

Title	アクティブなステレオ視覚による環境の面情報の獲得
Author(s)	西川, 敦
Citation	大阪大学, 1995, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3081474
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

アクティブなステレオ視覚による
環境の面情報の獲得

西川 敦

大阪大学大学院 基礎工学研究科

1995年1月

アクティブなステレオ視覚による
環境の面情報の獲得

西川 敦

大阪大学大学院 基礎工学研究科

1995年1月

目次

1	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.1.1	ロボットの3次元視覚センサとしてのステレオ視の有 用性	1
1.1.2	ステレオ視の原理	2
1.1.3	ステレオ視の問題点	4
1.1.4	従来の研究状況	7
1.2	本研究の概要と本論文の構成	8
2	環境の面構造の復元	11
2.1	緒言	11
2.2	準備：幾何学，記号と表記法	13
2.2.1	ステレオカメラの幾何学	13
2.2.2	視線とアーク	15
2.2.3	面構造復元問題	17
2.3	ステレオ対応アルゴリズム	18
2.3.1	アルゴリズムの概要	18
2.3.2	適用例	19
2.4	面構造復元アルゴリズム	23
2.4.1	アルゴリズムが必要とする仮定	23
2.4.2	アルゴリズムの概要	24
2.4.3	物体表面でないアークの決定	26
2.4.4	物体表面であるアークの決定	27
2.4.5	次の視点の選択	29
2.5	実験	32
2.5.1	実システムの概要	32
2.5.2	実験方法	36
2.5.3	結果と考察	38

2.6	結言	48
3	曲面の隠れ輪郭の検出	49
3.1	緒言	49
3.2	隠れ輪郭モデル	51
3.2.1	ステレオカメラの幾何学	51
3.2.2	物体表面とその像の幾何学	52
3.3	ステレオ対応アルゴリズム	54
3.3.1	アルゴリズムの概要	54
3.3.2	隠れ輪郭モデルに基づいた対応候補の限定	57
3.3.3	ステレオカメラの移動距離の決定	60
3.4	隠れ輪郭の検出	62
3.5	実験	63
3.5.1	実験方法	63
3.5.2	結果と考察	67
3.6	結言	74
4	結論	75
	付 録	77
A	視点ヒストグラム要素 h_{ij}, h_{mn} が Fig.2.11 のようになる理由	77
B	式 (3.4) の導出	79
C	式 (3.10) の導出	82
D	移動距離 $b_t (t = 2, 3, \dots)$ の満たすべき条件	84
E	曲率半径の推定値の不確かさ σ_{r_C} の低減	86
	謝 辞	87
	参考文献	89
	関連論文	95

目 次

1.1	Principle of stereo vision	3
1.2	The Problem of stereo vision : [Problem 1.1]	5
1.3	The Problem of stereo vision : [Problem 1.2]	6
2.1	Geometry of stereo camera	14
2.2	An example of lines of sight and arcs	16
2.3	Stereo correspondence algorithm	20
2.4	An example of stereo image	21
2.5	An example of motion parallax image	22
2.6	An example of binocular disparity image	22
2.7	An example of detected occlusion points	22
2.8	Outline of the algorithm	25
2.9	An example of using lemma 2.1 for determining no-object regions	26
2.10	An example of using lemma 2.2 for determining object surfaces	28
2.11	An example of calculating process of the next viewpoint	30
2.12	An overview of the Vision Robot	33
2.13	A schematic representation of the Vision Robot	33
2.14	Configuration of the experimental system	34
2.15	A schematic representation of experimental scene	37
2.16	Stereo image taken at an initial position($s = 1$)	38
2.17	Experimental results (created arcs)	40
2.18	Experimental results (reconstructed surfaces at $s = 1$)	42
2.19	Experimental results (reconstructed surfaces at $s = 2$)	43
2.20	Experimental results (reconstructed surfaces at $s = 3$)	44
2.21	Experimental results (viewpoint histogram at $s = 1$)	45
2.22	Stereo image taken at $s = 2$	45
2.23	Experimental results (viewpoint histogram at $s = 2$)	46
2.24	Stereo image taken at $s = 3$	46

2.25	Experimental results (viewpoint histogram at $s = 3$)	47
3.1	Geometry of stereo camera and object	52
3.2	Occluding contour model	53
3.3	Stereo correspondence algorithm with an occluding contour model	56
3.4	Geometric constraint based on occluding contour model . . .	58
3.5	Stereo image taken at time $t = 0$ (synthetic scene)	64
3.6	A schematic representation of experimental scene (synthetic scene)	64
3.7	Stereo image taken at time $t = 0$ (real scene)	66
3.8	A schematic representation of experimental scene (real scene)	66
3.9	Experimental results (synthetic scene)	68
3.10	Reconstructed surface in the vicinity of contour generators (synthetic scene)	70
3.11	Experimental results (real scene)	71
3.12	Reconstructed surface in the vicinity of contour generators (real scene)	72
3.13	The variation of magnitude of search range according to cam- era motion	73
E.1	The variation of σ_{τ_C} to the variation of f and z	86

表 目 次

2.1 Stereo camera parameters	35
2.2 Specifications of the camera positioning system	35
2.3 State of arcs	39
3.1 Camera position (synthetic scene)	65
3.2 Camera position (real scene)	67
3.3 Estimated radii of curvature (synthetic scene)	68
3.4 Estimated depth (synthetic scene)	69
3.5 Estimated radii of curvature (real scene)	72

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 ロボットの 3 次元視覚センサとしてのステレオ視の有用性

1960 年代初期に初めて実用化された産業用ロボットは、その後の制御技術、エレクトロニクス技術、あるいは計算機技術の急速な進展に伴いめざましい発展を遂げ、現在では、それらが生み出す数多くの製品を通じて人間の生活向上に大きく貢献している。しかしながら、これらのロボットは、限定された環境下では与えられた仕事を忠実に実行することができるが、一旦環境が変われば、もはや正しく仕事を実行することはできない。そこで近年、時々刻々と変化する開かれた環境下においても自ら適応して自律的に行動できる能力を備えた“知能ロボット (Intelligent Robot)”の実現が各方面で強く要求されるようになってきた [1]。このようなロボットを実現するためには、開かれた未知環境下においてもその 3 次元情報を高速かつ高信頼度で獲得できるセンシング機能を開発することが必要不可欠である。

環境の 3 次元情報を非接触で獲得するための手法は、一般に、“能動的手法”と“受動的手法”の 2 種類に大別することができる [2]。能動的手法は、対象となるシーンにエネルギー（光波、電磁波、音波など）を能動的に照射し、その挙動（伝播時間、変位など）を測定することによって 3 次元情報を獲得する方法であり、レーザレンジファインダ、超音波センサなどが代表的である。この方法は、一般に高精度な計測が可能で高速化も図れるという利点があり、すでに工場内では広く利用されているが、その一方で、適用できる環境と計測対象が限定されるという欠点がある。たとえば、複数のロボットや人間あるいは人間以外の生物が共存し、それらが自由に行動するより一般的な環境下では、複数のロボットから照射されるエネルギーがお互いに干渉し合って正常に動作しなかったり、照射エネルギーが人間や他の生物の行動を妨害するおそれもある。すなわち、能動的手法は、工場内のように限定された環境下であればその 3 次元情報を高速かつ高信頼度で獲得できる方法であると言える。一方、受動的手法は、対象となるシーンを受動的に撮影した 2 次元画像デー

タから、画像生成過程の逆問題 [3] を解くことによって、環境の 3 次元情報を獲得しようとする方法である。たとえば、1 台のカメラから観測される 1 枚の画像を解析することにより相対的な 3 次元情報を得ようとする単眼視 [4]、2 台（以上）のカメラから観測される複数枚の画像を用いて三角測量の原理から絶対的な 3 次元情報を得ようとするステレオ視 [5] などがある。この方法は、能動的手法に比べると、一般に、計測精度が低い、計算時間がかかるなどの問題があり、これまで産業応用に使用されることは少なかったが、対象に対して何ら影響を与えることがなく、画像データが取得可能な環境であれば適用できるという意味で非常に汎用性が高い。特に、“ステレオ視 (Stereo Vision)” は、我々人間が実際に左右の眼を用いて行っている知覚機構でもあることからわかるように、原理的には、自然光や通常の照明のもとで、実時間で広範囲の 3 次元情報（しかも絶対距離）が直接得られる方法であり、知能ロボットが動作することが想定される開かれた未知環境下においてその 3 次元情報を高速かつ高信頼度で獲得できる可能性のある方法であると言える。

1.1.2 ステレオ視の原理

ステレオ視は、工学的には、**Fig.1.1**のようにモデル化することができる。**Fig.1.1**において、2 台のカメラ（焦点距離 f のピンホールカメラ）は、その光軸が互いに平行で、両カメラのレンズ中心を結ぶ長さ B の線分（以下、「基線 (Baseline)」と言う）と垂直になるようにセットされている；このようなカメラ配置は一般に「標準のカメラ配置」と呼ばれる¹。

いま、両眼視差 (Binocular Disparity) を D_B で表すものとするれば、これは、シーン中の任意の点 $P(x, y, z)$ の左カメラへの像点 $p_L(X_L, Y_L)$ と右カメラへの像点 $p_R(X_R, Y_R)$ の画像上での位置ずれ量を示す。すなわち、**Fig.1.1** のような標準のカメラ配置では、

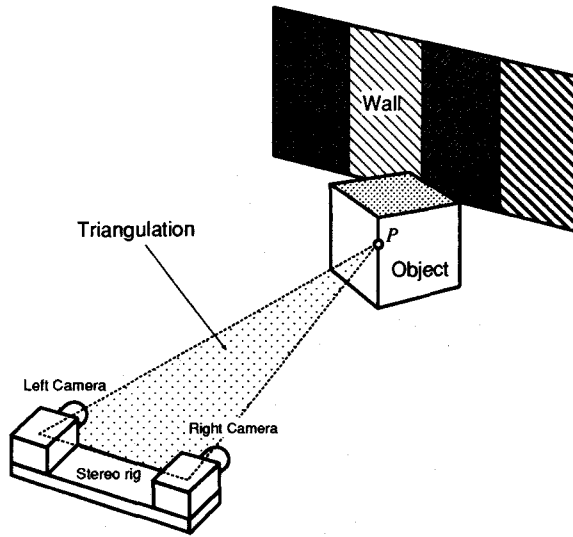
$$D_B = X_L - X_R \quad (1.1)$$

$$Y_L = Y_R \quad (1.2)$$

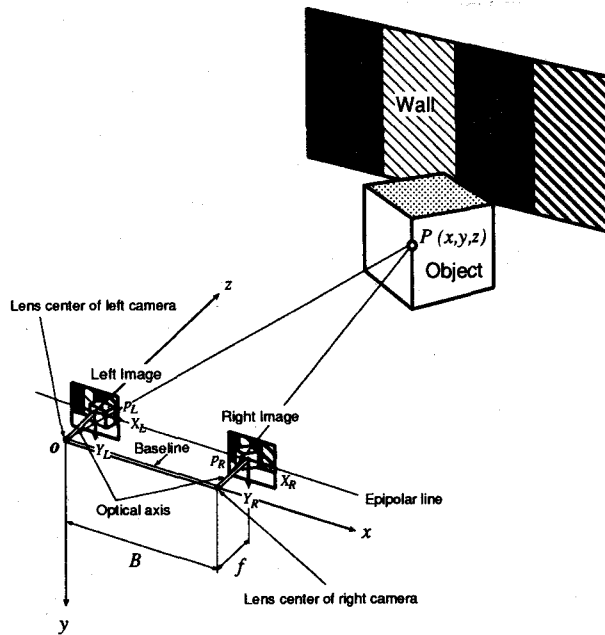
の関係がある²。

¹あるカメラ配置で撮影された画像は、簡単な画像処理によって、カメラを任意の角度だけ回転して撮影したのと等価な画像へ変換することが可能である [5][6]。したがって、任意のカメラ配置のステレオシステムの場合、予めステレオカメラのカメラモデルを求めておけば [7]、「標準のカメラ配置」の問題に帰着できる。

²式 (1.2) は、「標準のカメラ配置」では、一方の画像上の 1 点の他方の画像上での対応点は、同じ高さの走査線上に存在することを表しており、一般に“エピポーラ拘束 (Epipolar Constraint)” と呼ぶ。



(a) An example of stereo vision



(b) A model of stereo vision

Fig.1.1 Principle of stereo vision

このとき、左画像中の点 $p_L(X_L, Y_L)$ に対応したシーン中の点 $P(x, y, z)$ の左カメラ座標系³での奥行き z は、次式で容易に算出することができる。

$$z = f \frac{B}{D_B} \quad (1.3)$$

また、点 P の x, y 座標は z を用いて次式で計算できる。

$$x = X_L \frac{z}{f} = X_L \frac{B}{D_B} \quad (1.4)$$

$$y = Y_L \frac{z}{f} = Y_L \frac{B}{D_B} \quad (1.5)$$

すなわち、カメラの焦点距離 f と基線長 B が既知であれば、両眼視差 D_B を求めることにより、点 P の 3 次元位置 (x, y, z) を直ちに求めることができる。

1.1.3 ステレオ視の問題点

このように、ステレオ視は環境の 3 次元情報を獲得するための汎用的な手段であると言えるが、ロボットが動作する一般的な環境に適用する場合には、次のような問題が生じる [8]。

[問題 1.1] ステレオ視により 3 次元情報が獲得できる部分は、左右の画像中で特徴点として検出される部分のみ、すなわち、画像中で明るさが急激に変化しているエッジ特徴点のみであり、明るさの変化が小さい（模様のない）様な物体表面上の点の 3 次元情報が得られないという問題がある。

問題 1.1 は、ステレオ視により 3 次元情報が得られなかった部分が“物体表面”なのか“自由空間”なのか全く区別がつかないことを意味する。これは、多くのロボット応用にとって致命的な問題となる。たとえば、**Fig.1.2** のようなシーンにステレオ視を適用した場合、左右の画像中においてともに観測される特徴点 P, Q, R の 3 次元位置を復元することはできるが、 $Q-P$ 間ならびに $P-R$ 間に面があるのかわからないのはわからない。したがって、ロボットが、ステレオ視により検出された境界 P, Q, R から構成される未知物体 B を操作しようとしても、この物体のどこを掴んでいいのかわからないために、結局、ロボットはこの物体を操作することはできない。また、ロボットが未知

³左カメラのレンズ中心を原点にとり、 x 軸が基線に（右カメラに向かう方向を正）、 z 軸が左カメラの光軸に一致するような右手系の 3 次元直交座標系。Fig.1.1(b) 参照。

の3次元空間を移動する場合、境界 P, Q, R が検出できても、そのどちら側が移動可能な領域でどちら側に障害物が存在するかがわからないために、結局、ロボットは立往生してしまうことになる。

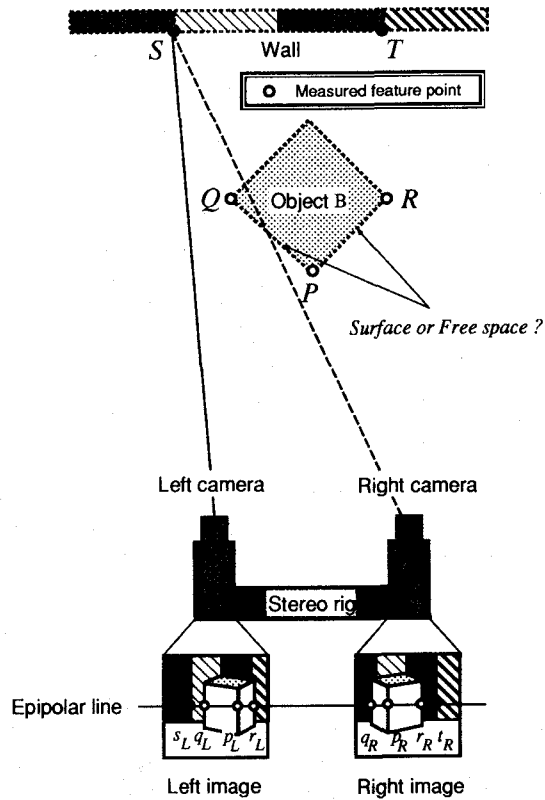


Fig.1.2 The Problem of stereo vision : [Problem 1.1]

作業環境中に曲面物体が存在する場合には、次のようなさらに深刻な問題が生じる [8].

