) 縞模様デューティ比のヒストグラム

2-5 計測例

自然シーンとして、図2-10に示す電話機とカップを対象とし計測を行った。図2-11は、MSBから順に8ビット目のパターンまでを投影したものである。上段は相補パターンのポジパターンを投影したときの入力画像、中段はネガパターンを投影したときの入力画像である。下段は、上段のポジ画像と中段のネガ画像との比較により二値化を行った画像である。

通常照明下で反射率の異なる物体面が良好に二値化できていることが、ここでも確認できる。図2-12は、得られた距離画像をワイヤフレームで異なる視線から立体表示したものである。作画の関係で、連続面のみを粗いメッシュで表示している

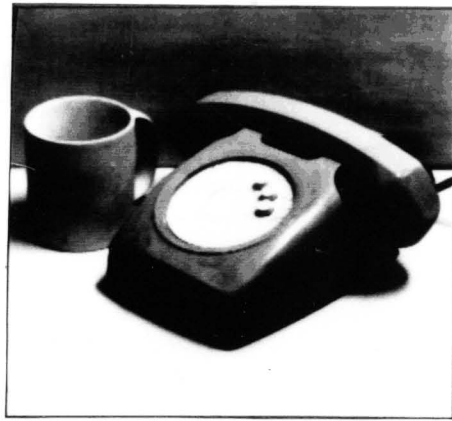


図2-10 計測対象シーン

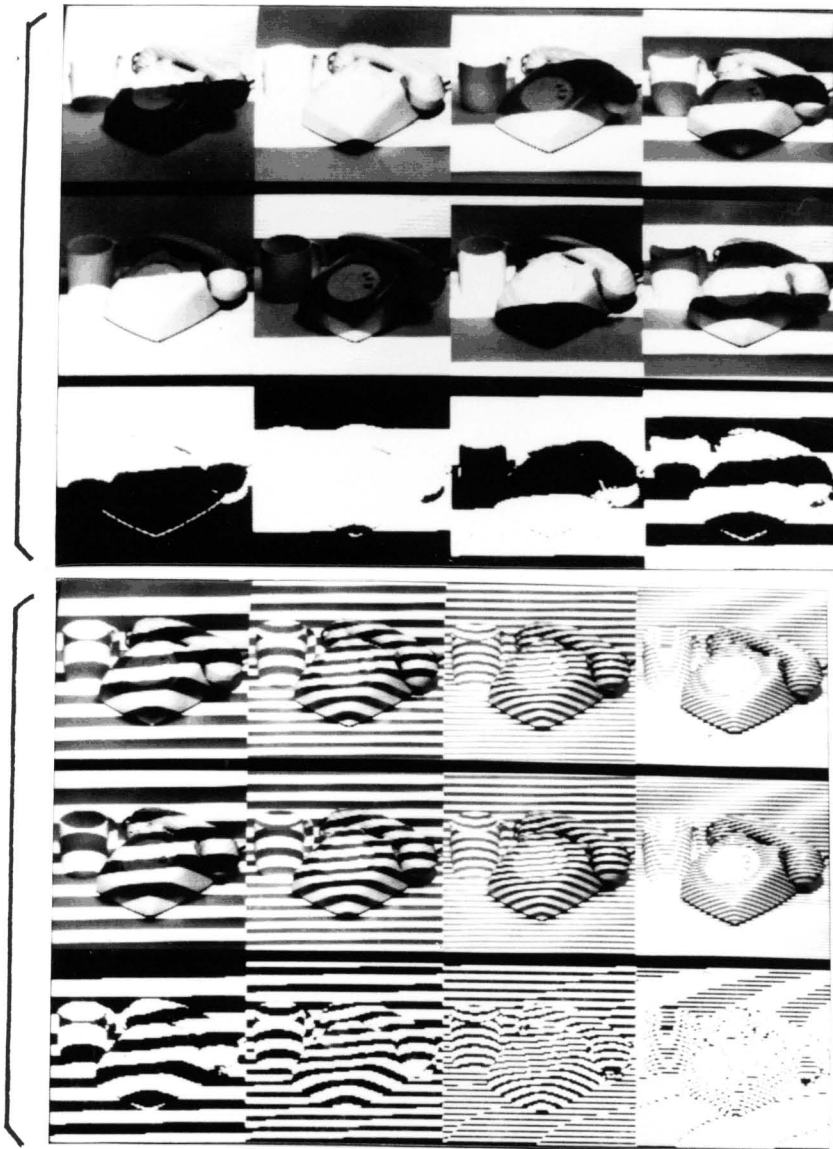


図2-11 グレイコードパターン光が投影されたシーンと投影パターンの抽出 (8bit)
 (上段) ポジパターン投影時の入力画像、(中段) ネガパターン投影時の入力画像
 (下段) ポジパターン画像とネガパターン画像の比較による二値画像

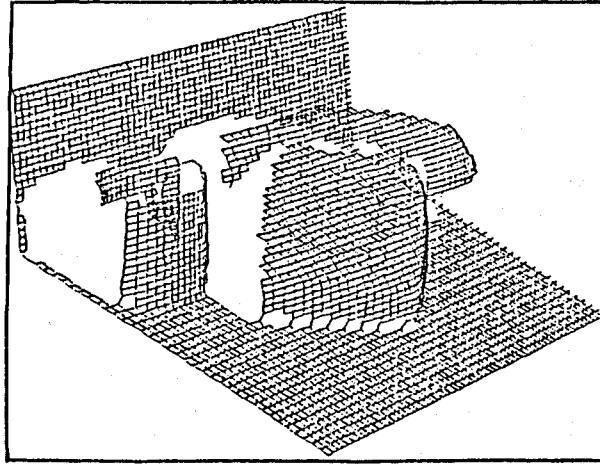


図2-12 計測結果のワイヤフレーム表示（視点をカメラ位置と別角度にして表示）

2-6 計測法のまとめと今後の課題

(1) 二進パターン光を投影する本計測法の特徴をまとめる。スリット光投影法の特徴を括弧内に併せて示す。

◆参照光の投影回数が、スリット光投影と比較して大幅に少ない。

n個のバイ領域の分割が、 $\log_2 n$ 回のパターン光の投影で得られる。

(スリット光投影法では、n回のスリット光の投影を要する。)

◆得られる距離画像は、二次元正方である。

◆距離画像と共に、同じカメラアングルで濃淡画像が入力できる。

入力画像の一つ一つの画素ごとに、参照光のデータを蓄えていくため、対象の観測画像とまったく同じアングルの距離画像が得られる。

(得られる距離画像は、二次元正方をなす。)

(同じカメラアングルで濃淡画像を入力できる。)

◆不可視領域を除き、全ての画素が三次元位置データを有す。

不可視領域を除き、参照光が照射されている全ての領域に三次元情報が与えられるので、得られる距離画像は稠密に全ての画素が三次元位置情報を担う。

(スリット光輝線上の画素しか三次元位置情報を有しない。)

◆不可視領域を、計測過程で確認できる。

全ての光パターンで暗領域"0"となり空間符号が零になる箇所は、他の物体の陰などに入り参照

光の到達しない領域である。逆に、空間符号が零か否かを調べるにより、不可視領域であるかを確認することができる。

(不可視領域を、確認することはできない。)

◆対象物体表面の連続性を、空間符号画像から確認できる。

連続した物体表面には連続した空間符号が与えられるので、空間符号画像の画素値の連続性を調べることによって、物体表面の連続性を確認することができる。逆に不連続性を確認することにより、ジャンプエッジや物体の輪郭を空間符号画像中から検出することができる。

(連続性を、確認することはできない。)

(2) 投影パターンとしてグレイコードパターンを用いることによる特徴をまとめる。

◆光パターンの二値化誤りを最小に限定できる。

グレイコードは、隣接値間のハミング距離が恒に1であり、光パターンの投影の位置ずれや二値化の誤りで生じる符号化誤りを、たかだか±1の空間符号の誤りに抑えることができる。

(二値化誤りは、直ちに三次元情報の欠落につながる。)

(3) 相補パターン投影による二値化手法を用いることによる特徴をまとめる。

◆通常照明の下で計測可能である。

◆物体表面のテクスチャ(明暗模様)に計測が影響されない。

相補的な二枚の光パターンに、通常照明や物体表面特性、入力非線形性の影響が同等に加えられる。この両者を比較することで、それらの影響を打ち消すことができる。

(スリット光輝線の抽出に浮動二値化法などを用いれば、通常照明の下でテクスチャを有する物体を計測できる。)

グレイコードパターンを用いた時系列パターン光投影法による距離画像計測法を提案した。スリット光投影法の欠点を全て取り除いているうえ、距離画像の応用に関して有用な情報も付随して得ることができる。相補パターンの利用から、照明やテクスチャに影響されない安定な計測が可能になり、計測対象物の範囲が大きく広がっている。また、計測処理も簡単な画像処理で実現でき、ソフトウェアによらなければならない複雑な画像処理は必要がない。

第3章 距離画像の高精度計測

グレイコードパターン投影時系列空間符号化による距離画像計測は、実用されているスリット光投影法と比較して、得られる距離画像の空間分解能（画素数）が画像入力装置の分解能と同等まで高めることができ、しかも画像全体にわたって隙間なく稠密に三次元位置データが得られる利点がある。高速計測性の面でも、投影するスリットの本数が多いほど、著しく有利となる特長がある。

三次元位置の計測分解能の面に関して、スリット光投影法では投影するスリット光の本数を増やすことで、パターン投影時系列空間符号化法では投影するパターン光の枚数を増すことで、各々高分解能化を図ることができる。しかし、スリット光投影法では走査ミラーの回転ステップ角の変更で、簡単に投影本数を増すことができるのに対して、パターン光の枚数を増すためには、プロジェクタのマスクパターンを次第に微細化する必要がある、実現に難しい面がある。次章で述べる高速距離画像計測システムでは、ストライプアレイ状の液晶光学シャッタをマスクに利用している。よりストライプ数の高いシャッタを用いれば容易に高分解能化ができるが、液晶の透明電極の製作プロセスに制約があり、実現可能なストライプ数には上限がある。

三次元位置の精度の面では、どちらの方式も投影光の画像中での位置を、いかに精度良く検出するか否かに依存しており、計測原理上の優劣はない。単純には、用いる画像入力装置の空間分解能（画素数）により計測精度が決定される。

CAD/CAMやNCマシンの普及に伴い、物体模型や機械部品に対する高精度で高細密な三次元形状入力の高必要性が高まっている [Inokuchi 87]。このような用途では、接触型プローブによる三次元ディジタイザが利用されているが、測定対象を傷つける可能性と計測時間が長大になる点に利用上問題がある。このため、光投影により高精度な三次元形状計測装置の開発が求められている。このような観点に立ち、スポット光、スリット光を投影する計測システムの中で、画像中の輝点、輝線位置の高精度な検出に特殊なデバイスや高度なアルゴリズムを適用して、三次元計測の精度の向上を図っているシステムが開発されている。

PSD (Position Sensitive Device) をスポット光の撮像入力に利用したシステムでは、PSDの光強度の重心位置を出力する作用により、画像中の輝点位置を高精度に検出している [Kanade 81]。ビデオカメラを撮像に用いたシステムにおいても、入力画像中にわずかに広がっている輝点の重心位置をソフトウェアにより求めることにより、同定しているものがある [Nakazawa 85]。また、スリット光を投影するシステムにおいても、輝線の中心位置 [Shirai 71]、極大輝度点 [Ozeki 86] を求めたり、輝線をガウス分布にフィッティングする [Nishikawa 81] などして、スリット光位置の高精度同定を行っているものがある。

本章では、グレイコードパターン投影時系列空間符号化に基づく三次元位置計測の精度に関して考察し [Sato 85]、光学シャッタをパターン光プロジェクタに用いた場合の高精度化手法について述べる [Sato 87]。シャッタの機械的微小移動からハードウェア的に倍の空間分解能を得る方法、およ

び、空間符号の内挿と空間符号境界の内挿を適用しソフトウェア的に高精度化する方法である。

3-1 計測精度決定の要因

図3-1に、パターン光による空間の符号化と、カメラの画素標本化による測定空間の量子化の様子を表す。測定空間は、順次投影されるグレイコードパターン光によって、プロジェクタの投影レンズを通る直線を軸線にナイフエッジ状に分割され、その各々の領域に同じ空間符号が割り当てられる。また、デジタル画像入力の二次元標本化によって、カメラの結像レンズを中心に先鋭な四角錐状に分割され、それぞれは画素の二次元アドレスに対応している。このナイフエッジと四角錐が交わってできる6面体が量子化された空間であり、空間符号と画素アドレスから識別される。逆に、この6面体内のどこに真の位置があるかを決定することはできない。

したがって、計測精度の向上には、投影するパターン数を増やしナイフエッジ空間を薄くし、同じくカメラ入力の画素数を増やし四角錐空間をより細くする必要がある。また一方、空間符号の分布からナイフエッジ空間を、投影パターンの境界での輝度分布から四角錐空間の内部を内挿することができ、真の三次元位置を推測できる。

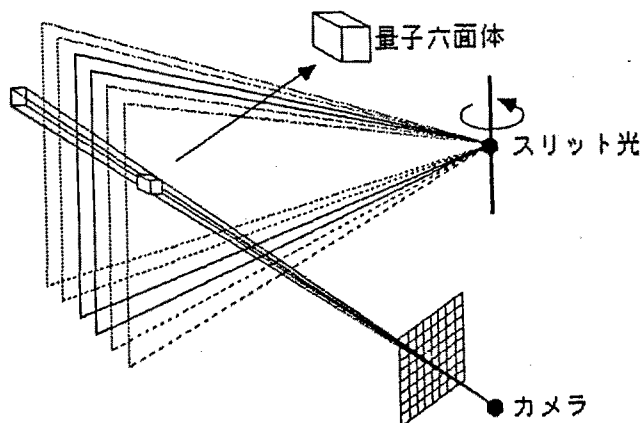


図3-1 プロジェクタとカメラによる測定空間の量子化

3-2 半ピッチずらしによる倍精度パターン化

半導体画像センサの中には、微小に水平移動するピエゾ素子上にセンサチップを置き、チップ全体を最小分解能つまり一画素の半ピッチ分ずらすことにより、ずらさなかったときの画像とずらしたときの画像の二回の入力から、等価的にずらし方向に分解能を倍にしたものが開発されている。また、センサ表面に結像されている像の方を、テーパーガラスによって半ピッチ分ずらすものもある[Onishi 79]。

プロジェクタも同様に考えることができ、投影する光パターンを最小分解能の半分だけずらすにより、空間符号化を倍にすることが可能となる。

図3-2に示すグレイコードパターンには、以下に記すような三つの特有な性質がある。

- (1) $n+1$ ビット目のパターンは、 n ビット目のパターンの倍の細かさのストライプで構成される。
- (2) n ビット目のストライプパターンの境界は、 $n+1$ ビット目のストライプの中心に位置する。
- (3) LSBのパターンが $\cdots 00110011 \cdots$ と二本おきにストライプパターンを構成する。

ここで同図下部のように、

- (A) $\cdots 01010101 \cdots$ とLSBパターンの倍の細かさのストライプパターンを生成し、
- (B) LSBパターンの境界が、この倍ストライプの中心を通るように半ピッチ分だけパターン全体を機械的に移動させることにより、

等価的にLSB+1ビット目のストライプパターンが得られる。このパターンを投影すれば、倍の分解能で計測が可能となる。

これは、グレイコードパターンが(3)の特徴を有し、かつ最小パターンを半ピッチ移動させてもグレイコードパターンの性質を保持できることで可能となっている。例えば、LSBパターンが一本おきにストライプパターンを成すような純二進コードでは実現することはできない。

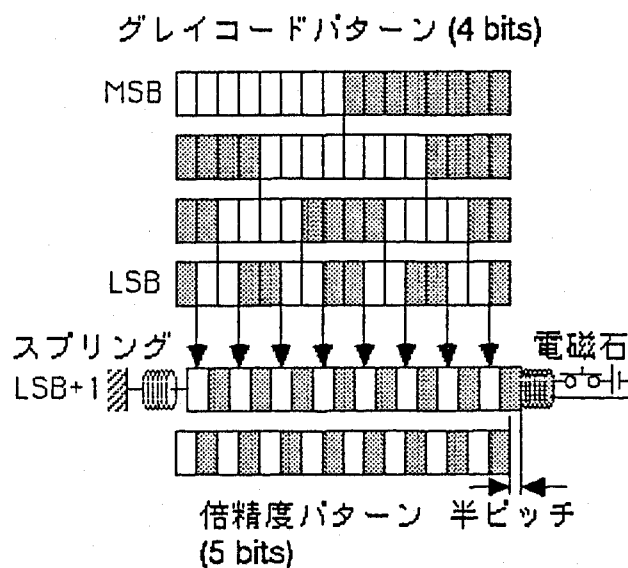


図3-2 半ピッチずらしによるグレイコードパターンの倍精度化

3-3 空間符号の内挿

段差のある二枚の平面にパターン光を投影したときの量子化の様子を、図3-3 (a) に示す。このとき計測される空間符号画像を (b) に模式する。i、j は画像の二次元座標を表し、高さはその画素上での空間符号の値を示している。投影パターンの二値化から得られて本質的に整数である空間符号を画素値とする空間符号画像には、第2章6節で述べたように、以下の特徴的な性質がある。

- (1) 連続した物体面上では空間符号は単調に±1づつしか変化しない。
- (2) 物体の境界線上では空間符号は±1以上大きく変化する。

この性質は、逆に空間符号の変化を調べることにより、対象とする物体表面の連続性が確認できることを意味する。

三次元位置計算に必要なプロジェクタ座標値には、整数で離散値である空間符号をそのまま適用するかぎり、図3-1の量子6面体以上に計測精度は向上できない。しかし、この空間符号の連続性を利用することにより、プロジェクタ座標が内挿することができ連続量で求められる。

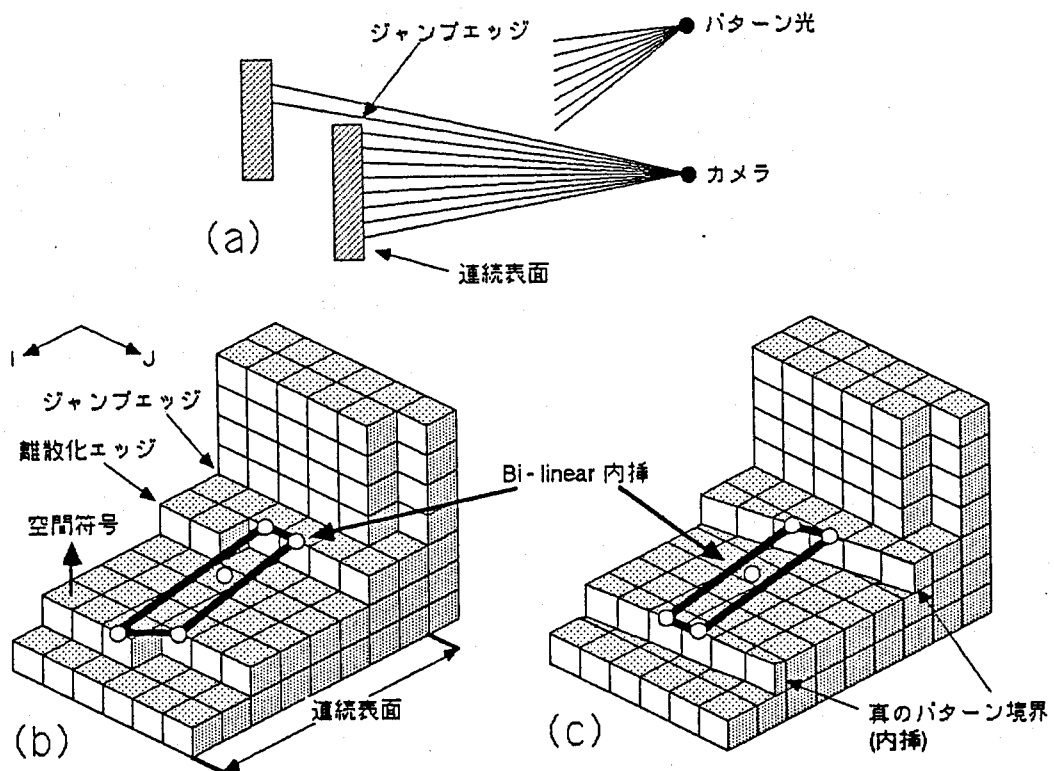


図3-3 空間符号の内挿

(a) 連続面とジャンプエッジ

(b) 周囲隣接4変化点によるBi-linear内挿、(c) パターン境界の内挿

この内挿処理の概念を、図3-3 (b) 上に表している。画像中任意点でのプロジェクタ座標値は、空間符号が±1 変化する周囲の隣接4点を用いてbi-linear法により内挿し算出する。ここで、同じ空間符号を持つ画像中の帯領域は、図3-1のナイフエッジ空間の幅に等しい。この内挿法は、この幅が十分に細くその中では物体表面が局所的に平面で近似できる、という仮定に基づいている。物体表面が緩やかな形状を有している場合、このような単純な内挿手法によっても効果は十分高いと考えられる。

3-4 パターン境界の内挿

グレイコードパターンが投影されて変形した縞模様を呈する対象物体は、カメラと画像入力装置によりデジタル画像に標本化され入力される。このとき、どのような対象でも単純に画像入力できるのではなく、入力できる縞模様の細かさには限界がある。これは、入力する縞模様つまり投影パターンが、サンプリング定理により画像入力の標本ピッチの倍以上の太さがなくては正しく標本化できないからである。これが、本計測法におけるグレイコードパターンの投影枚数の原理的な上限を与えている。したがって、単純に投影パターン数を増やすことで、計測精度を上げられるというものではない。

3-4-1 標本化誤差

計測精度を向上させるため、可能な範囲で投影パターン数を増やすと、グレイコードパターンの投影パターンが次第に細くなり、この標本化限界に近づいてくる。細くなるにつれて、投影パターンの境界（エッジ）に対する±1画素の標本化誤差が無視できなくなり、投影パターンの増加による高精度化を制限するようになる。この現象が、図3-3 (b) では、本来 (c) のように滑らかに続くはずの空間符号の境界（パターン境界）が、画素で区切られ離散化されているところに表われている。より高分解能のカメラと画像入力装置を適用すれば標本化誤差の影響を低減することができるが、そのような装置は特殊であり簡単に利用できるものではない。したがって、空間符号境界の真の位置を画素内で内挿し標本化誤差を取り除けば、通常 of 分解能の装置においても計測の高精度化を図ることができる。

3-4-2 濃淡情報によるパターン境界位置の推定

図3-4 (a) に、第2章4節で述べた、相補パターン光の投影を受けている対象を入力している画像の、ある直線断面をとったときの輝度プロファイルを定性的に示す。背景光による明暗をオフセットにして、相補パターン光を投影した時の二つの輝度プロファイルは、お互いに交番しながら投影パターンに応じて波打っている。交差する点は二値パターンの白黒が切り替わる画素内に正しく位置しており、この画素内にある真のパターン境界位置を同定したい。

真の境界には、それを挟む画素に相補パターンの投影による、境界の位置と結び付けられる四つ

の輝度情報がある。標本化された相補パターンの輝度情報を画素内で補間し、連続した輝度プロファイルを作れば、その交点からパターン境界位置を画素内で正しく同定することができる。図3-4 (b) のように、輝度プロファイルを直線補間した場合、その交点は次の単純な式で内挿される。

$$\text{エッジ位置} = \frac{(A-B)}{((A-B)+(D-C))} \quad (3-1)$$

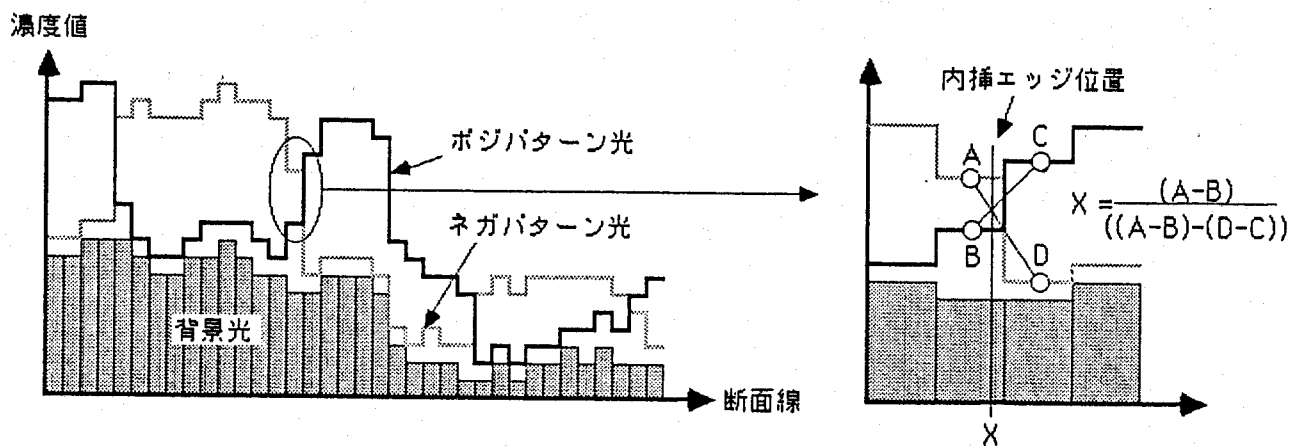


図3-4 パターン境界の内挿
(a) 入力画像の輝度プロファイル、(b) プロファイルの交差点

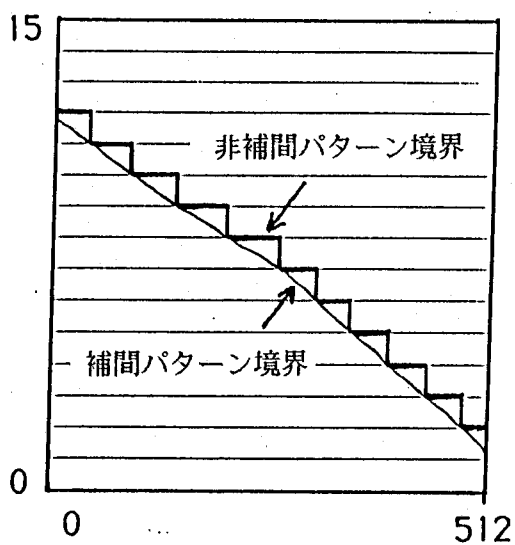


図3-5 パターン境界の内挿結果

3-4-3 位置推定の評価

図3-5に、パターン境界の内挿結果を示す。平板にストライプパターンをわずかに斜めにして投影したものを試験画像として用いている。同図は、その境界を抽出した画像の一部を切り出したものであり、横512、縦15画素と縦に大きく拡大して表示している。太線は内挿を行わない場合のパターン境界であり、階段状の標本化誤差が現われている。斜めに走っている細線が、(3-1)式により内挿されたパターン境界である。ストライプパターンの直線性が良く保たれており、同式の内挿処理は十分に有効なことを証明している。

3-5 各高精度化手法の総合評価

前述した高精度化の各手法の効果を評価するために、図3-6に示す計測配置下で、立方体を試験物体に用いて三次元位置計測を行った。計測された 256×256 画素の距離画像中、立方体の上面のZ座標値(高さ)を、 50×15 画素の範囲で表示したものを図3-7に示す。(a)が、7ビットのグレイコードパターン投影によるもので、プロジェクタ座標の内挿処理を全く行わない場合の結果である。プロジェクタ座標が整数のため、鋸歯状の量子化誤差が大きく現われている。(b)は、倍精度パターン投影(8ビット)で内挿処理を行わないものである。7ビットの(a)に比較して変差が少なく計測精度が向上していることが分かる。(c)は(a)の計測に、プロジェクタ座標の内挿処理を付加したものであり、(d)はさらにパターン境界の内挿も加えた場合の結果を示している。表3-1に誤差の標準偏差を示す。(a)、(c)、(d)の順に計測精度が大きく向上していることが確認でき、それぞれ高精度化手法の有効性が示されている。

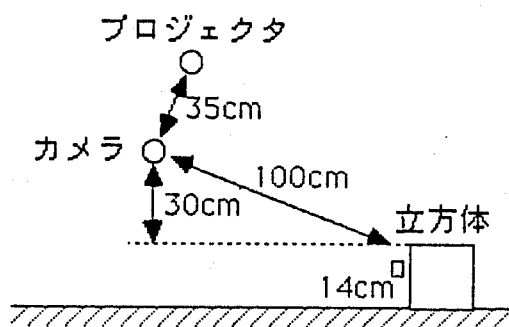


図3-6 計測配置

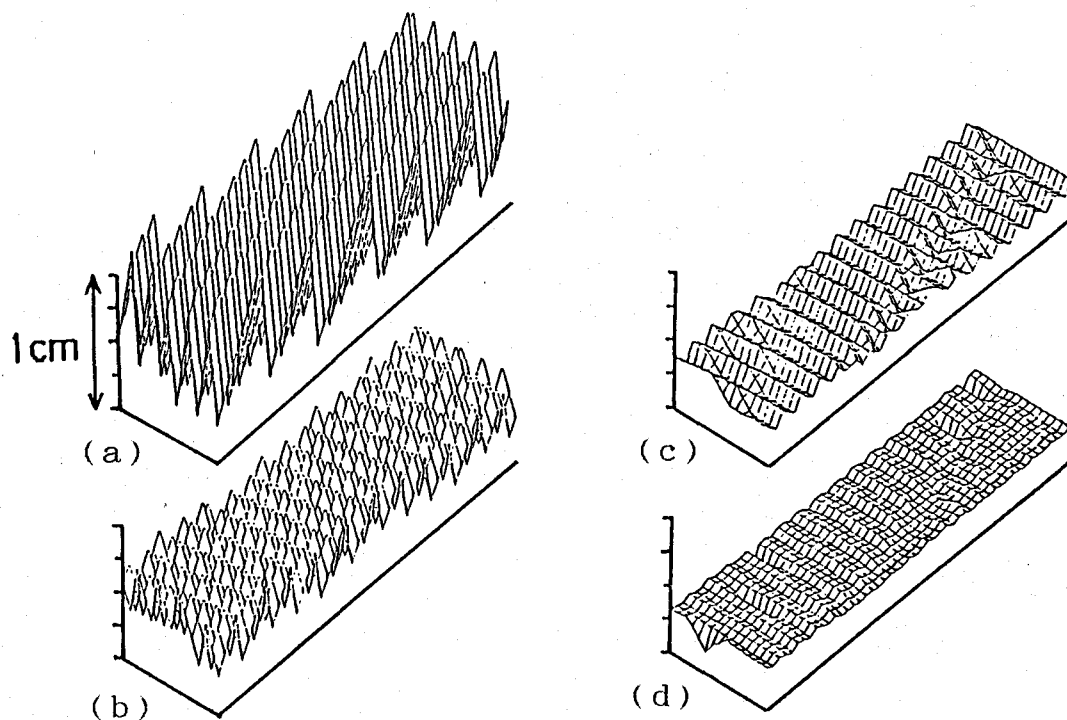


図3-7 平面の計測例

- (a) 7 bitパターン、(b) 8 bitパターン
(c) 7 bitパターン、空間符号の内挿を行ったもの
(d) 7 bitパターン、空間符号の内挿とパターン境界の内挿を行ったもの