[問題 1.2] 曲面物体が存在する環境にステレオ視を適用した場合、左カメラから見える物体の輪郭線と右カメラから見える同じ物体の輪郭線が空間中では同一の部分に対応しないことがあるために、3次元計測エラーが生じるという問題が起こる。

問題 1.2 は、ステレオ視では、通常、ステレオ画像中に観測されるすべての特徴点は“物体表面上の固定特徴点”⁴（以下「通常のエッジ点」と呼ぶ）に対応することを暗黙のうちに仮定していることに起因する。一方、ロボットが動作する一般的な環境下では、平面ばかりでなく曲面も存在するために、“物体表面に見掛け上描かれる特徴点”も頻繁に観測される。たとえば、**Fig.1.3**のような円筒状の物体を観測している場合を考えよう。図中の点 a_L, b_R はそれぞれ左および右カメラから観測される像であり、ともに円柱の側面輪郭線上に存在している；この輪郭線は、物体表面上に実際に描かれている曲線（模様など）ではなく、視点位置に依存して観測される見掛け上の境界線である；このような曲面輪郭線の像は一般に「隠れ輪郭 (Occluding Contour)」[9]と呼ばれる。**Fig.1.3**から明らかのように、ステレオ視によりこの2点 a_L, b_R に対応する3次元位置が C と推定されるが、これはエラーであり、実際にはこの位置には物体面は存在しない。

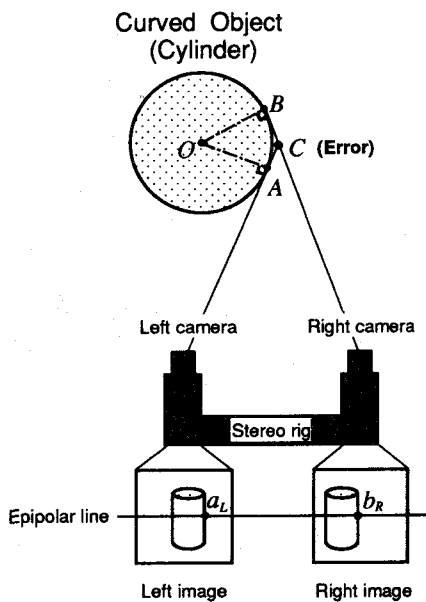


Fig.1.3 The Problem of stereo vision : [Problem 1.2]

⁴どの視点から観測しても3次元空間における位置が変化しない特徴点。たとえば、**Fig.1.2**の点 P, Q, R のような奥行きや方向の不連続性に起因するエッジ特徴点や、同図の点 S, T のような物体の反射率の不連続性に起因する模様（テクスチャ）のエッジがある。

1.1.4 従来の研究状況

これらの問題を解決するために、これまでいくつかの方法が提案されてきた。

問題 1.1 について

問題 1.1 を解決するためには、ステレオ対応によって得られたエッジ特徴点の距離情報をもとに、これら特徴点間の距離情報を補間する方法、すなわち、エッジ特徴点間の面情報を獲得する方法を確立する必要がある。

これまで、いくつかの発見的拘束（表面は滑らかであるなど）を付加することにより問題を正則化した後、弛緩法などを用いてエッジ情報に面を密着させる方法 [10][11][12][13][14]、環境中に存在する物体のクラス（多面体、一般化円筒など）を限定し、その物体クラスに関する先見的知識を利用して面を復元する方法 [15][16][17][18][19][20][21][22]、可能な面構造を予めある幾何学構造に限定して面パッチを生成し、その中から物理的に存在し得ない面を表す構造を除去していくことにより、物体表面の表現を獲得しようとする方法 [23][24][25] などが数多く提案されているが、これらは、いずれも環境に対する特別な仮定を予め必要とするものであり、本研究で想定している“開かれた未知環境”に適用することはできない。

一方、環境に対する特別な仮定を置く代わりに、ステレオ画像中に生じる隠れ (Occlusion)⁵ を利用して面を復元しようとする研究もいくつか行われている [26][27][28]。このアプローチは、付加的な拘束や環境に対する特別な仮定をとくに必要としないという点で、非常に有力な方法であるといえるが、これまで提案されてきた方法は、いずれも隠れの検出法や視点の選び方などに何らかの問題を残している。特に、隠れはシーン中に存在する物体とカメラの相対的位置関係に依存して発生するので、視点の選び方（「どこからシーンを見るか」）がアルゴリズムの性能を左右する重要なポイントとなるが、いずれの手法もこの点に関しては全く議論されておらず、その結果として、有効な面構造が獲得されない場合があったり [26][27]、大量の視点と画像処理を必要とする [28] などの問題を抱えている。

⁵一般に、前方にある他の物体によって後方の物体への視線が遮られて見えなくなる現象を“隠れ”という [6]。問題 1.1 は、ステレオ画像において生じる“隠れ”と深い関係がある；たとえば、Fig.1.2 の場合、特徴点 S が右カメラから見えないという観測結果は、右カメラの視点と S の間に S を遮る物体表面（この例の場合 $Q-P$ 間）が少なくとも 1 つ存在するという情報を提供する。

問題 1.2 について

問題 1.2 を解決するためには、まず、ステレオ画像中に観測される特徴点を「通常のエッジ点」と「隠れ輪郭」に分類する方法、すなわち、画像中から曲面の隠れ輪郭を検出する方法を確立する必要がある。さらに、通常のエッジ点のみならず、検出された「隠れ輪郭」に対応する曲面の 3 次元情報も獲得できる方法、すなわち、隠れ輪郭線近傍の面情報を獲得する方法を開発する必要がある。

これまで、各画像中の特徴点を構造化した後、その接続点を解析することにより隠れ輪郭を検出しようとする方法 [29][30][31]、ステレオ視によって対応付けられた結果（2 台のカメラの視線交点）が実際の曲面とずれる様子を 3 台目のカメラから観測することにより隠れ輪郭を検出する方法 [32][20][33] などが提案されているが、これらはいずれも、実データにおいて生じるであろうノイズや隠れの影響に極めて弱い上に、画像中において隠れ輪郭が同定されるだけで、隠れ輪郭に対応する曲面の 3 次元情報を得ることはできない。

最近、この問題を解決するべく、複数の視点から観測された画像特徴点の系列を“隠れ輪郭の見え方のモデル”に当てはめることにより隠れ輪郭を検出する手法 [34][35] が提案されている。このアプローチは、隠れ輪郭が検出できるのみならず、当てはめたモデルのパラメータから隠れ輪郭近傍の 3 次元形状が復元できるという優れた特長を持っているが、その反面、モデル当てはめへの入力となる画像特徴点の系列（隠れ輪郭を含むステレオ対応付け）をいかにして高信頼度で獲得するかが重大な問題となる。これまで、発見的拘束を駆使する方法 [34]、大量の画像系列（時空間画像）を解析する方法 [35] などが提案されているが、一般的な環境下で高速かつ高信頼度で動作する有効な手法はまだ確立されていない。

1.2 本研究の概要と本論文の構成

本研究では、ステレオカメラをアクティブに運動させることにより上述した 2 つの問題を解決する方法—環境の面情報を獲得する方法—を提案している。以下に、本研究の概要と本論文の構成を簡単に示す。

まず第 2 章で、ステレオカメラをアクティブに運動させることにより問題 1.1 を解決する方法、すなわち、“環境の面構造を復元する方法”が与えられる。

第 2 章で与えられる「面構造復元アルゴリズム」の最大のポイントは、ス

テレオカメラをアクティブに運動させることによって“隠れ”を検出している点、ならびに、従来の方法(1.1.4節参照)では全く取り扱われていなかった面構造を効率良く復元するためのカメラの移動戦略や視点の選択法に対する1つの解答を与えている点である。提案する方法では、左右の各画像中で同一のエピポーラ線上に連続して出現する2つのエッジ間に対応するすべての3次元線分(本論文では「アーク」と呼ぶ)を復元すべき面の候補と考え、ステレオカメラをアクティブに運動させることにより得られるエッジ点の3次元位置情報と隠れ情報に基づいて、各アークが物体表面であるか否かの判定を行う。さらに、現在までに復元された面構造に基づいて、アークが物体表面であるか否かが新たに最も多く決定できるであろう視点位置を予測し、その位置へカメラを移動させた後、同様の処理を新たに決定できる可能性があるアークが生じなくなるまで繰り返し行う。本手法を用いれば、非常に少ない観測回数で環境の面構造が正しく復元できることが、実シーンを用いた実験により示される。

第2章の構成は次のとおりである：まず、2.1節で従来の研究状況について詳しく述べ、提案する面構造復元アルゴリズムの新規性と有効性を明らかにする。次に2.2節で、ステレオカメラの幾何学について説明し、上述した「アーク」をはじめとするいくつかの記号と表記法を定義する。2.3節では、アクティブなステレオ対応アルゴリズムの概要が与えられる。続いて、2.4節で本研究で提案する面構造復元アルゴリズムの詳細が述べられる。特に、上述した各アークの状態の決定方法が2.4.3節～2.4.4節で、アークの状態を新たに決定するための次の視点の選択方法が2.4.5節で述べられている。2.5節において、本手法を実シーンに適用した実験結果が与えられ、最後に、2.6節で本章の総括が行われる。

続いて第3章では、ステレオカメラをアクティブに運動させることにより問題1.2を解決する方法、すなわち、“曲面の隠れ輪郭を検出する方法”が与えられる。

第3章で与えられる「隠れ輪郭検出アルゴリズム」の最大のポイントは、隠れ輪郭の見え方を表す一般的な幾何モデルを直接利用してステレオ対応付けを行うことにより、隠れ輪郭を含むステレオ対応点の系列を高信頼度で獲得している点である。まず、物体表面と隠れ輪郭の幾何学的関係を記述する一般的なモデル(本論文では「隠れ輪郭モデル」と呼ぶ)を導出する。ステレオカメラをアクティブに運動させることにより生じる像の動きを「隠れ輪郭モデル」に当てはめると、もう一方のカメラにおける対応点の存在範囲を拘束

することができる。この幾何学的拘束に基づいて各画像間でステレオ対応付けを行い、得られた対応点の系列を「隠れ輪郭モデル」に最小 2 乗フィッティングさせることによって画像中の隠れ輪郭を検出する。本章で示す方法では、隠れ輪郭の見え方を表すモデルを直接利用してステレオ対応処理を行っているために、モデルを用いない方法や発見的拘束を用いる従来の手法（1.1.4 節参照）に比べて、より正確に隠れ輪郭を検出することができるという特長がある。また、隠れ輪郭近傍の局所 3 次元形状をモデルから容易に推定することができるという利点もある。提案する手法の有効性は、人工画像ならびに実画像を用いたいくつかの実験により示される。

第 3 章の構成は次のとおりである：まず、3.1 節で従来の研究状況について詳しく述べ、提案する隠れ輪郭検出アルゴリズムの新規性と有効性を明らかにする。次に 3.2 節において、ステレオカメラと物体表面の幾何学の解析が行われ、「隠れ輪郭モデル」が導出される。続いて 3.3 節で、隠れ輪郭の対応付けも行うことが可能な“「隠れ輪郭モデル」を用いたステレオ対応アルゴリズム”が導出される。特に、上述した対応点の存在範囲を限定する方法が 3.3.2 節で、ステレオカメラの移動戦略が 3.3.3 節においてそれぞれ詳しく述べられている。3.4 節で、隠れ輪郭の検出法が与えられ、3.5 節において、本手法を人工シーンならびに実シーンに適用した実験結果が示される。そして、3.6 節で本章の総括が行われる。

最後に第 4 章で、本研究の主な結果をまとめ、今後の課題などを提示する。

第 2 章 環境の面構造の復元

2.1 緒言

ステレオ視は、人間の眼と同様に 2 台のカメラにより撮影された画像を用いて三角測量の原理により環境の奥行きを受動的に計測する手法である。この方法は、装置が簡単で、適用できる環境に対する制限が少なく、さらに広範囲の 3 次元情報を非接触かつ直接的に獲得できるために、知能ロボットの 3 次元視覚として有望視されている。しかしその一方で、ステレオ視により 3 次元情報が獲得できるのは、明るさが急激に変化しているエッジなどの特徴点のみであり、明るさの変化が少ない物体表面の 3 次元情報が獲得できない、すなわち、3 次元情報が得られなかった部分が物体表面上の点なのか自由空間なのかという区別がつかないという問題点がある [8]。したがって、一般に、ステレオ視を用いて環境の面構造を復元するためには、ステレオ対応によりエッジ点の距離情報を獲得した後、さらに、ある拘束・限定条件のもとで各エッジ点間の距離情報を補間する処理が必要になる。これまで提案されてきた方法は、使用する拘束条件の種類とその獲得方法で分類すると以下のようになる。

最も基本的な方法は、表面の滑らかさ拘束などに代表されるいくつかの発見的拘束を付加して問題を正則化し、弛緩法などの繰り返し計算によって、疎なエッジ情報に面を密着させる手法である [10][11][12][13][14]。この方法では、付加した拘束が全てのシーンで成立するとは限らない、膨大な計算時間を要するなどの問題があり、ロボットの視覚系として用いるのには致命的である。

これに代わる別のアプローチとして、環境中に存在する物体のクラスを予め限定し、その物体クラスにのみ成立する性質（先見的知識）を活用して各物体の面構造を復元しようとする方法がある。具体的には、3 面（あるいは 3 面以下）頂点物体 [15][16][17] や多面体 [18] を対象とするものから、簡単な曲面物体 [19][20]、あるいは一般化円筒物体 [21][22] を復元対象とする研究まで多岐にわたる。しかしながら、これらの研究では、アルゴリズムが動作する環境が予め限定されることに加えて、完全な線画が得られることを仮定するもの [17] や、曲面の隠れ輪郭などの特別な輪郭線が左右の画像中において

完全に検出・同定できることを仮定するもの [19][21][22] がほとんどであり、実データでは頻繁に発生するノイズや隠れに対してあまりロバストではないという問題がある。

一方、物体のクラスを限定する代わりに、可能な面構造を予めある幾何学構造（主としてドロネ網）に限定し、複数の視点からのステレオ計測結果に基づいて、その中から物理的に存在し得ない面を表す構造を除去していくことにより、物体表面の表現を獲得しようとする方法も提案されている [23][24][25]。しかし、このタイプの手法には、本質的に偽の面が多く発生する、計算コストが高いといった問題がある。

第 4 のタイプの方法は、ステレオ画像中から隠れを検出し、隠れが生じた原因を解析することによって、環境の面構造を復元しようとする方法である。このタイプの方法は、付加的な拘束や環境に対する特別な仮定をとくに必要としないという点で、非常に有力なアプローチであるといえる。杉本ら [26] は、エッジセグメントを構造化したループ状の境界線によって面の候補を表現し、対応の不完全なセグメント対から獲得される隠れ情報に基づいて面の復元を行った。しかし、実データではノイズの影響で必ずしもループ状の境界が得られるとは限らず、線分の欠落箇所では面の復元が困難であった。Echigo [27] は、面を発生させる代わりに、エッジの 3 次元位置情報に基づいて可能な自由空間を生成した後、さらに、三眼視によって検出された隠れ情報を利用して、可能な自由空間を拡張する方法を提案した。しかしながら、三眼視では、隠れが生じているエッジ点の距離情報が得られるとは限らない（つまり空間上で位置を特定できない）¹ ために、隠れの原因を特定できず、結果として、有効な面情報を獲得できない場合がある。一方、安野ら [28] は、1 台のカメラを微小間隔で等速直線運動させて撮影される大量の画像系列のエピポーラ線群を画像化した EPI (Epipolar Plane Image) の隠れ解析を行うことにより、面構造の復元を試みている。この方法では、ステレオ対応点や隠れを正確に検出できる反面、扱う画像のデータ量が莫大になるという問題がある。また一般に、“隠れ”は、シーン中に存在する物体とカメラの相対的位置関係に依存して発生するので、このタイプのアプローチでは、“視点位置の選び方”がアルゴリズムの性能を左右する重要なポイントとなるが、上述したいずれの

¹ステレオ視によりあるエッジ点の距離情報を得るためには、少なくとも異なる 2 つの視点位置からそのエッジ点が観測されなければならない。観測位置が予めバンプに与えられる三眼視（あるいは多眼視）では、この条件をステレオ画像中のすべてのエッジ点に対して満足させることは困難である。すなわち、1 台のカメラでのみ観測されるエッジ点の場合、他のカメラからは見えない（隠れが生じている）と判定できても、その距離情報は得られない。

手法もこの点に関しては全く議論されていない。

本論文では，ステレオカメラをアクティブに移動させることにより，環境の面構造を復元する一方法を提案する．提案する面構造復元アルゴリズムは，すでに筆者らが提案した“アクティブなステレオ視”[36][37][38][39][40]により獲得されるエッジ特徴点の3次元位置情報と隠れに関する情報に基づいており，上記の第4番目のアプローチに属する．提案する方法と従来の手法との大きな違いは，隠れの検出に“アクティブなステレオ視”を用いている点，ならびに，従来の方法では全く取り扱われていなかった面構造を効率良く復元するためのカメラの移動戦略や視点の選択法に対する1つの解答を与えている点である[41]．“アクティブなステレオ視”は，ステレオカメラを基線に沿ってアクティブに並進運動させることにより得られる単眼のステレオ対応に基づいて，両眼のステレオ対応点と隠れを検出する方法であり，隠れが正確に検出できるのに加えて，隠れが生じているかいなかにかかわらず，左右の画像中のほとんどすべての特徴点に対して粗い距離情報が獲得できるという利点があり，従来 of 両眼視や三眼視を用いる方法に比べて，面構造復元のためのより強力な拘束を提供する．提案する方法では，左右の各画像中で同一のエピポーラ線上に連続して出現する2つのエッジ間に対応する線分（本論文では「アーク」と呼ぶ）を復元すべき面の候補と考え，アクティブなステレオ視から得られるエッジ点の3次元位置情報と隠れ情報に基づいて，各アークが物体表面であるかいなかの判定を行う．さらに，現在までに復元された面構造に基づいて，アークが物体表面であるかいなか新たに最も多く決定できるであろう視点位置を予測し，その位置へカメラを移動させた後，同様の処理を新たに決定できる可能性があるアークが生じなくなるまで繰り返し行う．本手法を用いれば，非常に少ない観測回数で環境の面構造が正しく復元できることを，実シーンを用いた実験により示す．

2.2 準備：幾何学，記号と表記法

ここでは，次節以降の議論を簡単にするために，いくつかの記号と表記法を定義し，本論文で取り扱う「面構造復元問題」を定式化する．

2.2.1 ステレオカメラの幾何学

はじめに，ステレオカメラの幾何学について説明する．**Fig.2.1**に示すように，左右のカメラ（焦点距離が f のピンホールカメラとする）の光軸が互いに平行で，それぞれが基線（Baseline）と直交している標準配置の平行ステ

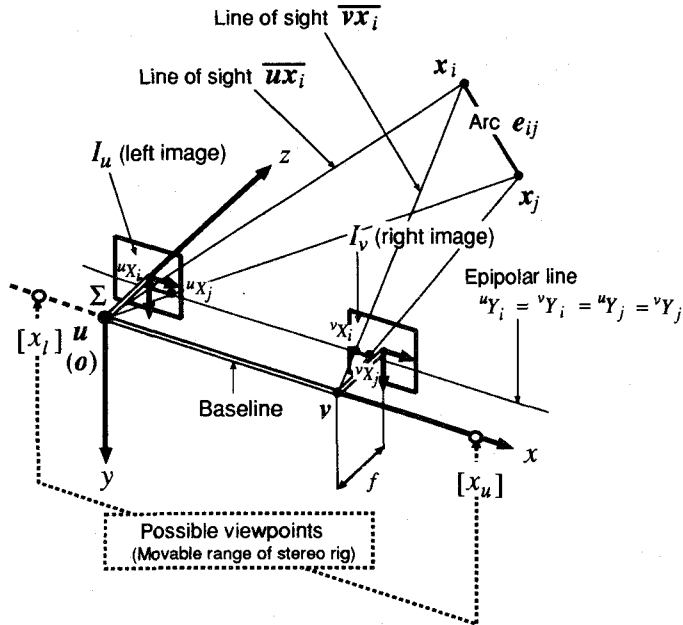


Fig.2.1 Geometry of stereo camera

レオカメラを考える。いま、このステレオシステムは、左右のカメラの相対的位置関係を保持したまま、基線に沿って並進運動できると仮定する (Fig.2.1 参照)。3次元位置を記述する座標系として、基線上のある1点 o を原点にとり、基線方向に x 軸を、カメラの光軸方向に z 軸を持った右手系の3次元直交座標 $\Sigma: o-xyz$ を考える。簡単のため、初期時刻において、ステレオカメラは左カメラの視点 (Fig.2.1 では u) と o がちょうど一致するような位置に設定されているものと仮定する。また、視点 v から観測される画像を I_v で記述し、各画像平面 I_v にも図に示すような2次元直交座標系 (${}^vO-{}^vXY$) を設定する。さらに、可能な視点の集合を \mathcal{V} で表す。上述のように、本研究では、カメラ運動を基線に沿った並進運動のみに限定しているので、 Σ からみた v の3次元位置を $v = (v_x, v_y, v_z)^T$ と表すものとすれば、

$$\mathcal{V} = \{v : v_x \in [x_l, x_u], v_y = v_z = 0\} \quad (2.1)$$

である。ここに、 x_l, x_u はそれぞれ v_x の下界および上界を示す (Fig.2.1 参照)；これはシステムのパラメータ (可動範囲) である。

2.2.2 視線とアーク

次に，シーン中の物体表面とその像の幾何学を表現するためのいくつかの表記法を定義する．

特徴点の定義

いま，**Fig.2.1**に示すように，シーン中の1点を \mathbf{x}_i で表し， \mathbf{x}_i の I_v への投影を $({}^vX_i, {}^vY_i)$ で表す．本研究では， \mathbf{x}_i の生成に関する条件を次のように明示的に設定する：

[条件 2.1] \mathbf{x}_i の生成は，その投影像が，左，右画像の少なくともどちらか一方の画像において画像特徴点²として抽出されたものに限る．

以下では，条件 2.1 を満たす \mathbf{x}_i を単に「特徴点 (Feature point)」と呼ぶものとする．たとえば，**Fig.2.2(a)**に示したシーンの場合，図中のエピソード線に関してシーン中に生成されるべき“特徴点”は，●印で示された計7点となる．

視線の定義

Fig.2.1に示すように，視点 \mathbf{v} と特徴点 \mathbf{x}_i を連結することにより得られる直線分を考え，これを $\overline{\mathbf{v}\mathbf{x}_i}$ で表すものとする．一般には， $\overline{\mathbf{v}\mathbf{x}_i}$ は視点 \mathbf{v} からの \mathbf{x}_i への視線 (Line of sight) に相当するが，本研究では，次に示す条件を明示的に設定する：

[条件 2.2] $\overline{\mathbf{v}\mathbf{x}_i}$ の生成は， \mathbf{x}_i が \mathbf{v} の視野内にある（すなわち $\overline{\mathbf{v}\mathbf{x}_i}$ が画像平面 I_v と交差する）もののみ限定する．

以下では，条件 2.2 を満たす $\overline{\mathbf{v}\mathbf{x}_i}$ を単に「視線」と呼ぶものとする．**Fig.2.2(a)**に示した特徴点に対して生成される視線の例を同図 (b) に示す³．

いま，これらの視線群をさらに次の2種類に分類して考える．**Fig.2.2(b)**の $\overline{\mathbf{u}\mathbf{x}_i}$ のように，その視線に対応する特徴点 \mathbf{x}_i が視点 \mathbf{u} から見えるとき，視線 $\overline{\mathbf{u}\mathbf{x}_i}$ を特に「可視視線 (Visible line of sight)」と呼ぶ．一方，同図の $\overline{\mathbf{v}\mathbf{x}_k}$ の

²本研究では，2.5.2 節で後述するように，画像中で明るさが急変するエッジの中心点，すなわち，2次微分の値がゼロを交差する点を画像特徴点として用いている．

³**Fig.2.2**のシーンの場合，7個の特徴点が存在するので，単純計算では，左右2個の視点に対して計14本の線分を生成できるが， $\overline{\mathbf{u}\mathbf{x}_0}$ ， $\overline{\mathbf{v}\mathbf{x}_1}$ の2本は条件 2.2 を満たさないで，結局，計12本となる．

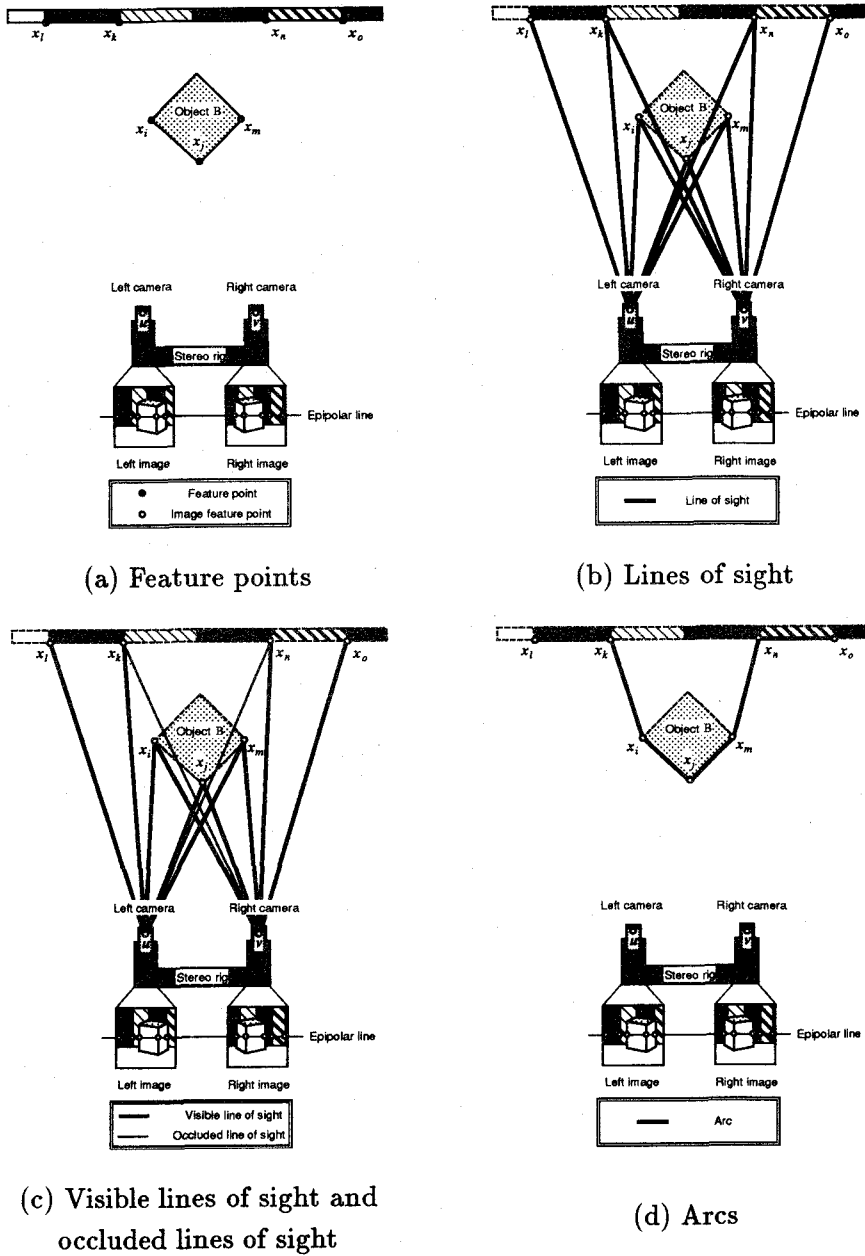


Fig.2.2 An example of lines of sight and arcs

ように，対応する特徴点 \mathbf{x}_k が視点 \mathbf{v} から見えない（この例では物体Bによって遮られる）とき，視線 $\overline{\mathbf{v}\mathbf{x}_k}$ を特に「隠れ視線（Occluded line of sight）」と呼ぶ．**Fig.2.2(b)**に示したすべての視線を可視視線と隠れ視線に分類すると同図(c)のようになる．

アークの定義

Fig.2.1に示すように，復元すべき面の候補として，シーン中の任意の2点 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ を連結することにより生成される「アーク（Arc）」を考え，これを $\mathbf{e}_{ij} = (\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ で表すものとする．ただし本研究では，アーク \mathbf{e}_{ij} の生成は， \mathbf{x}_i と \mathbf{x}_j に関する次の条件が成立する場合のみに限定する：

[条件 2.3] アーク $\mathbf{e}_{ij} = (\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ の生成は，次の2つの条件①,②を同時に満足するものに限る：

- ① \mathbf{x}_i と \mathbf{x}_j が同一のエピポーラ平面上にある．
- ② 左，右画像の少なくともどちらか一方の画像において，次の3つの関係が同時に成立する：
 - (a) \mathbf{x}_i の像が存在する．
 - (b) \mathbf{x}_j の像が存在する．
 - (c) \mathbf{x}_i の像と \mathbf{x}_j の像を結ぶ線分上に他のいかなる特徴点も存在しない．

条件 2.3 は，面の復元（面の存在可能性の検証）を，「画像中で同一のエピポーラ線上に連続して出現する2つの画像特徴点間」に対応するアークのみに限定することを意味している．**Fig.2.2(a)**のシーンに対して生成されるべきアークの例を同図(d)に示す．以下では，条件 2.3 を満たす $(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j); i \neq j$ の組の全集合を \mathcal{A} で表すものとする．

2.2.3 面構造復元問題

ここで，本論文で取り扱う“面構造復元問題”を定式化する．まず，アーク \mathbf{e}_{ij} の状態を示す次のような3値関数 STATE を導入する：

[定義 2.1] e_{ij} の状態を表す関数 $STATE$ は次のような 3 値関数である：

$$STATE(e_{ij}) = \begin{cases} \text{SURFACE,} \\ (e_{ij} \text{ が面であるとわかったとき}) \\ \text{FREE,} \\ (e_{ij} \text{ が面でないとわかったとき}) \\ \text{UNKNOWN,} \\ (e_{ij} \text{ が面であるかどうかわからないとき}) \end{cases}$$

本論文では、 $STATE(e_{ij}) \neq \text{UNKNOWN}$ のとき、「アーク e_{ij} の状態は決定されている」といい、 $STATE(e_{ij}) = \text{UNKNOWN}$ のとき、「アーク e_{ij} の状態は決定されていない」という。この $STATE$ 関数を用いると、本論文で取り扱う面構造復元問題は次のように記述できる：

[問題 2.1] 次式を満足させよ：

$$\forall e_{ij} \in \mathcal{A}; \quad STATE(e_{ij}) \neq \text{UNKNOWN} \quad (2.2)$$

すなわち、生成されるすべてのアークの状態を決定することが本章の目標となる。

2.3 ステレオ対応アルゴリズム

本論文で提案する「面構造復元アルゴリズム」は、すでに筆者らが提案した“アクティブなステレオ視”[36][37][38][39][40] から得られる特徴点の 3 次元位置情報と隠れに関する情報に基づいている。ここでは、アクティブなステレオ視の概要と特長を述べる。詳細は、文献 [36][37]などを参照されたい。

2.3.1 アルゴリズムの概要

アルゴリズムは次の 4 つの前提条件を必要とする [36][37]:

- アルゴリズムが動作する環境は静止環境である。
- ステレオカメラのキャリブレーションは正確に行われている。
- カメラの運動パラメータ（移動距離）は正確にわかる。
- シーンの奥行き範囲は予めわかっている。

以上の前提条件のもとで、ステレオ対応アルゴリズムの概要を以下に示す：

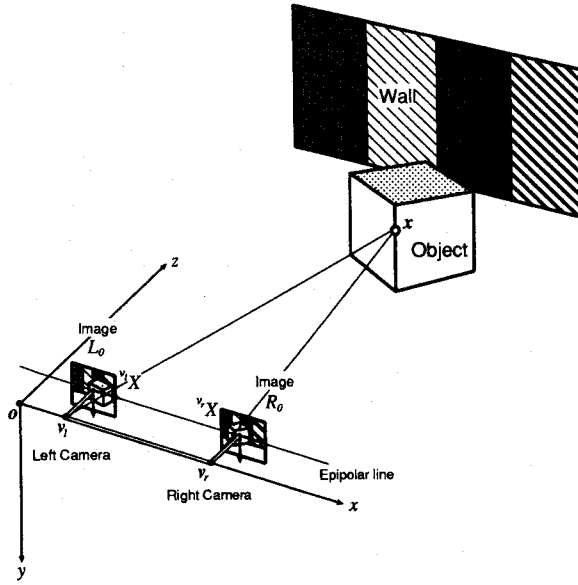
[アルゴリズム 2.1] アクティブなステレオ対応アルゴリズム

- ① 移動回数 t を $t \leftarrow 0$ に設定する。現在のステレオカメラの位置を初期位置とする (Fig.2.3(a) 参照)。
- ② $t \leftarrow t+1$ とし、標準配置の2眼ステレオカメラを、基線に沿って初期位置より b_t だけ右へ並進移動させる (Fig.2.3(b) 参照)。
- ③ 画像対 L_0 と L_t を用いた単眼の運動ステレオにより、 L_0 中の画像特徴点の運動視差 D_t^L を計算する。また、 R_0 中の画像特徴点に対しても、同様に画像対 R_0 と R_t を用いて運動視差 D_t^R を計算する ($t=1$ の場合の例が Fig.2.3(b) に示されている)。ここに、 $L_t(R_t)$ は、時刻 t において左(右)カメラにより撮影される画像を表す。
- ④ ③で検出された運動視差 $D_t^L(D_t^R)$ に基づいて、 L_0 と R_0 の両眼視差の探索範囲を限定する (Fig.2.3(b) では I_t^L で示す範囲になる)。
- ⑤ 限定された探索範囲内における現在の対応候補の数 n_t に応じて、左右画像 (L_0, R_0) 中の画像特徴点を次の3タイプに分類する (タイプ a の点で両眼視差を得る)。

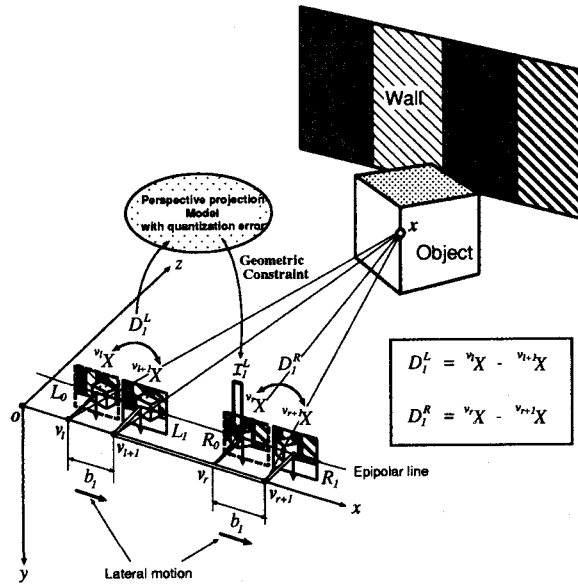
a. 融合点	($n_t = 1$ のとき)
b. オクルージョン点	($n_t = 0$ のとき)
c. 曖昧な点	($n_t > 1$ のとき)
- ⑥ a, b の点が見い出されなくなるまで同様の処理を行なう (②へ戻る)。

2.3.2 適用例

一例として、Fig.2.4に示した実シーンに対してアルゴリズム 2.1を適用した結果を Fig.2.5～Fig.2.7に示す [36][37]。ここに、Fig.2.5は単眼の運動ステレオにより得られた運動視差の視差画像を、Fig.2.6は両眼視差画像をそれぞれ示している；いずれも、画素の明るさにより視差の大きさを表している (明るい点ほどステレオカメラに近い)。また、Fig.2.7は、検出されたオクルージョン点を最も明るい点で表したものである。



(a) Before movement ($t = 0$)



(b) After movement ($t = 1$)

Fig.2.3 Stereo correspondence algorithm

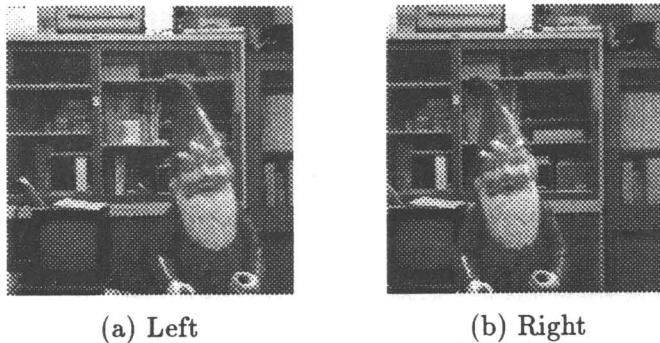


Fig.2.4 An example of stereo image

Fig.2.5から、**Fig.2.4**の左右の画像中のほとんどすべての画像特徴点に対して、運動視差が正しく検出されていることがわかる。また、**Fig.2.6**から、左右の画像中にも観測される画像特徴点に対しては、両眼視差が検出されていることがわかる。さらに、**Fig.2.7**より、前方の物体により引き起こされたオクルージョン点ならびに視野が重なっていないことにより生じたオクルージョン点がそれぞれの画像中で正しく検出されていることがわかる。

これらの結果をまとめると、アルゴリズム **2.1**には次のような特長があることがわかる：

[**特長 2.1**] 左右の画像中のほとんどすべての画像特徴点を次の2つのタイプのいずれかに分類することができる：

- 「融合点」… 左右のカメラでともに観測される画像特徴点。
- 「オクルージョン点」… 一方のカメラのみで観測される画像特徴点（もう一方のカメラでは隠れが生じて観測できない点）。