表3-1 計測誤差

	ビット数	プロジェクタ座標の内挿	パターン境界位置の内挿	誤差の標準偏差(mm)
a	7	-	-	0.83
b	8	-	-	0.42
c	7	あり	-	0.27
d	7	あり	あり	0.18

3-6 高精度化のまとめ

グレイコードパターン投影に基づく距離画像計測の高精度化について述べた。計測のハードウェア面、ソフトウェア面、両者の立場から精度を向上させる手法を適用した。

(1) 計測ハードウェアの面：

パターン光投影プロジェクタに装着されている液晶光学シャッタを、機械的に半ピッチ平行移動させることにより、シャッタ本来の分解能より倍の分解能を得る。

(2) 計測ソフトウェアの面 (A)：

連続した表面における空間符号の単調増加性から、その空間符号の変化する境界を利用し内挿することにより、プロジェクタ座標を高精度に推定する。

(3) 計測ソフトウェアの面 (B)：

相補パターン画像の輝度分布から、(2)の空間符号の変化する境界(パターン境界)の内挿を行ない、画像入力の標本化誤差を低減する。

いずれの手法も、実験からその高精度化の効果が証明できた。

以上の方法により、スリット光、スポット光投影による距離画像計測と比較しても、計測精度の面で遜色のないものが得られている。本計測法は、計測時間、空間分解能、計測精度、計測安定性など、すべての面で高い実用性を示している。

第4章 距離画像計測システム

第2章で述べた三角測量型の光投影三次元画像計測は、それぞれ投影光の形状や投影の仕方に工夫や特徴があり、それらを実現した実際の計測システムには二次元レーザスキャナやポリゴン回転ミラー、マスクパターン切り替え装置など機械的な機構を持ったプロジェクタが必須な装置であった。また、対象シーンに投影されている光の検出には、スポット光をPSD素子や一次元CCD (Charge Coupled Device) 光センサで行う例の他は、ほとんどITVカメラによる対象シーンの画像計測処理で行われている。このような機械的機構を持つプロジェクタと、ITVカメラによる画像計測機能を組み合わせた計測システムは比較的構築しやすいので、従来より広く研究されてきた。しかし、光投影による三次元画像計測の広範な実用化を考えた場合、

- (1) 電子的なデバイスで投影光を制御できるプロジェクタ
- (2) リアルタイム処理可能な簡便な画像処理技法

が鍵となる技術であり、それらを実現した計測システムが期待されている。

(1) に関しては、PLZTセラミック光電素子を、二次元ドットパターン光や複スリット光を制御する光学シャッタに用いている例[Altschuler 81][Mino 81]がある。しかし、大口径の素子の製作が難しいことや、制御電極が投影光に影をつくるなどの問題があり、広く利用されるまで至らず試験的に用いられているのみである。

(2) に関しては、画像処理を実行するハードウェアの性能に大きく左右されるのでリアルタイム性を一概に評価することは難しいが、標準的に普及している画像プロセッサに適用できることが第一の条件であり、容易に専用ハードウェア化が行える画像処理技法が最も望まれる。具体的には、二値化処理や画像間加減算などの画素処理や、エッジ抽出など 3×3 マスク処理[Tamura 85]のみで、対象シーンの画像計測処理ができることが望ましく、複雑な追跡処理などを含まないものが求められる。

第2章のグレイコードパターン投影による空間符号化法は、高速計測に向けた優れた方法であるが、実際に実用に耐えられる計測システムが実現できなければ工学的な価値はない。本研究の距離画像計測システムは、前述した光投影による三次元画像計測システム実用化への鍵となる二つの技術に関して、

- (1) 投影光のパターンを液晶光学シャッタで電子的に制御できるプロジェクタ
- (2) 局所並列型画像プロセッサに適応した高速かつ簡便な画像計測処理

を実現している[Sato 87, 88]。

〔1〕に関しては、ストライプアレイ状の液晶光学シャッタをグレイコードパターン光を投影するプロジェクタのマスクに利用しているため、機械機構部がまったくなく純電子的に投影光を制御できる。さらに、この液晶光学シャッタはグレイコードパターン以外にも任意のパターンが生成できる利点がある。したがって、このプロジェクタは第2章4節で述べた相補パターン比較法に必要な明暗反転したパターンを容易に投影できる。〔2〕に関しては、局所並列型画像プロセッサに適應した簡易な画像演算のみで、入力画像の計測処理に必要な画像演算の全てが実行できる。

4-1 システムの構成

図4-1に距離画像計測システムの全体の構成を示す。図4-2に実際に計測を行っている様子を示す。本計測システムは、以下に示す五つの主要なハードウェアから構成されている。

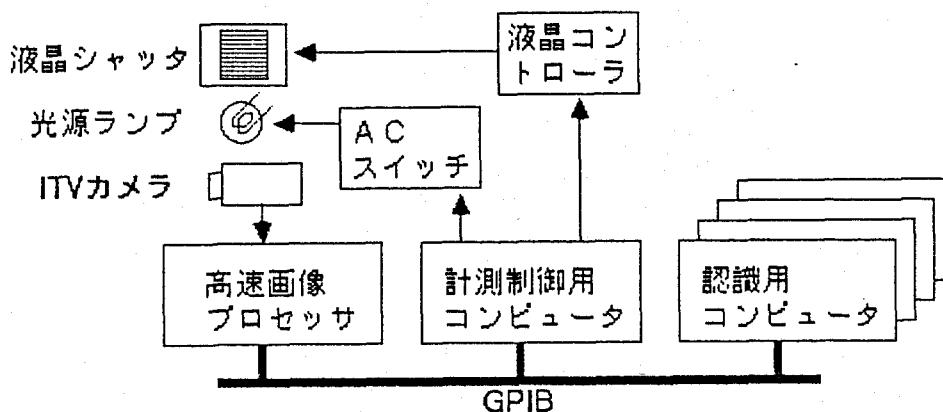


図4-1 計測システムの構成

◆グレイコードパターン光プロジェクタ

後節で述べる液晶光学シャッタを、一般に市販されている6×6cmサイズ用スライドプロジェクタのスライド挿入部に配置して、グレイコードパターン光を投影する。150Wのハロゲンランプを光源にして白色光を投影する。装着されている液晶光学シャッタは、専用コントローラによって投影パターンの制御を受ける。

◆ITVカメラ

パターン光が投影されている対象シーンを、観測するカメラである。ピンホールカメラにモデル化することにより三次元位置を算出しているため、幾何学的に歪みのない映像が入力できることがカメラへの必要条件となる。このため、CCD固体撮像カメラを用いる。固体撮像カメラは撮像管と異なり、歪みの大きい電子ビーム走査系を有しておらず、歪みの少ない映像が得られる。

(a)



(b)



図4-2 計測システムの外観

(a) カメラとプロジェクタ、(b) 計測の様子1、(c) 計測の様子2 [次ページ]



図4-2 計測システムの外観(つづき)
(c) 計測の様子2

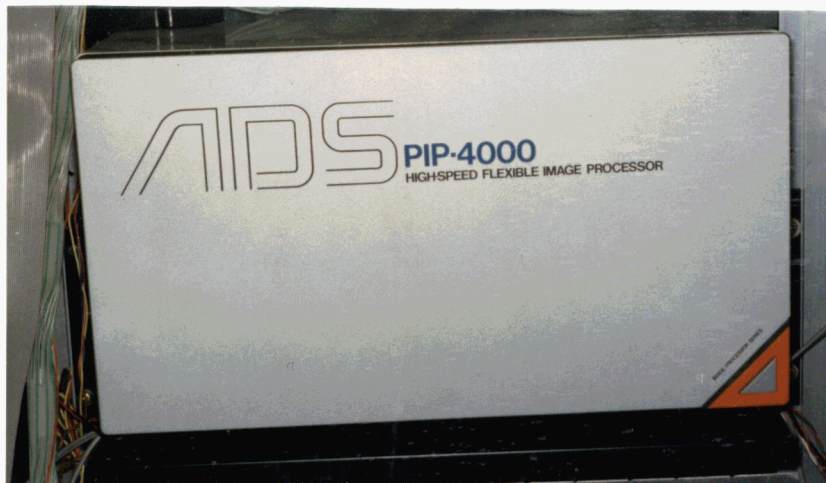


図4-3 高速画像プロセッサ

◆高速画像プロセッサ

図4-3に使用した高速画像プロセッサの外観を示す。ITVカメラの映像信号をAD変換し、 512×512 画素の空間分解能、8bitの濃度分解能のデジタル画像として取り込む。入力された画像は、画像ALU (Arithmetic Logical Unit) や画素値LUT (Look Up Table) などの画像処理回路により、画像間加減論理演算、二値化、二進コード変換、画素値ビットシフトなどの処理が施される。一ステップの画像演算は、リアルタイム処理 (NTSCフレーム時間: 1/30 sec.) で実行できる。

◆計測制御用コンピュータ

プロジェクタの光源の点滅、投影パターンの生成・切り替え、画像プロセッサへの制御コマンドの送出など、グレイコードパターン光の投影から空間符号画像を得るまでの処理過程に必要な制御すべてを行う。また、基準立方体を利用したシステムパラメータのキャリブレーションも、このコンピュータで行う。16bitの汎用マイクロコンピュータであり、プロジェクタとは9600baudのRS-232Cシリアルラインにより、画像プロセッサには10Kbyte/sec.の GPIB (General Purpose Interface Bus) で接続している。

◆認識用コンピュータ

計測制御用コンピュータで得られた空間符号画像とシステムパラメータから、距離画像の算出を行う。三次元位置の計算 (付録A参照) には強力な数値演算能力が必要であるため、浮動小数点コプロセッサを搭載したエンジニアリング・ワークステーションで実行する。計測制御用コンピュータとはGPIBで接続され空間符号画像を受信する。次章以降で述べる距離画像の認識処理もすべて、このワークステーション上でC言語、OPS-83言語により行う。

4-2 画像プロセッサによる高速処理の実現

ITVカメラより入力される一枚の画像には、262,144byte (512×512 画素 \times 8bit) ものデータ量があり、単純な画像演算にも長大な処理時間を必要とする。例えば、1 Mipsのスーパーミニコンピュータ (VAX-11/780等) でも、一ステップの画像演算に単純に0.262sec.を要する。第2章3節で述べた本システムの画像処理手順には、50ステップ以上の画像演算が必要なため、この処理過程がシステム全体の計測時間を支配する。いかえれば、使用している画像処理アルゴリズムの計算量と、それを実行するハードウェアの性能に、計測時間は全てが左右される。

画像の二値化やフィルタリングなどラスタ走査型の低レベル画像演算は、画像データの流れが単調で一面的なため、一般のフォンノイマン型コンピュータでの実行は効率的ではなく、満足な処理速度が得られない。そこで従来より、完全並列型、局所並列型、データフロー型、画像メモリ型、パイプライン型など、さまざまな画像処理専用ハードウェアが研究、試作されてきた [Kidode 83]。そのなかで、局所並列型がTTLデバイスなど低コストな回路技術で、比較的処理能力の高い画像

プロセッサが製作できるため[Sato 84]、普及が進んでいる。

したがって、グレイコードパターン光投影による空間符号化に必要な画像処理過程を、局所並列型画像プロセッサの基本画像演算の組み合わせによって記述する。これを高速に実行させることによって、実用性の高い高速距離画像計測システムを実現する。

4-2-1 画像プロセッサの高速画像処理機能

本計測システムに用いた高速画像プロセッサのアーキテクチャを図4-4に示す。内部のハードウェアは、

- (1) NTSC映像信号を、 512×512 画素 $\times 8$ bitの画像メモリに入力するAD変換部
- (2) 二枚の画像メモリ間の加減論理演算を行う画像ALU
- (3) 8bitバレルシフト付き16bit画像アキュムレータ
- (4) 二値化や二進コード変換を行う画素値LUT
- (5) 空間フィルタリングを行う二次元コンボルバ
- (6) 制御コマンドや画像データをGPIBで外部と交信するインタフェース部

から構成される。

画像プロセッサの内部動作が、全て30フレーム/秒のNTSC映像信号に同期して行われるため、画像の入力、画像メモリ間の転送、ALU演算、LUT演算、画素値バレルシフトの画像オペレーション1ステップは、 $1/30$ sec.で実行される。二次元コンボルーションは、マスクの画素数/30sec.で実行される。また、画像入力とALU演算が同時に実行できるため、画像を入力しながら他の画像メモリと減算するなどの処理が可能である。この機能を用いれば、相補パターン比較による二値化が効率的に実行できる。

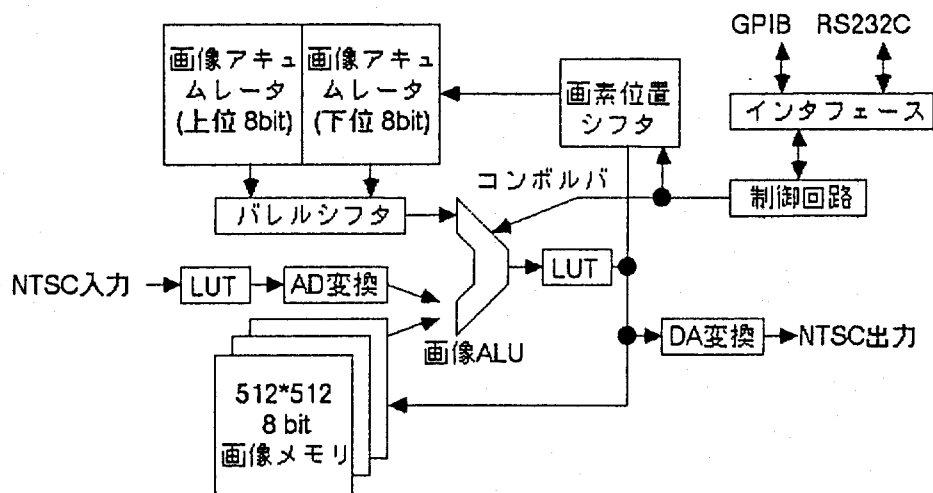


図4-4 高速画像プロセッサのアーキテクチャ

4-2-2 空間符号化処理

二進符号化されたパターン光を順次投影し測定空間を符号化する過程を、画像プロセッサの基本画像演算による手続きで記述する。このうち★印は画像オペレーションを表している。

はじめ

★画像メモリS ← 0 (空間符号画像格納用画像メモリをクリアする)

i を 0 から MSB まで繰り返す。

i に応じたグレイコードポジパターンを投影する。

★画像Acc ← カメラ (Acc : アキュムレータ)

ネガパターンを投影する。

★画像Acc ← 画像Acc - カメラ

(ネガ画像をカメラ入力しながら、ポジ画像 - ネガ画像を計算)

★画像Acc ← ビットシフト (画像Acc、1ビット左)

(9bitの2の補数表現データを、8bitデータにする)

★画像Acc ← 二値化 (画像Acc : しきい値 = 128)

(2の補数表現での正負の判定を、128をしきい値とする二値化で行う)

★画像Acc ← 論理AND (画像Acc、iビットのみが1の定数)

(二値画像をマスクし、iビット目のビットプレーンにする)

★画像Acc ← 論理OR (画像Acc、画像メモリS)

(空間符号画像にビットプレーンを挿入する)

★画像メモリS ← 画像Acc

(途中結果を待避する)

★画像Acc ← 画像メモリS

★画像Acc ← LUT変換 (画像Acc : グレイコード → 二進変換テーブル)

(グレイコード表現の空間符号画像を、純二進表現に変換する)

おわり

この手続きの結果、画像Accには空間符号画像が得られている。測定空間を256分割、つまりグレイコードパターン数を8とすると (MSB = 7)、51ステップの画像オペレーションが必要となる。

4-2-3 パターン境界内挿処理の付加

第3章4節で述べた、サブピクセル精度のパターン境界は、一組二枚の相補パターンの画像データの輝度プロファイルを直線近似し、その二本の直線の交点の計算から得られる。この処理を、画像プロセッサの基本画像演算による手続きで実現し、前節の空間符号化処理に次のように組み込む。このうち◎印は付加された画像オペレーションを表している。処理の流れを図4-5に示す。

はじめ

★画像メモリS ← 0

◎画像メモリU ← 0 (境界上縁データ格納用画像メモリをクリアする)

◎画像メモリV ← 0 (境界下縁データ格納用画像メモリをクリアする)

i を 0 から MSB まで繰り返す。

i に応じたグレイコードポジパターンを投影する。

★画像Acc ← カメラ

ネガパターンを投影する。

★画像Acc ← 画像Acc - カメラ

★画像Acc ← ビットシフト (画像Acc、1ビット左)

◎画像メモリD ← 画像Acc (差分データを待避する)

★画像Acc ← 二値化 (画像Acc : しきい値 = 128)

◎画像メモリB ← 画像Acc (二値画像を待避する)

★画像Acc ← 論理AND (画像Acc、iビットのみが1の定数)

★画像Acc ← 論理OR (画像Acc、画像メモリS)

★画像メモリS ← 画像Acc

◎画像Acc ← 画像メモリB (二値画像を復帰する)

◎画像Acc ← 3 × 3 フィルタ (画像Acc、マスクU) (二値画像のエッジ上縁を抽出する)

◎画像Acc ← 二値化 (画像Acc : しきい値 = 1) (エッジの線画化)

◎画像Acc ← 論理AND (画像Acc、画像メモリD)
(パターン境界の上縁差分データを抽出する)

◎画像Acc ← 論理OR (画像Acc、画像メモリU) (上縁差分データを格納する)

◎画像メモリU ← 画像Acc (途中結果を待避する)

◎画像Acc ← 画像メモリB

◎画像Acc ← 3 × 3 フィルタ (画像Acc、マスクV)

◎画像Acc ← 二値化 (画像Acc : しきい値 = 1) (二値画像のエッジ下縁を抽出する)

◎画像Acc ← 論理AND (画像Acc、画像メモリD)
(パターン境界の下縁差分データを抽出する)

◎画像Acc ← 論理OR (画像Acc、画像メモリV) (下縁差分データを格納する)

◎画像メモリV ← 画像Acc (途中結果を待避する)

★画像Acc ← 画像メモリS

★画像Acc ← LUT変換 (画像Acc : グレイコード → 二進変換テーブル)

おわり

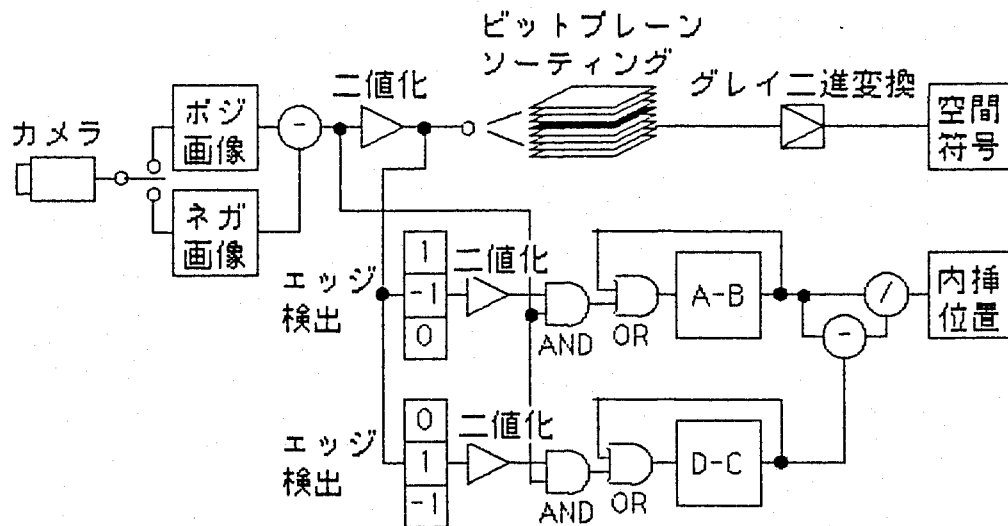


図4-5 計測処理の画像オペレーション

この手続きの結果、

画像Acc = 空間符号画像

画像メモリU = パターン境界上側濃度データ〔ポジ画像-ネガ画像〕

画像メモリV = パターン境界下側濃度データ〔ポジ画像-ネガ画像〕

が得られている。この三枚の画像データを制御用コンピュータに転送した後、

$$\text{パターン境界位置} = U / (U - V) \quad (4-1)$$

を計算する。測定空間を256分割した場合、画像プロセッサによる301ステップの画像オペレーションと、制御用コンピュータによる各1回ずつの画像間減算、除算が必要となる。

4-3 液晶光学シャッタによるパターン光投影

特殊高分子からなる液晶素子は、PLZTセラミック素子と並び、光透過率が印加電圧で変化する電気光学効果を持った代表的なデバイスの一つであり、

- (1) 電氣的駆動のしやすさ。
- (2) パターンレイアウトに自由度がある。
- (3) 大型素子が比較的製作しやすい。

ことから、ポケットTVやラップトップコンピュータなどのパネル表示素子として広く用いられて

いる。単に光を通過・遮蔽するスイッチング光シャッタとしても、ページプリンタの光書き込み部や立体テレビ用の眼鏡などに組み込まれ使用されている。

このような特長を持つ液晶素子をストライプアレイ状の光学シャッタとして構成し、パターン光投影プロジェクタのパターン生成用マスクに使用する。

4-3-1 パターン光プロジェクタに求められる条件と液晶光学シャッタ

本計測システムでは、グレイコードパターン光プロジェクタがもっとも重要な装置であり、システム全体の計測精度を決定する。したがって、投影パターンなどプロジェクタに要求される条件は多く、

- (A) 投影パターンに歪がないこと
- (B) 投影パターンの切り替えが速いこと
- (C) 投影パターンの中で位置ずれがないこと
- (D) 投影パターンのコントラストがよいこと
- (E) 電子的にパターンを制御できること
- (F) 耐熱性があり長寿命なこと

があげられる[Sato 86]。マスクとレンズ系による結像からパターンを投影する場合、以上のプロジェクタに対する条件はそのままマスクに対する条件となる。

グレイコードパターンが描かれた薄板をマスクに用いる限り、マスクの切り替えに機械機構が必要となり、パターンの切り替え時間と位置決め精度に限界がある。マスクとして光透過率をスイッチング制御できる電気光学素子を配した場合、機械機構は必要なく、上記の条件すべてを満足できる。このとき、液晶素子はコントラストの面を除き、このような光学シャッタとして優れた特性を持っている。しかも、本計測法での画像計測処理が相補パターン光の差分二値化の基づいているため、低コントラストの投影光でも安定に計測でき、コントラスト性を問題とする必要はない。

4-3-2 液晶光学シャッタの仕様

本計測システムに用いた液晶光学シャッタの外観を図4-6に示し、液晶仕様を以下に記す。

- (a) ツイステッドネマティック(TN)液晶
- (b) スタティック駆動

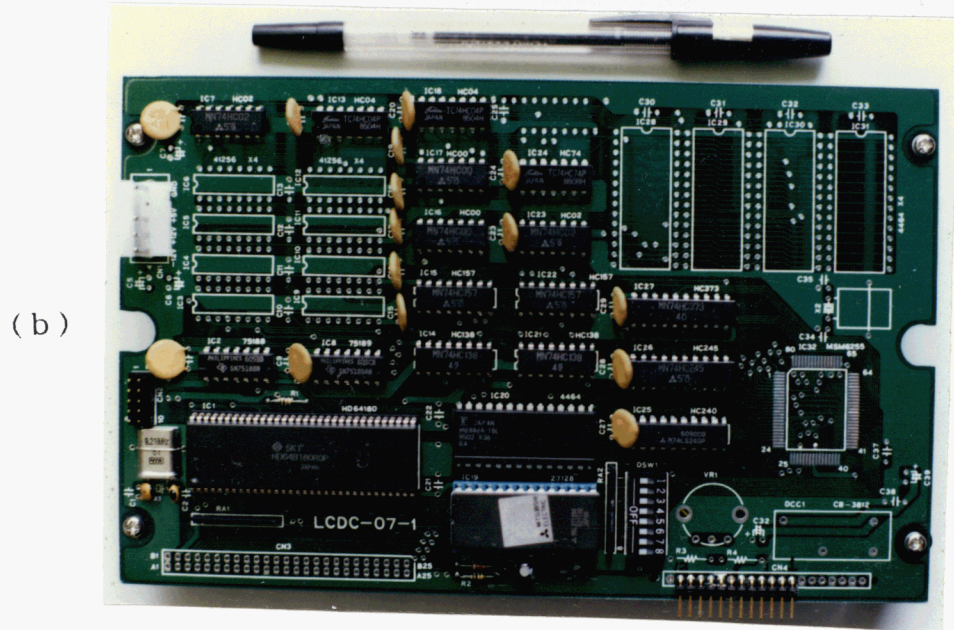
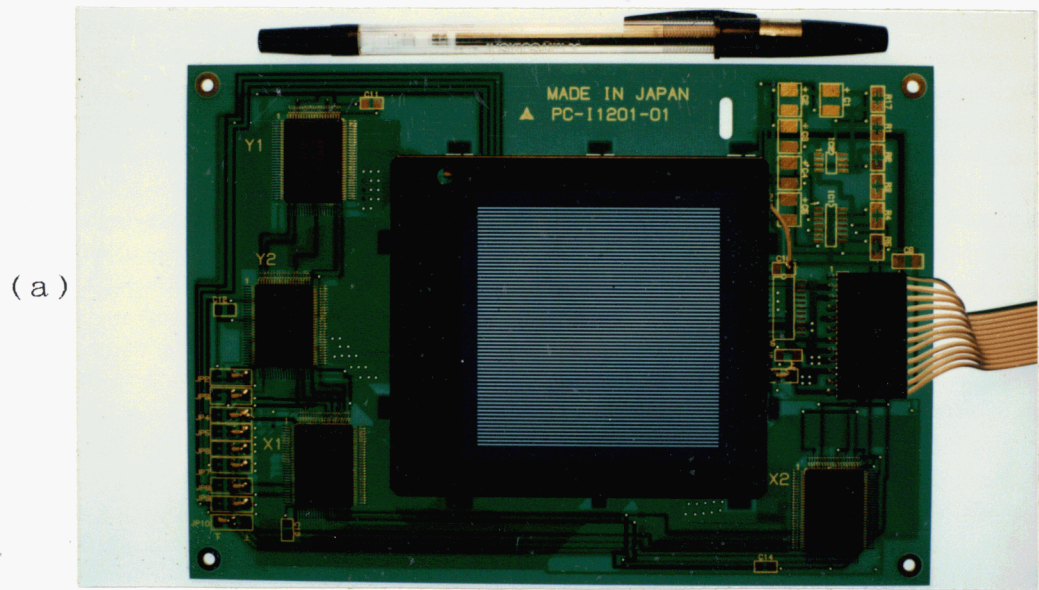


図4-6 液晶光学シャッタ (a) 本体、(b) コントローラ

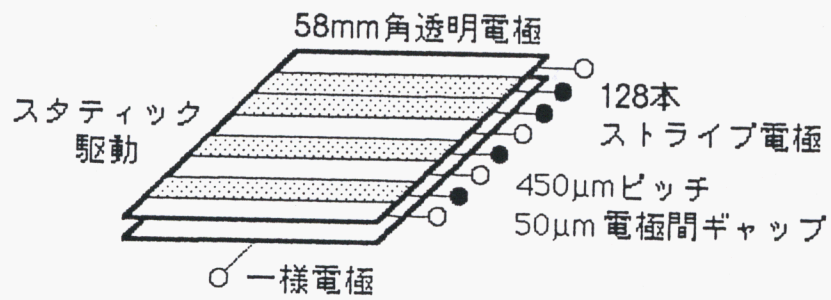


図4-7 液晶光学シャッタのパターン仕様

光学シャッタとしての構成を図4-7に示す。任意のストライプパターンが生成できるよう、ストライプ光学シャッタをアレイ状に構成している。パターン仕様を以下に記す。

- (イ) 58mm×58mm開口部
- (ロ) 128本ストライプシャッタ
- (ハ) 450μmストライプ電極ピッチ
- (ニ) 50μm電極間ギャップ

この液晶光学シャッタの温度-垂直コントラスト特性を図4-8(a)に、温度-スイッチング特性を(b)に示す。プロジェクタの光源の熱で高温になるため、60:1以上のコントラスト、10ms以下のスイッチング時間が使用状態での性能となる。これは、ともにパターン光プロジェクタ投影用の光学シャッタとして十分な性能である。

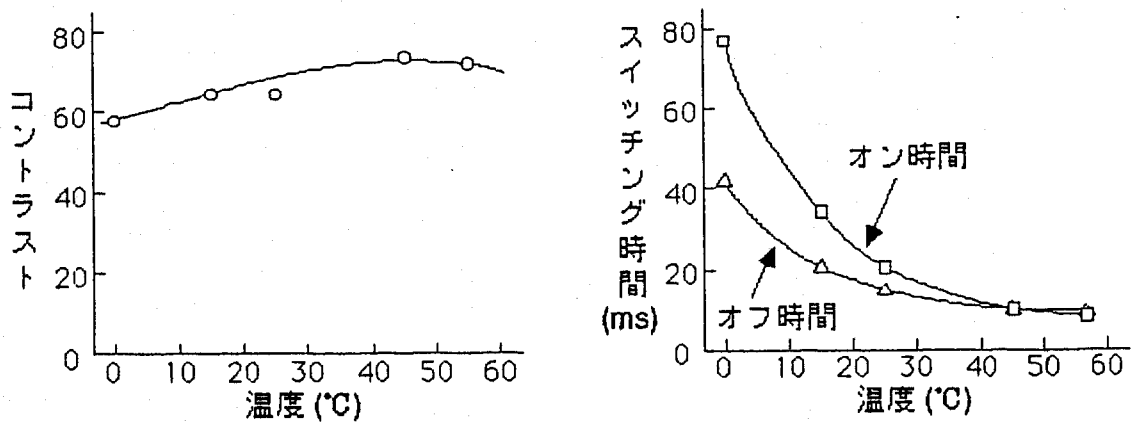


図4-8 液晶光学シャッタの特性
(a) 温度-垂直コントラスト特性、(b) 温度-スイッチング時間特性

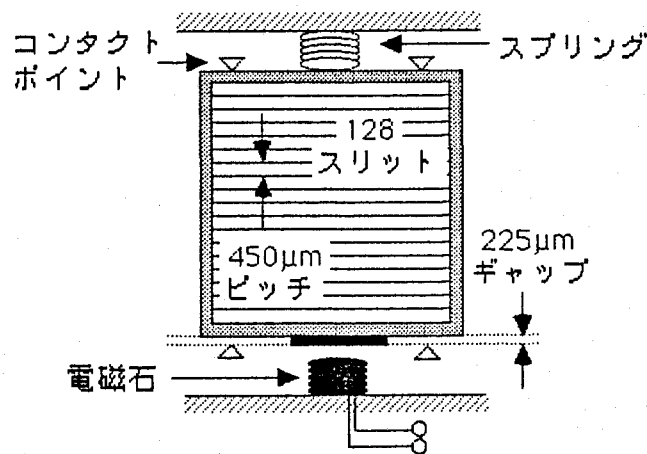


図4-9 液晶光学シャッタの半ピッチずらし機構

4-3-3 液晶光学シャッタの半ピッチずらし

液晶光学シャッタを半ピッチ移動させる機構を図4-9に示す。スプリングで基台の一方へ指示されている液晶シャッタを、電磁石の励磁により微小に(225 μm)移動させる。現在、移動の整定時間には約500msを見込んでいる。ギャップの調整や移動時間に問題があるが、ピエゾ素子など電歪素子や磁歪素子を用いれば、高速に移動させることができる。