以下では、この情報を“隠れ情報”と呼ぶ。

[**特長 2.2**] 左右の画像中のほとんどすべての画像特徴点に対して距離情報を獲得することができる：

- 「融合点」に対しては両眼視差により精度の高い3次元位置が得られる。
- 「オクルージョン点」に対しては単眼の運動視差により粗い3次元位置を求めることができる。

以下では、この情報を“3次元位置情報”と呼ぶ。

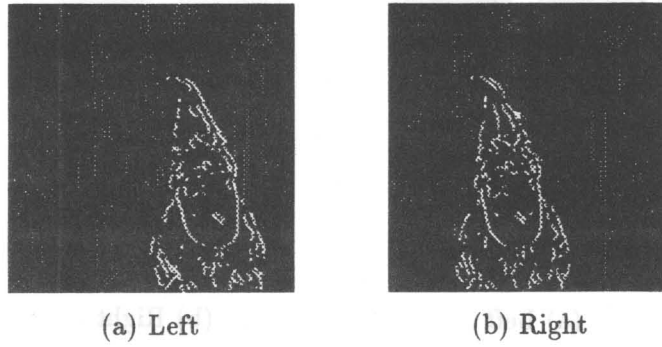


Fig.2.5 An example of motion parallax image

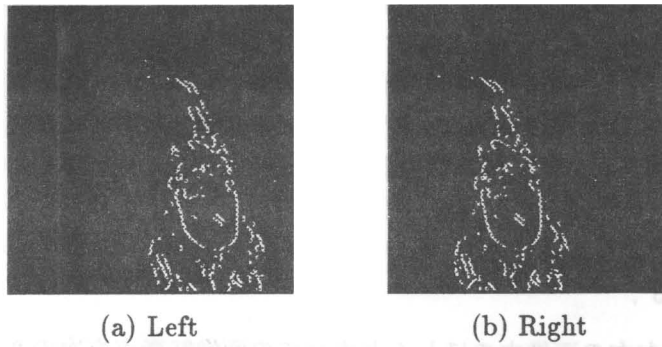


Fig.2.6 An example of binocular disparity image

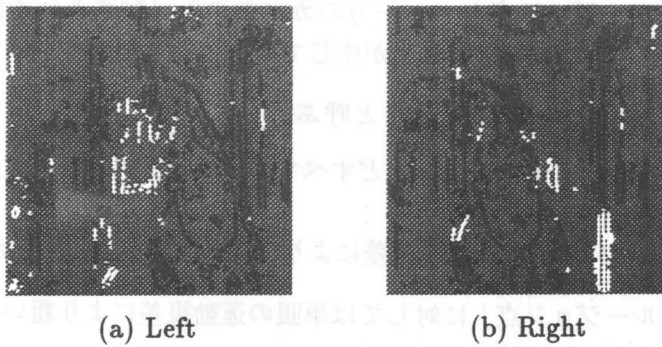


Fig.2.7 An example of detected occlusion points

特長 2.2 は、アクティブなステレオ視を用いれば、2.2.2 節で定義した「特徴点」の 3 次元位置が復元できる、すなわち、「視線」および「アーク」が獲得できることを意味している。また、特長 2.1 は、アクティブなステレオ視を用いれば、獲得されたすべての視線を「可視視線」と「隠れ視線」(2.2.2 節参照)のいずれかに分類できることを意味している。

2.4 面構造復元アルゴリズム

以上の準備のもとで、本研究で提案する「面構造復元アルゴリズム」について説明する。

2.4.1 アルゴリズムが必要とする仮定

アルゴリズムの概要について説明する前に、アルゴリズムが必要とする種々の条件を仮定する。まず、次のような物体表面のクラスを定義する：

[定義 2.2] ある視点 $v \in \mathcal{V}$ から観測したとき、少なくとも 1 つの特徴点を遮蔽する可視表面を遮蔽表面 (Occluding surface) と呼ぶ。

アルゴリズムが必要とする仮定は次の 2 つである：

[仮定 2.1] シーン中に存在するすべての物体表面は不透明 (opaque) である。

[仮定 2.2] 集合 \mathcal{A} に含まれるアークによって、シーン中のすべての遮蔽表面を表現することができる。

本論文のアプローチは、すでに述べたように、基本的には、画像中に生じる隠れを手掛かりとして面構造を復元しようとするものである。仮定 2.1 は、隠れが生じる原因を“物体表面と視線の空間的位置関係”のみに特定化するためのものである⁴。また、仮定 2.2 は、隠れを引き起こす(復元すべき)物体表面がアーク集合 \mathcal{A} の中に含まれることを保証するための仮定である(次節および脚注 5 を参照)。

⁴一般に、隠れは“物体表面と視線の空間的位置関係”ならびに“物体表面の材質”に依存して発生する。たとえば、物体表面がガラスのような透過性のある表面であれば、それが空間的にあるエッジ点への視線を遮っていたとしても、そのエッジ点は見える。これは、隠れに基づくアプローチでは、「透明な物体表面は本質的に自由空間と区別できない」ことを意味する。換言すれば、仮定 2.1 を満足しない場合、つまり、環境中に透過性のある表面が存在する場合には、面構造復元エラー(偽の自由空間：まちがって FREE と判定されるアーク)が生じる可能性がある。

2.4.2 アルゴリズムの概要

以上の仮定のもとで、提案するアルゴリズムの概要について説明する。まず、初期時刻 ($s = 1$: s はステップを示す) において、**Fig.2.1** に示したステレオカメラシステムから得られるステレオ画像系列に対して“アクティブなステレオ対応アルゴリズム”を適用する。その結果、各「特徴点」に対して、**2.3.2** 節で示した“3次元位置情報”と“隠れ情報”が獲得される。次に、獲得された「特徴点」の“3次元位置情報”に基づいて、可能な「アーク」のリスト \mathcal{A} (復元すべき面の候補に相当) を生成する。続いて、左右各カメラから復元された各特徴点に向かう「視線」群を生成する。各視線は、“隠れ情報”に基づいて「可視視線」と「隠れ視線」に分類された後、視線リスト \mathcal{Q} (面復元の幾何学的手掛かりに相当。最初は空) に追加される。以上の準備のもとで、まず、視線リスト \mathcal{Q} に含まれる可視視線に基づいて物体表面でないアークを決定する。これは、「可視視線と交差するすべてのアークは物体表面でない」(後述の補題 2.1 参照) という性質に基づいた処理である。続いて、 \mathcal{Q} 内の隠れ視線に基づいて物体表面であるアークを決定する。これは、「隠れ視線と交差するアークのうち少なくとも1つのアークは物体表面である」(後述の補題 2.2 参照) という性質に基づいた処理である。次に、まだ状態(物体表面であるか否か) が決定されていない \mathcal{A} 中の全アークに対して、カメラシステムの可動範囲内 (**Fig.2.1** 参照) で各アークの状態が決定できる可能性のある視点位置をそれぞれ予測し、それらの度数を累積した“視点ヒストグラム”を生成する。得られたヒストグラムが最大になる点を次の視点として選択し、ステレオカメラの一方のレンズ中心がその視点と一致するようにカメラを移動させた後(ステップ $s \leftarrow s+1$)、全く同様の処理を行う。ただし、アークの生成は $s = 1$ のときのみとする⁵。この繰り返し処理によって、新しい可視視線と隠れ視線が獲得され、その結果として、いくつかのアークの状態が新たに決定される。一連の処理は、生成される視点ヒストグラムが全区間にわたってゼロになるまで、すなわち、これ以上アークの状態が新たに決定できる見込みがなくなるまで繰り返し行われる。**Fig.2.8** にアルゴリズムの概要を示す。

⁵本研究では、簡単のため、「初期時刻 $s = 1$ における処理によって、復元すべきすべての面候補が獲得される、すなわち、仮定 2.2 が満たされる」ことを前提にして“面構造復元アルゴリズム”を構成している。ゆえに、最初の観測において、左右のいずれのカメラからも見えない位置(いわゆる死角)に復元すべき面がたまたま存在する場合には、本アルゴリズムではこの面に対応するアークが決して獲得されないために、思わぬエラー(偽の物体表面: まちがって SURFACE と判定されるアーク)が生じる可能性がある。

提案した方法のポイントは、

- 可視視線に基づいて物体表面でないアークを決定する方法。
- 隠れ視線に基づいて物体表面であるアークを決定する方法。
- 新たにアークの状態を決定するための視点ヒストグラムの生成法ならびに次の視点の選択方法。

である。以下で、これらについて順番に説明する。

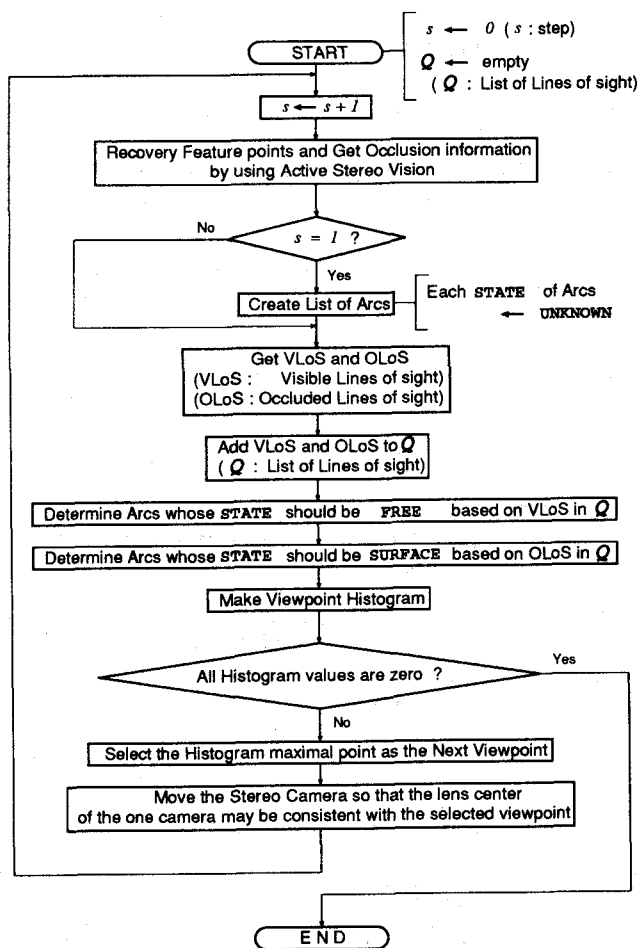


Fig.2.8 Outline of the algorithm

2.4.3 物体表面でないアークの決定

まず、可視視線に基づいて物体表面でないアークを決定する方法について説明する。

仮定 2.1, 仮定 2.2 のもとでは、次の補題が成立する。

[補題 2.1] 次の2つの条件 (P1), (P2) を同時に満足する視線 $\overline{vx_k}$ ($k \neq i, j$) が存在するならば、アーク e_{ij} は物体表面ではない (Fig.2.9 参照)。

(P1) 視線 $\overline{vx_k}$ が e_{ij} と交差する。

(P2) x_k が v から見える ($\overline{vx_k}$ は可視視線である)。

(証明) いま、アーク e_{ij} が物体表面であると仮定する。ここで、視線 $\overline{vx_k}$ が条件 (P1) を満足するならば、 x_k は必ず物体表面 e_{ij} の後方に存在することになり、仮定 2.1 より、 x_k は v から見えない。これは条件 (P2) に反する。ゆえに、 $\overline{vx_k}$ が条件 (P1), (P2) を同時に満足するならば、アーク e_{ij} は物体表面ではない。 □

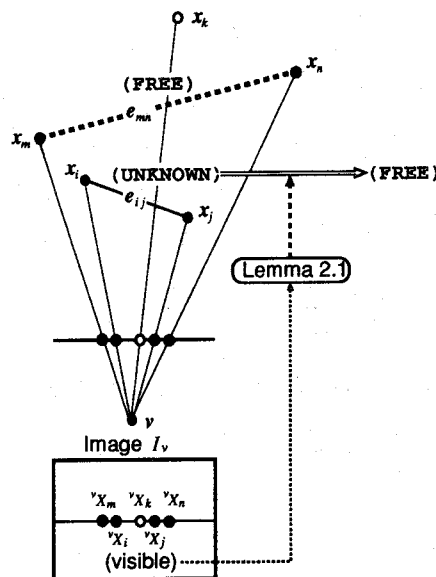


Fig.2.9 An example of using lemma 2.1 for determining no-object regions

本論文では、補題 2.1 に基づいた次の処理によって、物体表面でないアークを決定する。

[アルゴリズム 2.2] 物体表面でないアークの決定

視線リスト \mathcal{Q} 中のすべての可視視線について以下の処理を行う：

- ① 可視視線 $\overline{v\mathbf{x}_k}$ と交差するすべてのアーク $e_{mn} (m, n \neq k)$ を求める。
いまその集合を $\mathcal{A}_{v\mathbf{x}_k}^{(vis)} \subseteq \mathcal{A}$ とする。
- ② すべての $e_{mn} \in \mathcal{A}_{v\mathbf{x}_k}^{(vis)}$ に対して、

STATE(e_{mn}) \leftarrow FREE

2.4.4 物体表面であるアークの決定

次に、隠れ視線に基づいて物体表面であるアークを決定する方法について説明する。

仮定 2.1, 仮定 2.2 のもとでは、次の補題が成立する。

[補題 2.2] 次の3つの条件 (P3)~(P5) を同時に満足する視線 $\overline{v\mathbf{x}_k} (k \neq i, j)$ が存在するならば、アーク e_{ij} は物体表面である (Fig.2.10参照)。

(P3) 視線 $\overline{v\mathbf{x}_k}$ が e_{ij} と交差する。

(P4) e_{ij} を除いた視線 $\overline{v\mathbf{x}_k}$ と交差するすべてのアーク $e_{mn} \in \mathcal{A} (m, n \neq k)$ に対して次式が成立する： STATE(e_{mn}) = FREE

(P5) \mathbf{x}_k が v から見えない ($\overline{v\mathbf{x}_k}$ は隠れ視線である)。

(証明) いま、アーク e_{ij} が物体表面でないと仮定する。このとき、視線 $\overline{v\mathbf{x}_k}$ が条件 (P3) ならびに条件 (P4) を満足するならば、仮定 2.2 より、視線 $\overline{v\mathbf{x}_k}$ を横切る物体表面は存在しえない。したがって、 \mathbf{x}_k は v から見えるはずである。これは条件 (P5) に反する。ゆえに、 $\overline{v\mathbf{x}_k}$ が条件 (P3)~(P5) を同時に満足するならば、アーク e_{ij} は物体表面である。□

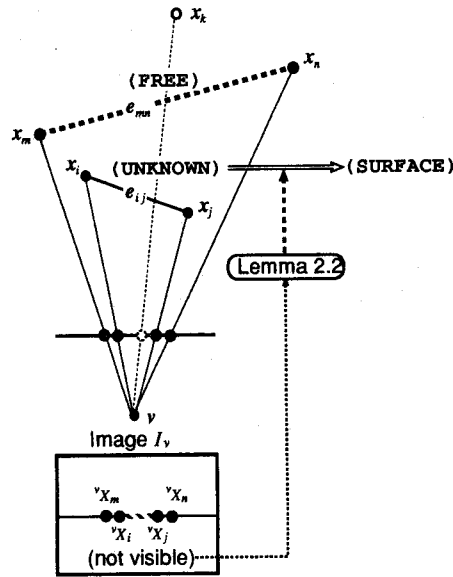


Fig.2.10 An example of using lemma 2.2 for determining object surfaces

本論文では、補題 2.2 に基づいた次の処理によって、物体表面であるアークを決定する。

[アルゴリズム 2.3] 物体表面であるアークの決定

視線リスト Q 中のすべての隠れ視線について以下の処理を行う：

- ① 隠れ視線 $v x_k$ と交差するすべてのアーク e_{mn} ($m, n \neq k$) を求める。いまその集合を $\mathcal{A}_{vx_k}^{(occ)} \subseteq \mathcal{A}$ とする。
- ② ある $e_{ij} \in \mathcal{A}_{vx_k}^{(occ)}$ に対して $\text{STATE}(e_{ij}) = \text{UNKNOWN}$ ，その他のすべての $e_{mn} \in \mathcal{A}_{vx_k}^{(occ)}$ ($m, n \neq i, j$) に対して $\text{STATE}(e_{mn}) = \text{FREE}$ ならば，

$$\text{STATE}(e_{ij}) \leftarrow \text{SURFACE}$$

このアルゴリズムでは、②の処理からわかるように、物体表面でない（つまり状態が **FREE** の）アークが多く判明しているほど、物体表面であるアークをより多く決定できる可能性がある。2.4.2 節で述べたように、“物体表面で

ないアークの決定” (アルゴリズム 2.2) が “物体表面であるアークの決定” (アルゴリズム 2.3) に先だって行われる理由はこの点に基づいている。

2.4.5 次の視点の選択

以上, 物体表面でないアークの決定方法, ならびに物体表面であるアークの決定方法を示した. ここでは, これら 2つの方法を適用した場合に, 最も多くのアークの状態が新たに決定されるであろう視点位置 (次の視点となる) を予測する方法について説明する. これは, 次の (i)~(iii) の 3段階の処理によって行われる.

(i) 視点ヒストグラム要素の計算

アクティブなステレオ視により復元された各「特徴点」に対して, 任意の視点からの「視線」を生成することができる. すなわち, ある視点に訪れたときに獲得できるであろう各視線が “アークリスト A 中のどのアークと交差しどのアークと交差しないか” (以下, 「交差パターン」と呼ぶ) を任意の視点に対して予測することができる⁶.

そこで, まず, 各アーク $e_{ij} \in A$ について, 次の 2つの条件を同時に満足する視線を生成することのできる視点の集合 $G_{ij} (\subseteq V)$ を求める:

(P6) (可能性): アーク e_{ij} と交差する.

(P7) (新規性): その交差パターンが視線リスト Q に含まれるどの視線の交差パターンとも一致しない.