4-4 システムパラメータのキャリブレーション

本計測システムは、カメラとプロジェクタを空間中の任意の位置に配置して計測でき、その計測結果はその配置に関係なく独立した世界座標で得ることができる。これは、カメラやプロジェクタの局所座標系や世界座標系を、同次座標系表現で統一して記述することにより、それらの間の位置関係(平行移動、回転移動、スケール変換)を明示できるためである。

カメラ座標系と世界座標系との間は 3×4 の行列であるカメラパラメータ、プロジェクタ座標系と世界座標系とは 2×4 の行列のプロジェクタパラメータで関係づけられている。任意の計測配置を取るため、カメラパラメータ、プロジェクタパラメータは、世界座標が既知の基準物体を用いて較正しなければ、その具体的な値を得ることができない。それぞれ、6点および8点の基準点に対して、その世界座標値とカメラ座標値、プロジェクタ座標値が与えられれば較正することができる(付録A参照)。しかし較正の精度を高めるため、実際には数多くの基準点を用いる。

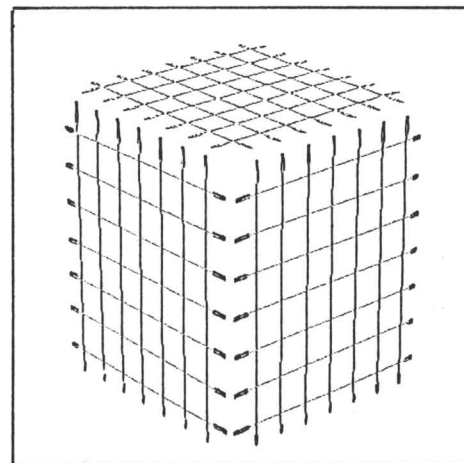
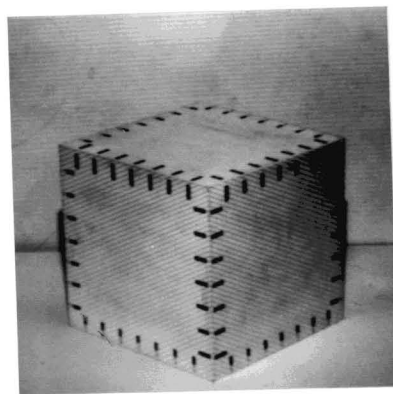


図4-10 システムパラメータのキャリブレーション
(a) 基準立方体、(b) 仮想基準点(149点)

本計測システムでは、図4-10(a)の16cm立方体の基準立方体を用いて較正を行う。立方体の三稜線が、世界座標系のXYZ座標軸となる。立方体の一つの面につき、対向する7組の黒い指標が上下左右にある。この指標の座標は既知である。この指標から、(b)に示すような仮想格子を作り、

その格子点を基準点とする。一面につき49点、三面で計147点が基準点となる。プロジェクタパラメータは、基準点における世界座標値とプロジェクタ座標値が必要であり、参照光を実際に投影し計測処理して得る必要がある。その際、黒い箇所は正しく計測が行えないので、このように面上に仮想的な基準点を置くことで、信頼できるプロジェクタ座標を得ている。以上のキャリブレーションはプログラムにより自動的に行うことができる。

4-5 計測時間

本計測原理に基づく計測装置の計測時間に関して、その支配要因と実際のシステムにおけるリアルタイム計測性を検討する。そのうえで、高速化のためのシステムアーキテクチャを提案する。

4-5-1 計測時間を決定する要因

本計測システムの計測処理は、グレイコードパターン光をシーンに投影し空間符号画像を得る計測過程と、得られた空間符号画像から距離画像を計算する算出過程の二つに、大きく分割できる。前者の計測過程の処理時間は、投影するグレイコードパターン光の枚数、液晶光学シャッタの切り替え時間、画像プロセッサでの画像オペレーションの数で決定され、次式で定義される。

$$\begin{aligned} \text{計測過程} &= 2 \times \text{空間符号化ビット数} \times \text{パターン切り替え時間} \\ &+ \text{画像オペレーション数} \times \text{フレーム時間} \\ &(+ \text{液晶シャッタ半ピッチ移動時間}) \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$\text{画像オペレーション数} = 7 \times \text{空間符号化ビット数} + 3 \quad (4-3)$$

パターン境界の内挿処理を行った場合は、次のようになる。

$$\text{画像オペレーション数} = 37 \times \text{空間符号化ビット数} + 5 \quad (4-4)$$

ただし、(4-3)、(4-4)式は4節に示した画像プロセッサの場合であり、用いる画像プロセッサに依存する計算式である。

後者の算出過程は、画像プロセッサ・制御用コンピュータ・認識用コンピュータ間でのデータ転送時間、制御用コンピュータでの内挿処理時間、認識用コンピュータでの三次元位置計算時間で決定され、次式で定義される。

$$\text{算出過程} = \text{画像転送時間} + \text{三次元位置計算時間} \quad (4-5)$$

パターン境界の内挿処理を行った場合は、次のように変更される。

$$\text{算出過程} = 3 \times \text{画像転送時間} + \text{画像間減算時間} + \text{画像間除算時間} \quad (4-6)$$

4-5-2 システムの計測時間

本計測システムでは、NTSCビデオ信号を用いているため一フレーム時間は33msである。液晶シャッタのパターン切り替え時間に1フレーム時間、液晶シャッタの半ピッチ移動時間に500msを見込んでいる。したがって、液晶シャッタの半ピッチずらしによる倍精度化を行い、空間符号化ビット数を8とした場合、計測過程に約3秒を要する。

算出過程は、そのほとんどを、高計算コストの同次座標系三次元位置計算が占めており、4台のワークステーションによる並列処理で59秒を要する。

4-5-3 高速化へのシステムアーキテクチャ

4節2で示した計測過程の中で本質的に処理が重複できないところは、グレイコードパターン光を順次投影しシーンを撮像する入力過程のみである。画像間減算、二値化、ビットプレーン挿入、二進コード変換の一連の画像処理過程は、直列に処理しなくてはならないが、それぞれ画素に独立な処理であるため、画素ごとにパイプライン処理できる。したがって、各々の画素演算回路をパイプライン配置することにより、1フレーム時間で処理することができる。このアーキテクチャを図4-11に示す。特殊なロジックハードウェアを用いなくても、このようなパイプラインアーキテクチャを持つ専用画像処理装置を実現することはさほど困難ではない。

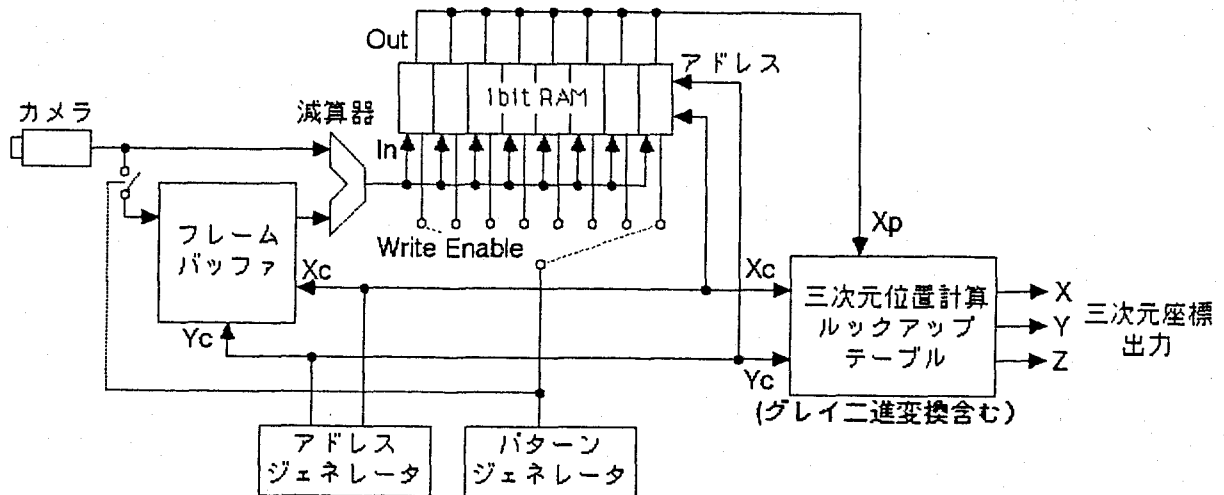


図4-11 専用計測処理装置のためのパイプラインアーキテクチャ

このとき、計測過程の処理時間は次式のようになり、液晶シャッタの半ピッチずらしによる倍精度化を行わない場合、約0.5秒となる。この値が本計測原理に基づく計測システムの理論的計測速度

限界となる。

$$\begin{aligned} \text{計測過程} &= 2 \times \text{空間符号化ビット数} \times \text{パターン切替時間} \\ &+ 1 \text{ フレーム時間} + (\text{液晶シャッタ半ピッチ移動時間}) \end{aligned} \quad (4-7)$$

現在、システム全体の処理時間のほとんどを費やしているのが、算出過程の三次元座標値計算である。これは、同次座標系による行列演算の中に逆行列演算（付録A-2）が必要であり、計算コストが高いためである。しかし、この処理も画素ごとに独立な処理であり、処理を並列化することができる。DSP（Digital Signal Processor）を並列配置するなどして、容易に高速化が可能である。

まったく別な方法として、三次元座標値計算をルックアップテーブル化[Sato 84]することによっても高速化できる。この場合、三次元座標値計算が単に一回のメモリアクセスで済むので、1フレーム時間で十分処理可能となる。ルックアップテーブルには三次元配列が必要であり、数十Mbyte以上のメモリを要することとなるが、実現に困難な点はない。

4-6 計測システムのまとめと今後の課題

生産工程、検査工程など工業分野で実用に供されている距離画像計測装置のほとんどはスリット光投影法に基づくものであり、時系列空間符号化投影法は用いられていない。それは、

- (1) 高速かつ精確な光パターンの投影が困難、
- (2) 計測精度に限界がある、
- (3) 様々な物体表面に対して安定に計測できない、

などの問題点が利用されない理由といえる。

本計測システムでは、液晶光学シャッタをグレイコードパターン光の投影に用いることにより、(1)と(3)の問題を解決している。液晶光学シャッタを用いたプロジェクタは、幾何学歪みのないグレイコードパターンを投影でき、かつ高速にパターンを切り替えることができる。さらに、相補パターンが生成可能で、照明や物体表面のテクスチャに影響されない安定な計測が可能になり、計測可能な対象物の範囲を広げている。これらにより、原理的に高速計測の面で優れている時系列空間符号化投影法の、実用化を妨げる問題は解決される。

(2)の計測精度は、画像入力の分解能、液晶シャッタのストライプ数で制限を受ける。画像入力の面では、512×512画素の空間分解能でNTSCビデオ信号の限界に達しているが、ハイビジョン用の3000×2000画素の高精細カメラの利用が考えられる。液晶光学シャッタの面からでは、超LSIプロセスを利用することにより高分解能なものを製作し、STN液晶の利用によって高コントラスト化もで

きるので、計測精度の向上を図ることができる。

計測時間は、前節で述べた画像処理装置のシステムアーキテクチャを実現することで、NTSCビデオカメラを画像入力に用いる場合でも、最高0.5秒まで高速化が行える。

第5章 距離画像に基づく曲面物体の記述

「自由な曲面からなる未知物体の形状の記述」、つまり実物や写真を用いずに物体の形を他人にどう説明するか、単純に考えても難しい問題である。例えば、ラクダの形をどう表現したらよいか[Imamiya]。CADで用いられているようなパラメトリック曲面[Yamaguchi 82a]は、近似次数を増すことによって対象の形状を忠実に数値化でき、定量的な記述は行える。しかし、形状の性質を定性的に記述しているものではない。人が説明する場合、ふくらみ・くぼみ・くびれが幾つあり、それがどの箇所にどのような位置関係にあるかといったように、定性的な性質をまず第一に述べるであろう。記述とは、このように定量と定性の両面から行う必要がある。距離情報を用いれば、単に対象物体の形状の性質を認識するだけでなく、シーン中での物体の位置や姿勢方向、さらに物体どうしの相対的な関係も記述できる[Sato 84, 85b]。

多面体と簡単な二次曲面プリミティブ(円筒、円錐、球)の組合せからなる物体は、CADやCGで扱われているようにB-Reps表現[Yamaguchi 82b]あるいはCSG表現[Yamamoto 83]が行えれば、対象の三次元構造を計算機上で再構成でき、シーンの記述が行えたといえるであろう。特にCSG表現は対象を体積表現[Ballard 82]したものであり、完全なる記述といえるが、通常の計測手段で得られる情報(濃淡画像、距離画像)は対象の表面に関する情報しか得られず、背面や内部をも正確に記述するCSG表現とは、直接対応づけることは難しい。濃淡画像には簡易表現として線画表現[Shirai 87]があるが、距離画像には適した記述形式は未だ確立されておらず、研究が進められている。

本章では、前章で述べた距離画像計測システムにより得られる距離画像から、未知の曲面物体からなる対象シーンの記述を行う。「シーンの記述」という用語を、本論文では以下のように定義する。

- (1) ある視点から撮像した単一の距離画像を記述対象とする。
- (2) シーン中、同一の形状特性を持ち連結した一つの領域を最小記述単位とする。
- (3) 領域間のエッジ情報を、記述単位間の接続記述とする。
- (4) 領域をノードとし、エッジをアークとするネットワークを自動的に生成する。

本論文で扱う「対象シーンのクラス」を、以下のように設定する。

- (A) 多面体
 - 平面が接続して構成される物体
- (B) 曲面体
 - 複数の二次曲面が滑らかに接続して構成される物体

- 複数の二次曲面が接続し稜をなして構成される物体
- (C) 両者の複合体
 - 平面と二次曲面が接続し稜をなして構成される物体

したがって、記述最小単位は単一の平面ないし二次曲面からなる領域であり、おのずと接続関係も限定されたものとなる。

本章で述べる「シーンの記述」は、次章での「シーンの認識」を最終目標として行う。距離画像の計測から認識までの、処理とデータの流れを図5-1に表す。既知物体を扱う場合（モデル駆動）は認識段階まで処理を進める必要はなく、この記述段階でモデルとの照合処理を行うことで、応用目的は通常達成できる。

以下、距離画像から同一の形状特性を持った一つの連結領域を切り出すセグメンテーションについて述べ、次に各領域を二次曲面に見みなしたうえでの解析について述べる [Shirasawa 86, 87]。

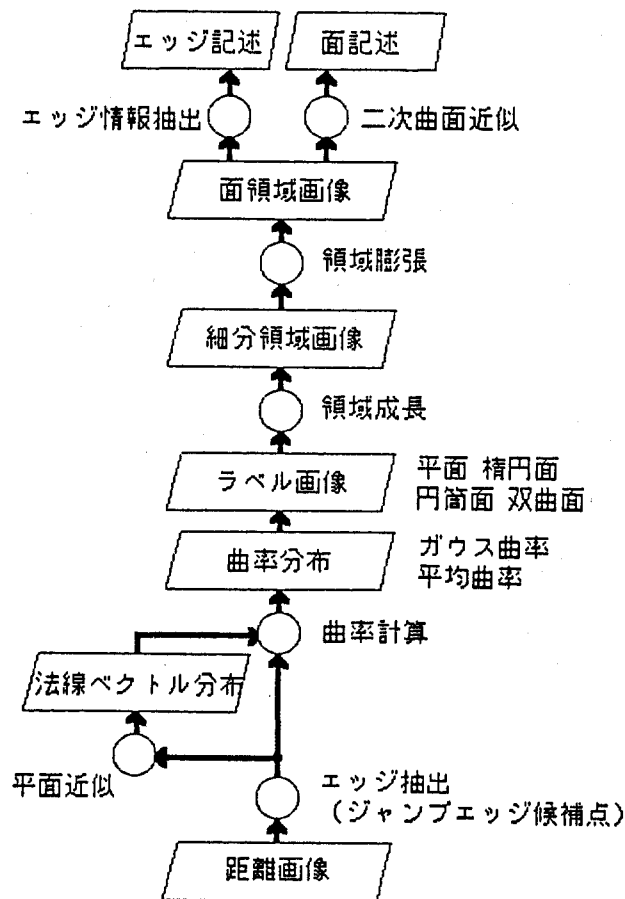


図5-1 距離画像によるシーン記述の処理の流れ

5-1 光投影法によるシーン記述とモデル表現

5-1-1 光投影三次元計測に基づくシーンの記述

◆スリット画像を用いた多面体の記述

最初に光投影による三次元計測を用いて多面体を認識したのは白井[Shirai 72]である。スリット光をシーンに投影し、それを走査することにより複数本のスリット画像を得た。一本一本のスリット光輝線を識別し絶対的な三次元座標を計測するものではなく、輝線群の歪んだ縞模様から物体の概略構造を推定した。各スリット光輝線は直線近似され、その方向と隣接する直線との間隔から平面を構成する直線グループを求めた(スリット光が平行投影と見なせる場合、等間隔のスリット光が平面と交われば、等間隔で同方向の輝線が現われる)。平面部分が見つかったら、その線群を最小二乗法によって平面の方程式を求め、すべての平面が見つかった後で多面体にまとめあげた。

この方法は、距離画像による記述というよりも、スリット光輝線のなす縞模様の解析から、間接的にシーンの記述を行っているものと考えられる。

◆一般円筒法

スタンフォード大学では、自由物体を解析するために一般円筒を用いて物体をモデリングした。一般円筒とは、中心軸が滑らかな曲線をなし、その断面が軸に沿って連続的に変化するものであり、掃引物体ともいわれる。初期の研究では断面に円が使われたが、次第に楕円や多角形も使われるようになった。

AginとBinford[Agin 76]は、スリット光輝線がつくる画像を直接用いて、まず対象物体のおおまかなセグメンテーションを行い、三次元座標への変換はその後に行った。三次元計測には、X字状に直交したスリット光を参照光とする計測法を用いた。入力画像から検出された光のすじは、細線化され点列として表された。次に、隣り合う点列が画像中でほぼ平行であるならば、それを一つの一般円筒を構成するグループとした。得られたグループから中心軸を推定し、推定された軸に直交する平面上にある三次元座標データを使い、最小二乗法により断面の円を決定する。一つの円が決まると、その円を含む平面に垂直な方向に中心点を移動させ、同様にして円を求める。以上の処理を繰り返すことにより一般円筒を成長させ、物体をモデル化し記述した。

NevatiaとBinford[Binford 77]はこの考えをさらに進めた。一般円筒の作り方は同様であったが、三次元座標への変換は省略した。円筒をより一般化し、エッジをもとに物体の境界を得た。彼らは、一つの物体を滑らかな一般円筒で表される部分に分割し、部分と部分はジョイントによって結合した。そして、部分とジョイントからなるツリー構造により、物体を記述した。

◆接続点辞書を用いた距離画像の解釈

杉原[Sugihara 77]は、Huffman、Clows、Waltsらの接続点辞書の拘束条件を利用し、距離データ

を解析した。スリット光を投影した画像を入力し、輝線の急変する部分を輪郭として抽出する。得られた輪郭に対し、距離画像を直接用いて線のラベル付けを行なう。次に接続点辞書を使って、抽出された縁線の接続点を調べ不可能接続点があれば、まだ発見されていない内部稜線があるとして追跡を行う。このように推定される縁線、稜線を方向グラフとしてまとめ、物体を立体線画として記述した。

◆領域法

上記の方法は、計算量を削減するため、画像全体の三次元位置データを得るのではなく、まずスリット画像そのものから物体認識に必要な情報を得た後、必要に応じて三次元座標を算出していた。前章までに述べたように、距離画像を得ることは、計算機の高速化と距離画像測定法の発達により問題とはならなくなってきた。このため、距離画像そのものから、すべての処理を三次元データに基づき行なおうとする方法が試みられた。

大島 [Oshima 79] は、面素の概念に基づいて距離情報を処理するアルゴリズムを開発した。この方法では、平面と単体の二次曲面で構成される物体に対象シーンを限定した。まず、距離画像を互いに重なり合う小領域（面素）に分割し、それぞれを最小二乗法で平面近似した。次に、隣接する部分を併合して、より大きい平面領域を作った。領域を法線の方向の分散に基づいて、分散が小さければ平面、大きければ曲面、それ以外は不明領域とした。曲面領域は、周辺にある曲面領域や不明領域を併合して成長する。また、残された不明領域は隣接領域に併合した。併合処理が終わると曲面領域に二次曲面を当てはめ、記述を行った。

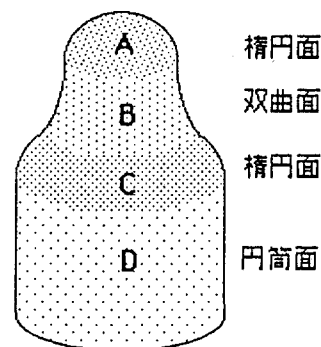


図5-2 連続二次曲面の例

本論文で扱う対象シーンのクラスは、平面と単体の二次曲面という大島が対象としたクラスに、滑らかに連続した二次曲面からなる物体のクラスを加えたものである。このような物体の典型例を図5-2に示す。以下、この物体表面を「連続二次曲面」と呼ぶ。しかし、この拡張にともない、領域分割の方法に局所曲率の同定という、まったく新しいアルゴリズムが必要となった。

5-1-2 三次元物体のモデル表現

三次元シーンを記述する際、個々の物体の記述法として、視点の変化や隠ぺいによる画像上での対象物の見かけの形状変化に、柔軟に対処できることが必要である。物体記述における、代表的な三次元物体のモデル表現法とその特徴について述べる。

◆体積指向型モデル

三次元物体の形状を体積的特徴によって表現する方法である。この方式のモデルは、画像から得られる物体の表面形状のデータと直接照合を行うのが難しいという、共通の欠点がある。

A : CSG (Constructive Solid Geometry) [Requicha 82]

この方法は、基本物体（物体プリミティブ）を集散的に組み合わせることにより記述を行うものである。複雑な物体は、基本物体を端末ノードとし、基本物体間の幾何学的論理演算を行う演算子を中間ノードとして持つツリー構造で表現される。この方法は、記述のしやすさ、表現の簡潔性、柔軟性において優れており、抽象的なモデル記述も可能である。

B : 一般化円筒 (Generalized Cylinder) [Binford 77]

一般化円筒は、前述したように、

- ・ 中心軸となる空間曲線
- ・ 中心軸と直交する平面上での物体の断面形状
- ・ 中心軸方向に沿った断面形状の大きさの変化規則（掃引規則）

より記述される。すなわち、断面を軸に沿って移動させながら、その形状を掃引規則により変化させたとき、断面によって形成される三次元空間として定義される。複雑な物体はいくつかの一般化円筒を組み合わせで表現する。この表現法は、記号表現によって完結に表現でき、パラメータ化による一般的モデル記述も容易に行える。

◆表面指向型モデル

物体のモデルを表面形状をもとに記述するものであり、モデルとデータの照合が取りやすい利点がある。

a : ウィングドエッジ (Winged Edge) [Baugart 72]

部分物体、面、稜線、頂点を記述要素とし、それらの間の接続関係を表すネットワークによって多面体の形状を構造的に表現する。記述の中心となる稜線はベクトルとして表現され、頂点にはその三次元座標が、面にはそれを構成する稜線や穴の有無などが属性とされる。これは、ワイヤフレームモデルに面を記述要素として付加したものともいえる。

b : 拡張ガウス像 (Extended Gaussian Image) [Ikeuchi 81]

拡張ガウス像は、物体表面法線の単位ベクトルのガウス球面上における空間ヒストグラムである。同一の拡張ガウス像を持つ凸多面体は互いに合同である。このモデルは簡潔で、距離画像データとの整合性もよい。問題点としては、

- ・複雑な物体の場合、表現が一意でない。
- ・パラメータ化による定量的モデル化ができない。

などがある。

c : 平・曲面パッチによる記述 [Oshima 82]

物体表面をいくつかの部分表面や曲面のつぎ合わせとして表現し、それらの間の隣接関係を記述する。このモデルは形状記述の厳密性はないが、記述単位が部分曲面というかなり大局的な特徴であるため、入力データとして直接三次元情報が得られる場合には比較的容易に記述が行える。

本論文で行う記述表現は、この中で、表面指向型モデルの平・曲面パッチによる記述に基づいている。

5-2 エッジの認識

距離画像は、シーンの三次元位置・形状の情報から構成されている。そこに現われるエッジ全てがシーンの三次元構造を反映しており、シーンを認識するうえで重要な手がかりとなる。濃淡画像でのエッジは、単に明暗が急変する箇所という意味でしかなかったが、距離画像では、三次元構造にエッジが直接対応している [Matsuda 83]。

ここでは、距離画像におけるエッジの性質を述べ、その検出方法 [Takagi 86] と記述方法を検討する。

5-2-1 エッジの種類

距離画像から得られるエッジの種類としては、図5-3に示すように、ジャンプエッジ、ループエッジ、スムーズエッジがある。

◆ジャンプエッジ

距離画像において、その画素値である三次元座標が不連続である部分をジャンプエッジと呼ぶ。データ処理の対象としては、濃淡画像におけるエッジと同じものである。しかし、濃淡画像ではテ

キスチャによるエッジなど物体の三次元構造を反映しないものに対して、距離画像のジャンプエッジはすべてその構造を反映している。物体をカメラ方向から観測したときの、物体の輪郭線（物体が背景を隠す境界線）、ある物体が他の物体や自分自身を隠す境界に現われ、シーンから物体を切り出すもっとも有力な手がかりとなる。

すなわち、ジャンプエッジは、カメラ位置から観測した際のオクルード（Occlude）境界である。ジャンプエッジを挟み、カメラとの距離が近い方の物体が、エッジ反対側の物体をオクルードしていることになる。したがって、カメラに近くオクルードしている方の物体の輪郭は、ジャンプエッジの形状として正しく表現されている。しかし、オクルードされている物体に関して、ジャンプエッジは単にオクルードされているという事実を保証するだけであり、その形状は意味を持たない。

◆ルーフエッジ

物体の稜線をルーフエッジと呼ぶ。物体表面の傾きが急変する部分であり、平面と平面とが接続する境界には必ず生じ、平面と曲面、曲面と曲面との接続境界にも生じることがある。凸の場合と凹の場合が存在する。

◆スムーズエッジ

物体表面の傾きは変化しないが、曲率が変わる部分をスムーズエッジと呼ぶ。滑らかに接続する曲面と曲面との境界に生じる。例えば、砲弾状の物体は、円柱と半球が融合した形状である。その境界は、滑らかであり、稜線や陰影の変化などは現れない。しかし、この境界を境にし、楕円面、円筒面と曲率は変化している。

このような境界は、対象シーンのクラスとして連続二次曲面を加えることによって、初めて生じる。

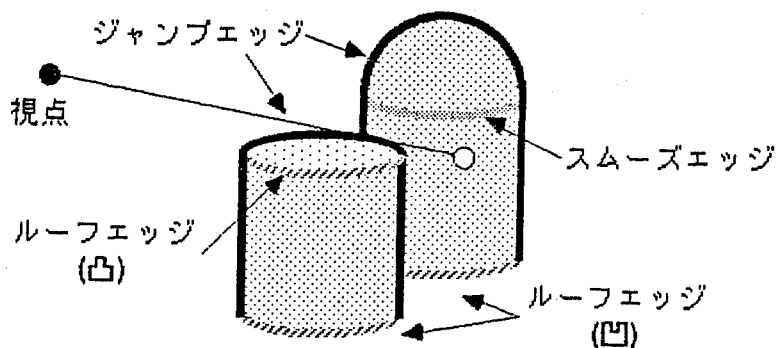


図5-3 距離画像におけるエッジの種類

5-2-2 エッジの検出

次節で述べる法線ベクトルや曲率の計算にジャンプエッジが必要になるため、すべての処理に先立って距離画像より抽出する。ルーフエッジとスムーズエッジは、領域が抽出された後、領域の境界を追跡することにより検出する。

◆ジャンプエッジの検出

ジャンプエッジは、距離画像において画素値の不連続点であるから、濃淡画像処理におけるエッジオペレータで検出可能である。しかしながら、対象物体の大きさにより最適な閾値は大きく変化し、合理的な閾値決定は行えない。一方、2章6節で述べた空間符号画像でも、ジャンプエッジにおいて空間符号値が不連続となる。この不連続量は物体の大きさに影響されない特徴があるので、この空間符号画像を微分することによりジャンプエッジ点は安定に抽出可能である。各エッジ点は領域抽出後、線分化されジャンプエッジとなる。

さらに、ジャンプエッジに対し、オクルードエッジか被オクルードエッジかを判定する。注目している画素とその四近傍の画素について、視点との距離 d をそれぞれ求める。注目点画素の距離値 d_0 と四近傍の距離値との差 Δd から、次のように識別する。

$\max \Delta d > T$ の時、オクルードエッジ

$\min \Delta d < -T$ の時、被オクルードエッジ

ただし、 T は閾値であり、1 cm 程度が経験的に適当である。距離の差の最大値と最小値を使うことで、視線方向に対し角度の浅い平面などがエッジとして抽出されることを防いでいる。

◆ルーフエッジ・スムーズエッジの検出

ある領域が他の領域に接続するとき、その接続線はルーフエッジまたはスムーズエッジとなる。したがって、まず領域を抽出した後に、各領域の境界を追跡することによりこれらのエッジを検出する。

ルーフエッジは面の傾き（法線ベクトル）が、領域境界の前後で変化するのに対し、スムーズエッジは変化しない。図5-4のように、領域の輪郭線から、その前後の法線ベクトルを調べることにより両者を区別できる。しかし、不適切に領域の検出が行われると、ルーフエッジやスムーズエッジは実際の位置からずれて検出される。そのため、本来はルーフエッジであるものが面上にずれて検出されると、スムーズエッジと誤認識されることがあり注意を要する。

以上のアルゴリズムに基づいて処理を行う際、ノイズの影響より、長さの短いエッジも数多く発生する。また、分断されている可能性もある。そこで、エッジの連結や排除が行われる。連結されるエッジは、同じ領域と領域を分けるエッジに限るが、その条件は、図5-5に示すように、