ただし, $STATE(e_{ij}) \neq UNKNOWN$ ならば, $G_{ij} = \emptyset$ とする.

条件 (P6) は, その視線に基づいてアーク e_{ij} の状態を判定できる可能性を保証する. 条件 (P7) は, その視線がアークの状態判定のための新しい手掛かりを与えることを保証する. すなわち, 両条件を同時に満足する視線を生成できる視点群 G_{ij} は, “アーク e_{ij} の状態を新たに決定できる可能性のある視点の集合” であると言える. この G_{ij} に基づいて, 定義 2.3 で与えられる「視点ヒストグラム要素」 $h_{ij}(v)$ を計算する.

⁶ただし, これらの視線が「可視視線」となるか, 「隠れ視線」となるかは実際に訪れてみなければわからない.

[定義 2.3] 視点ヒストグラム要素 $h_{ij}(v)$ は次式で定義される値である：

$$h_{ij}(v) = \begin{cases} 1, & (\text{for } v \in G_{ij}) \\ 0, & (\text{for } v \in V \setminus G_{ij}) \end{cases}$$

$h_{ij}(v)$ は、カメラシステムの可動範囲内のある視点 v において、アーケ e_{ij} の状態が新たに決定できる可能性を 2 値で表現したものである。

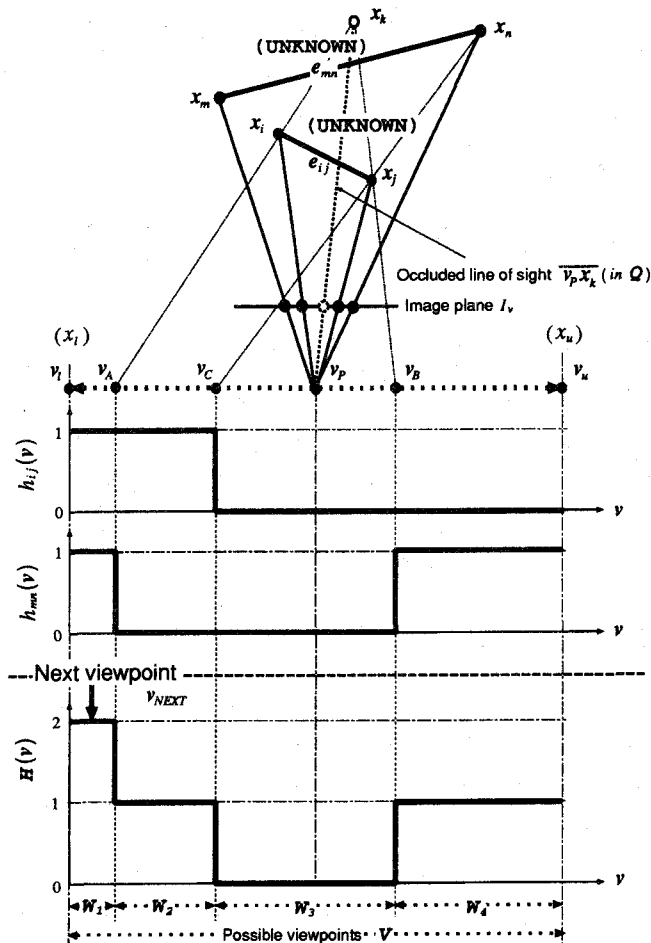


Fig.2.11 An example of calculating process of the next viewpoint

視点ヒストグラム要素の計算例を Fig.2.11 に示す。ここに、Fig.2.11 に示

されている3つのグラフのうち上の2つがそれぞれ同図中の2つのアーク e_{ij} および e_{mn} に関する視点ヒストグラム要素に相当する（各視点ヒストグラム要素が同図のようになる理由が付録Aに示されている）。

(ii) 視点ヒストグラムの作成

(i) で得られた視点ヒストグラム要素 $h_{ij}(v)$ をもとにして、次式で与えられる視点ヒストグラム $\mathcal{H}(v)$ を作成する（Fig.2.11参照）：

$$\mathcal{H}(v) = \sum_{\forall e_{ij} \in A} h_{ij}(v) \quad (v \in \mathcal{V})$$

$\mathcal{H}(v)$ は、その定義から明らかなように、カメラシステムが視点 v に訪れた時に“新たに状態が決定できる可能性のあるアークの数”を示している。

(iii) 次の視点の選択

次の手順によって、視点ヒストグラム \mathcal{H} の値が最大となる視点位置を次の視点に選ぶ。

- ① まず、各ヒストグラム値 $\mathcal{H}(v)$; $v \in \mathcal{V}$ に基づいて、システムの可動区間 \mathcal{V} を次のような連続閉区間 $\{W_i\}$ （区間内ではヒストグラム値は同一）に分割する（Fig.2.11参照）。

$$\mathcal{V} = \{W_1, W_2, W_3, \dots\}; \quad W_i = [v_{i_l}, v_{i_u}]$$

- $\cup_i W_i = \mathcal{V}$
- $\forall i \neq j; W_i \cap W_j = \emptyset$
- $\forall i; v_{i_u} < v_{i+1_l}$ かつ $\mathcal{H}(v_{i_u}) \neq \mathcal{H}(v_{i+1_l})$
- $\forall v \in W_i; \mathcal{H}(v) = \text{const.}$

- ② 区間 $\{W_i\}$ の中からヒストグラム値が最大になる区間の集合 $\mathcal{V}_N = \{W_N\}$ を求める。すなわち、

$$\mathcal{V}_N = \{W_N : W_N \in \{W_1, W_2, W_3, \dots\}, \\ \forall v_N \in W_N, v \in \mathcal{V}; \mathcal{H}(v_N) \geq \mathcal{H}(v), \mathcal{H}(v_N) \neq 0\}$$

ここで、 $\mathcal{V}_N = \emptyset$ 、すなわち、 $\forall v \in \mathcal{V}; \mathcal{H}(v) = 0$ ならば、これ以上アークの状態が新たに決定できる見込みはないと考え、一連の処理を終了する（Fig.2.8参照）。

- ③ ヒストグラム最大区間 W_N の中点を次の視点 v_{NEXT} に選ぶ。ただし、 W_N が複数存在する場合には、次のルールにしたがって選ぶ：
- (a) 区間長さが最長の W_N に属する視点を優先する。それでもなお複数存在する場合には、さらに、
 - (b) 最初のステレオカメラ位置に最も近い視点を優先する。それでもなお複数存在する（この段階で最悪でも 2 点に絞られる）場合には、さらに、
 - (c) 現在のステレオカメラ位置に最も近い視点を優先する。

ここに「ステレオカメラ位置」は、左カメラの視点と右カメラの視点の中点を意味する。

あとは、ステレオカメラの一方のレンズ中心が視点 v_{NEXT} に一致するようにカメラシステムを移動させて一連の処理を繰り返し行えばよい。視点を一致させるカメラは原理的には左右のどちらでも良いが、本論文では、最初 ($s = 1$) のステレオカメラ位置 (v_c とする) で観測された特徴点ができる限り多く両カメラで常に観測できるように、 $v_{NEXT} < v_c$ ならば左カメラの視点を、 $v_{NEXT} > v_c$ ならば右カメラの視点を v_{NEXT} に一致させるものとした。

2.5 実験

提案した手法の有効性を検証するために、実シーンを撮影したステレオ画像系列を用いて面構造復元実験をおこなった。まず、本研究で使用したステレオ視覚システムの概要について説明する。

2.5.1 実システムの概要

本研究で使用した実システム（以下、「アクティブステレオ視覚システム」と呼ぶ）は、人間の視覚系の持つ視線制御機能を参考にして構築されたものであり、人間の眼球運動をシミュレートできる構造を持つ「ビジョンロボット」本体と、その運動制御を行うトランスピュータシステム（「運動制御部」と呼ぶ）、ならびに、画像の取り込みおよび一連の画像処理をつかさどるシステム（「画像処理部」と呼ぶ）から構成されている [42]。以下に、アクティブステレオ視覚システムの概要を示す。

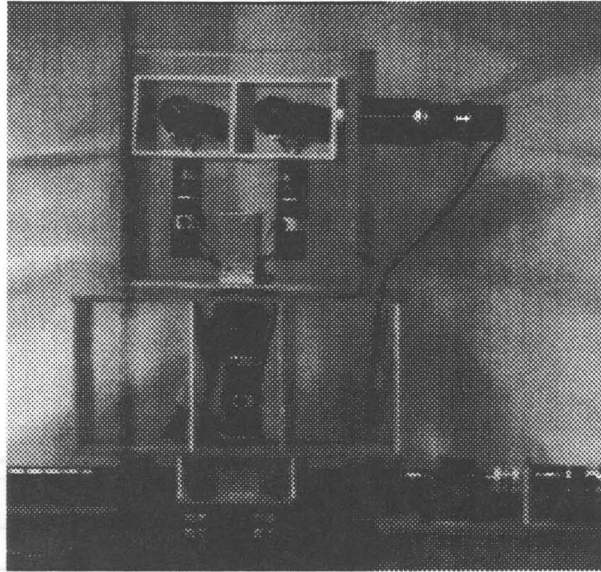


Fig.2.12 An overview of the Vision Robot

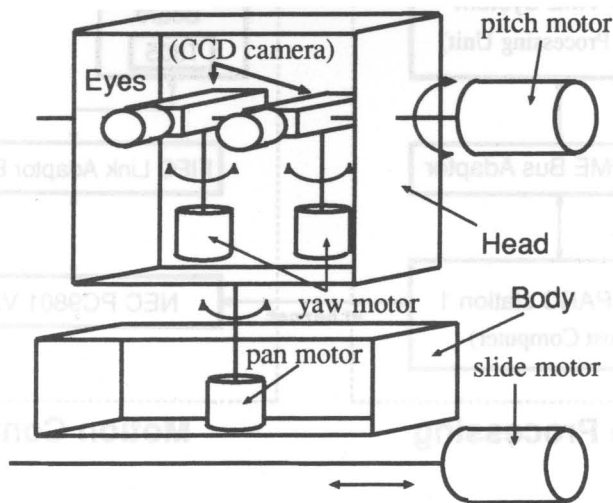


Fig.2.13 A schematic representation of the Vision Robot

ビジョンロボット

Fig.2.12にビジョンロボットの外観を示す。ビジョンロボットは、**Fig.2.13**に示すように、2台の CCD カメラと回転 4 軸、並進 1 軸の計 5 台のハーモニックドライブ減速機付き DC サーボモータおよびエンコーダから構成されており、2 台のカメラの位置と姿勢を変化させることができる：左右のカメラの yaw 角は独立に、pitch 角は 2 台同時に制御でき、また首関節によりロボット頭部 (Head) の pan 角の制御が、スライド機構 (Slider) によりロボット本体 (Body) の 1 軸方向の並進移動の制御が可能である。

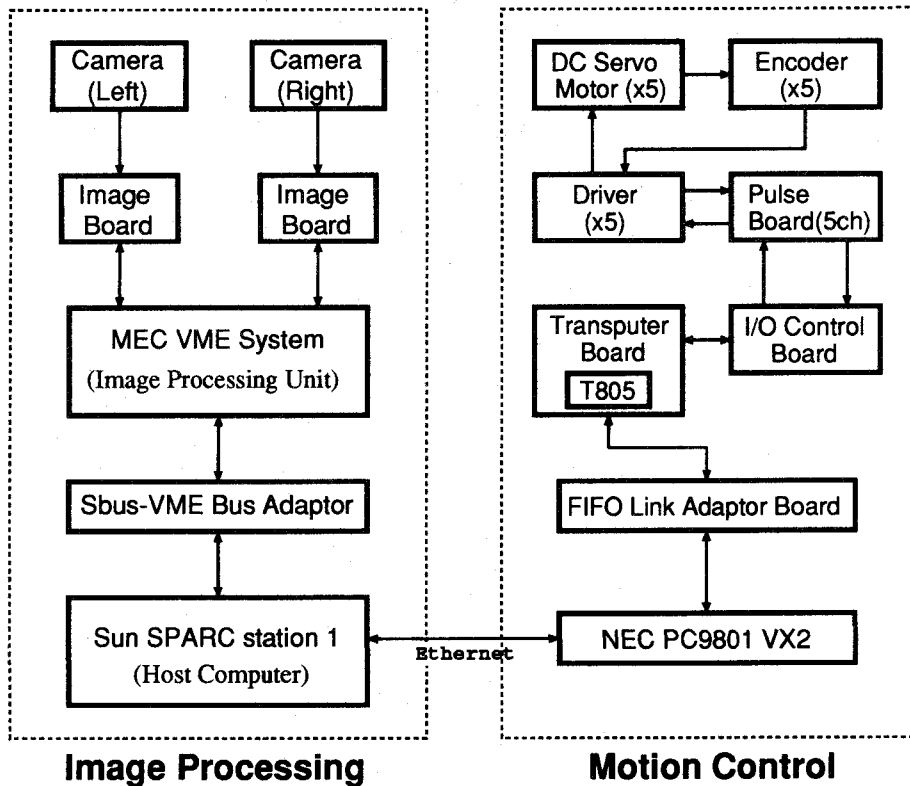


Fig.2.14 Configuration of the experimental system

画像処理部

2台の CCD カメラ（基線長 120(mm), 焦点距離 16(mm)）により撮影された画像は、画像処理装置 MEC VME System のフレームバッファに取り込まれる。取り込まれた画像は、Sbus-VME バスアダプタを介して、ホスト計算機（Sun SPARC station 1, 12.5MIPS）上で動作する C 言語によりインプリメントされたプログラムにより直接アクセスして処理される（Fig.2.14 参照）。撮影される各画像は、 370×370 (pixel), 各点 8 ビットで構成されている。システムの主なパラメータを Table 2.1 に示す。

Table 2.1 Stereo camera parameters

Focal length : f	16(mm)
Baseline length	120(mm)
Image Size	370×370 (pixel), 8(bit)

運動制御部

画像処理部からネットワーク（Ethernet）を介して送られて来る情報を元に、トランスピュータ（Transputer:T805,30MHz）がモータへの位置および速度指令を決定する。5台のモータにはそれぞれ専用のドライバが接続されており、パルスボードにより指令値に応じたパルス列を生成し、これらのドライバに与えることにより高速かつ高精度な制御が行われる（Fig.2.14 参照）。Table 2.2 に本システムの性能を示す。

Table 2.2 Specifications of the camera positioning system

	yaw motor	pitch motor	pan motor	slide motor
Maximum Speed	600 deg/sec	204 deg/sec	270 deg/sec	33.3 mm/sec
Sensing Resolution	0.0072 deg	0.00409 deg	0.0327 deg	0.0008 mm
Movable Range	38 deg(in) 31 deg(out)	48 deg(down) 54 deg(up)	360 deg	550 mm

2.5.2 実験方法

本節では、アクティブステレオ視覚システムを用いた実験方法とその条件（各パラメータの設定など）、ならびに実験に用いたシーンについて説明する。

実システムの設定（カメラキャリブレーションなど）

2.2.1 節で述べた前提条件にしたがって、まず、“アクティブステレオ視覚システム”のステレオカメラが、標準のカメラ配置となり、かつ、その基線方向がスライド機構（Fig.2.13参照）の可動方向と一致するように、3次元位置が既知であるテストパターンを用いて、2台のカメラパラメータのキャリブレーションを行った[7]。実験システムの主なパラメータはTable 2.1に示すとおりである：ステレオカメラの基線長は120(mm)で、カメラの焦点距離 f は16(mm)（等価的に約700(pixel)）である。各画像は、 370×370 (pixel)、各点8ビットで構成されている。なお、式(2.1)における各パラメータは、 $x_l = -90$ (mm)、 $x_u = 210$ (mm)に設定した⁷（Fig.2.15参照）。

特徴抽出

撮影される各画像に対して、ステレオ対応をとるための画像特徴点（Fig.2.2参照）が次の手順で抽出される[43]：まず、原画像に対して標準偏差1.5(pixel)のガウス関数のラプラシアンを積和的に作用させた画像を作成し、そのゼロ交差点を検出する。次に、それらのゼロ交差点のうち、エッジの勾配の大きさが十分に大きい点に対応する原画像上の点を画像特徴点として選択する。なお、各画像特徴点の位置決めは、サブピクセル法[44]を用いて行った。

実験シーン

Fig.2.15に実験シーンの概略図を示す。対象物体は、同図に示すように、1枚の平板と4本の柱から構成される物体であり、カメラより約700(mm)の距離に配置されている。物体の後方には壁があり、壁には2枚のカレンダーが貼りつけてある。カメラから壁までの距離は約1400(mm)である。このようなシーンを投影した画像には多くの隠れが生じる。初期時刻($s = 1$)において実システムにより撮影されたステレオ画像をFig.2.16に示す。前方の物体により、後方のカレンダーの文字の一部が隠されていることに留意されたい。