- ・一つのエッジの端点と他のエッジの端点が近接している。
- ・二つのエッジが、他の短いエッジを介して連結している。

の場合に限定する。

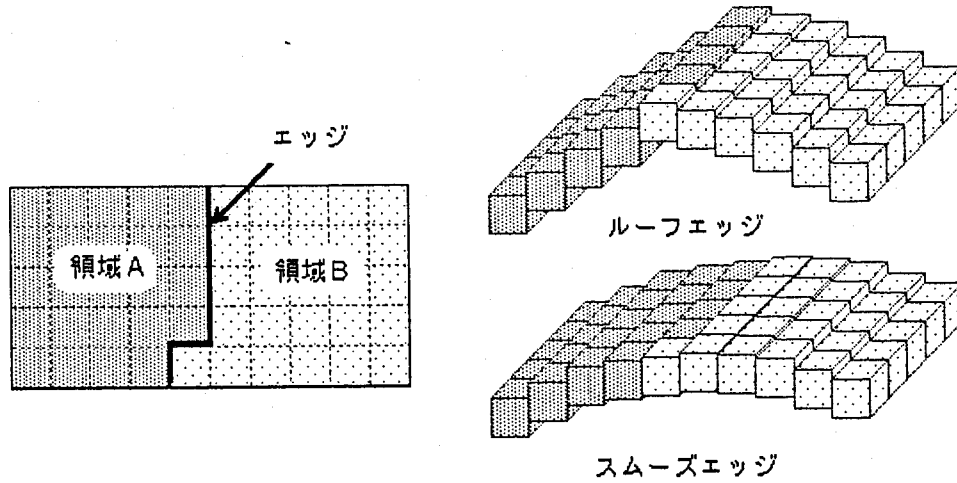


図5-4 ルールエッジとスムーズエッジ

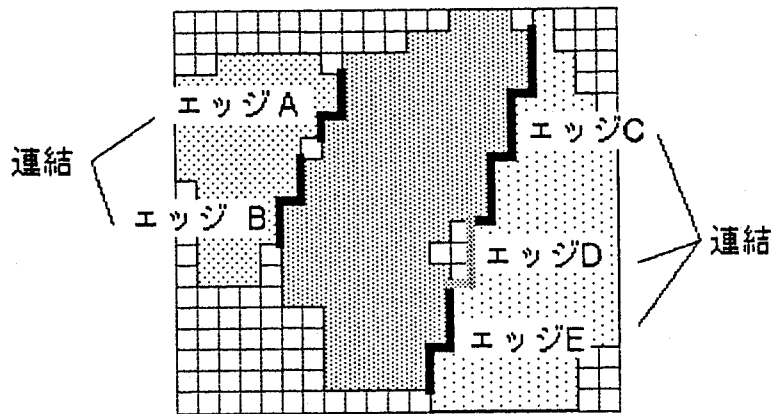


図5-5 エッジの連結

5-2-3 エッジの記述

エッジを記述するための特徴量を以下に示す(図5-6)。

(a) ラベル

エッジの種類を表すラベルである。

- ・オクルードしているジャンプエッジ
- ・オクルードされていないジャンプエッジ

- ・凸のルーフエッジ
- ・凹のルーフエッジ
- ・スムーズエッジ

(b) 長さ

エッジの画像中での長さを表す。エッジの信頼度の指標ともなる。

(c) 両側の領域

エッジは二つの領域間に現われるので、その二つの領域の識別子を特徴量として持たせる。これにより領域間の接続関係が導かれる。

(d) 端点

二次元画像中（カメラ座標系）でのエッジの端点である。

以上の方法により、画像中でエッジに相当する画素がラベリングされているので、これをエッジ画像として独立させる。

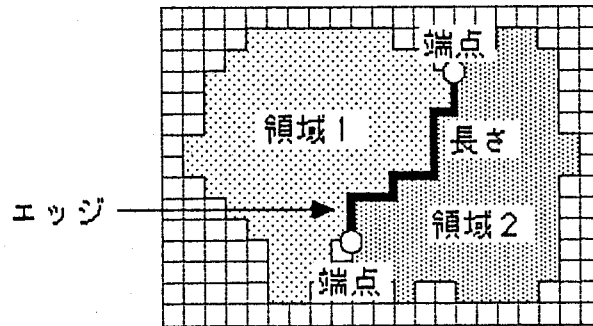


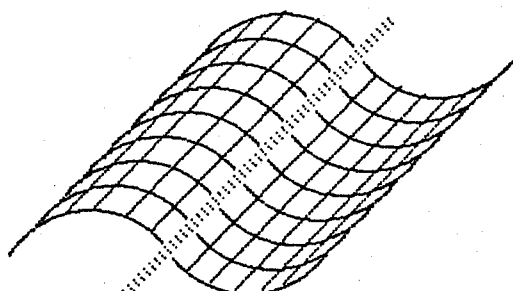
図5-6 エッジの記述

5-3 局所形状の認識

対象シーンとして連続二次曲面を考える場合、この連続二次曲面を二次曲面の単体にセグメンテーションするためには、その手がかりとなる曲面の局所的な形状を認識する必要がある。

距離画像を用いた物体構成面のセグメンテーション法として、まず三次元位置の不連続性と法線ベクトルの不連続性を検出し、そのエッジを基準にしセグメンテーションを行うもの [Sugihara 77]がある。しかし、連続二次曲面の接続境界では明確なエッジは存在せず、法線ベクトルの向きも滑らかにしか変化しないため、従来のエッジ検出では抽出できない。そこで、曲面のマイクロな形状を表すパラメータとしてガウス曲率、平均曲率を求め、領域を基準としたセグメンテーションを行

なう。この二つのパラメータを使うことにより、曲面のおおまかな形状を知ることができる。例えば、図5-7に示すような凸曲面から凹曲面へ滑らかに変化する曲面では、その境界において平均曲率が正から負へと変化するため曲率の符号を調べるだけでセグメント化できる。



凸面 接合部 凹面

図5-7 凸曲面と凹曲面の滑らかな接続

5-3-1 法線ベクトル

曲率を計算するためには、物体の三次元位置の他に、法線ベクトルを必要とする。各画素における法線ベクトルは、その画素を取り囲む小領域を最小二乗法により平面で近似することにより求める（付録B-1参照）。

また、平面近似のためのマスクサイズは距離画像の計測誤差と標準化密度（カメラ座標系におけるスケール係数）により決まるものである。ジャンプエッジや不可視領域の近傍の場合では、マスク内に異なる面が混在し法線ベクトルが求められない場合が生じる。このため、マスクを動的に変形させ、ジャンプエッジを含まないように対処するが（付録B-1参照）、それが困難な場合は”法線ベクトル計算不可能”のラベルを付加する。

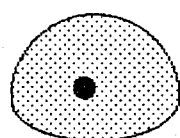
5-3-2 ガウス曲率、平均曲率による認識

ガウス曲率、平均曲率 [Honbe 66] の物理的意味は、注目点を通る二つの主曲率のそれぞれ積および平均である。これらは、表面の見え方には関係なく、同一の形状であれば同一の値を取る特徴があり、各画素ごとに局所的な形状を記述できる。それらの符号のみからでも、楕円面（正、負）、円筒面（正、負）、双曲面、平面の六種類に分類でき、曲面形状の定性的な情報を得ることができる。ガウス曲率、平均曲率の符号と曲面の形状との関係を、表5-1に示す。円錐面上の点は、円筒面型の形状として分類される。この六種類のラベルを各画素ごとの局所形状に対して付与し、ラベル画像を得る。

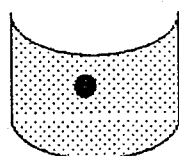
ガウス曲率、平均曲率は、注目点と四近傍点での対象表面の三次元位置と法線ベクトルから算出される（付録B-2参照）。局所情報として、参照される近傍点としては隣接画素が望ましいが、三次元位置、法線ベクトルとも変化量が小さく曲率が安定に求まらない。このため、縦横に数画素離れた点を参照する。”法線ベクトル計算不可能”画素の周囲においては、曲率計算が行えないため、”曲率計算不可能画素”とし、後段の処理で近傍の領域に併合する。

表5-1 ガウス曲率、平均曲率と局所形状

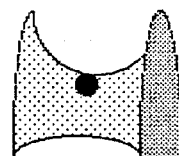
		平均曲率H		
		H > 0	H = 0	H < 0
ガ ウ ス 曲 率 K	K > 0	正楕円面	-	負楕円面
	K = 0	正円筒面	平面	負円筒面
	K < 0	双曲面		



正楕円面



正円筒面



双曲面

5-4 分割・膨張によるセグメンテーション

対象を平面や曲面のパッチ集合で記述するためには、入力画像を平面や曲面を構成する画素群（領域）にグループ化しなければならない。しかし、一回の操作で領域を安定に抽出することは困難であるため、分割と膨張に基づく方法で領域を抽出する。すなわち、画像をいったん細かな領域に分割しておき、その後各領域の特徴を調べ併合膨張していくことにより、最終的に目的に応じた領域を得る方法である。

5-4-1 領域成長による分割

前節の処理によって得られるラベル画像は、画素単位独立にラベル付けされているため、領域としての情報は持っていない。そこで、このラベル画像に対し領域成長を施し、基礎となる細分領域を得る。領域成長には、ラスタ走査と逐次成長を基本とするアルゴリズムを用いる。

- ・ラスタ走査により未処理の画素を発見する。
- | ・ 8近傍の同一のラベルを持つ画素を統合する。
- | ・ 成長しきれなくなるまで繰り返す。
- ・未処理の画素がなくなるまで繰り返す。

領域成長で得られる領域は多くの微小領域を含む。これらの微小領域はノイズの影響によって生じることが多いので、抽出された領域のうち面積が9画素以下のものは除外する。

5-4-2 領域膨張による併合

上記の領域分割では、通常必要以上に同一領域が分割されるため、信頼性の高い領域を中心に領域の膨張を行なう。近似方程式に基づいた平面領域の膨張と、曲面領域の膨張の二種類を順次行う。

a) 平面領域の膨張

平面と平面の接続する稜線付近では、本来二枚の平面からなる部位を、単一の平面と見なして法線ベクトルを算出しているため、なだらかに鈍り角の取れた稜線として法線ベクトルが得られる。多くの場合、二つの平面に挟まれた形で楕円面領域や円筒面領域が形成される。この不要領域は、平面領域を膨張させることによって取り除く。膨張のアルゴリズムは次の通りである。

- (1) 平面領域を画素数の多い順に並べる。この順番に以降の操作を繰り返す。
- (2) ラスター走査により平面領域に接する画素（接点）を探索する。接点が見つからない場合には次の領域に移る。接するという判定は、8近傍中に3画素以上平面領域を含むことを条件とする。
- (3) 接点 (x, y, z) と近似平面との垂直距離を求める。
- (4) d が閾値以下なら平面の一部と見なして併合する。

閾値には、膨張前に平面領域に含まれている各点と近似平面との最大誤差を求め、その値の2倍程度を設定する。

この処理により、実際の平面領域のほぼ全域を併合でき、平面の輪郭情報を正確に知ることができる。

b) 曲面領域の膨張

曲面領域の膨張も、平面の膨張と同様に曲面方程式との適合性を基準に行うのが望ましい。しかし、一般に曲面を多項式に近似する場合、領域の境界付近で極端に近似精度が悪くなることが多い。このため、近似方程式を手がかりにしても、良好な膨張効果を得ることが難しいことが推測される。ここでは、局所形状のラベルが付加できなかった画素、“曲率計算不可能画素”、“法線ベクトル計算不可能画素”の併合を、単純に二値画像の膨張処理で行う。

- (1) ラベル画像からラスター走査により、未ラベル画素を探索する。
- (2) 3×3 の矩形近傍領域を切り出し、その領域内に曲面としてラベルづけされた画素が存在を調べ、存在しなければ、現われるまで領域を拡大する。ただし、矩形領域のサイズの上限を15とし、それを越えた場合は、次の画素の処理に移る。
- (3 A) 近傍領域内にただ一つの曲面領域が存在する場合には、その曲面領域に併合する。

(3B) 近傍領域内に複数の曲面領域が存在する場合には、ユークリッド距離で最も近い曲面領域に併合する。距離が等しい場合には、どの領域に含まれるか決定できないので不明画素として併合は行なわない。

この処理の結果、曲面領域のうち輪郭に近い領域が新たに併合される。ここで、画素数が増した領域から、再び最小二乗近似すれば近似精度が向上する。このようにして得られた領域を、シーンの最小記述単位として用いる。

5-5 二次曲面の特性に基づく分割面の特徴抽出

前節までの処理より、距離画像をもとに物体形状に対応した領域をセグメンテーションすることができる。対象シーンのクラスとして、平面と二次曲面のみで構成される三次元世界を考えているので、各領域は平面か単一の二次曲面に対応する。本説では、得られた領域を二次曲面の方程式に近似し、シーン記述に有効な特徴を抽出する方法について述べる（付録D参照）。

一般に二次曲面の方程式は次式で表される[Yano 81]。

$$ax^2+by^2+cz^2+2fxy+2gxz+2hyz+2lx+2my+2nz+d = 0 \quad (5-1)$$

物体面の曲面領域がどのような二次曲面で構成されているかを認識するためには、記述表現が座標軸の平行移動・回転に対して不変であることが望ましい。そこで、上記方程式を定性的に分類し、二次曲面の標準形に変形すればこの問題は解決される。

5-5-1 二次曲面の分類

(5-1) 式の各係数からなるパラメータを、以下のように定義する。

$$I = a + b + c \quad (5-2)$$

$$J = \begin{vmatrix} a & d \\ d & b \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b & f \\ f & c \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} c & e \\ e & a \end{vmatrix} \quad (5-3)$$

$$D = \begin{vmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{vmatrix} \quad (5-4)$$

$$A = \begin{vmatrix} a & d & e & g \\ d & b & f & h \\ e & f & c & i \\ g & h & i & j \end{vmatrix} \quad (5-5)$$

$$A' = a + D + A + \begin{vmatrix} a & d \\ d & b \end{vmatrix} \quad (5-6)$$

$$A'' = \begin{vmatrix} a & d \\ d & b \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a & e \\ e & c \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a & g \\ g & j \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b & f \\ f & c \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b & h \\ h & j \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} c & i \\ i & j \end{vmatrix} \quad (5-7)$$

$$A''' = a + b + c + j \quad (5-8)$$

重要な点として、これらのパラメータには次の特徴がある。(5-1)式の各係数は、物体面が同一の形状を有していたとしても物体面の位置と方向が異なれば、変化する。ここで、 $I = 1$ となるように(5-1)式の各係数を正規化することによって、物体面の平行移動と回転に対して、 I 、 J 、 D 、 A は不変となり、 A' 、 A'' 、 A''' は符号が不変となる。特に I 、 J 、 D は、さらに物体面の膨張、

表5-2 二次曲面の分類

		D ≠ 0 有心二次曲面		D = 0 無心二次曲面		
		D > 0 & J > 0	← 不成立	J > 0	J < 0	J = 0 & I ≠ 0
A > 0	A' < 0 J < 0		一葉 双曲面		双曲的 放物面	
A < 0		楕円面	二葉 双曲面	楕円の 放物面		
A = 0	A' ≠ 0 A'' < 0 J < 0		楕円の 円錐面	楕円の 円筒面	双曲的 円筒面	放物的 円筒面
	A'' < 0				二葉 平面	二葉 平行面
	A' = 0 A'' = 0 & A''' ≠ 0					一葉 平面

& : AND | : OR

縮小に対しても不変となる。したがって、これらのパラメータを用いれば、物体面の位置と向きによらず、物体面そのものの形状が判断できる [Hall 82]。これらのパラメータの符号の組み合わせで二次曲面は、表5-2のように分類できる [Sato 85b, c]。

ここで、(5-2) 式の二次曲面の一般式から、個別の二次曲面を表す方程式（標準形）で各領域を表現し直す。標準形で表現して初めて、一般式からでは導出できない二次曲面の中心、径、焦点などの物理的概念が表出する。

5-5-2 二次曲面の中心と主軸

分割面を、二次曲面の標準形に変形する際、座標軸の平行移動のためのパラメータとして二次曲面の中心点の座標を求め、回転パラメータとして主軸を求める。標準形、中心、主軸の関係を図5-8に示す。具体的な算定方法は付録Dに記す。

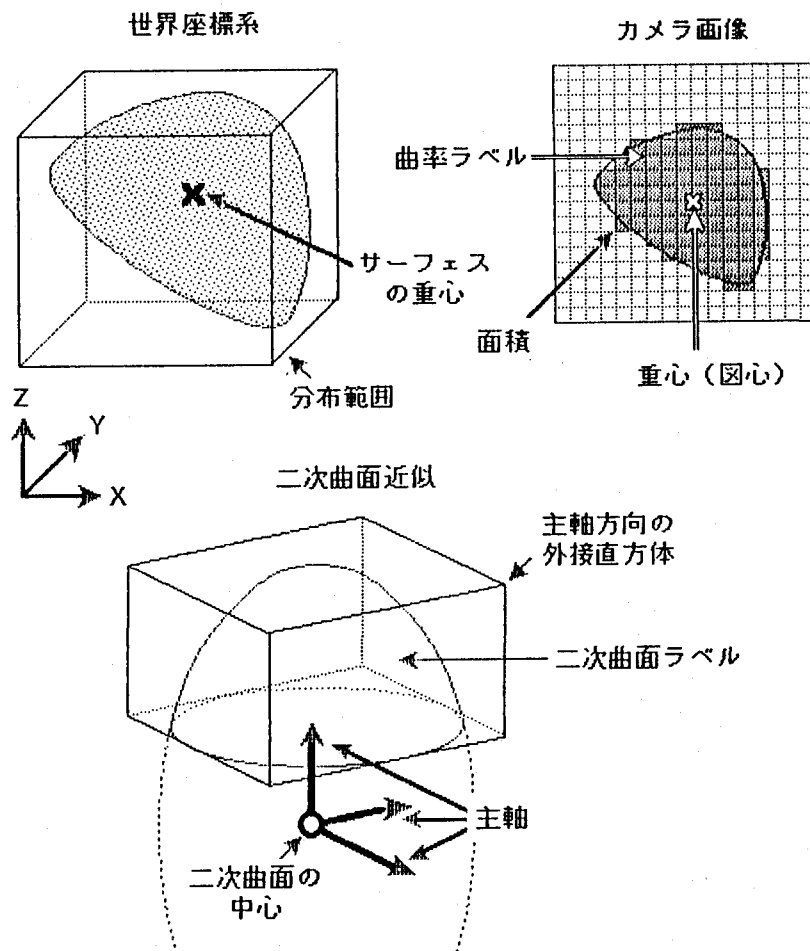


図5-8 二次曲面の記述

5-6 分割面の存在領域

5-6-1 平面の存在領域

平面領域を近似方程式により記述する場合、この方程式で表される平面は空間中に無限に伸びているため、有限の面をなすように存在領域を制限する必要がある。したがって、平面を記述するためには方程式のほかに境界に関する情報が必要となる。

前節の膨張処理によって得られる平面領域は、境界の形状を損うことなく保存しているので、この領域の境界を追跡することで平面の輪郭の形状を知ることができる。輪郭形状の記述は、境界の点列データではなく直線セグメント化し表現する。

5-6-2 二次曲面の存在領域

平面と同様、単に二次方程式により表された曲面は大きく空間に広がっており、特に開いた二次曲面ではその広がりは無限である。対象物体の表面は、前述の標準形で表される二次曲面の一部分であるため、境界条件を与えることにより空間中での領域を指定し、曲面の存在を制限する必要がある。しかし、近似した二次曲面は境界付近で近似誤差が大きくなり、実際の三次元座標と合致しなくなる。このため、境界の追跡を行っても、正しい存在領域が得られるものではない。

二次曲面の境界は、平面との接続による場合と自由曲面との接続による場合とがある。後者の場合、自由曲面を簡易に表現することは難しく、ここでは境界をすべて平面によって指定する。図5-8のように二次曲面の主軸方向に物体の実表面を囲む外接直方体を作り、その内部にのみ二次曲面が存在するものとする。平面でクリッピングされた領域は本来の曲面領域を正確に表していないが、物体面をパラメトリックに忠実に再現することが目的ではなく、シーンの記述を行い計算機が三次元構造の概略を知るためには、このような簡単な処理でも有用な情報を得ることができる。

5-6-3 分割面の記述

面を記述するための特徴量を以下に示す(図5-8)に示す。

(a) 局所曲率に基づく形状タイプのラベル

- ・平面
- ・楕円面
- ・円筒面
- ・双曲面

b) 近似二次曲面の係数の解析に基づく形状タイプのラベル
(表5-2に示したものを簡略化している)

- ・平面
- ・楕円面
- ・一葉双曲面
- ・二葉双曲面
- ・楕円的放物面
- ・双曲的放物面
- ・二次錘面
- ・楕円柱
- ・双局柱
- ・放物柱

(c) 画像中での重心

分割面領域の二次元画像中(カメラ座標系)での重心位置である。

(d) 三次元空間での重心

分割面内の各画素が表している三次元点の、空間中(物体座標系)の重心位置である。

(e) 三次元空間での分布範囲

分割面内の各画素が表している三次元点の、空間中での分布範囲である。

(f) 近似二次曲面の中心

(g) 近似二次曲面の主軸

(h) 主軸に沿った外接直方体の大きさ

二次曲面の主軸方向に物体の実表面を囲んでいる外接直方体の大きさである。

5-7 実験例

以上の手法の有効性を検討するために、前章で述べた距離画像計測システムで得られた距離画像を対象シーンとし記述を行った。**距離画像データベースPRIMULA**(付録E参照)中の花瓶のシーン、VASE(XYZ型距離画像、256×256画素)を用いた。この花瓶は、全体が滑らかに接続した曲面群で構

成されている。このシーンの濃淡画像を図5-9に、視点との距離に応じて輝度変調を施した距離画像（P型距離画像）を図5-10に示す。

5-7-1 法線ベクトル分布

図5-11に、いがぐり表現（Needle Map）により法線ベクトルを表す。作図の都合上あらく表現しているが、実際は画素毎に法線ベクトルを有している。

平面近似のためのマスクサイズは距離画像の計測誤差と標本化密度（カメラ座標系におけるスケール係数）により決まる。対象とした距離画像の誤差が1mm以内なので、経験的に5mm×5mm程度の平面領域が必要である。256×256画素の画像では、10×10画素を妥当なマスクサイズとした。

5-7-2 ガウス曲率・平均曲率

図5-12に、ガウス曲率・平均曲率を疑似カラーにより表現した。赤が正、青が負の値を表し、濃度が強度を表している。

ガウス曲率は、花瓶の膨らんでいる箇所に正部が、くびれている箇所に暗部が生じている。平均曲率は、床面と壁面の接続部のように視点に向かって凹部の箇所が正になり、花瓶全体のような凸部では負になっている。

$K = 0$ 、 $H = 0$ の条件は、近似的に零か否かで判断する。この距離画像の場合、

$$-1.0 \times 10^{-4} < G < 1.0 \times 10^{-4} \quad \text{の時} \quad G = 0$$

$$-1.0 \times 10^{-2} < H < 1.0 \times 10^{-2} \quad \text{の時} \quad H = 0$$

と見みなした。

5-7-3 局所形状の分類

図5-13に、ガウス曲率・平均曲率の符号に基づく局所形状の分類結果を示す。図中の各色は、

白：平面	赤：正楕円面	青：正円筒面
緑：双曲面	ピンク：エッジ画素	黒：ラベル付け不可能画素

を表す。

5-7-4 領域成長

図5-14に、領域成長した後、平面と曲面の膨張処理を行い、最終的にセグメンテーションされた面領域を色分けして表現している。ラベル画像において、床面と壁面の境界付近に現われている不安定な領域とラベル付け不可能画素が、吸収されていることがわかる。

5-7-5 分類、中心、主軸

図5-14で分割された領域は、平面と二次曲面に近似され近似方程式の係数から、

- (1) 平面、 (2) 双曲面、 (3) 楕円面、 (4) 楕円面
- (5) 平面、 (6) 双曲面、 (7) 円錐面、 (8) 楕円面

と分類された。図5-15に、近似二次曲面の中心と主軸を示す。花瓶は床面上に置かれた回転体であるため、各領域の主軸はその中の一本が鉛直をなしている。

5-7-6 存在領域

図5-16に、近似方程式から生成される二次曲面と、外接直方体により存在領域が制限された二次曲面の両方を示す。

5-7-7 ネットワーク記述

図5-17に、領域をノードとしエッジ情報など接続関係をアークとするネットワークを示す。本論文で定義するところのシーンの記述は、このネットワークを構築することで完了する。

5-7-8 対象シーンの再構成

各面領域に対して生成された二次曲面から、花瓶の再構成を行なった例を、図5-18に示す。面と面の間には空隙があるなど、正しく本来の形状を再生してはいない。しかし、形状の定性的な説明を行うときには、このような簡単な記述でも十分である。