⁷アクティブステレオ視覚システムのスライド機構の可動範囲は、Table 2.2に示したように、最大550(mm)なので実現可能である。

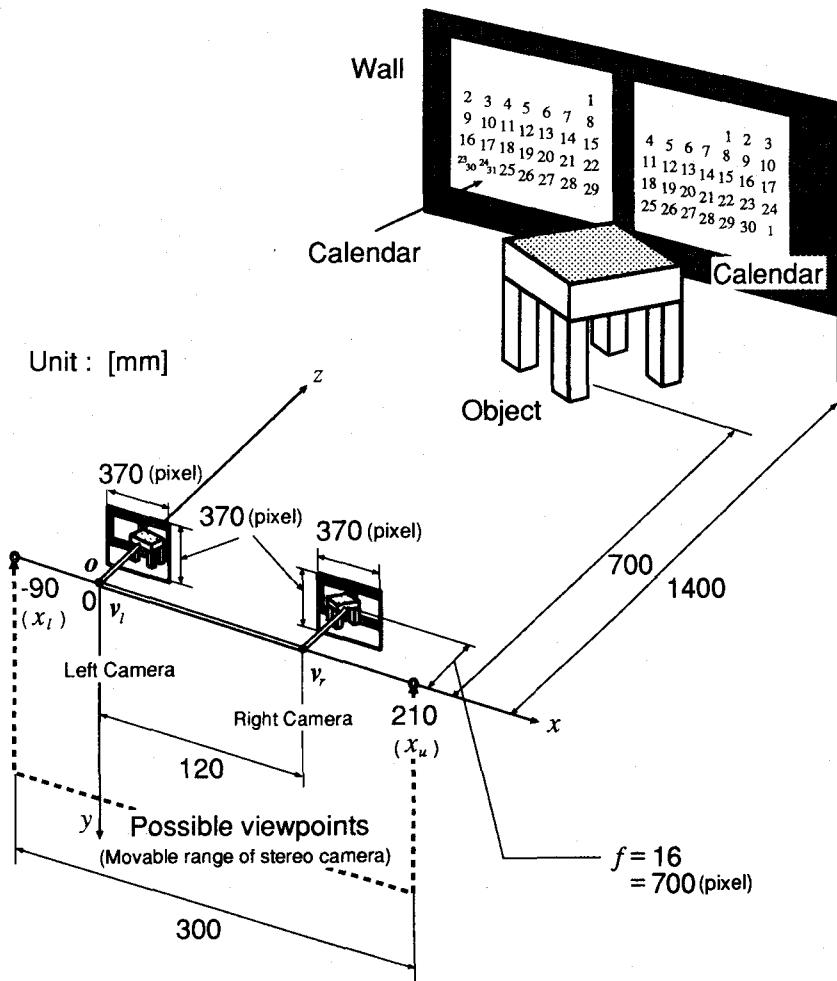


Fig.2.15 A schematic representation of experimental scene

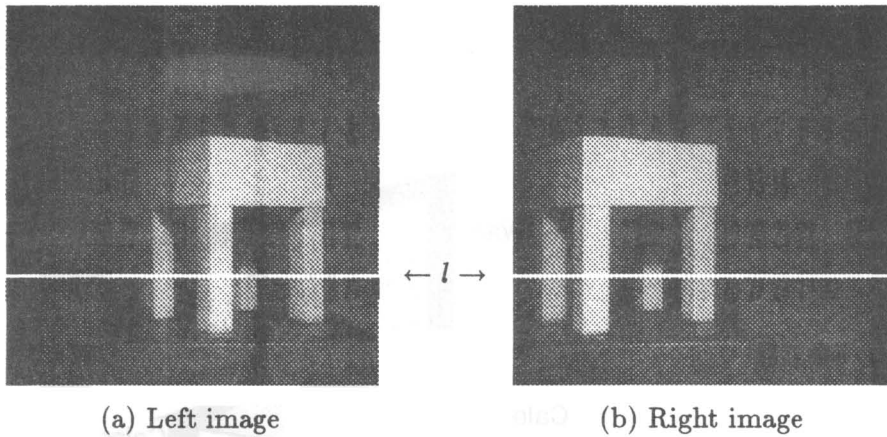


Fig.2.16 Stereo image taken at an initial position($s = 1$)

2.5.3 結果と考察

アルゴリズム検証実験は、Fig.2.16に示したエピポーラ線 l 上に存在する画像特徴点群から生成されるアークに対してのみ行った。

提案したアルゴリズムによる面構造復元過程を Fig.2.17～Fig.2.20に、各過程（ステップ $s = 1 \sim 3$ ）において生成された視点ヒストグラムを Fig.2.21 ($s = 1$)、Fig.2.23 ($s = 2$)、Fig.2.25 ($s = 3$)にそれぞれ示す。ここに、Fig.2.17～Fig.2.20は、生成されたアークの xz 平面への正射影を2次元地図の形態で示したものである；各図において、横軸が x 座標を、縦軸が z 座標（座標系は Fig.2.1で定義した Σ ）を表している。また、Fig.2.21、Fig.2.23に基づくカメラ移動の後、撮影されたステレオ画像をそれぞれ Fig.2.22、Fig.2.24に示す。さらに、アークの状態変化の様子（アークの本数を各ステップごとに状態別で示したものを Table 2.3に示す。ここに、Table 2.3中の括弧内の符号付き数字は、アークの状態別本数の各ステップごとの増減量を示したものである。以下に、本手法による面構造復元結果を順を追って説明する。

Fig.2.17は、初期時刻 ($s = 1$)において“アクティブなステレオ対応アルゴリズム”を適用することにより復元されたシーンの特徴点ならびにアークを示したものである。図中、●印で示した点が復元された特徴点を、細実線が生成されたアークをそれぞれ表している。本実験において生成されたアークは全部で51本であった。この段階では、すべてのアークの状態は UNKNOWN

Table 2.3 State of arcs

Step	SURFACE	FREE	UNKNOWN
Initial state	0	0	51
$s = 1$	1 (+1)	5 (+5)	45 (-6)
$s = 2$	7 (+6)	12 (+7)	32 (-13)
$s = 3$	8 (+1)	13 (+1)	30 (-2)

である (Table 2.3 参照)。

Fig.2.18 は, Fig.2.17 の各アークに対して, アルゴリズム 2.2 およびアルゴリズム 2.3 を適用した後のすべてのアークの状態を図示したものである。状態が SURFACE と決定されたアークを太実線で, FREE と決定されたアークを破線で, まだ状態が決定されていない UNKNOWN アークを Fig.2.17 と同じ細実線でそれぞれ示した。同図および Table 2.3 からわかるように, 1 本のアークが SURFACE, 5 本のアークが FREE, 計 6 本のアークの状態が決定された; この決定はいずれも正しい。しかしながら, この段階 ($s = 1$) では, まだ相当数 (45 本) のアークの状態が決定されていない。そこで, 次の視点を選択するために, ステレオカメラの可動範囲内において視点ヒストグラムが作成される。 $s = 1$ において計算された視点ヒストグラムが Fig.2.21 に示されている。このヒストグラムより, $x = -72$ の位置が次の視点位置 v_{NEXT} として選択された (2.4.5 節参照)。

Fig.2.19 は, ステレオシステムの左カメラのレンズ中心がこの視点位置 v_{NEXT} と一致するように移動させた後 ($s = 2$ となる), 同様の処理を行った結果である (この場合左カメラが選ばれた理由については 2.4.5 節を参照)。留意すべき点は, 現在の左カメラの視点位置 ($x = 72$) を選択する段階では, 新たに決定できる可能性のあるアークの本数が 9 本と予測された (Fig.2.21 の縦軸の値を参照) のに対して, 実際には, 新たに状態が決定されたアークの本数は, SURFACE が 6 本, FREE が 7 本の計 13 本であった (いずれも正しい決定である) という点である (Table 2.3 参照)。これは, 本論文で提案した視点選択アルゴリズムが, 基本的に, “選択される視点において獲得されるであろう視線群が各アークに及ぼす影響” を考慮しているだけに過ぎないことに起因する。すなわち, 視点計画時における予測を上回る量のアークの状態が決定された理由としては, 次の 3 点が考えられる:

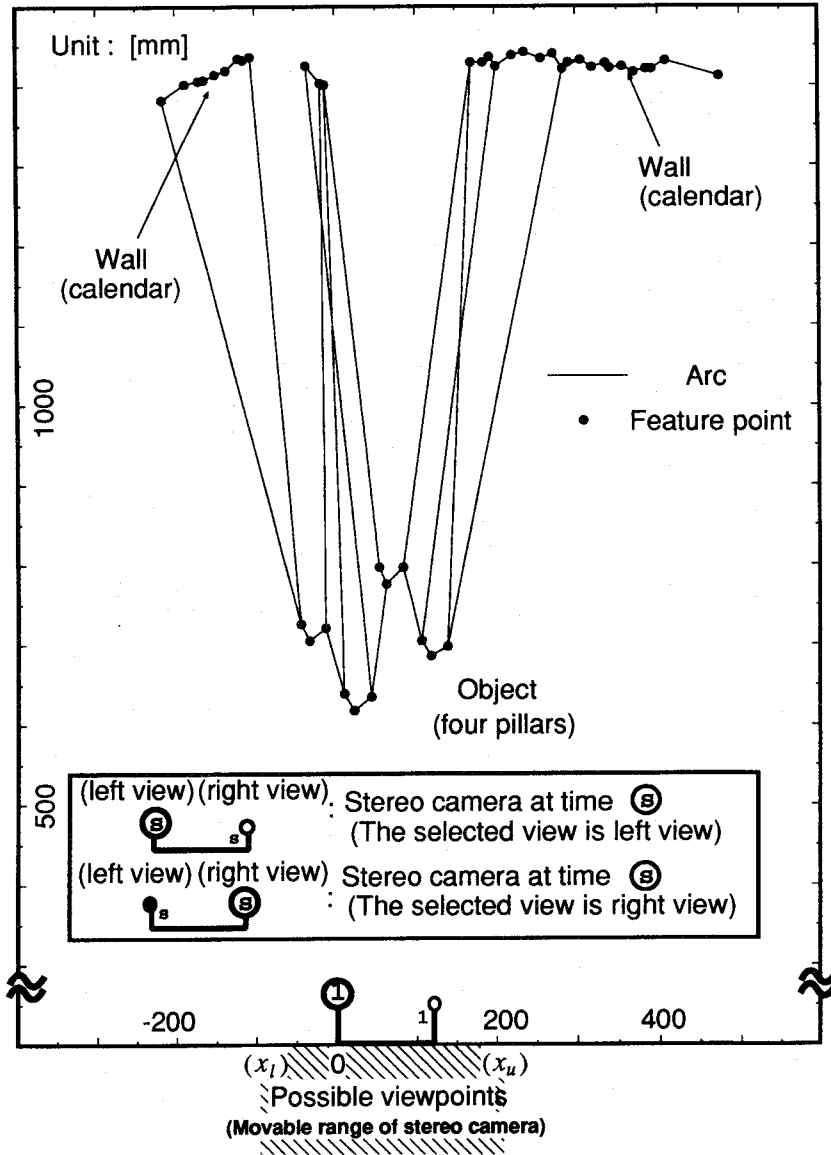


Fig.2.17 Experimental results (created arcs)

- ① 選択された視点位置と一致しないもう一方のカメラからの視線の影響。
 — Fig.2.19の場合, 選択された視点位置 ($x = -72$) から基線長さ (120(mm)) だけ離れた位置 ($x = 48$) に右カメラが存在する. 可視視線ならびに隠れ視線は左右両カメラにおいて獲得されるので, 左カメラから獲得される視線により最大 9 個のアーキが決定される可能性があるのと同時に, 右カメラから獲得される視線により最大 3 個⁸のアーキの状態が新たに決定される可能性もある (Fig.2.21参照).
- ② 現在のステップ s 以前に獲得され, その時にはアーキの状態を決定できなかった隠れ視線の影響。
 — これは, 「あるアーキ e_{ij} に対して条件 (P3) と条件 (P5) を満足しているが, 条件 (P4) を満足しなかったために, e_{ij} の状態を決定できなかった隠れ視線」がすでに存在している場合に起こる可能性がある. いま, 条件 (P4) を満足しなかった原因がその隠れ視線と交差する別のアーキ e_{mn} の状態が UNKNOWN であったためであるとしよう (補題 2.2 参照). ここで, アルゴリズム 2.2を適用した結果, 現在のステップ s において新たに獲得された可視視線により, アーキ e_{mn} の状態が FREE と決定されたとする. その結果, 上記の隠れ視線がアーキ e_{ij} に関して条件 (P4) を新たに満たすようになり, 次に続くアルゴリズム 2.3の処理において, この隠れ視線により, アーキ e_{ij} の状態が新たに SURFACE と決定される可能性がある.
- ③ 現在のステップ s においてはじめて観測された (=これまででは両カメラからともに見えない位置に存在していた) 特徴点に向かう視線の影響。
 — たとえば, 移動前 (初期時刻) のステレオ画像 Fig.2.16における向かって左側のカレンダーの数字: “27” は, 左右の画像中においてともに隠されており全く見えないが, 移動後に撮影された Fig.2.22の左画像中には, はっきりととらえることができる. このような, 移動後にはじめてその存在が明らかになる新しい特徴点に向かう視線 (前もって予測はできないが) によって, いくつかのアーキの状態が決定される可能性がある.

これらの影響を加味することができれば (今回採用した視点選択法では, 簡単のため考慮しなかったが, ①, ②の影響を考慮することは可能である), より多くのアーキの状態が一度に決定できる視点を選択できる可能性がある.

⁸ Fig.2.21の横座標 48 に対応するヒストグラム値が 3 である.

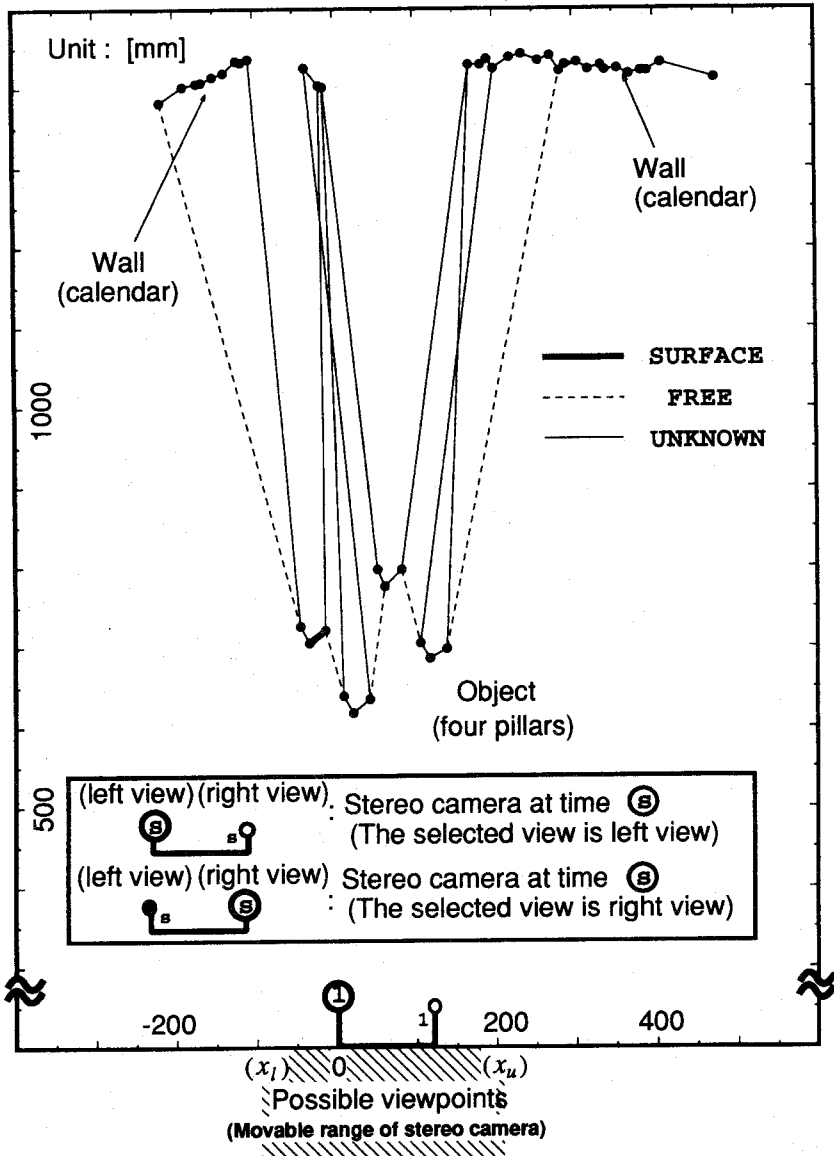


Fig.2.18 Experimental results (reconstructed surfaces at $s = 1$)

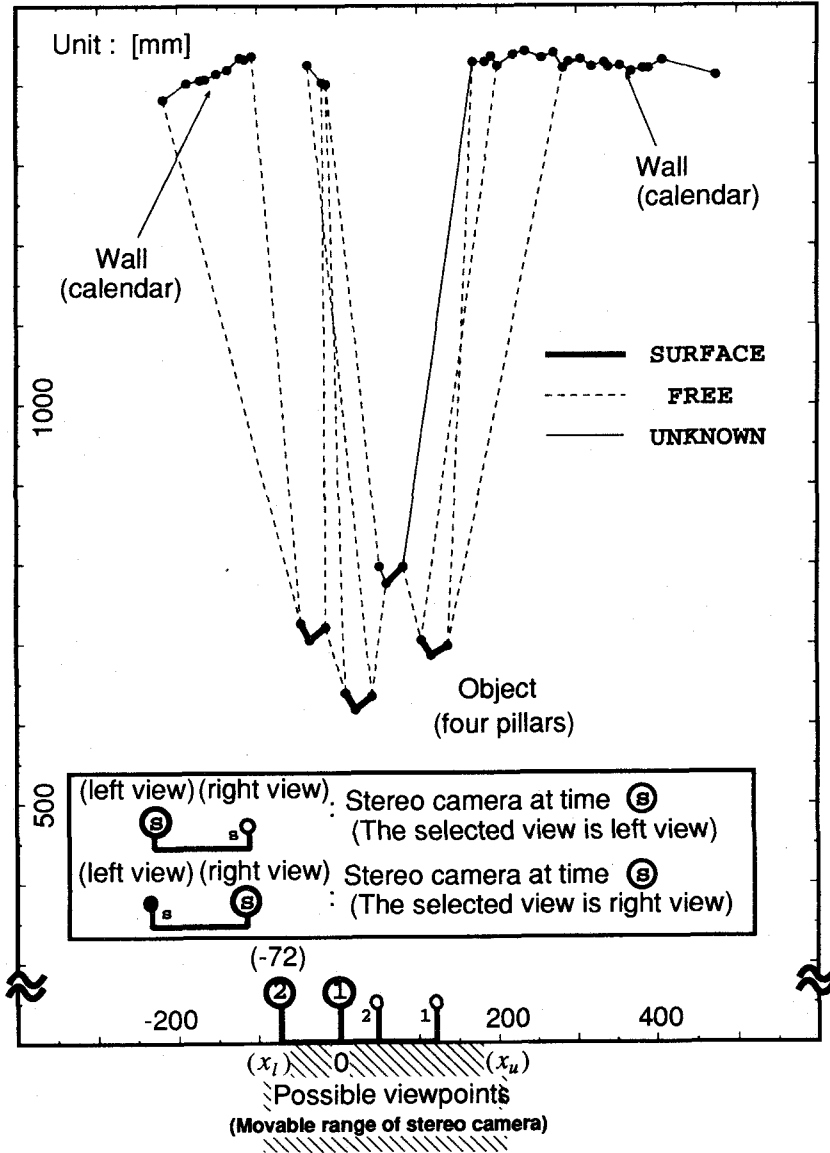


Fig.2.19 Experimental results (reconstructed surfaces at $s = 2$)