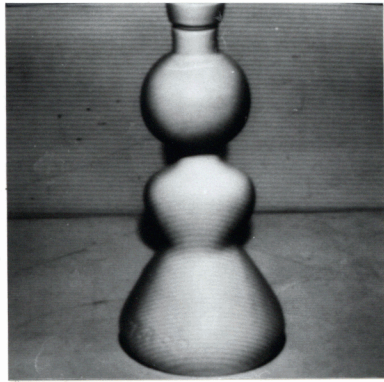


図5-9 記述対象シーン

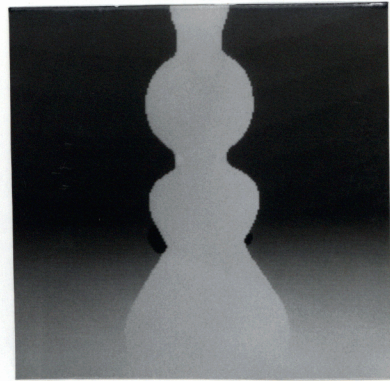


図5-10 距離画像

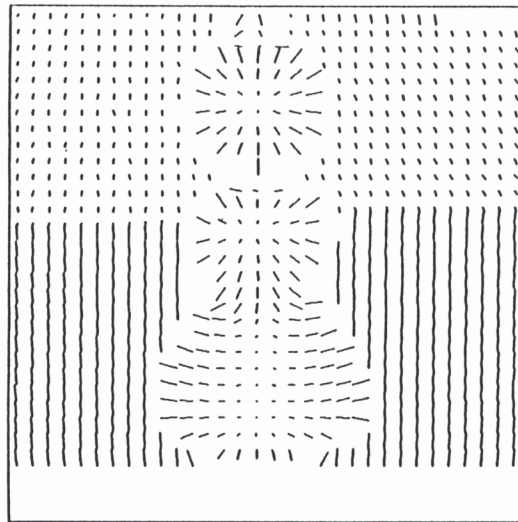


図5-11 法線ベクトル分布

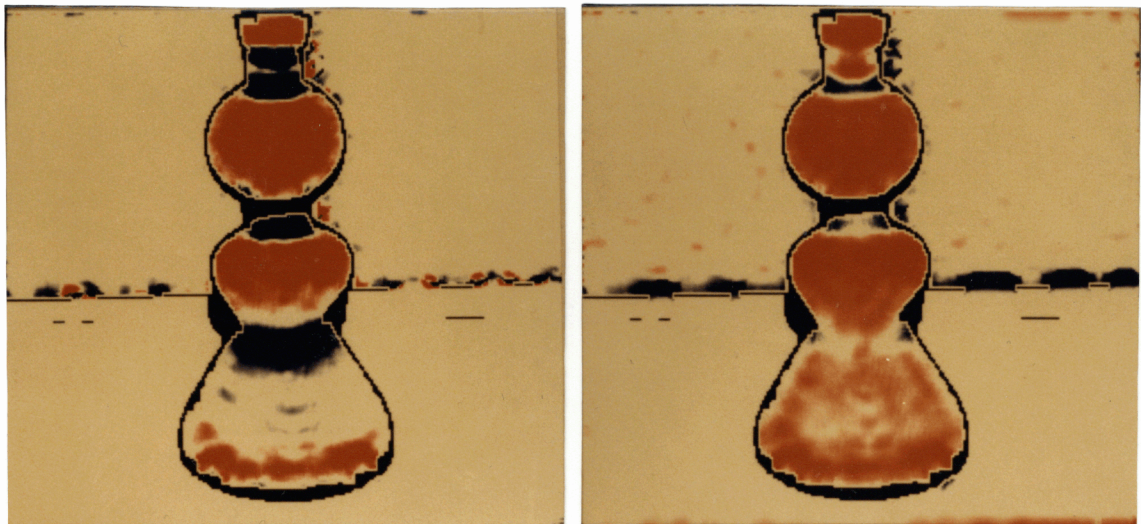


図5-12 局所曲率 (a) ガウス曲率、(b) 平均曲率

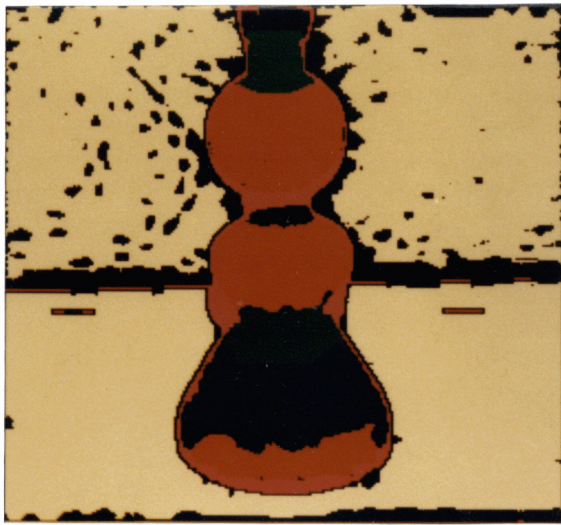


図5-13 局所形状の分類結果

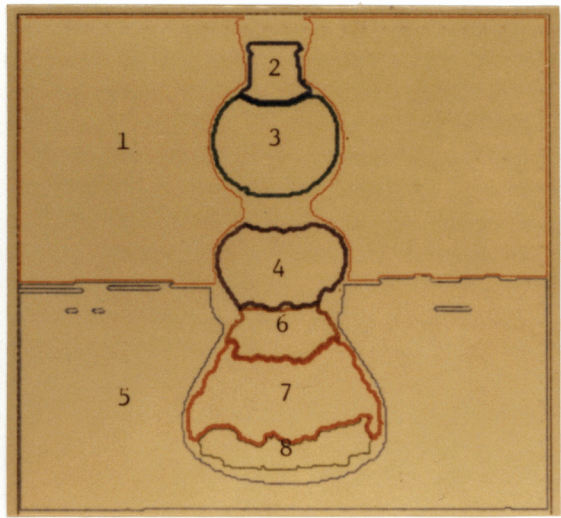


図5-14 セグメンテーション結果

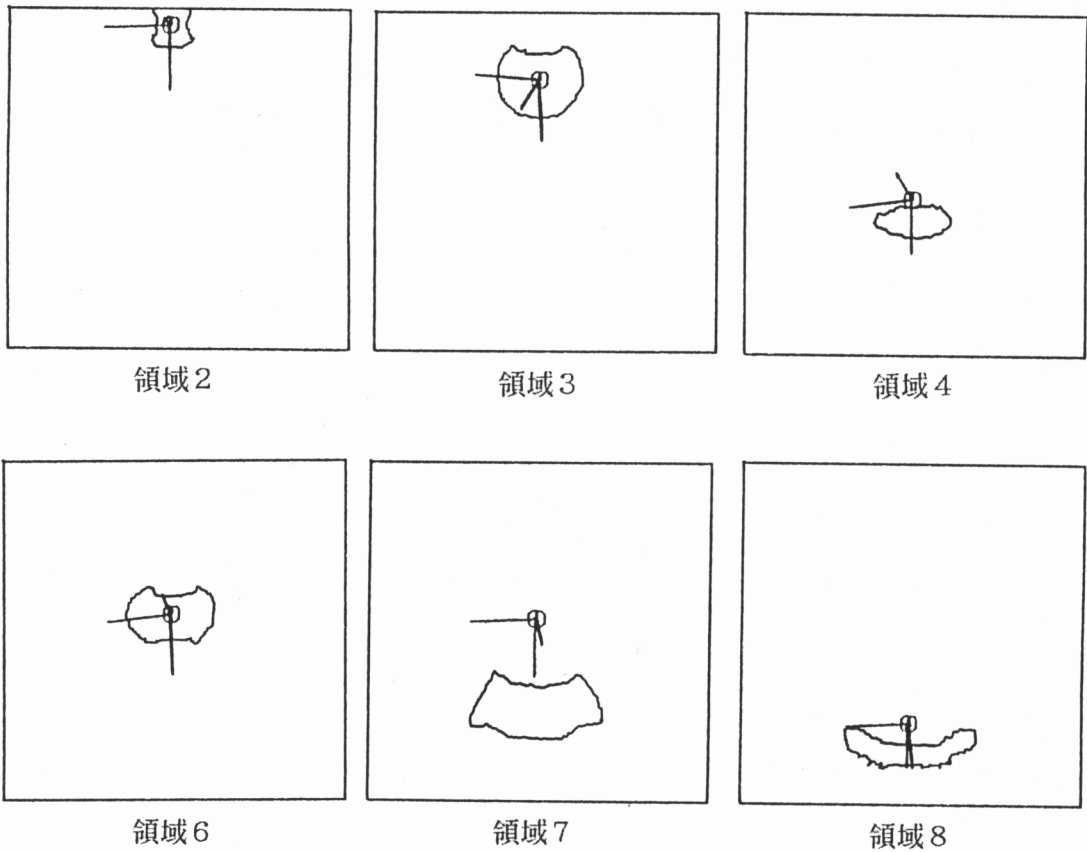


図5-15 二次曲面の中心と記述

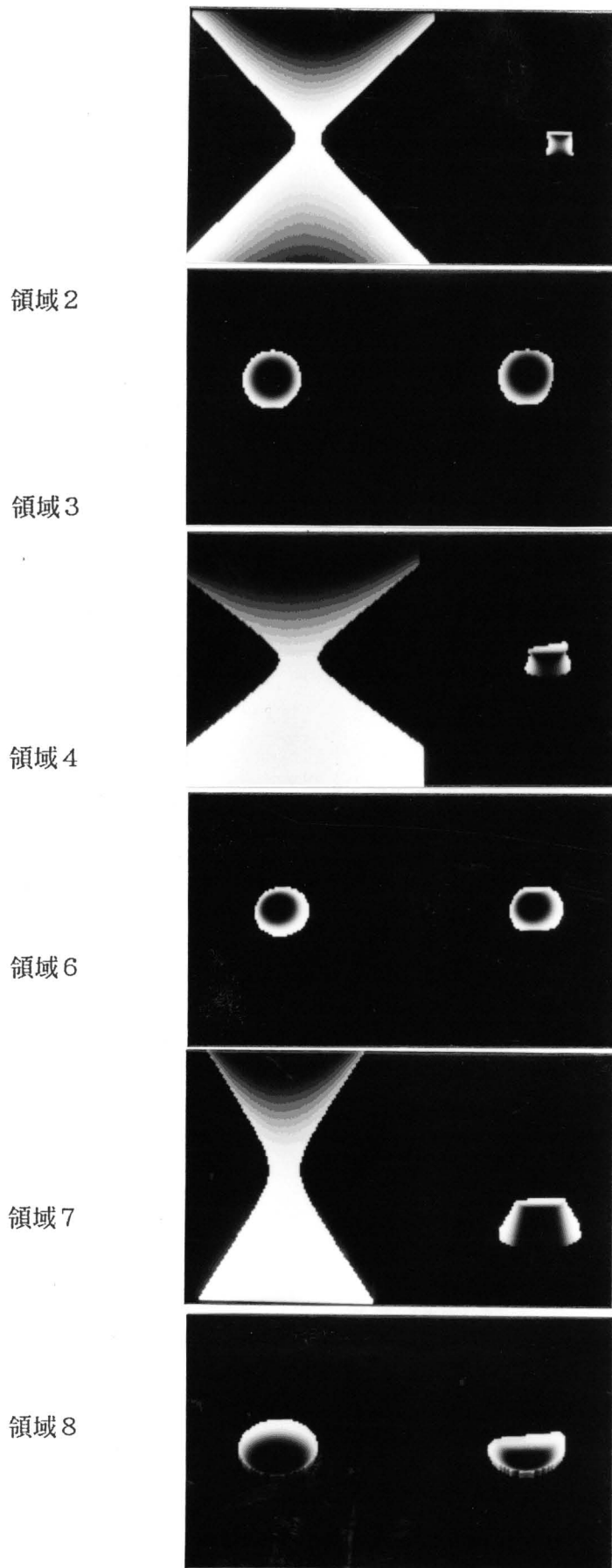


図5-16 近似二次曲面と存在領域の制限

(a) 近似方程式のつくる面、(b) クリッピングされた面

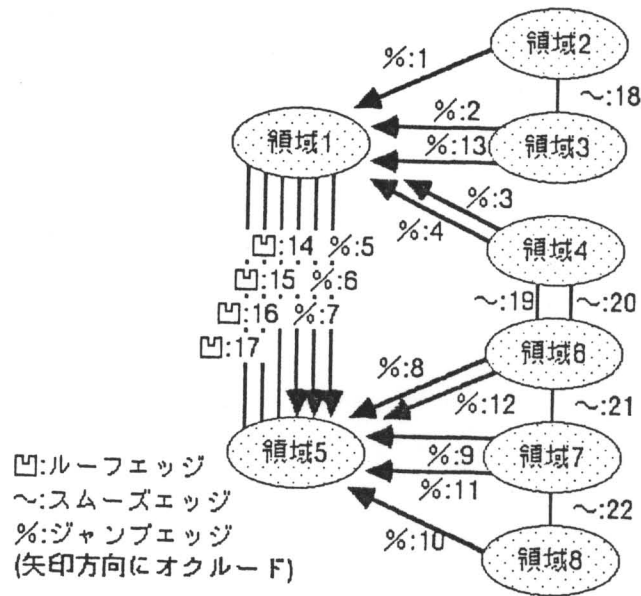


図5-17 面ネットワーク記述結果

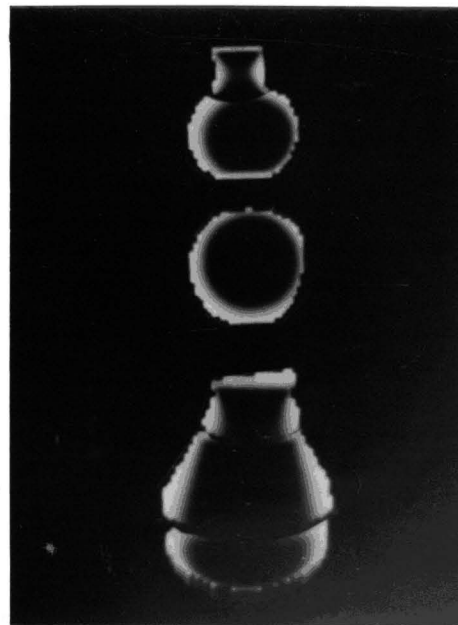


図5-18 物体の再構成

5-8 曲面物体の記述のまとめと今後の課題

記述対象のシーンの物体クラスに、従来の方法では識別困難であった二次曲面が滑らかに接続して構成された連続二次曲面を加えた。これを識別するため、以下の手法を活用した。

- (1) ガウス曲率、平均曲率などの物体の局所形状を表現するパラメータを用いて、同一の形状性質を有する領域を抽出する。距離画像や濃淡画像においても、画素値が連続となるような連続二次曲面を、これよりセグメント化できる。
- (2) 曲面を単に二次曲面の一般式に近似するのではなく、二次曲面の種別を認識し、個別の標準形に近似して記述する。このため、曲面の空間的位置や方向に不変となる記述が可能になる。さらに、二次曲面の物理的概念に基づいている中心と主軸を求める。これは、人間の直感的理解と結び付きやすい。
- (3) 面が接続する関係も、距離画像を基に性質別に識別する。

◆二次曲面の分類の妥当性

面の形状の定性的な分類に、曲率による分類と方程式による分類の二種類について述べた。人間は物体の形状の判断に細かな解析は行わず、大まかな外形をもとに判断している。そのため、シーンの記述を解釈、認識していくときにも、曲率による分類を主、方程式による分類を従とした方が人間の感覚にあった結果が得られると思われる。方程式に基づく方法では、分類するパラメータとして、前述のAとDを求めている。このパラメータによる二次曲面の分類は、数学的に確かなものである。しかし、分類の条件に $A=0$ とか $A \neq 0$ といったものがあり計算機の数値演算になじまないく、計算機プログラムで直ちにこれを扱うことはできない。微小値を閾値にして零、非零を判断するのが常であるが、閾値の設定に合理的な基準はない。

さらに、普通の情景に多く出現する、楕円面、円錐面、円筒面の三種の面を考えてみる。いずれの面も細長く伸び、なおかつその中央部分しか観測できない場合、パラメータによる判断と人間の判断との間で、異なる結果を呈することになる。通常、人間は曲面体の認識に三次元座標データを直接利用しておらず、二次曲面のような場合は特に輪郭線から認識を行っている。輪郭線が楕円をなすときは楕円面とし、円錐体がいかに細長くなろうとも、輪郭線がV字形をなすなら円錐面と大局的に判断する。しかし、中央部のみを切り出した面からでは、樽形で楕円面なのか、バケツのような円錐面なのか、それとも円筒面なのか、判断するのは難しい。

このようなあいまいな判断には、方程式よりもむしろガウス曲率や平均曲率による分類の方が適していると思われる。そこで今後は、方程式と曲率とを組み合わせた分類を考える必要がある。例えば、方程式の解析結果が長楕円だとしても曲率による解析が円筒面であれば曲面は円筒と認識されるべきである。同様に方程式によって一葉双曲面と認識されても曲率から円筒面と判断されるならば、二次錐面と判断されるべきであろう。今後は、多くの対象物体に対し実験を行ない、このような規則を見つけださなくてはならない。

第6章 シーンの認識

初期のシーンの認識に関する研究は、距離画像を得ることが困難であったため、濃淡画像からの線画の解釈 [Roberts 65] [Nita 83] が中心であった。濃淡画像において明るさの急変する点を抽出し、そのエッジ点の追跡や細線化から線画が抽出できる。シーンを多面体の世界（積み木の世界）に限定し、最初にこの線画に解釈を与えたのは Huffman [Huffman 71] である。彼は線のタイプとして、凸の稜 (+)、凹の稜 (-)、境界線 (→) を取り上げた。頂点では、必ず三枚の平面で交わるという仮定を設け、12種類の接続点のラベルの辞書を作成した。Clowes [Clowes 71] は、逐次的に辞書と矛盾するラベルを取り除いて、最終的に無矛盾のラベルの組み合わせを得るという弛緩法を用いて線画を解釈した。対象シーンのクラスは拡張が次々と進み、円筒、円錐、球、トーラスまで現在解釈可能である [Chakravarty 79]。

ここで、頂点をノード、稜線をアークと考えれば、線画は多面体をネットワーク表現したものと見みなすことができる。ある頂点から確定ラベルを伝播させ、ネットワーク全体に無矛盾なラベルを付加する弛緩法の過程は、まさに形式言語学や論理学における**プロダクション過程** [Fukumura 82] に相当する。

一方、前章までの過程で、時系列光パターン投影法に基づいた距離画像計測装置によりシーンの三次元計測を行い、局所曲率を手がかりにシーンを二次曲面の集合に分割し、シーンをネットワーク表現 [Shirai 87] により記述している。これは面をノード、面の接合をアークとする面ネットワークであり、グラディエント空間 [Ballard 82] とはまた別種に、線画ネットワークと双対関係をなしているといえる。本章では、この面ネットワークの認識に基づいたシーンの認識について検討する [Ozaki 88a, b]。

「**シーンの認識**」という用語を、本論文では以下のように定義する。

- (1) シーン中から、個々の物体を切り出す。
- (2) 物体の位置関係を抽出する。
- (3) 物体面の形状をシンボル化する。
- (4) 床、壁などの特定意味ラベルを付与する。

対象シーンのクラスは、前章で設定したものと同一である。認識過程は、線画ネットワークに対するラベル付けと同様、ある面（ノード）に与えられた仮説を境界（アーク）を通して伝播させ、面ネットワーク全体に無矛盾な仮定を付与するものである。これも一種のプロダクション過程である。計算機上における実現技法は、物体の構成面の蓋然的な性質をヒューリスティックな IF-THEN ルールで表現し、**プロダクションシステム**で推論する。

6-1 シーンの階層構造

シーンの三次元構造を単にパラメトリックな形状ではなく意味を保持したまま、どのように計算機表現するかという問題は、コンピュータビジョンに限らず、CG、CADの分野に共通した問題である。例えば、人体は頭、胴体、手足からなり、頭は目、鼻、口、耳からなり、さらに目は、黒目、白目、瞼からなるといった具合に、実在する物体は部分-全体関係をなし階層構造をとる。そして、その階層構造の上に重ねて、例えば、黒目は白目の中にあるというように空間的な位置関係を与えることが、最終的なシーンの認識といえる。したがって、面ネットワークを認識処理対象とする場合、平板的なネットワークである面ネットワークを、空間位置関係が重畳している階層構造に変換することが、認識の主目的となる。

6-1-1 物体と面の階層構造

複雑な物体やシーンを構造的に記述する方法として、部分-全体関係と呼ばれる木構造を取る階層構造がある。木構造のノードに記述される情報は、葉ノードと枝ノードでは内容が異なる。葉ノードには具体的な形状情報が記述され、枝ノードには下位ノードが表す部分形状に対する集合論理演算やそれらの間で満たされるべき制約条件などが記述される。以下、この木構造を「物体木」と呼ぶ。

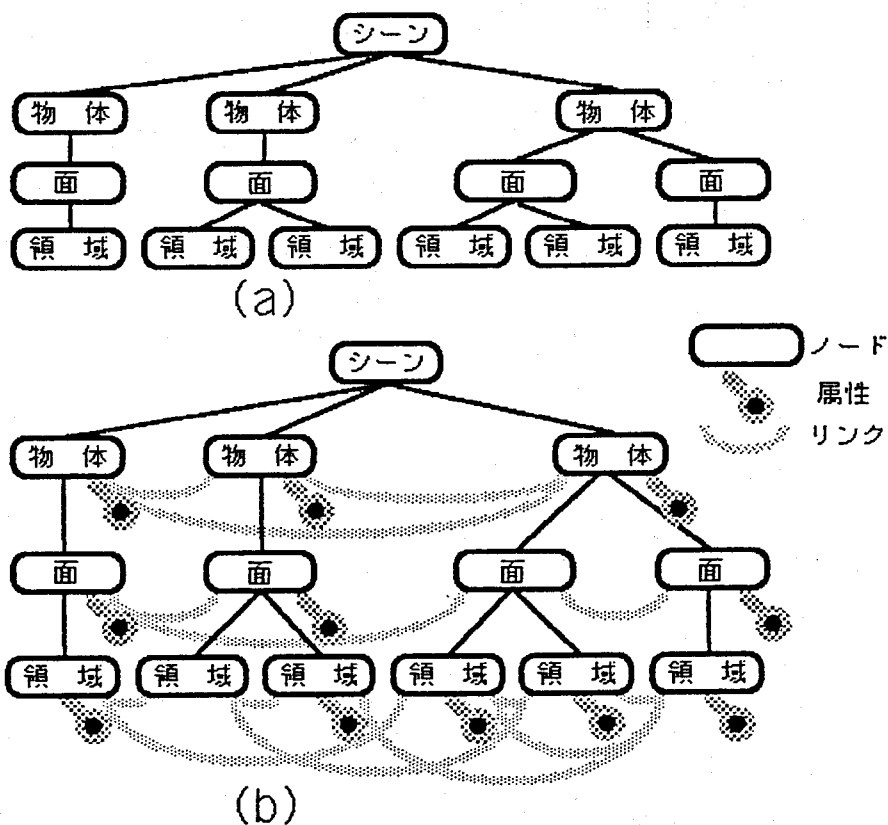


図6-1 物体木 (a) シーンの部分-全体構造、(b) シーンの多重モデル

図6-1(a)に、この部分-全体関係を用いて記述される階層構造を示す。【シーン】は対象シーンであり、【物体】は、独立した個々の物体をさす。また、【面】はジャンプエッジとルーフエッジで囲まれた区域を指し、これは、濃淡画像から得られる線画における閉領域に等しくなる。さらに、【領域】とは前章の曲率特徴により得られる面領域を指し、葉ノードとなる。

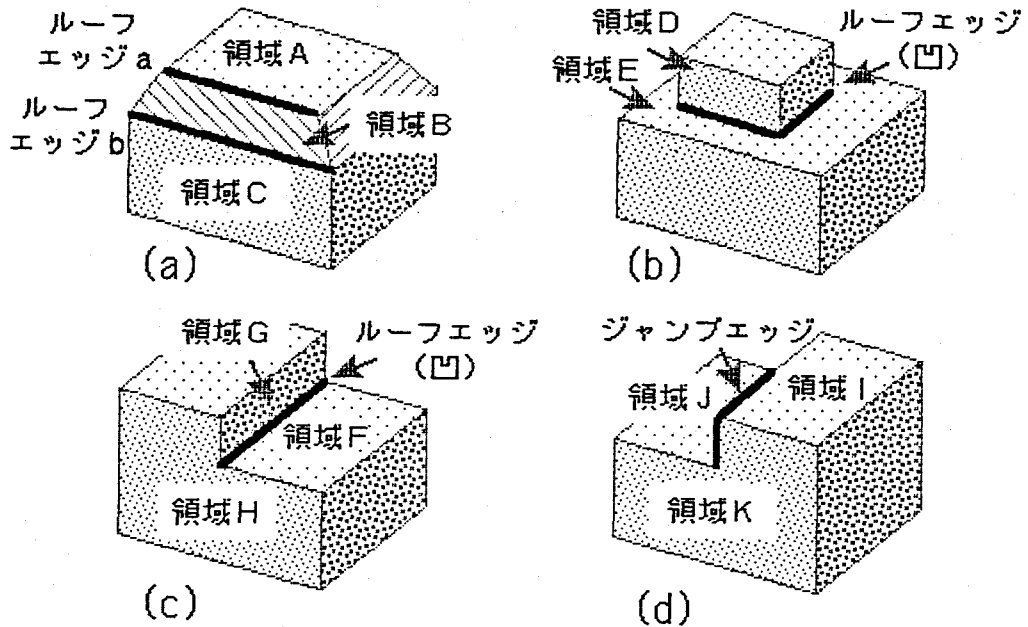


図6-2 物体構成の定義

【領域】が集まり【面】を構成し、【面】が集まり【物体】を構成する。また、【シーン】は【物体】の集合で表現される。既知の物体を仮定していないため、完全にボトムアップ処理となる。そのため、画像から得られる特徴量は最下位ノードの【領域】だけであり、【面】および【物体】レベルの情報は推論により導出する必要がある。その導出の手がかりとしてエッジ情報を用いる。

【面】の定義を、ジャンプエッジとルーフエッジで囲まれた区域とした。この区域は、スムーズエッジによって接する領域群に等しくなる。したがって、次の定義が得られる。

◆定義A：スムーズエッジで接する【領域】と【領域】は、同一の【面】に属する。

一般に、【面】と【面】が接するとき、その境界にはルーフエッジが生じる。図6-2(a)の多面体の場合、凸のルーフエッジが複数個生じている。このとき、 α のエッジで会するA、B二つの領域が、異なる物体に属するとするより、同一の物体に属すると考えるほうが自然である。一方、 β のエッジで会するB、C二つの領域が、四角台と直方体とそれぞれ異なる物体に分けられるとも考えられるが、同一の物体に属すると考えても差しつかえないであろう。ここで、次の定義が得られる。

◆定義B：凸のルーフエッジで接する【領域】と【領域】は、同一の【物体】に属する。

一方、図6-2(b)の場合、凹のルーフエッジによりD、Eの領域は、異なる物体に属すると考えられる。したがって、

◆定義C：凹のルーフエッジで接する【領域】と【領域】は、異なる【物体】に属する。

また、物体の輪郭線には必ずジャンプエッジが生じるため、

◆定義D：ジャンプエッジで接する【領域】と【領域】は、異なる【物体】に属する。

の定義が得られる。

定義Aは【面】の定義から導いたものであり、常に成り立つ。定義Aより【面】が、定義Bより【物体】が導出され、シーンの木構造を構築することができる。定義Cが成立するとすると、図6-2(c)において凹のルーフエッジで会している領域Fと領域Gは、異なる物体に属すると導かれてしまう。しかし、定義Bから領域Fと領域Hが同一物体、領域Gと領域Hが同一物体となり、その導出結果が伝播され領域Fと領域Gが同一物体となる。これは、定義Cの結果と矛盾するが、定義Cよりの定義Bが優先するものとし、定義Cの結果を棄却する。同様に、図6-2(d)において、定義Dからジャンプエッジで会している領域Jと領域Iは、異なる物体に属すると導かれてしまうが、定義Bから領域Jと領域K、領域Iと領域Kが同一物体となり、領域Jと領域Iも正しく同一物体と導かれる。これも、定義Bが優先するものとし、定義Dの結果を棄却する。

定義間の優先度は、以下の通りである。

定義の優先度：定義A > 定義B > 定義C > 定義D

6-1-2 シーン多重モデル

面ネットワークを構築する際、面やエッジの特徴解析より得られた結果は、面ネットワーク上に離散的に格納されている。一方、物体と面の階層構造からなる物体木は単にグラフにすぎず、特徴解析結果と総合的に表現されなくてはならない。物体を構成する各要素の接続に関しては**木構造**、物体間の位置関係（リンク）に関しては**自由ネットワーク構造**、物体の形状特徴（属性）に関しては**スロット構造**と、三面性を持つ多重モデルをなしている。すなわち、各ノードを**フレーム**と考えれば、**属性**はフレームのスロットに対応し、**リンク**はフレーム間の関係となる[Osuga 86]。属性およびリンクを付加した木構造を、図6-1(b)に示す。図では、一つのノードに一つの属性しか表現していないが、実際は任意個の属性を許容する。リンクについても一つのノード間に任意個のリンクが存在する。

(a) 属性

属性は物体木の各ノードにタグとして付加される情報であり、すべてのノードが独立して有している。属性の例を以下に示す。

- ・【領域】レベルの属性
平面領域ならば『水平面』、『垂直面』など
曲面領域ならば『回転体』など
- ・【面】レベルの属性
曲面の『窪み』、『膨らみ』など
- ・【物体】レベルの属性
『球状』、『静止安定』、『細長い』など
- ・単一物体の認識結果
『床面』、『壁面』など

(b) リンク

リンクは物体木のノード間の相互関係であり、同一階層のノード間に存在する。

- ・位置関係
《隠ぺい》、《上方(下方)》など
- ・接続関係
《直角》、《滑らか》など

6-2 知識処理による解釈

シーンの認識では、画像から得られた特徴からシーンを記述し、その記述を解釈、推論していく。しかしながら、画像から抽出される特徴は不完全であったり不正確、あいまいであったりする。そのため、誤った特徴の排除や未検出の特徴の発見という機能と推論機能をうまく融合させる必要がある。この蓋然性という判断機構を持った推論には、ヒューリスティックな知識が必要である。

ここでは、推論を演繹する知識処理機構をプロダクションシステムによって実現する。三次元シーンに関する知識を IF-THEN型のプロダクションルールで表現し、推論結果のプロダクションを重

ねることにより、シーンを認識していく。簡単で断片的なルールの集積によって、ヒューリスティクスを計算機上で記述することができる。

6-2-1 プロダクションルールによる解釈

プロダクションシステムは、プロダクションルールによって知識を表現するものであり、基本的に、

- (A) ルールベース
- (B) ワーキングメモリ (グローバルデータベース)
- (C) 推論エンジン

の三要素からなる。

一つのルールは、

```
IF .....  
THEN .....
```

の形で記述され、IF部は条件部、THEN部は実行部と呼ばれる。ルールベースは、このルール形式で記述された知識を集積し格納する知識ベースであり、ワーキングメモリはプロダクションシステムの推論状態を保持する記憶領域である。ルールの基本的な動作は、ワーキングメモリの内容がルールの条件部を満たしていれば実行部が実行され、ワーキングメモリの内容を更新する。推論エンジンの動作は、ルールを選択適用し、目的とする目標(ゴール)を生成・検証する推論を行うことである。

プロダクションシステムで使われる推論機構は、**前向き推論**と**後ろ向き推論**に分けられる。前向き推論は、事実から出発し、ルールを適用することにより仮説・事実を導出していき、目標に到達することを目指す。一方、後ろ向き推論は、ある目標から出発し、その目標が成立するための事実や条件の検証を積み重ねることを目指す。いかえれば、前向き推論はボトムアップ推論、後ろ向き推論はトップダウン推論である。

シーン中にある物体が特定され、そのモデルが認識システムにとって既知の場合は、トップダウン処理が有効である。また、モデルと対象シーンとの照合(マッチング)により認識する方法も採れる。しかし、シーン中に現れる物体が未知なときは、認識システムは対象物体のモデルを持つことができず、ボトムアップ処理となる。画像から得られた事実に基づいて、シーンの三次元構造に関する仮説を推論していく必要がある。このため、認識処理手順を定式化することが困難となり、状況に応じて処理手順を選択する柔軟な認識システムが求められる。また、述語論理によらず既知

の事実から新たな事実を発見していくには、なんらかの深い知識が必要であり、特に経験的知識（ヒューリスティクス）が有効である。このヒューリスティクスを表現する手段としては、ルールによる記述が、認識システムの構築上扱いやすく実現が容易である。知識の追加・訂正が行いやすく（知識の拡張性）、一つ一つのルールの意味が断片的で分かりやすい（知識の可読性）ためである。

6-2-2 プロダクションシステム処理系

面ネットワークの認識には、プロダクションシステムにより認識システムを制御し、プロダクションルールにより知識を記述する。システムを記述するプロダクション言語としては、

- ・前向き推論
- ・推論の高速性
- ・記述力の強さ
- ・他言語とのインターフェース

などを考慮して、OPS 83 言語 [Forgy 86] を使用する。しかし、OPS 83 は数値演算に不向きであるため、画像処理部は手続き型言語である C 言語を用いる。

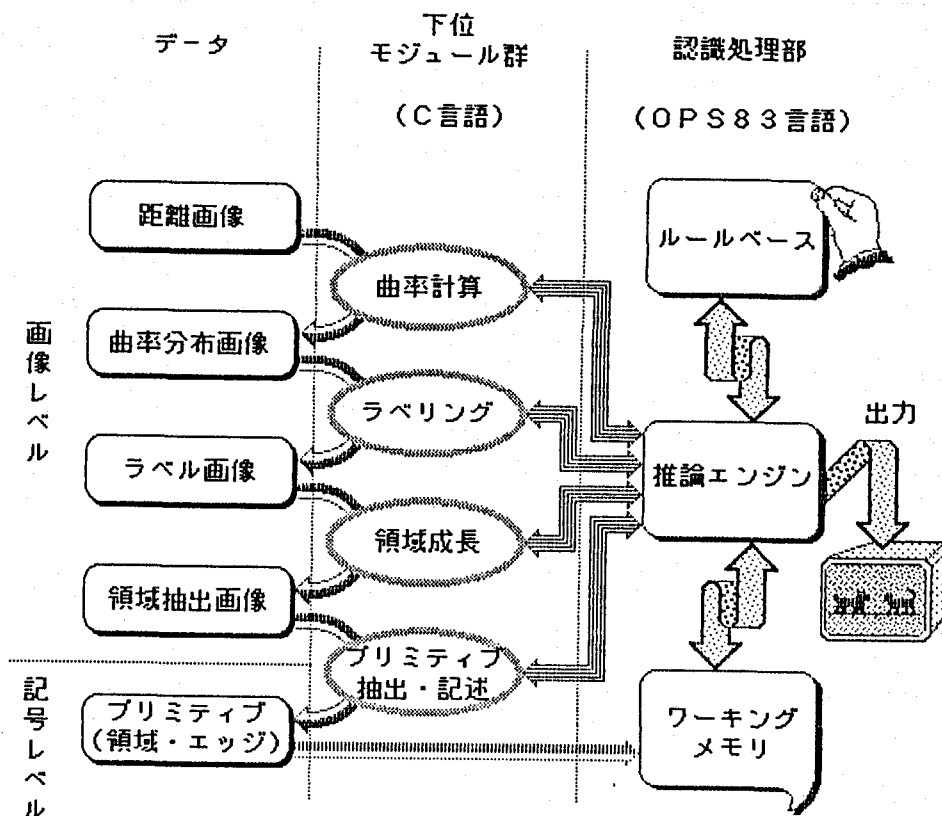


図6-3 認識システムのモジュール構成

本認識システムのモジュール構成を図6-3に示す。認識システム全体の制御はOPS 83の推論エンジンが行い、ルールベースから必要なルールを選択、適用し、必要に応じて下位モジュールを起動する。下位モジュール群はC言語で記述され、距離画像、曲率分布など画像レベルのデータを処理する。つまり、OPS 83の推論エンジンは直接画像データを扱わず、C言語の下位モジュールを介して操作する。画像処理において必要となる閾値などの処理パラメータは、ワーキングメモリ上に蓄えられ、推論エンジンから下位モジュールに引き渡される。一方、物体木の属性の記述など、シンボルで表現されるデータはワーキングメモリ上に保持され、推論エンジンが直接に操作する。

距離画像から特徴を抽出し面ネットワークを記述するまでの画像処理は、比較的逐次的な処理であり、手続き型言語でも十分記述できる。しかし、面ネットワークの不完全さなどから画像データへフィードバックする必要があるため、非決定的な制御構造を取りルールにより動的な記述を行う。つまり、画像データを処理する下位モジュールの制御構造をルール表現する。微小領域の削除やエッジの連結といった処理も、対象物体や画像サイズなどの知識が必要であり、ルールにより記述され制御される。

したがって、ルールベース内に蓄えられているルールには、

- (A) 実物体の構造に関するルール
- (B) (A) のルールセットを制御するメタルール
- (C) 画像処理を制御するルール

の三種類がある。

6-3 認識ルール

認識に関するヒューリスティックルールは、次のように細分類される。各分類ごとにルールの例を示す(各ルールのOPS 83表現は付録Fに示す)。

6-3-1 画像処理ルール

微小領域の除去、エッジの連結などの画像処理を直接行ったり、画像データを処理する下位モジュールを起動、制御するルールである。

・領域の記述を求めるルール

IF

〔未処理の【領域】がある〕

THEN

〔領域記述計算モジュールを起動する〕

〔得られた記述をワーキングメモリ上にストアする〕

- ・微小領域を削除するルール

IF

〔面積が閾値以下の【領域】がある〕

THEN

〔指定領域を画像から除去するモジュールを起動する〕

〔その領域をワーキングメモリから取り除く〕

6-3-2 物体木構築ルール

物体木を構築するルールである。

- ・【領域】から【面】を導出するルール

IF

〔スムーズエッジで会した二つの【領域】が属する【面】がある〕

THEN

〔その二つの【面】を同じ【面】とする〕

6-3-3 形状属性導出ルール

物体木の形状に関する属性を導くルールである。

◆形状異方性

- ・背の高い物体を見つけるルール

IF

〔【物体】の高さ（Z軸）が幅（X、Y軸）の閾値（3）倍より長い〕

THEN

〔その【物体】ノードに『背が高い』という属性を追加する〕

◆回転体属性

距離画像はカメラから見える部分のみに関して情報があり、いわゆる2.5D画像と呼ばれるように、シーンの完全な三次元情報を持つものではない。物体の三次元構造の認識では、物体の裏面（カメラと反対側の見えない部分）の形状を推測して、初めてその物体を認識したといえる。しかし、複雑な形状をした曲面物体の裏面を推測することは、既知の完全な物体モデルを活用しない限り、困難である。そのため、比較的単純な形状をした曲面物体、特に回転体に限定し検討する。回転体で

は、おもて面（カメラから見える部分）の形状をそのまま裏面の形状と考えることができる。そこで、各領域が回転体の一部か否かを判断し、その後、物体全体について検討する。

まず、他の【領域】に隠ぺいされた【領域】はカメラから見えない部分が多く、信頼度が低いとして除外する。円筒面や円錐面（多くの場合、二次曲面近似より得られる形状ラベルは、長楕円や双曲面の一部となる）の二次元画像への投影像は、図6-4(a)のエッジ α と β のような、少なくとも二つの直線状のジャンプエッジを持つ。これらは回転面の輪郭を与える。したがって、これらのエッジの端点の midpoint と midpoint を結ぶ直線（図中の直線X）は、回転軸の画像面への投影像と一致するはずである。この回転軸は、曲面の第一主軸で与えられる。

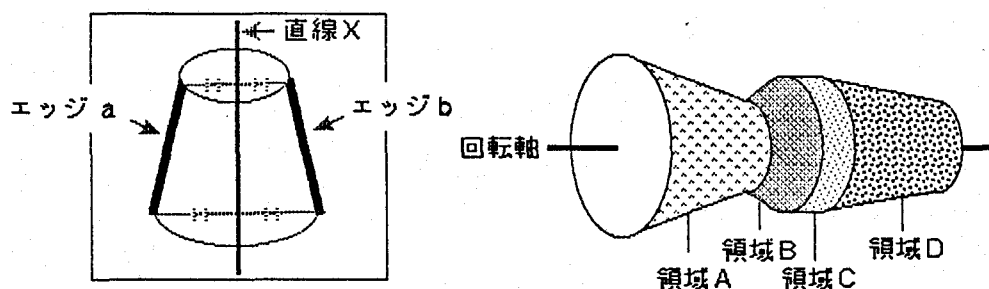


図6-4 回転体の認識 (a) 主軸と輪郭、(b) 積み重なった回転体

一方、図6-4(b)のように、三次元空間上で同一の主軸を持ち直線状に整列している領域群から、一つの物体が構成されている場合を考える。その領域の多くが回転体であるときは、物体も回転体と考えることの蓋然性は高い。

6-3-4 意味属性導出ルール

未知の物体からなるシーンを対象としているが、物体は床面上に置かれ、空中に存在することはないと仮定している。そこでまず、対象シーンから床面や壁面などの背景部分を抽出し、画像中から除外することにより注目物体を分離する。

例えば、床面を認識するには、高さが0でありかつ水平な平面領域の【物体】を選び出し、その【物体】が画像上で十分な面積を占めているか、また他のすべての【物体】より下方にあるかを検定したうえで、条件を満たした【物体】を床面と見なす。壁面は、床面に垂直な平面領域の【物体】で、十分な面積を持ち他の【物体】を隠ぺいしないものとする。このように、特定の物体に対する知識は、属性とリンク情報を持った物体木を扱うルールで記述される。

・床面を認識するルール

IF

〔【物体】が高さ0の水平な【領域】のみを持つ〕

THEN

〔その【物体】を床面と見なし、『床面』の属性を追加する〕

- ・床面を棄却するルールA

IF

〔『床面』属性を持つ【物体】を構成する【領域】の面積が小さい〕

THEN

〔『床面』属性を取り除く〕

- ・床面を棄却するルールB

IF

〔『床面』属性を持つ【物体】の下方に別の【物体】がある〕

THEN

〔『床面』属性を取り除く〕

(注意：第4章で述べた距離画像計測システムでは、床面をXY平面に、鉛直上向きをZ軸とする世界座標系を設定している。そのため床面は $Z = 0$ となる。)

6-3-5 リンク導出ルール

物体木のノード間の接続リンクを導くルールである。

- ・直交する二平面を求めるルール

IF

〔平面である二つの【領域】の法線が直交する〕

THEN

〔その二つの【領域】ノード間に《直交する》というリンクを追加する〕

6-4 ワーキングメモリエlement

プロダクションシステムの推論エンジンが直接操作するデータは、ワーキングメモリに蓄えられたデータであり、ワーキングメモリエlementと呼ばれている。OPS 83 言語では、ワーキングメモリエlementとして、C言語の構造体、Pascal言語のレコードと同種の、任意個の数値データ、シンボルデータ、配列データが集合したデータ形式（element型）しか扱うことができない。したがって、面ネットワークを、Lispにおけるリストデータのように、単一のデータ形式で表現することはできない。個々の面を記述したelement、個々のアークを記述したelementに分解し表

現する必要がある。

6-4-1 面のエレメント表現

面の特徴データをエレメントデータ型で表現する。

- (A) 局所曲率に基づく形状タイプ (シンボル)
- (B) 近似二次曲面の係数の解析に基づく形状タイプ (シンボル)
- (C) 画像中での重心
- (D) 三次元空間での重心
- (E) 三次元空間での分布範囲
- (F) 近似二次曲面の中心
- (G) 近似二次曲面の主軸
- (H) 主軸に沿った外接直方体の大きさ

6-4-2 エッジのエレメント表現

面と面との接続関係、つまりエッジに関する特徴データをエレメントデータ型で表現する。

- (A) エッジのタイプ (シンボル)
- (B) エッジの長さ
- (C) このエッジで会する面 (右側面、左側面) の識別子
- (D) エッジの端点の位置 (始点、終点)

6-5 実験例

図5-10のシーン、つまり図5-19の面ネットワークを認識対象とし実験を行った (ワーキングメモリに初期設定された内容は付録Fに記す)。【シーン】、【物体】、【面】、【領域】からなる木構造、物体木の認識結果を図6-5に示す。属性やリンクの認識結果は、認識システムのワーキングメモリ内にシンボル表現されているが、ここでは自然言語で示している。

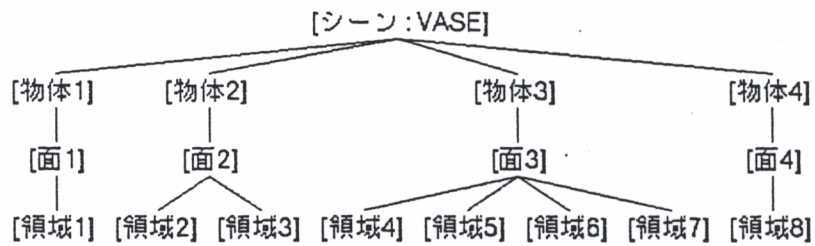


図6-5 図5-9のシーン認識結果

- ・シーン中の物体数：
 - ・シーンは4物体（床、壁含む）からなる。
- ・特定物体の認識
 - ・【物体1】は壁であり、【物体4】は床である。
- ・物体形状の認識
 - ・【物体2】と【物体3】は曲面物体である。
- ・物体間の空間位置関係の認識
 - ・【物体2】は【物体3】の上に位置する。
 - ・【物体2】は【床】の上に位置する。
 - ・【物体3】は【床】の上に接して置かれている。

花瓶が、上部【物体2】と下部【物体3】に誤って分割されている。これは、【領域3】と【領域4】の間に上部の影による不可視領域が生じて、切断されたためである。また、閾値の関係で、【物体2】と【物体3】を回転体と認識できなかった。

また、複数物体を含むシーンを対象として、図6-6（付録E、PRIMULA距離画像データベース、KOKESHI）に示すものも認識実験を行った。この認識結果の物体木を図6-7に示す。

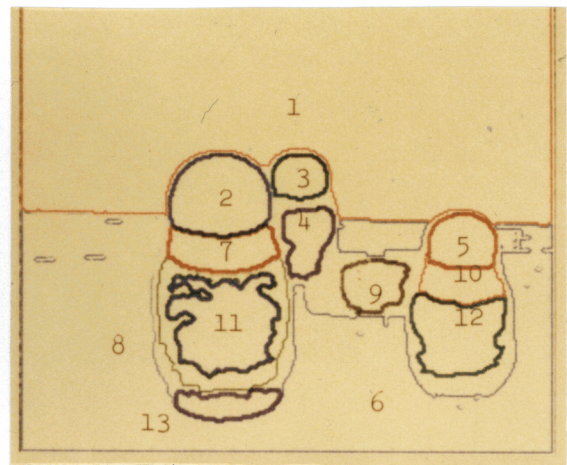
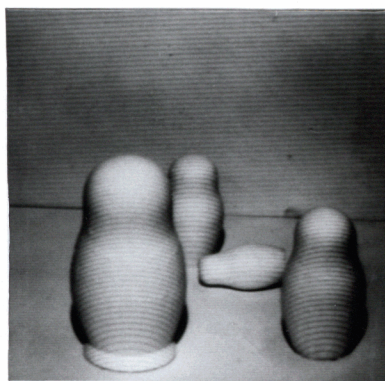


図6-6 認識対象シーン

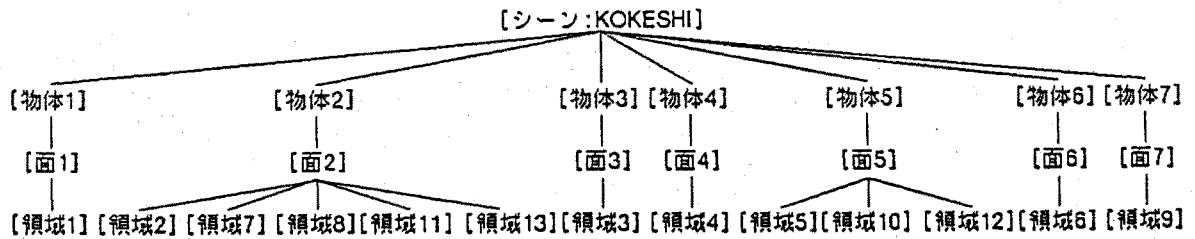


図6-7 図6-6のシーン認識結果

- ・シーン中の物体数：
 - ・シーンは、7物体（床、壁含む）からなる。
- ・特定物体の認識
 - ・【物体1】は壁であり、【物体6】は床である。
- ・物体形状の認識
 - ・【物体2】と【物体7】は曲面物体である。
 - ・【物体3】は球形の曲面物体である。
 - ・【物体4】は球体である。
 - ・【物体5】は回転体の曲面物体である。
- ・物体間の空間位置関係の認識
 - ・【物体2】が【物体3】と【物体4】をオクルードしている。
 - ・【物体5】が【物体7】をオクルードしている。
 - ・【物体4】は【床】の上に接して置かれている。
 - ・【物体7】は【床】の上に接して置かれている。
 - ・【物体3】は【床】の上に位置する。
 - ・【物体3】は【物体4】の上に位置する。
 - ・【物体3】は【物体7】の斜め上方に位置する。
 - ・【物体5】は【床】の上に位置する。

一番奥手の物体が、上部【物体3】と下部【物体4】に誤って分割された。これは、【領域3】と【領域4】の間の部位が、平らで平面領域と認識された後、微小領域ということから削除され、空白部となってしまったからである。最右の【物体5】が【床】の上に置かれていると認識されなかったのは、床に接している箇所が急に丸まっており、【領域12】と【床】の間に細い不可視領域が生じているからである。

6-6 シーン認識のまとめと今後の課題

プロダクションシステムにより、曲面物体を中心とした三次元シーンの認識を行った。面をノードとしエッジをアークとするネットワークを、曲面物体の性質に関するヒューリスティックな知識を用いて、面のノードを階層化した木構造に変換した。さらに、エッジのアークをこの木構造を横断するリンク構造に置き換えた。これにより、およそ平板的であった面ネットワークが、シーンの三次元構造を反映した木構造とリンク構造の多重構造に構築し直せた。この段階で、以下の項目に対して認識が行えたといえる。

- ・シーンの構成
 - ・【物体】、【面】、【領域】の各構成と数
- ・特定物体（床、壁）の認識
- ・物体形状の認識
 - ・多面体、曲面物体、回転体、球体
- ・物体間の空間位置関係の認識
 - ・上下関係、上置関係、斜め関係、オクルード関係

認識システム内には、プロダクション言語のワーキングメモリ要素として、計算機表現された認識結果が保持されている。システムに、人間との自然言語対話機能を付加すれば、シーンの三次元構造に対する定性的な質問に回答できるし、システム自ら対象シーンの解説が行えるであろう。例えば、シーン中に幾つ物体があるか、上下に積み重なった物体はあるか、くびれた回転体の物体があるかなどの質問には、簡単に答えられる。

しかし、実際に計測された距離画像を基に実験を行った結果は、芳しいものではない。不可視領域や、単純に面積のみを手がかりにした微小領域の除去による有為な領域の不適切な棄却から、簡単なシーンに対しても誤認識が多く生じている。閾値の不適切さから、形状の属性を正しく認識できないものもある。これらの問題は、このような特殊な状況に対処する認識ルールの不十分さに全て起因している。しかし、これらルールの完備には、連続二次曲面という閾値を決定しにくい物体を扱っているため、多くの困難を伴うことになる。

認識システムの計算機上での実現は、プロダクションシステム記述言語OPS 83を用いて構築した。断片的なヒューリスティック知識を、個々のプロダクションルールで表現したので、知識の可読性がよいものとなり、今後のシステムの改良・発展にも柔軟に対処できる。

ルールベース内のルール総数は、およそ200ルールであり、このうち、認識に用いるルールが半分以上を占める。線画の解釈における頂点辞書に相当する、多面体の認識に関するルールは、組み込んでいない。しかし、この程度のルール数によっても、曲面物体に関する基本的な認識を行うことができる。ルールを拡充するに際しても、前述のような希な状況に対処するルールのみが増加する

こととなる。このとき、一つ一つのルールは正しくとも、他のルールと矛盾関係が生じないように注意深くルールベースを構築せねばならない。これは、プロダクションシステムの性質上、ルールベース全体の完全整合性が保証されないためである。これは、推論構造を制御するルール（メタルール）を整備するなどして、プログラミングテクニックで解決する必要がある。

シーンの認識においては、対象シーンを完全に再現できるような情報を一枚の画像データから抽出することは、既知の物体モデルがないかぎり不可能である。距離画像においても例外ではなく、完全かつ正確な三次元構造に関する特徴を得ることはできない。そのため、ヒューリスティックな推論ルールを用いて蓋然性を基準に認識を行った。推論することにより、情報の不完全さ、不正確さ、あいまいさに対処した。しかしながら、より確かな解析を行っていくためには、各プリミティブに情報の確信度（Certainly Factor）を持たせ、その確信度に応じた推論を行うことが必要となる。例えば、面積の大きい領域は、二次曲面近似した際、データ（サンプル）数が多く精度良い近似が得られる。したがって、面積の大きい領域は近似の確信度が高いと見みなされる。そして、この確信度の高い領域を優先的に推論対象とさせれば、より確実な認識ができる。また、あいまいな面ネットワークを扱うルールに、知識の確信度（優先度）を持たせることが考えられる。例えば、床面の認識は他の物体の認識の前に行われるべきであるし、しかも比較的安定に求めることができるので、床面の認識は優先度を高く設定するべきである。また、推論結果にも確信度を使用することも必要であろう。確信度の高いデータと確信度の高いルールにより推論された結果は、確信度の高い結果となる。例えば、床面は一般に面積の大きな平面であるため確信度は高く、その認識ルールの確信度も高いので、認識された床面の確信度も高くなる。

第7章 結論

距離画像を画像情報の入力としたシーンの認識が、高い信頼性を有し、曲面物体に対する適応も容易であり、特に産業応用を踏まえたロボットビジョンには最適なアプローチであると、コンピュータビジョンの研究者の間で意見の一致をみていると考えている。しかしながら、距離画像の応用が研究室段階にとどまり広く普及されない点に問題意識を持ち、本研究では距離画像処理の各段階おのにおに新機軸の導入、機能強化を図るべく考究を進めた。

現状の距離画像計測法における問題点を整理し、新たな計測法と計測システムを研究した「計測」の観点と(第2～4章)、この成果から距離画像によらなければ認識が難しい曲面物体に対する記述と認識アルゴリズムの開発を行った「認識」の観点(第5～6章)の両面から、一貫した距離画像処理の流れを明らかにした。各々の「まとめ」は各章末に記したので、ここでは大局的な観点から本研究の成果と将来への展望を検討する。

第2章では、実用的な距離画像計測法としてスリット光投影法に置き代わるグレイコードパターン光投影法を提案した。256本の空間分解能を有する距離画像を測定する場合、スリット光投影法より32倍の速度で計測が可能である。提案した計測法は、計測の高速性以外にも、距離情報が二次元正方の画像データをなしていること、すべての画素が距離情報を持っていること、対象物体表面の連続性を距離画像から容易に確認できることなど、優れた特徴を合わせて有している。

第3章では、本計測法の高精度化を追求した。マスクパターンの微細化によらず、簡単な機械機構による投影パターンの倍精度化を行った。デジタル画像の標本化誤差には、相補パターンの濃度値からパターン境界のサブピクセル分解能で同定する手法を開発した。測定空間を分割することによる量子化誤差には、プロジェクタ座標の内挿により対処した。これら三つの手法の適用により、従来の距離画像精度を大きく向上させた。

第4章では、グレイコードパターン光を投影するプロジェクタ用に、液晶光学シャッタを新たに開発したことにより、機械機構のまったくない計測システムを実現した。画像計測には高速画像プロセッサを利用したため、優れた計測の高速性が示された。

以上、三章各論の研究成果を総合した距離画像システムは、

- (1) 512×512画素という高精細の距離画像を約3秒で計測可能
- (2) 高い計測精度、高い計測安定性
- (3) 機械機構がない計測システム

を実現しており、卓越した生彩をなしている。実際、現時点で開発されている実用的な距離画像計測システムの中で最高速であり、唯一機械機構がないものである。このため、本研究に基づく計測システムの利用が広まっており、荷物の仕分け、CADへの形状データの入力 [Fujita 87] [Yamamoto 88] などの分野では実用化がなされている。さらに、ピンピッキングなどFA分野への適

用も既に行っている [Inokuchi 86] [Ozaki 86] [Fujita 88a, b]。

第5章では、濃淡画像に基づく処理では認識が非常に困難とされる対象である二次曲面の滑らかな接合により構成されている曲面物体を取り上げた。そのような物体を扱うことが可能であることを明確にすることにより、シーンの認識に関しての距離画像の優位性を明らかにした。ここで開発されたアルゴリズムである、局所形状に基づくセグメンテーション法と二次曲面とその境界の特徴解析は、距離画像処理の基本モジュールとして十分使用することができる。

第6章では、実世界に対するヒューリスティクスを、IF-THEN型ルールにより表現し、プロダクションシステムによるシーン認識システムを実現した。小規模なルール群ではあるが、第5章のシーン記述法である面とエッジからなるネットワーク記述から、複数の曲面物体を含むシーンに対する特定面、物体の構成と形状、物体間の位置関係の認識が行えることが示された。従来、知識処理を距離画像処理に組み込んだ研究はなく、先駆けとして議論の導火線になるものと思う。

以上、各論をまとめたが、この6章からなる本研究の意義は、コンピュータビジョンの最終目標であるシーンの認識を、距離画像を画像情報の入力とするアプローチで行えることを、計測から認識まで一貫した処理を示すことで証明していることである。各処理過程には、個別に優れたものが開発されているが、計測と認識を総合して扱うことで、ノイズに対するロバスト性、不可視領域の操作など、実計測の問題点に対処した処理アルゴリズムが開発できる要因となった。

現在、研究室レベルにおいても、(1)のような高精細な距離画像を計測できる場所は少なく、画像データそのものも距離画像の研究者の間で貴重なものになっている。本研究を遂行するにあたってデータベース化された距離画像データ (PRIMULA、付録E参照) に国内を含め海外よりも利用の依頼があることが、このことを物語っており、研究者の間で標準画像として距離画像処理アルゴリズムの評価などに活用されることは、十分意義のあることである。

計測に関する今後の課題は、リアルタイム計測を目指し一層の高速化を図ることである。これには、複数のグレイコードパターンを、RGBカラーまたはマルチスペクトル光で重畳し同時多重化することにより、パターン光の切り替え回数を削減することが考えられる。各パターン光の間の干渉を排することが技術課題となるが、狭帯域光学フィルタの利用から実現が行えるであろう。

認識に関する今後の課題は、認識システムにおけるルールベースの整備拡充である。不可視領域や特殊な位置関係に対応したルールを明示し、認識可能なシーンを広げていくことが求められる。線画の解釈では、対象シーンのクラスに応じて必要な頂点辞書のサイズが、認識に必要な知識量の目安を与えている。今後の研究の中では、単にルール数を増やすのではなく、対象シーンのクラスに認識ルール数すなわち知識量がどのように依存するのかを明らかにしたい。また、現在のセグメンテーションのアルゴリズムでは、物体表面の細かな凹凸に敏感に反応し、必要以上に分割する性向がある。大局的形状と微細形状とを区別して認識する、スケールスペースの概念を距離画像処理にも導入する必要があるであろう。

謝辞

本研究は、著者が、大阪大学基礎工学部在学以来、同大学院修士課程、博士課程と進み、さらに大阪大学助手に奉職し現在に至るまで、六年にわたり一貫して行った研究をまとめたものです。この研究は、大阪大学基礎工学部在学中に、桜井良文教授（現在、大阪大学名誉教授、摂南大学教授）のご指導を賜り、パターン認識研究へ著者を導いて下さらなくては第一歩を記すことができませんでした。制御工学全般にわたり深く澄み渡ったご薫陶をご教授下さったのはもとより、当時青二才であった著者に対し研究者としてのライトスタッフ（優れた資質）を御身を持ってご教示下さったことに、心より感謝の意を表します。大学院在学中は、辻三郎教授のこの分野における先端的なご指導をいただきました。そしてなにより、この研究を遂行するにあたり、井口征士教授には徹頭徹尾、進取気鋭の創造あふれるご指導ご便撻を拝しました。さらにご配慮により、大阪大学50周年記念事業「南太平洋調査交流計画」に参加させていただき、三次元画像計測の基礎と応用の基本技術を固める貴重な体験を得ることができました。ここに謹んで、ご厚志を万謝いたします。白井良明教授には、懇切なるご討論を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。北橋忠宏教授には、手厚いご討議を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、同次座標系表現によるシステムパラメータ（第2章）とそのキャリブレーション法（第4章）について、山本裕之氏（現、キャノンシステム情報研究所）の全面的な参加による、著者との二人三脚的な研究や実験、討論、機器・プログラム開発により初めて、本計測システムの実用化が可能になりました。半ピッチずらし法、各種内挿法による高精度化技法（第3章）については明石千恵氏（現、三菱電機中央研究所）に、局所形状に基づいたシーンの記述（第5章）については白沢寿夫氏（現、リコー中央研究所）に、OPS 83 言語によるシーン理解システム（第6章）の構築には尾崎幸久氏（現、富士写真フィルム）に、ロボット応用（第7章）とPRIMULAデータベースの開発（付録）については藤田武洋氏に、システムの小型化（第7章）とプログラム開発には山本勉氏に、多大なる研究の協力をいただきました。尾西康次氏にはプロジェクトの製作に、木田隆夫氏には液晶光学シャッタの開発にご協力をいただきました。以上の皆様に、深く感謝の意を表します。

液晶光学シャッタの製作には、清水和彦氏（松下電子部品）にご便宜をはかっていただきました。お礼申し上げます。

桜井研究室、井口研究室における研究生活では、千原国宏助教授、沼田卓久博士、今井正和博士、仁田武志氏（現、三菱電機姫路製作所）、松田文男氏（現、三菱電機応用機器研究所）に、様々なご理解ご協力を賜りました。ここに深謝いたします。

参考文献

第1章

- [Ballard 82] D.H.Ballard and C.M.Brown: "Computer Vision", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1982).
(邦訳)"コンピュータ・ビジョン", 日本コンピュータ協会 (1987).
- [Fujita 87] 藤田, 佐藤, 井口: "距離画像生成システムのCAD入力への利用", 第29回システムと制御研究発表講演会, D24 (1987).
- [IEEJ 84a] "外観検査の自動化", 電気学会 (1984).
- [IEEJ 84b] "光と画像の基礎工学", 電気学会 (1984).
- [Inokuchi 87] 井口征士: "三次元画像入力システム", 第18回画像工学コンファレンス論文集, pp.243-248 (1987).
- [Ishizuka 88] 石塚満: "画像の認知と仮説推論", 信学技報, PRU87-123 (1988).
- [Ito 87] 伊藤稔: "立体視を用いた三次元計測技術", 電学論, Vol. C-107, No. 7, pp. 613-618 (1987).
- [Kanade 87] T.kanade, C.Thorpe, S.Shafer and M.Hebert: "Carnegie Mellon Nablab vision system", Proc. Intl. W.S. Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence (1987).
- [Kanamori 86] 金森, 横山, 金原, 橋本, 大照: "焦点ボケを利用した3次元情報抽出", 信学総全大, No.1655 (1986).
- [Kidode 80] 木戸出正継: "画像処理ハードウェア", 情報処理, Vol.21, No.6 (1980).
- [Kitahashi 87] 北橋忠宏: "単眼視による三次元計測", 電学論, Vol.C-107, No.7, pp.613-618 (1987).
- [Kurciwa 74] 黒岩, 小林: "レーザ応用計測", 計測と制御, Vol.13, No.1, pp.44-56 (1974).
- [Marr 82] D.Marr: "Vision - A computational investigation into the human representation and processing of visual information - ", W. H. Freeman and Company, New York (1982).
(邦訳)"ビジョン - 視覚の計算理論と脳内表現", 産業図書 (1987).
- [Ohta 87] Y.Ohta, k.Takano and K.Ikeda: "A highspeed stereo matching based on dynamic programing", Proc. 1st ICCV, pp.335-342 (1987).
- [Pugh 83] A.Pugh: "Robot vision", British Library Cataloguing Publication Data (1983).
- [Rosenfeld 82] A. Rosenfeld and A.C. Kak: "Digital picture processing -second edition", Academic Press, Inc., New York (1982).
- [Sakano 83] 坂野誠: "オートフォーカス技術", 光学, Vol.12, No.5, pp.351-358 (1983).
- [Sato 83] 佐藤, 井口, 桜井: "高速画像プロセッサ", システムと制御, Vol.27, No.6別冊, pp.23-26 (1983).
- [Sato 84a] 佐藤, 井口: "ビデオタブレット - CCDカメラを用いた座標入力装置-", 電子通信学会論文誌, Vol.J67-D, No.6, pp.369-375 (1984)
- [Sato 84b] 佐藤, 井口: "画像入力による三次元形状計測", 映像情報, Vol.16, No.12, pp.19-24 (1984).
- [Sato 85] 佐藤, 井口: "距離画像入力システム", システムと制御, Vol.29, No.4別冊, pp.23-26 (1985).
- [Sato 86a] 佐藤, 井口: "7×7のマスクをもつ実時間イメージプロセッサ", テレビ学技報, VR73-3 (1986).
- [Sato 86b] 佐藤他: "画像処理アルゴリズムの最新動向", 新技術コミュニケーションズ (1986).
- [Sato 87] 佐藤, 谷内田: "コンピュータグラフィクスによる立体表示", 光学, Vol.16, No.11, pp.460-465 (1987).
- [Shimizu 87] 清水房生: "三次元測定機", O plus E, No.87, pp.62-69 (1987).

- [Shirai 76] 白井良明: "立体認識のための画像処理", 信学誌, vol. 59, No. 11, pp.1265-1271 (1976).
- [Shirai 87] Y. Shirai: "Three-dimensional computer vision", Springer-Verlag (1987).
- [Sugihara 84] 杉原厚吉: "画像を路用した立体計測の諸手法", 情処研資, CV33-4 (1984).
- [Takano 84] 高野英彦: "形状パターンの認識技術", 情報調査会 (1984).
- [Takasaki 70] H. takasaki: "Moire topography", Applied Optics, Vol. 9, No. 6, pp. 1467-1472 (1970).
- [Tazumi 85] 田積誠: "移動ロボットのための制御システム", 信学総全大, No. 1644 (1985).
- [Tokumaru 87] 得丸英勝: "インテリジェントFAへの期待", システムと制御, Vol. 31, No. 7, pp. 489-489 (1987).
- [Uemura 79] 植村恒義: "画像計測入門", 昭晃堂 (1979).
- [Yachida 84] 谷内田正彦: "視覚センサシステム", 日経メカニカル, 昭和59年7月16日号から6回連載 (1984).
- [Yamamoto 87] 山本, 田宗, 田村: "距離画像の入力と処理", 信学技報, IE86-128 (1987).
- [Yokoya 77] 横矢, 北橋, 田中: "簡単なデータ表現を用いた両眼視に基づく距離情報の抽出", 情報処理, Vol. 18, No. 3, pp. 245-252 (1977).