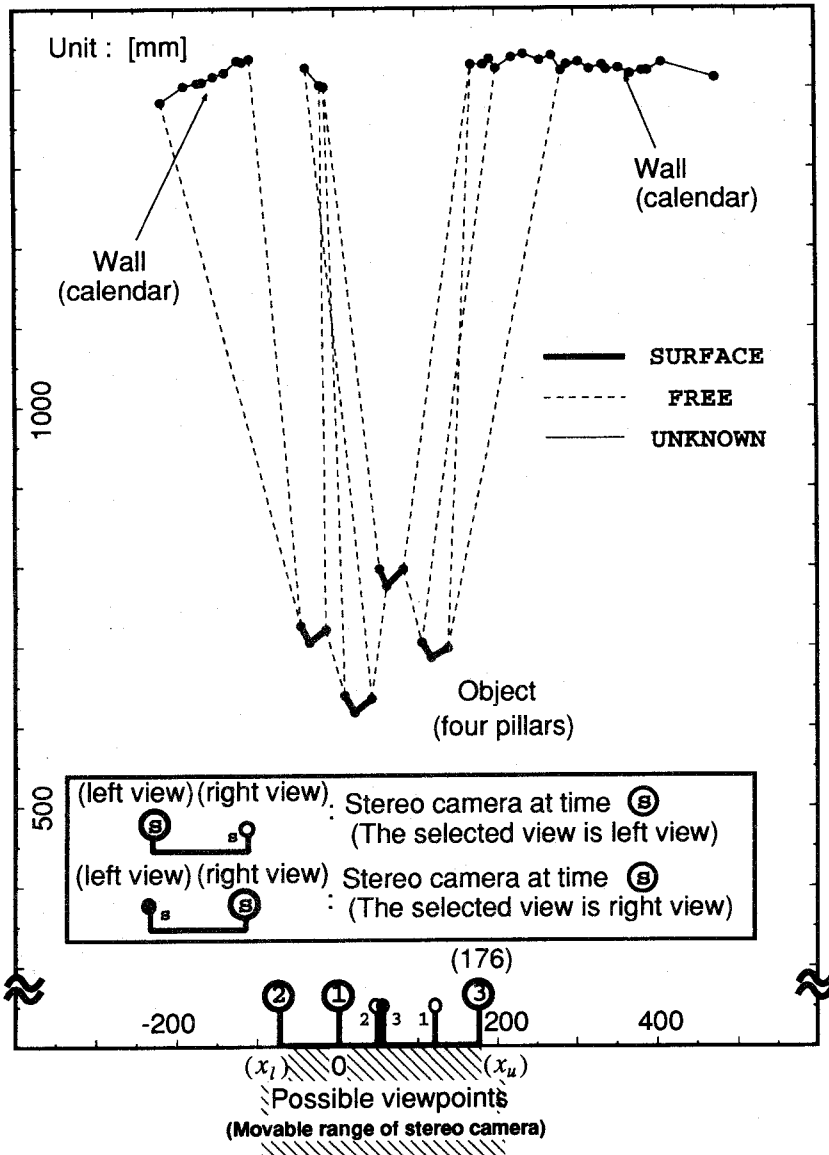


Fig.2.20 Experimental results (reconstructed surfaces at $s = 3$)

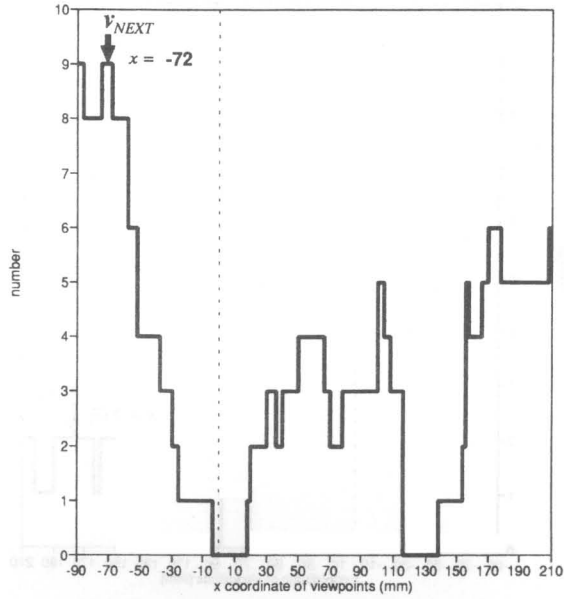


Fig.2.21 Experimental results (viewpoint histogram at $s = 1$)

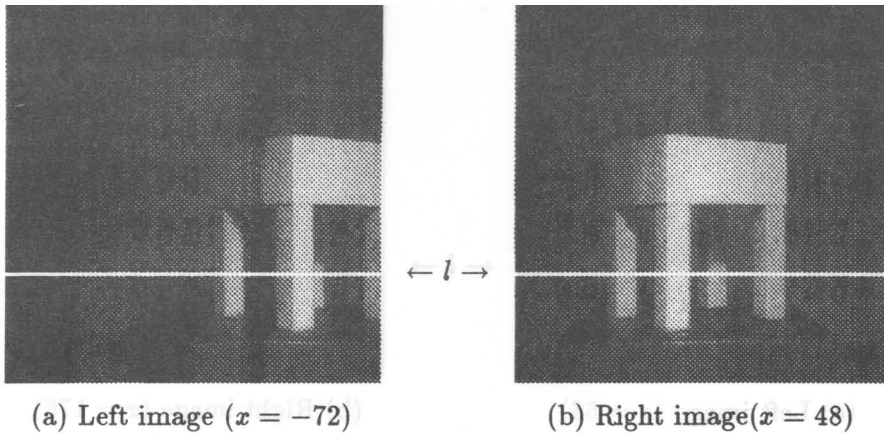


Fig.2.22 Stereo image taken at $s = 2$

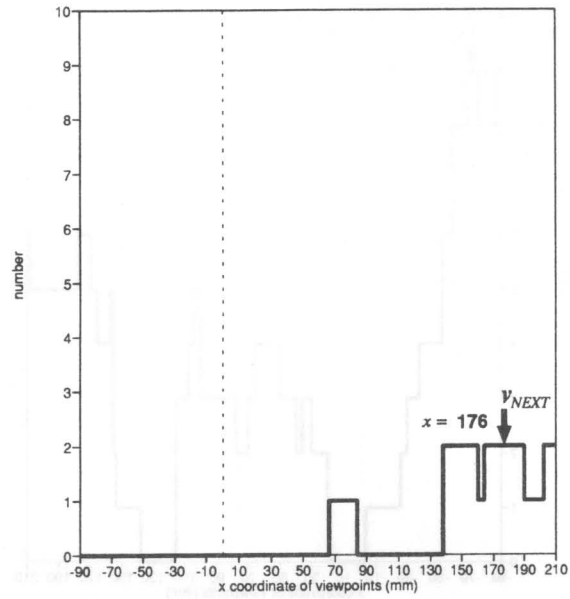


Fig.2.23 Experimental results (viewpoint histogram at $s = 2$)

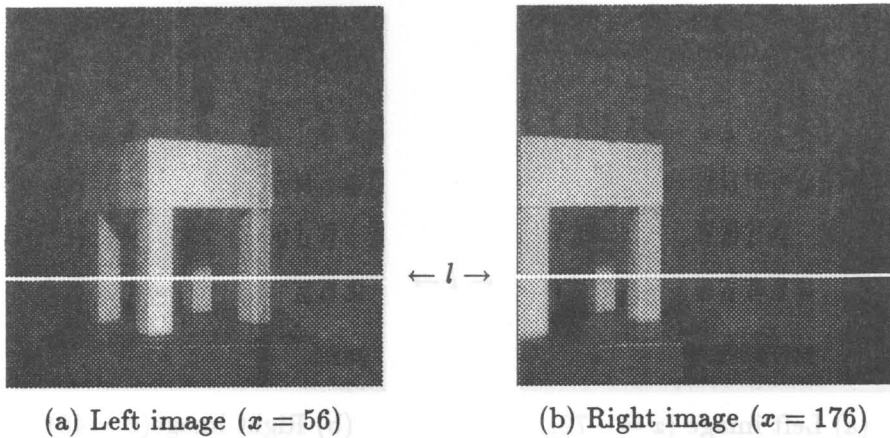


Fig.2.24 Stereo image taken at $s = 3$

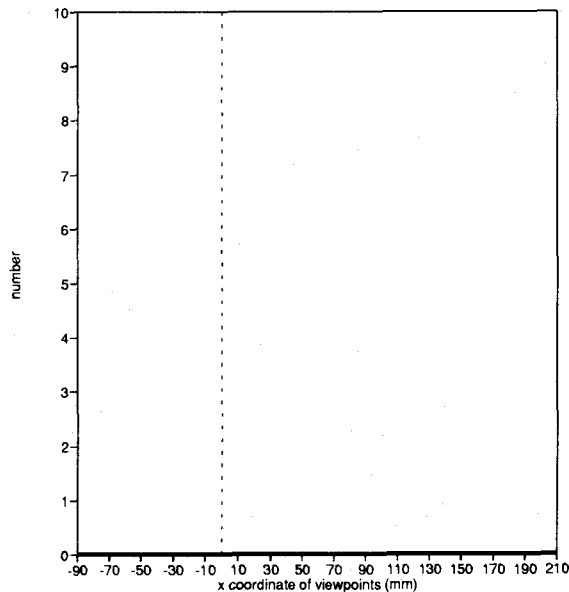


Fig.2.25 Experimental results (viewpoint histogram at $s = 3$)

Fig.2.20は次のステップ $s = 3$ における面構造復元結果を示している。同図に示されている $s = 3$ におけるステレオシステムの位置は、 $s = 2$ において作成された視点ヒストグラム (**Fig.2.23**) に基づいて決定されたものである。**Fig.2.20**の結果に基づいて、さらに視点ヒストグラムを作成すると、全区間にわたってヒストグラム値がゼロとなり、もうこれ以上アークの状態が決定できる可能性はないと判定された (**Fig.2.25**)。すなわち、**Fig.2.20**は面構造復元最終結果を表している。図より、偽の面が生成されることなく（物体表面でないアークがすべて正しく **FREE** と決定）、対象物体（4本の柱）の面構造が正確に復元されていることがわかる。その一方で、背景の壁（カレンダー）に相当するアーク（全部で30本）の状態がすべて **UNKNOWN** のままになっていることがわかる (**Table 2.3**参照)。これは、本実験の場合、壁が常に最後方にあり、壁自体が引き起こす隠れがシーン中に全く存在しなかったことに起因する。

結局、本実験では、3回の観測（2回の移動により収束）によって、実験シーンに存在するすべての遮蔽表面（**定義 2.2** 参照；具体的にはカレンダーの文字を隠す4本の柱の可視部分を指す）を正しく復元することができた。

2.6 結言

本章では、ステレオカメラをアクティブに運動させることにより得られるエッジ点の 3 次元位置情報と隠れ情報を用いて、環境の面構造を復元する方法を提案した。本手法は、従来の手法ではほとんど議論されていなかった面情報を効率良く獲得するためのカメラの移動戦略や視点の選択法に対する 1 つの解答を与えている。提案した手法を用いれば、少ない観測回数で有効な面構造が正しく復元できることを実シーンを用いた実験によって示した。

本論文では、ある特定のエピポーラ線上に存在する画像特徴点から生成される 2 次元面構造のみを取り扱ったに過ぎなかったが、提案した方法は、原理的には、他のエピポーラ線上に対しても全く同様に適用することができるので、各エピポーラ線ごとに復元された面構造を統合することにより [28][19][20]、物体表面の完全な 3 次元構造を復元することも可能であろう。

一方、本論文では、特徴点の空間位置の位置決め曖昧さ（ステレオによる 3 次元計測誤差）を考慮・解消する問題 [45][46] に関しては全く取り扱わなかった。具体的には、提案した手法では、最初のステレオ計測によって空間中に位置決めされた特徴点のみからアークを生成するに留まり、観測回数の増大に応じて、アークを構成する各特徴点の 3 次元位置を統計的に統合・リファインするような処理は一切行わなかった。しかしながら、実際には、この計測誤差が原因で予期せぬ面構造復元エラーが生じるおそれもある。今後は、特徴点の位置決め曖昧さを考慮した面候補の表現方法とその位置決め曖昧さを解消するための統計的手法、ならびに、面構造の復元過程においてその解釈に矛盾が生じた場合の対処法について順次検討する。

第 3 章 曲面の隠れ輪郭の検出

3.1 緒言

シーンが投影された 2 次元画像系列から、環境中に存在する物体の 3 次元位置・姿勢を推定したりその形状を認識する手法を確立することは、ロボットの視覚研究の中心的課題である。一般にこの目的を達成するために、まず各画像中よりエッジが抽出される。エッジには、物体の輪郭線のように奥行きや法線の不連続性に起因するものや、表面の模様や影など反射率の不連続性に起因するものがあるが、物体の形状を認識するための主要な手がかりは輪郭線に含まれている [47]。

球の輪郭線や円柱の側面輪郭線のように、視点位置に依存して物体表面上に描かれる位置が変化する曲線は、輪郭生成線 (Contour Generator) [47] と呼ばれ、これが画像上に投影されてできる像は、隠れ輪郭 (Occluding Contour) [47] と呼ばれる¹。隠れ輪郭には、以下のような物体表面を記述するための多くの有益な情報が含まれている。

- ① 隠れ輪郭に対応する物体表面 (輪郭生成線) の法線方向が一意に決定できる [49]。
- ② 隠れ輪郭の曲率の符号から物体表面の定性的な形状が推定できる [9][50]。
- ③ 観測者の移動による隠れ輪郭の見え方の変化から物体表面の曲率が推定できる [48][51]。

しかしながら、画像中の隠れ輪郭を発見することは非常に困難であり、隠れ輪郭を高い信頼度で検出できる手法を開発する必要がある。

よく知られているように、隠れ輪郭の 3 次元位置をステレオ法により推定しようとするとき、2 台のカメラに投影される輪郭線の像がシーン中では同一の部分に対応しないために、2 台のカメラの視線交点として算出される 3 次

¹輪郭生成線はリム (Rim) [9][34] あるいはリム (Rimb) [19][29] と呼ばれることもある。隠れ輪郭は見かけの輪郭 (Apparent Contour) [48][35] や先端境界 (Extremal Boundary) [49][50][32][34][30] あるいはシルエット (Silhouette) [51][52][53] と呼ばれることもある。

元位置と実際の曲面との間にずれが生じるという問題が起こる (Fig.1.3 参照). このずれの様子を 3 台目のカメラから観測することにより隠れ輪郭を検出しようとする方法がいくつか提案されている [32][20][33][54]. しかしながらこれらの方法では, 実データにおいて生じるであろうノイズや隠れの影響に極めて弱い上に, 画像中において隠れ輪郭が同定されるだけで, 隠れ輪郭に対応する曲面の 3 次元情報を得ることはできないという難点がある.

一方, Vaillant ら [34] や Cipolla ら [35] は, 複数の視点から観測された物体表面の像を予め何らかの方法により対応付けた後に, 得られた対応点の系列を視点の移動に伴う隠れ輪郭の見え方の変化のモデルに当てはめることによって隠れ輪郭を検出する手法を提案した. この方法では, 隠れ輪郭を検出できるのみならず, 当てはめたモデルのパラメータから隠れ輪郭近傍の 3 次元形状が復元できるという優れた特長を有する反面, モデル当てはめへの入力となる対応点の系列をいかにして獲得するかが重大な問題となる. Vaillant らは, 三眼視による幾何学的拘束を用いて通常のエッジの対応付けを行なった後に, 幾つかの発見的拘束 (図形の連続性, 近傍の連続性など [55]) を用いてそれらの対応付けの結果を徐々に伝播させることにより, 幾何学的拘束を満足しない隠れ輪郭の対応付けを行なった. Cipolla らは, 視点を微小に変えて撮影される大量の画像系列上のエピポーラ線群を画像化した EPI (Epipolar Plane Image) を用いて, エピポーラ線上での対応探索を EPI 上での軌道追跡問題に置き換えることにより通常のエッジと隠れ輪郭の対応付けを行なった. しかしながら前者の手法では, 全てのシーンで常に成立するとは限らない発見的拘束を用いているために対応付けを誤る可能性があり, さらに繰り返し計算を行なうために計算量が膨大になるという問題がある. また後者の方法では対応付けは正確に行なえるが, 大量の画像を撮像・処理する時間とメモリが膨大になるという問題がある.

本論文では, 物体の見え方を表す幾何モデル (隠れ輪郭モデル) を直接利用してステレオ対応付けを行うことにより, 隠れ輪郭を高い信頼度で検出する一方法を提案する. ここに隠れ輪郭モデルは, 物体表面とその像の幾何学的関係をエピポーラ平面上で記述したモデルであり, 表面の模様のエッジや多面体の稜線・頂点に加えて, 曲面の隠れ輪郭の見え方も表すことができるように従来の幾何モデル (いわゆる視線の方程式) をより一般化したものである.