第2章

- [Altshuler 81] M. D. Altshuler et al. : "Laser electro-optic system for rapid three-dimensional topographic mapping of surface", Optical Engineering, Vol. 20, No. 6 (1981).
- [Aoki 85] 青木, 谷内田, 辻: "パターン投影機と2台のカメラを用いた3次元物体の認識", 信学論, Vol. J68-D, No. 3, pp. 384-391 (1985).
- [Azetsu 87] 畔津明仁: "基礎からの映像信号処理", CQ出版社 (1987).
- [Bastuscheck 86] C. M. Bastuscheck and J. T. Schwartz : "Experimental implementation of a ratio image depth sensor", Techniques for 3-D Machine Perception, North-Holland, pp. 1-12 (1986).
- [Ballard 82] D. H. Ballard and C. M. Brown: "Computer Vision", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1982).
- [Besl 85] P. J. Besl and R. C. Jain : "Range image understanding", Proc. CVPR, pp. 430-449 (1985).
- [Boyer 87] K. L. Boyer and A. C. Kak : "Color encoded structured light for range data acquisition", IEEE Trans., Vol. PAMI-9, No. 1, pp. 14-28 (1987).
- [Chihara 87] 千原国宏: "センサ - 変換原理からコンピュータ応用計測まで -", コロナ社 (1987).
- [Faugeras 83] O. D. Faugeras and E. Pauchon: "Measuring the shape of 3-D objects", Proc. CVPR, pp. 2-7 (1983).
- [Faugeras 84] O. D. Faugeras : "New steps toward a flexible 3-D vision system for robotics", Proc. 7th ICPR, pp. 796-805 (1983).
- [Hall 82] E. L. Hall et al. : "Measuring curved surfaces for robot vision", Computer (1982).
- [Idesawa 77] T. Idesawa, T. Yatagai and T. Soma : "Scanning moire method and automatic measurement of 3-D shapes", Applied Optics, Vol. 16, No. 8, pp. 2152-2162 (1977).
- [IEEJ 84] "光と画像の基礎工学", 電気学会 (1984).
- [Inokuchi 84] 井口征士: "画像入力による三次元画像計測", 映像情報, Vol. 16, No. 12, pp. 19-24 (1984).
- [Ishii 76] M. Ishii and T. Nagata : "Feature extraction of three-dimensional objects and visual processing in a hand-eye system using a laser tracker", Pattern Recognition, Vol. 8, pp. 229-237 (1976).
- [Jarvis 83] R. A. Jarvis : "A laser time-of-flight range scanner for robot vision", IEEE

- Trans., Vol. PAMI-5, No. 5, pp. 505-512 (1983).
- [Kanade 81] T. Kanade and H. Asada : "Noncontact visual 3-D sensing devices", Proc. SPIE, Vol. 283, (1981)
- [Kiessling 76] A. Kiessling: "A fast scanning method for three-dimensional scenes", Proc. 3rd IJCP, pp. 586-589 (1976).
- [Kuroiwa 74] 黒岩, 小林: "レーザ応用計測", 計測と制御, Vol. 13, No. 1, pp. 44-56 (1974).
- [Lewis 77] R. A. Lewis : " A scanning laser range finder to a robotic vehicle" , Proc 5th IJCAI (1977).
- [Lynch 81] D. K. Lynch ; "Range image enhancement via one-dimensional spatial filtering", CGIP, Vol. 15, p. 194 (1981).
- [Mino 81] 美濃, 坂井, 金出: "並列スリット光の時系列符号化による距離測定法", 情処研資, CV 12-3, (1981)
- [Morita 86] 森田, 矢島, 阪田, 藤元: "符号パターン投影法による曲面形状の計測", 信学総大, No. 1667 (1986).
- [Nakamura 87] 中村哲夫: "非接触三次元座標測定機", O plus E, No. 87, pp. 70-75 (1987).
- [Nakazawa 85] 中沢, 大矢, 中島, 油田: "ファイバースケイティングを用いた3次元形状計測システムの開発", 第16回画像コンファレンス, pp. 67-70 (1985)
- [Nishikawa 81] Y. Nishikawa and S. Inokuchi : " Range data entry techniques using a laser spot scanner and two solid-state image sensors" , IEEE Trans. , Vol. IM-30, No. 4, pp. 270-273 (1980)
- [Nitzan 77] D. Nitzan, A. E. Brain and R. O. Duda : "The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis", Proc. IEEE, Vol. 65, No. 2, pp. 206-219 (1977).
- [Ozeki 86] O. Ozeki, T. Makano and S. Yamamoto : "Real-time range measurement device for three-dimensional object recognition", IRRR Trans., Vol. PAMI-8, No. 4, pp. 550-554 (1986).
- [Posdamer 82] J. L. Posdamer and M. D. Altsuler : " Surface measurement by space-encoded projected beam system", CVGIP, Vol. 18, pp. 1-17 (1982)
- [Sato 84] S. Inokuchi, K. Sato and F. Matsuda: "Range-imaging system for 3D object recognition", 7th ICPR, Montreal, pp. 806-808 (1984)
- [Sato 85a] 佐藤, 井口 : "空間コード化による距離画像入力", 電子通信学会論文誌, Vol. J68-D, No. 3, pp. 369-375 (1985)
- [Sato 85b] K. Sato, H. Yamamoto and S. Inokuchi : "3-D shape measurement of megalithic statue -MOAI-", 8th ICPR, Paris, pp. 675-677 (1986)
- [Sato 86a] 佐藤, 山本, 白沢, 井口 : "マルチカメラによる巨石像の立体計測", 昭61信学全大, S15-9 (1986).
- [Sato 86b] 佐藤, 井口: "パターン光投影型レンジファインダにおける二値化方法の検討", 第29回自動制御連合講演会, No. 3001 (1986).
- [Sato 88] 佐藤, 井口: "距離画像チップセンサ", 昭63信学全大, D-508 (1988).
- [Shirai 71] Y. Shirai and M. Suwa : "Recognition of polyhedra with a range finder", Proc. 2nd IJCAI, pp. 80-87 (1971)
- [Suzuki 74] 鈴木, 金谷, 鈴木 : "モアレ縞による三次元計測", 精密機械, Vol. 40, No. 9, pp. 746-753 (1974).
- [Tajima 86] 田島讓二: "Rainbow Range Finderによる距離画像取得", 情処研資, CV44-3, (1986)
- [Takasaki 70] H. Takasaki : "Moiré topography", Applied Optics, Vol. 9, No. 6, pp. 1467-1472 (1970).
- [Ueda 81] 上田, 松本: "時系列空間符号化格子法とその装置化", 信学論, Vol. J64-D, No. 6, pp. 780-787 (1981).
- [Yamamoto 85] 山本, 佐藤, 井口 : "三次元計測のためのシステムパラメータ", 昭60信学全大, No. 1631 (1985).

- [Yamamoto 86a] 山本, 佐藤, 木田, 井口: "二値画像累積による距離画像入力", 昭61信学全大, S 15-12(1986).
- [Yamamoto 86b] H. Yamamoto, K. Sato and S. Inokuchi: "Range imaging system based on binary image accumulation", 8th ICPR, Paris, pp. 233-235 (1986)
- [Yamamoto 87] 山本, 田宗, 田村: "距離画像の入力と処理", 信学技報, IE86-128 (1987).
- [Yonezawa 78] 米沢, 玉邑: "符号化格子を用いた物体形状の認識", 信学論, Vol. J61-D, No. 6, p. 411-418 (1978)
- [Zuk 85] D. Zuk and M. Delleva: "3D sensor for the autonomous land vehicle, Operation manual", ERIM (1985).

第3章

- [Inokuchi 87] 井口征士: "C.G.と画像処理", コンピュータグラフィックス技術動向'87, 日本能率協会 (1987).
- [Kanade 81] T. Kanade and H. Asada: "Noncontact visual 3-D sensing devices", Proc. SPIE, Vol. 283, (1981)
- [Nakazawa 85] 中沢, 大矢, 中島, 油田: "ファイバースケイティングを用いた3次元形状計測システムの開発", 第16回画像コンファレンス, pp. 67-70 (1985)
- [Nishikawa 81] Y. Nishikawa and S. Inokuchi: "Range data entry techniques using a laser spot scanner and two solid-state image sensors", IEEE Trans., Vol. IM-30, No. 4, pp. 270-273 (1980)
- [Onishi 79] 大西, 村上, 村上: "特殊光学系による空間画素ずらし法を用いた固体撮像静止画カメラ", 信学総大, No. 1340 (1979).
- [Ozeki 86] O. Ozeki, T. Makano and S. Yamamoto: "Real-time range measurement device for three-dimensional object recognition", IRRR Trans., Vol. PAMI-8, No. 4, pp. 550-554 (1986).
- [Sato 85] K. Sato, H. Yamamoto and S. Inokuchi: "Tuned range finder for high precision 3D data", 8th ICPR, Paris, pp. 1168-1171 (1986)
- [Sato 87] 佐藤, 明石, 井口: "液晶レンジファインダの高精度化 - 倍精度パターン投影と空間コードの内挿", 昭62信学全大, S12-4 (1987).
- [Shirai 71] Y. Shirai and M. Suwa: "Recognition of polyhedra with a range finder", Proc. 2nd IJCAI, pp. 80-87 (1971)

第4章

- [Altshuler 81] M.D. Altshuler et al.: "Laser electro-optic system for rapid three-dimensional topographic mapping of surface", Optical Engineering, Vol. 20, No. 6 (1981).
- [Kidode 83] 木戸出, 坂上: "パイプライン方式と完全並列型処理方式が増えた最近の画像処理装置", 日経エレクトロニクス, No. 295 (1983).
- [Mino 81] 美濃, 坂井, 金出: "並列スリット光の時系列符号化による距離測定法", 情処研資, CV 12-3, (1981)
- [Sato 84] 佐藤, 井口: "テーブルルックアップを用いた高速画像プロセッサ", 画像電子学会誌, No. 12, pp. 10-18 (1984).
- [Sato 86] 佐藤, 井口: "電気光学素子を用いたレンジファインダ", システムと制御, Vol. 30, No. 6別冊, pp. 33-36 (1986).
- [Sato 87] K. Sato and S. Inokuchi: "Range-imaging system utilizing nematic liquid crystal mask", 1st ICCV, London, pp. 657-661 (1987)
- [Sato 88] 佐藤, 井口: "液晶レンジファインダ - 液晶シャッタによる高速距離画像計測システム -", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J71-D, No. 7 (1988)
- [Tamura 85] 田村秀行: "コンピュータ画像処理入門", 総研出版 (1985).

第5章

- [Agin 76] G. J. Agin and T. O. Binford : " Computer description of curved objects " , IEEE Trans., Vol. C-25, No. 4, pp439-449 (1976).
- [Ballard 82] D. H. Ballard and C. M. Brown: "Computer Vision", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1982).
- [Baumgart 72] B. G. Baumgart : "Winged edge polyhedron representation", STAN-CS-320, AIM-179, Stanford AI lab (1972).
- [Binford 77] R. Nevatia and T. O. Binford: "Description and recognition of curved objects", Artificial Intelligence, Vol. 8, No. 1, pp. 77-98 (1971).
- [Hall 82] E. L. Hall et al. : " Measuring curved surfaces for robot vision", Computer (1982).
- [Honbe 66] 本部: "ベクトルとテンソル", 至文堂, pp. 92-101 (1966).
- [Ikeuchi 81] K. Ikeuchi: "Recognition of 3-D objects using the extended gaussian image", Proc. 7th IJCAI, pp. 595-600 (1981).
- [Imamiya] 今福道夫: "動物絵遊び 直感でとらえる動物画", 思索社.
- [Matsuda 83] 松田, 仁田, 井口: "リングオペレータによる距離画像のラベリング", 信学論, Vol. J66-D, No. 10, pp. 1161-1168 (1983).
- [Oshima 79] M. Oshima and Y. Shirai : "A scene description method using three-dimensional information", Pattern Recognition, Vol. 11, No. 1, pp. 9-17 (1979).
- [Oshima 82] 大島, 白井: "三次元情報を用いた物体認識", 信学論, Vol. J68-D, No. 5, pp. 629-636 (1982).
- [Requicha 82] A. A. G. Requicha and H. B. Voelcker: "Solid modeling: A historical summary and contemporary assesment", IEEE Computer Graphics & Application, Vol. 2, No. 3, pp. 9 (1982).
- [Sato 84] 佐藤, 松田, 井口: "距離画像を利用した曲面体のラベリング", 第28回システムと制御研究発表講演会, D5 (1984).
- [Sato 85a] 佐藤, 井口: "距離画像による三次元形状計測", ロボットおよび応用シンポジウム, pp. 87-92 (1985)
- [Sato 85b] K. Sato and S. Inokuchi : "Three-dimensional surface measurement by space-encoding", J. Robotic Systems, Vol. 2, No. 1, pp. 27-39 (1985)
- [Sato 85c] 佐藤, 藤原, 井口: "距離画像による曲面の分類", 昭60信学全大, No. 1630 (1985).
- [Sato 86] 佐藤他: "画像処理アルゴリズムの最新動向", 新技術コミュニケーションズ (1986).
- [Shirai 72] Y. Shirai : "Recognition of polyhedra with a range finder", Pattern Recognition, Vol. 4, No. 2, pp243-250 (1972).
- [Shirai 87] 白井良明: "パターン理解", オーム社 (1987).
- [Shirasawa 86] 白沢, 佐藤, 井口: "距離画像を用いた連続二次曲面のセグメンテーション", 第29回自動制御連合講演会, No. 3002 (1986).
- [Shirasawa 87] 白沢, 佐藤, 井口: "距離画像を用いた連続二次曲面の認識", 信学技報, PRU87-15 (1987).
- [Sugihara 77] K. Sugihara: "Dictionary-guided scene analysis based on depth information", PIPS-R-No. 13, Electrotechnical Laboratory, pp. 48-122 (1977).
- [Yamaguchi 82a] 山口富士夫: "コンピュータディスプレイによる形状処理工学", 日刊工業新聞社 (1982).
- [Yamaguchi 82b] 山口富士夫: "CAD/CAM入門", 工業調査会 (1982).
- [Yamamoto 83] 山本強: "The 3 dimensional computer graphics パソコンによる3次元グラフィックスの実際", CQ出版社 (1983).
- [Yano 81] 矢野健太郎: "立体解析幾何学", 裳華房, pp189-191 (1981).

第6章

- [Ballard 82] D.H. Ballard and C.M. Brown: "Computer Vision", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1982).
- [Chakravarty 79] I. Chakravarty: "A generalized line and junction labeling scheme with applications to scene analysis", IEEE Trans., Vol. PAMI, pp. 202-205 (1979).
- [Clowes 71] M.B. Clowes: "On seeing things", Artificial Intelligence 2, No. 1 (1971).
- [Forgy 86] C.L. Forgy: "人工知能用言語 OPS83", パーソナルメディア社 (1986).
- [Fukumura 82] 福村, 稲垣: "オートマトン・形式言語理論と計算論", 情報科学講座, No. 6, 岩波書店 (1982).
- [Huffman 71] D.A. Huffman: "Impossible objects and nonsense sentences", Machine Intelligence, No. 6 (1971).
- [Nita 83] 仁田, 佐藤, 井口, 桜井: "三次元位置計測法を利用した物体認識", 昭58信学全大, No. 1488 (1983).
- [Osuga 86] 大須賀節雄編: "知識ベース入門", オーム社 (1986).
- [Ozaki 87] 尾崎, 佐藤, 井口: "距離画像を用いた連続二次曲面の認識", 昭62信学会情シ部門, S 13-4 (1987).
- [Ozaki 88a] 尾崎, 佐藤, 井口: "距離画像を用いた三次元シーンの認識", 昭63信学全大, D-510 (1988).
- [Ozaki 88b] Y. Ozaki, K. Sato and S. Inokuchi: "Rule-driven processing and recognition from range image", 9th ICPR, Beijing, (1988 Submitted)
- [Roberts 65] L.G. Roberts: "Machine perception of three-dimensional solids", Optical and Electro-optical Information Processing, J.P. Tipperett et al. (Eds.), Cambridge, MA: MIT Press (1965).
- [Shirai 87] 白井良明: "パターン理解", オーム社 (1987).

第7章

- [Fujita 87] 藤田, 佐藤, 井口: "距離画像生成システムのCAD入力への利用", 第29回システムと制御研究発表講演会, D24 (1987).
- [Fujita 88a] T. Fujita, K. Sato and S. Inokuchi: "Bin-picking of curved object using range finder", USA-Jap. Symp. Flexible Automation, Minnesota (1988)
- [Fujita 88b] 藤田, 佐藤, 井口: "曲面物体のビンピッキング", 昭63信学全大, D-511 (1988).
- [Inokuchi 86] S. Inokuchi, K. Sato, Y. Ozaki, D. Suizu and H. Matsumura: "Vision system for depalletizer in automated storage", Japan-USA Symp. Flexible Automation, Osaka, pp. 711-714 (1986)
- [Ozaki 86] 尾崎, 佐藤, 松村, 水津, 井口: "自動倉庫・荷下作業におけるビジョンシステム", 情報学会第33回全大, 5S-10 (1986).
- [Yamamoto 88] 山本, 佐藤, 井口: "小型CRTプロジェクタを用いた形状計測装置", 第32回システムと制御研究発表講演会 (1988).

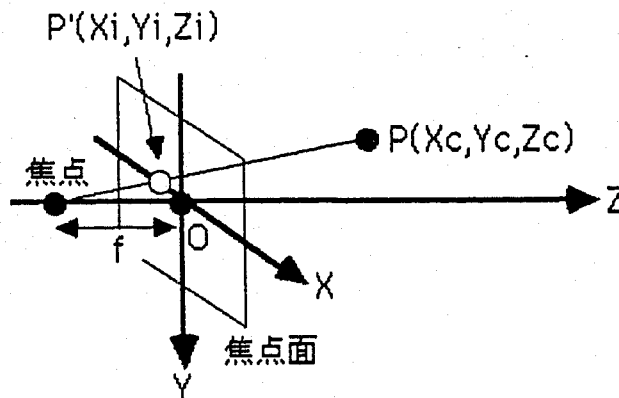
付録

- [Ballard 82] D.H. Ballard and C.M. Brown: "Computer Vision", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1982).
- [Honbe 66] 本部: "ベクトルとテンソル", 至文堂, pp. 92-101 (1966).
- [Omoto 65] 尾本, 小郷: "公式と数表", 電気書院 (1965).
- [Yamamoto 85] 山本, 佐藤, 井口: "三次元計測のためのシステムパラメータ", 昭60信学全大, No. 1631 (1985).
- [Yamamoto 87] 山本, 田宗, 田村: "距離画像の入力と処理", 信学技報, IE86-128 (1987).

付録A 同次座標系表現による光投影法のシステムパラメータ

三次元空間上のある一点は、一つの平面と一つの直線の交った点として唯一に決定できる。スリット光投影法では、スリット光が一つの平面を、カメラの視線が一つの直線を、なすことで、対象の三次元位置はこれら二つの交点として求められる。スリット光やカメラの視線の方程式は、プロジェクタやカメラの焦点距離や姿勢などのシステムパラメータによって記述される。以下、これらスリット光投影法でのシステムパラメータの幾何モデルについて述べる [Yamamoto 85]。

A-1 カメラパラメータ



図A-1 透視変換

図A-1にピンホールカメラモデルによる透視変換を示す。Fはレンズの焦点、Iは結像面である。空間中のある一点P (X_c, Y_c, Z_c)を結像面Iへ透視した点、P' (X_i, Y_i, Z_i)は、

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -f \end{pmatrix} + \alpha \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ f + Z_c \end{pmatrix}, \quad Z_i = 0 \quad (\text{A-1})$$

で与えられ、また

$$X_i = f X_c / (f + Z_c), \quad Y_i = f Y_c / (f + Z_c), \quad Z_i = 0 \quad (\text{A-2})$$

と表せる。透視変換はこのように非線型変換であるが、同次座標系 (Homogeneous Coordinate) による表現を用いることにより、線型化できる [Ballard 82]。三次元の点 (X, Y, Z) を、次式のようにW_hを媒介とする四次元の点 (X_h, Y_h, Z_h, W_h) で表現したものが同次座標である。

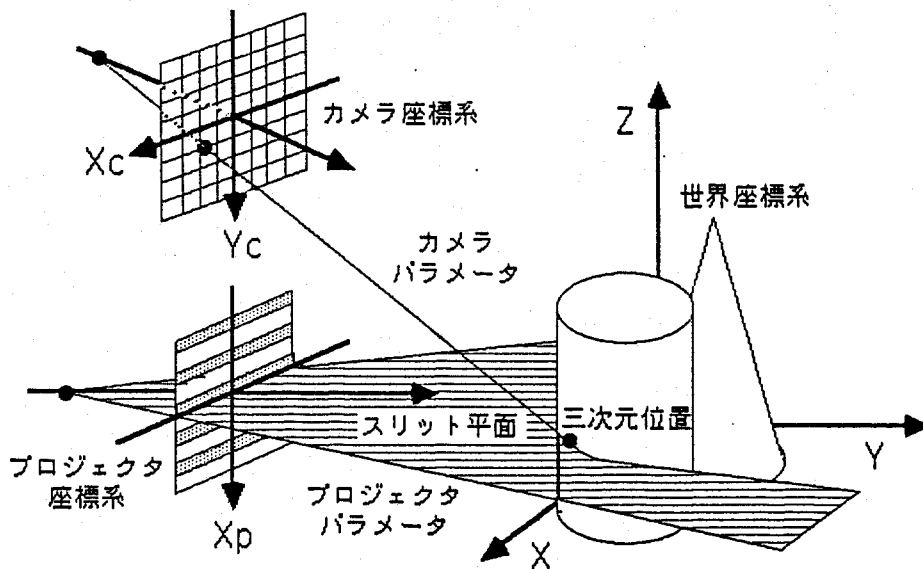
$$X = X_h / W_h, \quad Y = Y_h / W_h, \quad Z = Z_h / W_h \quad (A-3)$$

この同次座標系により、透視変換は、

$$\begin{pmatrix} X_{ih} \\ Y_{ih} \\ Z_{ih} \\ W_{ih} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{ch} \\ Y_{ch} \\ Z_{ch} \\ W_{ch} \end{pmatrix} \quad (A-4)$$

の4×4の行列演算で記述できる。

図A-1の透視変換は、点Pと点P'がカメラに固定した座標系で共に表現されているときに適用できるが、計測装置の配置や計測データの処理の面から、測定対象である点Pをカメラとは独立した測定に適した別の座標系で表現した方が利点が多い。図A-2にこの関係を表す。



図A-2 世界座標系とカメラ座標系、プロジェクタ座標系の関係

測定に用いる座標系を**物体座標系**と呼び、カメラに原点を置いた座標系を**カメラ座標系**と呼ぶ。この二つの座標系を関係づける変換Tは、回転移動と平行移動を含めて、

$$T = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (A-5)$$

で表せ、物体座標系の点Pからカメラ座標系の点P'への変換は、

$$\begin{pmatrix} X_{ch} \\ Y_{ch} \\ Z_{ch} \\ W_{ch} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A-6})$$

$$= \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{31}/f & T_{32}/f & T_{33}/f & T_{34}/f+1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A-7})$$

と表せる。Z_{ch} = 0なので、結像面での二次元座標 (X_c, Y_c) で上式を簡略化すると、

$$\begin{pmatrix} H_c X_c \\ H_c Y_c \\ H_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A-8})$$

と記述できる。この3×4マトリクスをカメラパラメータと呼ぶ。

A-2 プロジェクタパラメータ

スリット光プロジェクタも、**プロジェクタ座標系**と呼ばれるプロジェクタに原点を置いた座標系上で、ピンホールカメラモデルと同じ透視変換の関係にある。しかし、**図A-2**に示すように、スリットが直線的に伸びているため、結像面の二次元座標のうち一次元がパラメータとなる。したがって、スリット位置X_pと空間上の点(X, Y, Z)の関係は(A-8)式とまったく同様であるが、変換マトリクスは2×4に縮退したものとなる。次式にこの関係を示す。

$$\begin{pmatrix} H_p X_p \\ H_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A-9})$$

ここで、この2×4のマトリクスを**プロジェクタパラメータ**と呼ぶ。

A-3 三次元座標の算出

カメラパラメータC、プロジェクタパラメータPが既知として、与えられた (X_c, Y_c) と X_p から、視線とスリット光のなす平面との交点 (X, Y, Z) を物体座標系で求める。(A-8)式、(A-9)式には、

$$H_c = C_{31}X + C_{32}Y + C_{33}Z + C_{34} \quad (A-10)$$

$$H_p = P_{21}X + P_{22}Y + P_{23}Z + P_{24} \quad (A-11)$$

の関係があり、さらに展開整理すると、

$$(C_{11} - C_{31}X_c)X + (C_{12} - C_{32}X_c)Y + (C_{13} - C_{33}X_c)Z = X_c C_{34} - C_{14} \quad (A-12)$$

$$(C_{21} - C_{31}Y_c)X + (C_{22} - C_{32}Y_c)Y + (C_{23} - C_{33}Y_c)Z = Y_c C_{34} - C_{24} \quad (A-13)$$

$$(P_{11} - P_{21}X_p)X + (P_{12} - P_{22}X_p)Y + (P_{13} - P_{23}X_p)Z = X_p P_{24} - P_{14} \quad (A-14)$$

となる。ここで、

$$F = \begin{pmatrix} X_c C_{34} - C_{14} \\ Y_c C_{34} - C_{24} \\ X_p C_{34} - C_{24} \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} C_{11} - C_{31}X_c & C_{12} - C_{32}X_c & C_{13} - C_{33}X_c \\ C_{21} - C_{31}Y_c & C_{22} - C_{32}Y_c & C_{23} - C_{33}Y_c \\ P_{11} - P_{21}X_p & P_{12} - P_{22}X_p & P_{13} - P_{23}X_p \end{pmatrix} \quad V = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (A-15)$$

とおけば、(A-12, 13, 14)式はまとめて、

$$F = Q \cdot V \quad (A-16)$$

と行列演算で表現できる。したがって、Qの逆行列が存在すれば

$$V = Q^{-1}F \quad (A-17)$$

となり、交点の座標 (X, Y, Z) が求められる。

A-4 カメラパラメータ、プロジェクタパラメータのキャリブレーション

物体座標系で基準となる既知の点 (X, Y, Z) と、それに対応するカメラ結像面での位置 (X_c, Y_c) の一組が分かれば、(A-12, 13)式を移項した、

$$C_{11}X + C_{12}Y + C_{13}Z + C_{14} - C_{31}XX_c - C_{32}YX_c - C_{33}ZX_c - C_{34}X_c = 0 \quad (A-12)'$$

$$C_{21}X + C_{22}Y + C_{23}Z + C_{24} - C_{31}XX_c - C_{32}YX_c - C_{33}ZX_c - C_{34}X_c = 0 \quad (A-13)'$$

の二式が成立する。したがって、カメラパラメータの C_{11} から C_{34} まで12個の未知数を決定するには、同一平面上にない6個の基準となる点を用いればよい。

パラメータのキャリブレーション精度を高めるためには、6個以上の基準点を用い、最小二乗法によりパラメータを決定する。n点の基準点の物体座標 (X_i, Y_i, Z_i) とそれに対応するカメラ座標 (X_{ci}, Y_{ci}) が既知であれば、 $C_{34} = 1$ と置くことにより、

$$\begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1 X_{c1} & -Y_1 X_{c1} & -Z_1 X_{c1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1 X_{c1} & -Y_1 X_{c1} & -Z_1 X_{c2} \\ & & & & & & & \dots & & & \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_n X_{cn} & -Y_n X_{cn} & -Z_n X_{cn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_n X_{cn} & -Y_n X_{cn} & -Z_n X_{cn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \dots \\ C_{32} \\ C_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{c1} \\ Y_{c1} \\ \dots \\ X_{cn} \\ Y_{cn} \end{pmatrix} \quad (\text{A-18})$$

となり、これを

$$A \cdot C = R \quad (\text{A-19})$$

と表せば、疑似最小二乗法により、

$$C = (A^t A)^{-1} A^t R \quad (\text{A-20})$$

でカメラパラメータをキャリブレーションできる。

プロジェクタパラメータの場合もまったく同様である。同一平面上にない8個以上の基準となる点の物体座標 (X_i, Y_i, Z_i) とそれに対応するプロジェクタ座標 X_{pi} が既知であれば、 $P_{34} = 1$ と置くことにより、

$$\begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1 X_{p1} & -Y_1 X_{p1} & -Z_1 X_{p1} \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -X_2 X_{p2} & -Y_1 X_{p2} & -Z_2 X_{p2} \\ & & & & \dots & & \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_n X_{cn} & -Y_n X_{cn} & -Z_n X_{cn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ \dots \\ P_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{p1} \\ X_{p2} \\ \dots \\ X_{cn} \end{pmatrix} \quad (\text{A-21})$$

となり、これを

$$B \cdot P = S \quad (\text{A-22})$$

と表せば、疑似最小二乗法により、

$$P = (B^t B)^{-1} B^t Q \quad (A-23)$$

でプロジェクタパラメータもキャリブレーションできる。

付録 B 法線ベクトル

B-1 局所平面近似

曲面上の点Pにおいて、その接平面に垂直な直線を点Pの法線といい、その方向ベクトルを法線ベクトルという。デジタル画像として標本化されている距離画像では、曲面は二次元的なサンプル点の集まりとして表現される。このときの法線ベクトルは、注目画素を取り囲む小領域を面素と考え、この小領域を平面と見なすことで近似される。この最小二乗あてはめされた平面の法線ベクトルを、その画素での対象物体面の法線ベクトルとする。

近似平面の方程式を、次式のように表す。

$$ax + by + cz = 1 \quad (B-1)$$

同一直線上にない小領域内の3点以上の標本点の座標 (X_i, Y_i, Z_i) から、

$$\begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ X_n & Y_n & Z_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ \dots \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (B-2)$$

と置き、

$$A \cdot P = U \quad (B-3)$$

と表せば、疑似最小二乗法により、

$$P = (A^t A)^{-1} A^t U \quad (B-4)$$

で平面方程式が決定でき、 (a, b, c) を正規化することで法線ベクトルを求める。

ただし、近似平面が原点 $(0, 0, 0)$ 付近を通ると、推定誤差が大きくなるので、座標原点の位置に注意する必要がある。そのため、入力される距離画像の原点が床面上に置かれている場合などは、多くの接平面が原点と交わるため、そのままの座標系では正しく平面近似が行えない。この場合、カメラの視点が原点となるように座標系の平行移動を施した後、(B-4) 式を数値計算する。接平面が視点近傍を通過する曲面部位は、視線と平行となりカメラより観測されないので、認識の上で問題とならない。

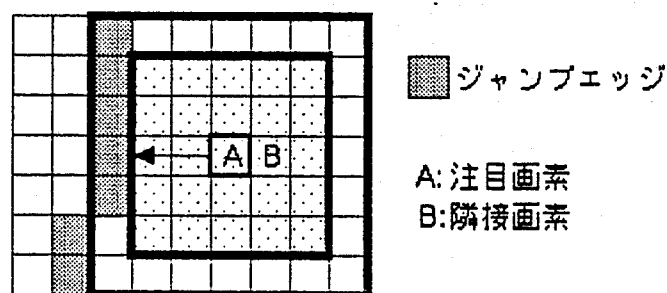
B-2 マスクサイズ

平面近似の際の小領域を与えるマスクサイズは、距離画像の計測誤差と標本化密度により決定される。マスクサイズが大きく標本点の数が多い方が計測誤差の影響を抑えられるが、必要以上に大きいと物体の局所的な形状の変化を検出できなくなる。

また、ジャンプエッジ（距離画像の不連続な点）がマスク内にあると、異なる物体面が同一の面素の中に存在することになり、正しく法線ベクトルが決定できない。したがって、ジャンプエッジを含まないように、マスク形状を縮小変化させる必要がある。以下、そのアルゴリズムを示す。

- ・マスクサイズの可変範囲を決める。
- ・画像中のジャンプエッジを検出する。
- ・マスクサイズの可変範囲の間で、マスク内にジャンプエッジを含まない最も大きな正方マスクで平面近似を行う。
- ・最小マスクサイズにしてもジャンプエッジが存在する場合は、“法線ベクトル計算不可能画素” とラベルづけする。

このとき、マスクサイズを縮小させた場合は標本点となる画素数が少なくなり、平面近似の精度が悪化するので、隣接画素との連続性から補正を加える。これは、隣接する画素間では法線ベクトルが急変しないものと仮定し、縮小したマスクの画素数に応じて隣接画素の法線ベクトルの成分を加味するものである。



図B-1 平面近似のための近傍領域サイズの適応変化

ジャンプエッジに接しマスクサイズが縮小した画素を点A、ジャンプエッジと反対側の隣接画素を点Bとして、

N_a : 縮小したマスクサイズで得られた点Aの法線ベクトル

N_b : 点Bの法線ベクトル

m : 点Aの法線ベクトルを求めるのに要した画素数

n : 最大マスクサイズ内の画素数

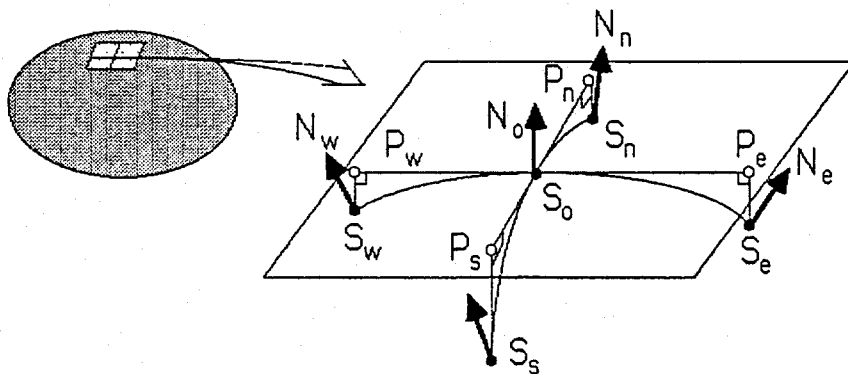
とおいた場合、最終的な点Aの法線ベクトルを、

$$N_a \cdot m/n + (1 - m/n) N_b \quad (B-5)$$

と定義する(図B-1)。

付録C ガウス曲率・平均曲率

ガウス曲率・平均曲率は、曲面の局所的な形状を表す簡便かつ重要な指標であり、物理的には注目点を通り直交する二つの主曲率の積および平均を表している。これは、物体表面の見え方つまり平行移動・回転移動に関係なく、同一の形状であれば同じ値を取る特徴がある。この両曲率を距離画像から算出する方法について述べる[Omoto 65][Honbe 66]。



図C-1 ガウス曲率、平均曲率の算出に必要な近傍情報

図C-1はある注目画素における対象表面を拡大したものである。Sは近傍点の三次元位置を、Nは法線ベクトルを表している。また、図中の平面は注目点における接平面である。Sより接平面に下ろした垂線の足をPとすると、 P_0 における接線ベクトルは近似的に、

$$R_u = (P_e - P_w) / 2, \quad R_v = (P_s - P_n) / 2 \quad (C-1)$$

と表すことができる。ここで、

$$dS_u = S_e - S_w, \quad dS_v = S_s - S_n \quad (C-2)$$

とおくと、(C-1) 式は、

$$R_u = (dS_u - N_o \cdot (N_o \cdot dS_u)) / 2, \quad R_v = (dS_v - N_o \cdot (N_o \cdot dS_v)) / 2 \quad (C-3)$$

と変形できる。

また、

$$N_u = (N_e - N_w) / 2, \quad N_v = (N_s - N_n) / 2 \quad (C-4)$$

とすると、点P_oにおける面の第一次基本量は、

$$E = R_u \cdot R_u, \quad F = R_u \cdot R_v, \quad G = R_v \cdot R_v \quad (C-5)$$

で、第二次基本量は、

$$L = -R_u \cdot N_u, \quad N = -R_v \cdot N_v, \quad M = -(R_u \cdot N_v + R_v \cdot N_u) / 2 \quad (C-6)$$

で定義される。ガウス曲率Kおよび平均曲率Hは、これら二つの基本量より、

$$K = (EG - FF) / (LN - MM) \quad (C-7)$$

$$H = (EN - 2FM + GL) / 2(EG - FF) \quad (C-8)$$

で求められる。

参照される近傍点としては隣接画素が望ましいが、三次元位置、法線ベクトルとも変化量が小さく曲率が安定に求まらない。このため、十字方向に数画素（5画素）離れた点を参照点とする。ジャンプエッジの周辺（“法線ベクトル計算不可能画素”）では法線ベクトルが算出されないため、上記の曲率計算が行えない。このような画素は“曲率計算不可能画素”とする。

付録D 二次曲面の性質

D-1 二次曲面

二次曲面の方程式は一般に次のように表される。

$$a_1x^2+a_2y^2+a_3z^2+a_4xy+a_5xz+a_6yz+a_7x+a_8y+a_9z+a_{10} = 0 \quad (D-1)$$

で示される。

三次元位置データ (x_i, y_i, z_i) から、疑似最小二乗法を用いて近似を行う。 a_{10} を -1 に固定すると、

$$\begin{pmatrix} X_{12} & Y_{12} & Z_{12} & X_1Y_1 & X_1Z_1 & Y_1Z_1 & X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_{22} & Y_{22} & Z_{22} & X_2Y_2 & X_2Z_2 & Y_2Z_2 & X_2 & Y_2 & Z_2 \\ & & & \dots & & & & & \\ X_{i2} & Y_{i2} & Z_{i2} & X_iY_i & X_iZ_i & Y_iZ_i & X_i & Y_i & Z_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (D-2)$$

となり、これを、

$$X \cdot A = B \quad (D-3)$$

と表せば、

$$A = (X^t X)^{-1} X^t B \quad (D-4)$$

が成立し、近似方程式を決定することができる。

これ以降、表記の関係上、係数を少し変更した次の方程式により近似曲面を表すことにする。

$$ax^2+by^2+cz^2+2fxy+2gxz+2hyz+2lx+2my+2nz+d = 0 \quad (D-5)$$

しかし、この記述では座標軸の平行移動・回転に対して不変ではない。そこで、二次曲面の標準形を導出し、座標軸の平行移動・回転に対して不変な記述表現に変換する。座標軸の平行移動のためのパラメータとして二次曲面の中心点を求め、回転のパラメータとしては主軸を求める。

D-2 中心

(D-1)式で表される二次曲面が中心を持つ条件(有心条件)は、次の行列式Dが非零 ($|D| \neq 0$) であることである。

$$D = \begin{vmatrix} a & f & g \\ f & b & h \\ g & h & c \end{vmatrix} \quad (D-6)$$

このとき、中心の座標 (X_0, Y_0, Z_0) は、

$$X_0 = -\frac{1}{D} \begin{vmatrix} l & f & g \\ m & b & h \\ n & h & c \end{vmatrix}, \quad Y_0 = -\frac{1}{D} \begin{vmatrix} a & l & g \\ f & m & h \\ g & n & c \end{vmatrix}, \quad Z_0 = -\frac{1}{D} \begin{vmatrix} a & f & l \\ f & b & m \\ g & h & n \end{vmatrix} \quad (D-7)$$

で求められる。

D-3 主軸

(D-1)式で表される二次曲面の主軸は行列Dの固有ベクトルと等価である。Dは実対称行列なので、ヤコビの方法などで固有ベクトルを数値計算できる。Dの固有値の数が3未満の場合は、二次曲面が対称軸を持ち主軸を一意に決定できない。

D-4 二次曲面の分類と標準形

二次曲面の標準形を(D-1)式より求める方法について述べる。

$$A = \begin{pmatrix} a & f & g & l \\ f & b & h & m \\ g & h & c & n \\ l & m & n & d \end{pmatrix} \quad (D-8)$$

$$V^t = [x \quad y \quad z \quad 1] \quad (D-9)$$

とすると、(D-1)式は、

$$V^t A V = 0 \quad (D-10)$$

で表される。また、Dの固有値を t_1, t_2, t_3 とする。

(ア) Dの固有値がすべて非零の場合

この場合は、座標の回転・平行移動によって二次曲面の方程式は、

$$t_1 x^2 + t_2 y^2 + t_3 z^2 + d' = 0 \quad (D-11)$$

の形の標準形に書き換えられる。行列で表現すれば、

$$V^t A' V = \begin{pmatrix} x & y & z & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (D-12)$$

となり、 d' は

$$d' = |A| / |D| \quad (D-13)$$

で与えられる。

◆ $|A| \neq 0$ の場合

$$t_1' = -t_1/d', \quad t_2' = -t_2/d', \quad t_3' = -t_3/d' \quad (D-14)$$

とすれば、(D-11)式は、

$$t_1' x^2 + t_2' y^2 + t_3' z^2 = 1 \quad (D-15)$$

となる。したがって、二次曲面は次のように分類できる。

- a) t_1' 、 t_2' 、 t_3' がすべて正ならば、楕円面。
- b) t_1' 、 t_2' 、 t_3' のうち1つが負ならば、一葉双曲面。
- c) t_1' 、 t_2' 、 t_3' のうち2つが負ならば、二葉双曲面。

◆ $|A| = 0$ の場合

この場合、標準形は、

$$t_1 x^2 + t_2 y^2 + t_3 z^2 = 0 \quad (D-16)$$

となり、次のように分類できる。

- d) t_1, t_2, t_3 のうち1つでも正であれば、二次錐面。
- e) t_1, t_2, t_3 がすべて負であれば、空間中の一点。

(イ) Dの固有値のうち一つが零 ($t_1 \neq 0, t_2 \neq 0, t_3 = 0$)

この場合、座標軸の回転により二次曲面は、

$$t_1 x^2 + t_2 y^2 + 2l'x + 2m'y + 2n'z + d' = 0 \quad (D-17)$$

と表される。

◆ $|A| \neq 0$ の場合

さらに平行移動より、二次曲面は、

$$t_1 x^2 + t_2 y^2 + 2 \operatorname{sqr}(-A/t_1 t_2) z = 0 \quad (D-18)$$

と表現される。このとき、

- f) t_1, t_2 ともに正ならば、楕円の放物面。
- g) t_1, t_2 の一方が負ならば、双曲的放物面。

となる。

◆ $|A| = 0$ の場合

さらに平行移動より、二次曲面は、

$$t_1 x^2 + t_2 y^2 + d'' = 0 \quad (D-19)$$

と表現される。このとき、 $t_1' = t_1/d''$ 、 $t_2' = t_2/d''$ とすると、

- h) d'' が0ならば、二平面
- i) t_1', t_2' がともに正ならば、楕円柱
- j) t_1', t_2' の一方が負ならば、双曲柱
- k) t_1', t_2' ともに負ならば、一直線

と分類される。

(ウ) Dの固有値のうち二つが零 ($t_1 \neq 0, t_2 = 0, t_3 = 0$)

このとき、二次曲面は回転移動により、

$$t_1 x^2 + 2l'x + 2m'y + 2n'z + d' = 0 \quad (D-20)$$

となり、

l) m', n' が同時に0でないならば、放物柱。

m) m', n' が同時に0ならば、平行二平面。

に分類できる。このとき、それぞれ次の形の標準形に直すことができる

$$t_1 x^2 + 2m''y = 0 \quad (D-21)$$

$$t_1 x^2 + d'' = 0 \quad (D-22)$$

D-5 二次曲面の主軸変換

二次曲面の中心を原点とし、三つの主軸を直交座標とするように、座標系を平行・回転移動させることを主軸変換と呼ぶ。この主軸変換は以下のようにして求まる。

$$D' = T^t D T = \begin{pmatrix} t_1 & 0 & 0 \\ 0 & t_2 & 0 \\ 0 & 0 & t_3 \end{pmatrix} \quad (D-23)$$

Dを直交化する 3×3 の変換行列Tより、

$$T' = \begin{pmatrix} T & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D-24)$$

なる 4×4 の行列 T' を考える。この変換行列 T' により、

$$T'^t A T' = \begin{pmatrix} t_1 & 0 & 0 & u \\ 0 & t_2 & 0 & v \\ 0 & 0 & t_3 & w \\ u & v & w & d \end{pmatrix} \quad (D-25)$$

となり、 T' は直交変換行列を表し、三つの主軸が直交座標となるように回転移動させる。さらに、平行移動を行なうことにより、二次曲面の中心を原点とすることができる。平行移動変換は、

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & S_x \\ 0 & 1 & 0 & S_y \\ 0 & 0 & 1 & S_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D-26)$$

で表され、

$$\begin{aligned} t_1 \neq 0 \quad \text{ならば} \quad S_x &= -u/t_1; & t_1 = 0 \quad \text{ならば} \quad S_x &= 0 \\ t_2 \neq 0 \quad \text{ならば} \quad S_y &= -v/t_2; & t_2 = 0 \quad \text{ならば} \quad S_y &= 0 \\ t_3 \neq 0 \quad \text{ならば} \quad S_z &= -w/t_3; & t_3 = 0 \quad \text{ならば} \quad S_z &= 0 \end{aligned}$$

である。変換 T 、変換 S を順に施すことにより、

$$S^t T^t A T S = \begin{pmatrix} t_1 & 0 & 0 & u' \\ 0 & t_2 & 0 & v' \\ 0 & 0 & t_3 & w' \\ u' & v' & w' & d'' \end{pmatrix} \quad (D-27)$$

主軸変換がなされる。最終的な主軸変換行列 P は、

$$P = (TS)^t \quad (D-28)$$

で得られる。

付録 E 距離画像データベース

三次元画像計測、距離画像処理の研究の遂行を円滑にするために、距離画像のデータ形式の整理とデータベース化を行う。

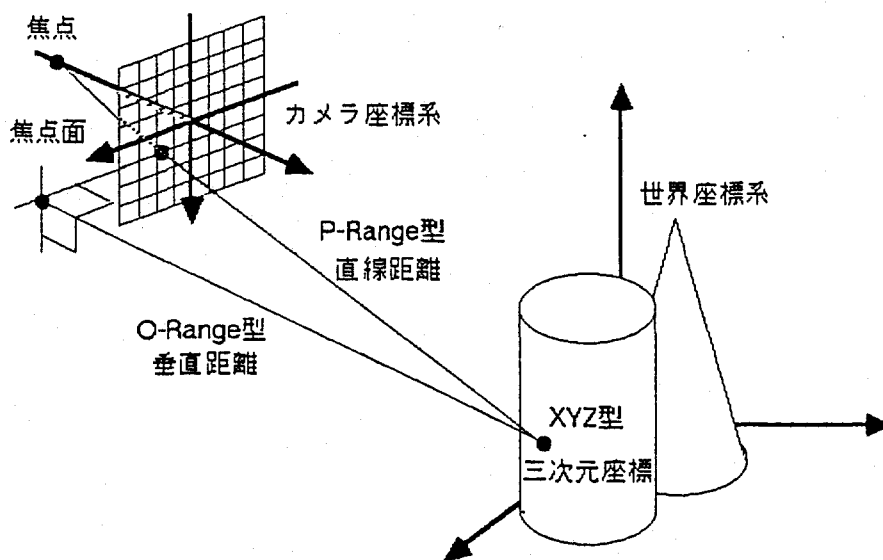
E-1 距離画像のデータ形式

距離画像を実際に計算機内に蓄えソフトウェアによって処理を行う際、そのデータ形式は、記憶サイズから処理アルゴリズムまで大きく左右する。これまで明確に議論されたことはなかったが、山本ら [Yamamoto 87] が初めて検討を行った。図E-1に示すように、距離画像をなす二次元配列のデータ要素として三種類が考えられ、それぞれ距離画像の表現形式となる。

- (1) P型 (Perspective Type) - 視点との直線距離
- (2) O型 (Orthogonal Type) - 焦点面との垂直距離
- (3) XYZ型 (XYZ Type) - シーン中に設定された世界座標系での三次元座標値

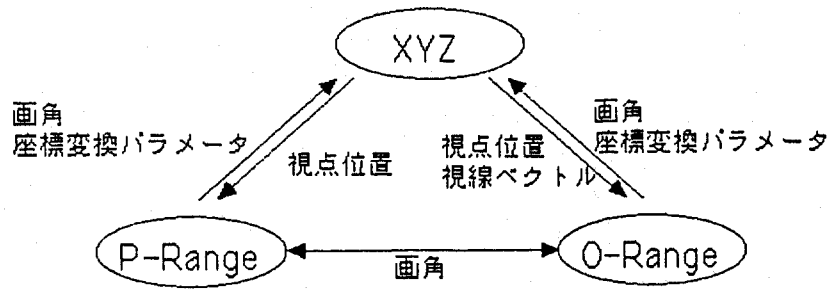
P型は光飛行時間測定法、O型はモアレ計測法などカメラ座標系に固定した三角測量法、XYZ型は同次座標系表現に基づく三角測量法において、それぞれ代表的な表現形式である。

応用面では、P型は直感的な距離の概念と一致するので例えば移動ロボットの障害物回避などに適し、O型は等高線分布を得たい場合などに都合がよい。一方、XYZ型は距離画像というよりも三次元位置分布というべきものであり、物体の形状に関する処理に向いている。そのため、本論文では一貫してこのXYZ型を適用している。



図E-1 距離画像の形式 [Yamamoto 87]

これら三者の間では、図E-2に示すように、カメラ視点の世界座標系における位置や、画角、視線ベクトルなどカメラパラメータを、介して相互に変換が可能である。



図E-2 データ形式の変換[Yamamoto 87]

E-2 距離画像のデータベース

大量の距離画像の保存と流通が円滑になるよう、距離画像のデータベース化を行う。これは、距離画像処理ソフトウェアパッケージPRIMULA (Package of Range Image, Utilities and Applications) に添付される標準データ群の一部をなす。

一つの距離画像はXYZ型で表現され、以下の五つのファイルから構成される。

- (A) X世界座標値 (256×256画素、IEEE単精度表現、物理単位mm)
- (B) Y世界座標値 (256×256画素、IEEE単精度表現、物理単位mm)
- (C) Z世界座標値 (256×256画素、IEEE単精度表現、物理単位mm)
- 不可視ラベルとして、計測範囲を大きく越えた遠方の座標値 (-1.0E5) を付加する。
- (D) 同一のカメラアングルからの濃淡画像 (256×256画素、8 bit整数)
- (E) 視点データ (位置 (x, y, z)、視線ベクトル (i, j, k))

現在、曲面物体を中心に数十種類のシーンが蓄積されている。

付録F OPS 83 実際例

ルール	3頁
面のワーキングメモリエlement	3頁
エッジのワーキングメモリエlement	4頁

```
module() {
```

```
-----  
-- 画像処理ルール --  
-----
```

```
-- 領域の記述を求めるルール
```

```
rule preprocess_analyze_region {  
    (goal subject = preprocess; operation = analyze; object = region);  
    &R (region flag = 0b);  
    &P (para_real id = &R.id);  
    -->  
    local  
        &id:          integer,  
        &o:           integer,  
        &para:        real10,  
        &s:           surface,  
        &t:           std;  
  
    &id = &R.id;  
    call para_copy(&P.para, &para);  
    &o = c_parameter(&id, &para, &s, &t);  
    &o = name(&s.label, &R.label);  
    call make_region(&id, &s);  
    call make_standard(&id, &t);  
    remove &R;  
    remove &P;  
};
```

```
-- 微小領域を削除するルール
```

```
rule region_remove_small {  
    (goal subject = region; operation = remove; object = small);  
    &T (threshold);  
    &R (region flag = 1b; area < &T.remove_area);  
    -->  
    local  
        &id:          integer,  
        &o:           integer;  
  
    &id = &R.id;  
    &o = c_region_remove(&id);  
    remove &R;  
};
```

```
-----  
-- データツリー構築ルール --  
-----
```

```
-- 領域から面を抽出するルール
```

```
rule node_same_face {  
    (goal subject = node; operation = make; object = face);  
    &E (edge label = smooth; status = 0b);
```

```

&R1 (region id = &E.region1);
&R2 (region id = &E.region2);
&NR1(node label = region; id = &R1.node);
&NR2(node label = region; id = &R2.node);
&NF1(node label = face; id = &NR1.up_node);
&NF2(node label = face; id = &NR2.up_node; id <> &NF1.id);
-->
remove &NF2;
};

```

— アトリビュート・リンク導出ルール —

— 背の高い物体を見つけるルール

```

rule attribute_tall_object {
  (goal subject = attribute);
  &NO (node label = object);
  - (attribute node = &NO.id; class = tall);
  &AX1(attribute node = &NO.id; class = max_xc);
  &AX2(attribute node = &NO.id; class = min_xc);
  &AY1(attribute node = &NO.id; class = max_yc);
  &AY2(attribute node = &NO.id; class = min_yc);
  &AZ1(attribute node = &NO.id; class = max_zc);
  &AZ2(attribute node = &NO.id; class = min_zc);
  ((&AZ1.value - @.value) / (&AX1.value - &AX2.value) > 3.0);
  ((&AZ1.value - @.value) / (&AY1.value - &AY2.value) > 3.0));
  -->
  make(attribute node = &NO.id; class = tall);
};

```

— 直行する二平面を求める

```

rule link_right_angle {
  (goal subject = link);
  &NR1(node label = region);
  &NR2(node label = region; id <> &NR1.id);
  &R1 (region node = &NR1.id; label = planar);
  &R2 (region node = &NR2.id; label = planar; (check_right_angle(&R1.axis[1], @.axis[1]));
  - (link class = right_angle;
  ((&NR1.id = @.node1 / ¥ &NR2.id = @.node2) ¥ / (&NR1.id = @.node2 / ¥ &NR2.id));
  -->
  make(link node1 = &NR1.id; node2 = &NR2.id; class = right_angle);
};

```

— 単一物体認識ルール —

— 床面を認識するルール

```

rule floor_find {
  (goal subject = single_object);

```

```

&NO (node label = object);
&NF (node label = face; up_node = &NO.id);
- (node label = face; up_node = &NO.id; id <> &NF.id);
&NR (node label = region; up_node = &NF.id);
- (node label = region; up_node = &NF.id; id <> &NR.id);
  (attribute class = horizontal; node = &NR.id);
&R (region node = &NR.id; (check_include(@.center.zc, -5.0, 5.0)));
-->
make(attribute class = floor; node = &NO.id);
};

```

-- 床面を検定するルール

```

rule floor_check1 {
  (goal subject = single_object);
  &T (threshold);
  &A (attribute class = floor);
  &NO (node label = object; id = &A.node);
  &NF (node label = face; up_node = &NO.id);
  &NR (node label = region; up_node = &NF.id);
  &R (region node = &NR.id; area < &T.large_area);
  -->
  remove &A;
};

```

```

rule floor_check2 {
  (goal subject = single_object);
  &A (attribute class = floor);
  &NO (node label = object; id = &A.node);
  (link node1 = &NO.id; class = over);
  -->
  remove &A;
};

```

};

REGION

id = 1

curvature label : planar
 parameter label : planar
 area : 26267
 image center of G : 127.2972 62.75353
 3d center of G : 252.8559 239.686 97.44561
 max - min X : 386.6909 120.7851
 max - min Y : 369.5614 109.8826
 max - min Z : 189.7481 -2.096586
 parameter center : 0 0 0
 axis : -0.7068511 -0.7071743 -0.163094e-01
 : 0 0 0
 : 0 0 0
 clipping X : 386.6909 120.7851
 Y : 369.5614 109.8826
 Z : 189.7481 -2.096586
 fitting parameter : -0.5427853e-03 -0.5430334e-03 -0.1252386e-04

id = 2

curvature label : hyperbolic
 parameter label : single_hyperbolic
 area : 747
 image center of G : 123.9438 28.33199
 3d center of G : 32.37843 34.72608 222.3838
 max - min X : 51.44263 21.57028
 max - min Y : 55.01512 23.12253
 max - min Z : 239.1526 209.2579
 parameter center : 32.57981 34.72585 223.4032
 axis : 0.7253217 0.677648 -0.12125
 : -0.6759808 0.7344097 0.6076506e-01
 : 0.1302245 0.3788846e-01 0.9907603
 clipping X : 12.51005 -7.575381
 Y : 18.59134 -19.37134
 Z : 15.42244 -15.39681
 fitting parameter : -1.277739 4.503432 5.523147

id = 3

curvature label : elliptic
 parameter label : elliptic
 area : 2445
 image center of G : 124.3738 62.50593
 3d center of G : 21.72502 24.15719 188.3966
 max - min X : 56.954 5.896306
 max - min Y : 59.66125 6.570065
 max - min Z : 210.4276 162.3969
 parameter center : 38.70071 40.20642 182.6367
 axis : 0.6653778 0.2768238 -0.6932828
 : -0.4745161 0.8737777 -0.1065222
 : 0.5762872 0.3998513 0.7127496
 clipping X : 2.028268 -32.30703
 Y : 29.79404 -34.72762
 Z : 20.69206 -33.79779
 fitting parameter : 32.20052 34.12301 33.23667

id = 4

curvature label : elliptic
parameter label : elliptic
area : 2107
image center of G : 126.7428 120.813
3d center of G : 27.65044 26.70722 119.2943
max - min X : 63.67724 10.40398
max - min Y : 60.88444 8.28448
max - min Z : 138.7727 95.13396
parameter center : 36.27013 34.56164 115.9027
axis : 0.7110399 0.6854557 -0.1567568
 : -0.6996165 0.7119872 -0.6009069e-01
 : 0.7041936e-01 0.1523966 0.9858075
clipping X : 5.102109 -19.03558
 Y : 34.91703 -35.18373
 Z : 22.35467 -22.17123
fitting parameter : 18.5179 32.08866 27.08499

id = 5

curvature label : planar
parameter label : planar
area : 20633
image center of G : 128.2159 185.1011
3d center of G : 108.1931 101.3539 -2.173159
max - min X : 378.6169 -103.2579
max - min Y : 369.8405 -105.5782
max - min Z : 0.6578135 -6.448549
parameter center : 0 0 0
axis : 0.3142947e-03 -0.3255927e-02 0.9999947
 : 0 0 0
 : 0 0 0
clipping X : 378.6169 -103.2579
 Y : 369.8405 -105.5782
 Z : 0.6578135 -6.448549
fitting parameter : 0.6623676e-06 -0.6861779e-05 0.2107462e-02

id = 6

curvature label : hyperbolic
parameter label : single_hyperbolic
area : 1100
image center of G : 127.69 153.6191
3d center of G : 28.74647 26.55647 79.63181
max - min X : 64.58838 14.0951
max - min Y : 62.61404 12.54811
max - min Z : 97.5276 64.16317
parameter center : 41.31603 38.96064 84.74689
axis : 0.7065457 -0.706892 0.331191e-01
 : 0.7052914 0.7072338 0.4883111e-01
 : -0.5794127e-01 -0.1114279e-01 0.9982578
clipping X : 31.24931 -31.01253
 Y : 4.192327 -26.29866
 Z : 13.00097 -19.07007
fitting parameter : 24.56341 21.57879 -25.33438

id = 7

curvature label : conical
parameter label : dual_hyperbolic
area : 3174
image center of G : 128.0592 183.8929
3d center of G : 24.86456 22.52962 44.75174
max - min X : 80.08278 -3.743515
max - min Y : 79.92893 -9.742094
max - min Z : 71.66796 12.96588
parameter center : 43.80488 42.69652 169.2793
axis : 0.7815384 0.6237198 -0.1308879e-01
 : -0.6238543 0.7814259 -0.1339332e-01
 : 0.187424e-02 0.1863289e-01 0.9998246
clipping X : 4.433727 -43.14547
 Y : 54.13914 -54.75561
 Z : -98.11397 -155.8547
fitting parameter : -21.12526 -25.81547 63.7983

id = 8

curvature label : elliptic
parameter label : elliptic
area : 1269
image center of G : 130.0946 208.8936
3d center of G : 17.58511 12.56544 19.05623
max - min X : 62.98519 -5.611519
max - min Y : 60.61723 -10.90779
max - min Z : 31.07167 7.434256
parameter center : 39.31944 36.08895 18.92016
axis : 0.671574 0.5909981 0.4468889
 : -0.648959 0.7602262 -0.301377e-01
 : -0.3575479 -0.2697729 0.8940817
clipping X : -4.89456 -39.67568
 Y : 46.50382 -47.89105
 Z : 25.49735 -5.498208
fitting parameter : 40.74952 50.93709 34.0698

EDGE

id = 1

edge type : jump
length : 23
region1 : 2
region2 : 1
end point 1 : 139 14
end point 2 : 141 35

id = 2

edge type : jump
length : 53
region1 : 3
region2 : 1
end point 1 : 142 36
end point 2 : 143 85

id = 3

edge type : jump
length : 33
region1 : 4
region2 : 1
end point 1 : 141 97
end point 2 : 158 124

id = 4

edge type : jump
length : 17
region1 : 5
region2 : 1
end point 1 : 157 127
end point 2 : 173 129

id = 5

edge type : jump
length : 36
region1 : 4
region2 : 1
end point 1 : 111 98
end point 2 : 97 130

id = 6

edge type : jump
length : 12
region1 : 5
region2 : 1
end point 1 : 200 128
end point 2 : 211 128

```

id = 13
  edge type      : jump
  length        : 53
  region1       : 3
  region2       : 1
  end point 1   : 106 37
  end point 2   : 108 87

id = 14
  edge type      : concave_roof
  length        : 78
  region1       : 1
  region2       : 5
  end point 1   : 75.5 129.5
  end point 2   : 1 130

id = 15
  edge type      : concave_roof
  length        : 15
  region1       : 1
  region2       : 5
  end point 1   : 254 126.5
  end point 2   : 240 126.5

id = 16
  edge type      : concave_roof
  length        : 22
  region1       : 1
  region2       : 5
  end point 1   : 231.5 126
  end point 2   : 212.5 127

id = 17
  edge type      : concave_roof
  length        : 31
  region1       : 1
  region2       : 5
  end point 1   : 199.5 127
  end point 2   : 173.5 128

id = 18
  edge type      : smooth
  length        : 43
  region1       : 2
  region2       : 3
  end point 1   : 141 38.5
  end point 2   : 107 38.5

```

id = 7
edge type : jump
length : 17
region1 : 5
region2 : 1
end point 1 : 76 131
end point 2 : 92 131

id = 8
edge type : jump
length : 10
region1 : 6
region2 : 5
end point 1 : 151 145
end point 2 : 155 154

id = 9
edge type : jump
length : 50
region1 : 7
region2 : 5
end point 1 : 156 155
end point 2 : 175 204

id = 10
edge type : jump
length : 93
region1 : 8
region2 : 5
end point 1 : 174 205
end point 2 : 85 210

id = 11
edge type : jump
length : 49
region1 : 7
region2 : 5
end point 1 : 85 159
end point 2 : 97 209

id = 12
edge type : jump
length : 11
region1 : 6
region2 : 5
end point 1 : 98 148
end point 2 : 101 158

id = 19
edge type : smooth
length : 16
region1 : 4
region2 : 6
end point 1 : 145 138.5
end point 2 : 133 141.5

id = 20
edge type : smooth
length : 10
region1 : 4
region2 : 6
end point 1 : 126 141.5
end point 2 : 119 141.5

id = 21
edge type : smooth
length : 97
region1 : 6
region2 : 7
end point 1 : 155 158.5
end point 2 : 101 158.5

id = 22
edge type : smooth
length : 145
region1 : 7
region2 : 8
end point 1 : 170.5 204
end point 2 : 86.5 205