ステレオ対応付けは, 前章で示した方法と同様, アクティブなステレオ対応アルゴリズム [36][37][38][39][40] を用いた. これは, カメラをアクティブ

に運動させることにより獲得される幾何学的な拘束を用いて、ステレオ対応付けを行うアルゴリズムであり、発見的拘束を用いる代わりに、カメラの移動によって生じる像の動きに基づいて、もう一方のカメラにおける対応点の存在範囲を拘束するところに最大の特長がある。本章では、このアルゴリズムにおける対応点の存在範囲を拘束する処理に“隠れ輪郭モデル”を用いることにより、隠れ輪郭のステレオ対応付けも可能なアルゴリズムに拡張した。こうして獲得された対応点の系列を隠れ輪郭モデルに最小2乗フィッティングさせて、対応する物体表面のパラメータ（奥行きと曲率）を推定し、得られた曲率の大きさに基づいて隠れ輪郭の検出を行う。

提案する手法では、隠れ輪郭の見え方を表すモデルを直接利用してステレオ対応付けを行うために、モデルを用いない方法や発見的拘束を用いる従来の手法と比べて、より高い信頼度で隠れ輪郭を検出することができるという特長がある。さらに本手法では、各隠れ輪郭に対応する物体表面の奥行きと曲率がわかるので、隠れ輪郭近傍の局所3次元形状を同時に復元することができるという利点もある。

人工画像ならびに実画像を用いたいくつかの実験により、提案する手法の有効性を示す。

3.2 隠れ輪郭モデル

まず、ステレオカメラと物体表面の幾何学を解析することにより、シーン中の点とその像との関係を記述する新しい幾何モデルを導出する。

3.2.1 ステレオカメラの幾何学

簡単のため、3台以上のカメラで構成される標準配置（任意の2台のカメラの光軸が互いに平行でそれぞれが基線と直交）の平行ステレオカメラを考える。

Fig.3.1に示すように、カメラ番号 i を左から順に $i = 0, 1, 2, \dots$ とし、各カメラ i のレンズ中心を o_i 、 o_0 と o_i 間の距離を b_i とし、各カメラの焦点距離は同一値 f であるとする。さらに、3次元位置を記述する座標系として、 o_0 を原点にとり、 x 軸が基線に z 軸がカメラ0の光軸に一致するような右手系の3次元直交座標（ $o_0 - xyz$ ）を考える。また、カメラ i の画像平面にも、図に示すような2次元直交座標系（ $O_i - X_i Y_i$ ）を設定する。

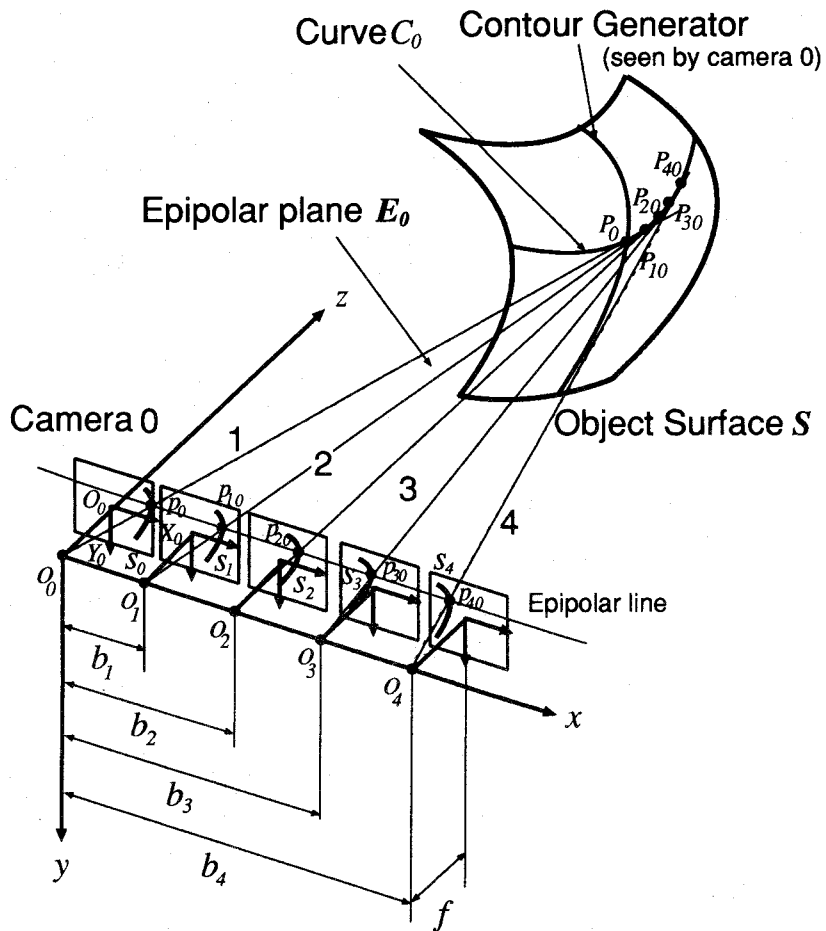


Fig.3.1 Geometry of stereo camera and object

3.2.2 物体表面とその像の幾何学

このようなステレオカメラが、ある物体表面 S をとらえている場合を考える。Fig.3.1に示すように、カメラ i により観測される物体表面 S の隠れ輪郭を s_i とする。特に、隠れ輪郭 s_0 上の任意の1点を p_0 とし、 p_0 に対応する物体表面上の点を P_0 で表す。

図のようなカメラ配置の場合、カメラ i に関する p_0 のエピポーラ平面は、

任意の $i (\neq 0)$ について同一の平面で与えられる。いま、この平面を E_0 で表し、 E_0 と隠れ輪郭 s_i の交点を $p_{i0} (\forall i \neq 0)$ と定める。さらに、 p_{i0} に対応する物体表面上の点を P_{i0} で表す。

ここで、カメラ位置が 0 から $1, 2, \dots$ と変化すると、隠れ輪郭点 p_0 に対応する物体表面上の点は、エピポーラ平面 E_0 上において、 P_0 から P_{10}, P_{20}, \dots と変化していくことがわかる。そこで、点 P_0 および P_{i0} を結んで得られる曲線、すなわち、物体表面 S とエピポーラ平面 E_0 の交線を考えこれを C_0 とすると、曲線 C_0 は、カメラ 0 の視線 (o_0 と p_0 を結ぶ直線) と点 P_0 で接し、カメラ i の視線 (o_i と p_{i0} を結ぶ直線) と点 P_{i0} で接する。この様子を xz 平面 H に正射影すると **Fig.3.2** のようになる。

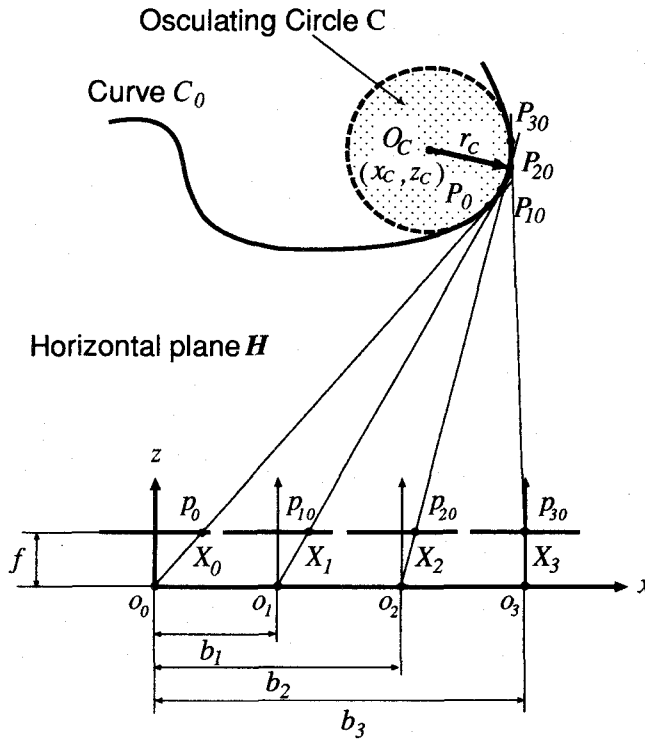


Fig.3.2 Occluding contour model

よって、物体表面が点 P_0 の近傍で局所的に滑らかであれば、投影平面 H 上において、点 P_0 の近傍で曲線 C_0 を十分に良く近似する接触円 (Osculating

Circle) を考えることができる。いまこの接触円を C で表し、 C の半径を r_C 、中心を $O_C(x_C, z_C)$ とし、カメラ i に投影された隠れ輪郭点の像の X 座標を X_i とすれば、 x_C, z_C, r_C と X_i の間には次式の関係が成り立つ。

$$x_C = \frac{X_i}{f} z_C + b_i \pm \frac{\sqrt{f^2 + X_i^2}}{f} r_C \quad (3.1)$$

ここに、複号は O_C と P_0 の相対的位置関係に依存して決まる。すなわち、 P_0 の x 座標を x_0 ($\neq x_C$) とするとき、式 (3.1) の複号は、 $x_0 < x_C$ ならば +、 $x_0 > x_C$ ならば - をとる。

本論文では、式 (3.1) で表される幾何学的関係を“隠れ輪郭モデル (Occluding Contour Model)” と呼ぶ。このモデルにおいて曲率半径 r_C は非負値であるが、特に r_C がゼロのとき、式 (3.1) は右辺の第3項がゼロとなって、視線の方程式そのものを表す。すなわち、隠れ輪郭モデルは、 r_C がゼロでなければ隠れ輪郭点 (隠れ輪郭上の点) を表し、 r_C がゼロならば通常のエッジ点 (表面の模様エッジや稜線など) を表す。

以下では、便宜上、隠れ輪郭点及び通常のエッジ点を総称して“隠れ輪郭候補点”と呼ぶものとする。

3.3 ステレオ対応アルゴリズム

ここでは、前章で示した“アクティブなステレオ対応アルゴリズム” (アルゴリズム 2.1) に“隠れ輪郭モデル”を組み込むことによって、隠れ輪郭点の対応付けも行うことが可能なステレオ対応アルゴリズムを導出する。

3.3.1 アルゴリズムの概要

提案するアルゴリズムは、アルゴリズム 2.1 と同様、次の4つの前提条件を必要とする (2.3.1 節参照)。

- アルゴリズムが動作する環境は静止環境である。
- ステレオカメラのキャリブレーションは正確に行われている。
- カメラの運動パラメータ (移動距離) は正確にわかる。
- シーンの奥行き範囲は予めわかっている。

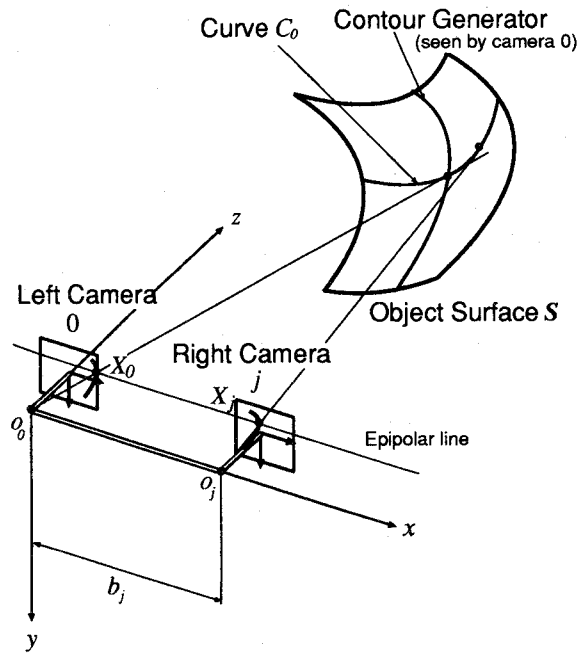
以上の前提条件のもとで、提案するステレオアルゴリズムの概要を以下に示す。

[アルゴリズム 3.1] 隠れ輪郭モデルを用いたアクティブなステレオ対応アルゴリズム

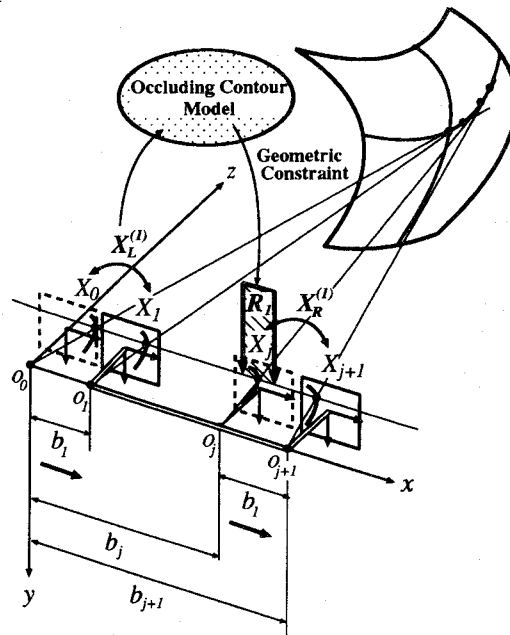
- ① **Fig.3.3(a)** に示すように、左カメラがカメラ 0 の位置に、右カメラがカメラ j の位置にあるステレオカメラを考える。現在の移動回数 $t = 0$ とする。
- ② 移動回数 $t \leftarrow t + 1$ とし、ステレオカメラを基線に沿って b_t だけ右へ並進移動させる。移動後の左右のカメラ位置はそれぞれ $t, j + t$ となる。
- ③ 隠れ輪郭候補点のペア $\mathbf{X}_L^{(t)} = \{X_0, X_t\}$ (左カメラ), $\mathbf{X}_R^{(t)} = \{X_j, X_{j+t}\}$ (右カメラ) をそれぞれ求める (詳細は 3.3.3 節で述べる)。
- ④ ③で得られた隠れ輪郭候補点のペアを隠れ輪郭モデルに当てはめることによって、もう一方のカメラにおいて観測される隠れ輪郭候補点の位置を予測する (詳細は 3.3.2 節で述べる)。

たとえば、**Fig.3.3(b)** に示すように、左カメラの隠れ輪郭候補点のペア $\mathbf{X}_L^{(1)}$ を用いれば、対応すべき右カメラ j の隠れ輪郭候補点の存在可能性を太線矢印で示した範囲 R_1 内に限定することができる。
- ⑤ こうして限定された範囲に存在する像点の数 n_t を調べる。もし $n_t = 1$ ならば、その像点を対応する隠れ輪郭候補点として選択する。もし $n_t = 0$ ならば、対応する隠れ輪郭候補点は存在しない (オクルージョンが生じている) と考える。一方 $n_t > 1$ ならば、現段階では対応が決まらなると考える。

たとえば、**Fig.3.3(b)** のように限定範囲 R_1 内に、像点が X_j の 1 点しかなければ、 X_j は $\mathbf{X}_L^{(1)}$ と対応すると考える。この場合、 $\mathbf{X}_L^{(1)}$ と $\mathbf{X}_R^{(1)}$ は、同一の隠れ輪郭候補点として対応づけられることになる。
- ⑥ ②～⑤の処理を隠れ輪郭候補点の系列が得られなくなるまで繰り返す。



(a) Before movement ($t = 0$)



(b) After movement ($t = 1$)

Fig.3.3 Stereo correspondence algorithm with an occluding contour model

提案するアルゴリズムのポイントは、

- 隠れ輪郭モデルに基づいて対応候補を限定する方法（アルゴリズム 3.1 のステップ④）
- $X_L^{(t)}$ および $X_R^{(t)}$ の対応を一意に決定するためのカメラの移動距離の決め方（アルゴリズム 3.1 のステップ③）

である。以下でこれらについて説明する。

3.3.2 隠れ輪郭モデルに基づいた対応候補の限定

3.3.1 節のアルゴリズムにおいて像点の存在位置を限定するために用いられる幾何学的拘束条件を以下で導出する。本節では、左カメラで検出された隠れ輪郭候補点のペアを用いて右カメラの隠れ輪郭候補点の存在位置を拘束する条件を導出するが、全く同様の議論が右カメラのペアを用いて左カメラにおける像点の位置を予測する場合にも成立することに留意されたい。

なお議論を簡単化するために、次の2つの仮定をおいた：

[仮定 3.1] 焦点距離 f の2乗は任意の像点の画像座標の2乗に比べて十分大きい。

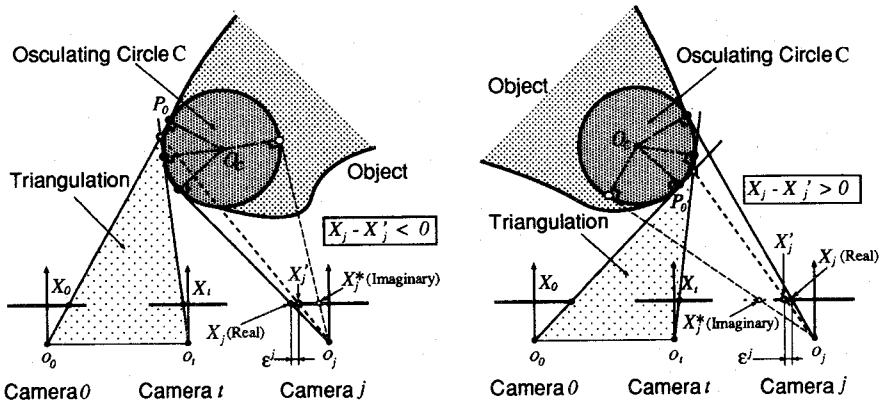
[仮定 3.2] 物体表面の曲率半径はカメラからその表面までの距離に比べて十分小さい。

仮定 3.1 は、比較的焦点距離の長い（広角でない）レンズを用いることを仮定するものである。一方仮定 3.2 は、直前方に置かれた対象物体の輪郭生成線が画像平面の外側に投影される（観測されない）ことを避けるものであり、いずれも現実的な仮定であるといえる。

像点に位置決め誤差のない場合

まず各像点に位置決め誤差のない理想的な状況を考える。この場合、本アルゴリズムにおけるステレオ対応決定問題は、次の問題 3.1 のように書くことができる。

[問題 3.1] カメラ 0 とカメラ $t (> 0)$ の対応ペア X_0, X_t が与えられた時、対応するカメラ $j (j > t)$ の像 X_j の存在範囲を予測すること。



(a) Double sign of Eq. (3.1) is plus (b) Double sign of Eq. (3.1) is minus

Fig.3.4 Geometric constraint based on occluding contour model

X_0, X_t, X_j に関して式 (3.1) が成立する。これら 3 つの式を (x_C, z_C, X_j) を未知数とする三元連立方程式系とみなして解くことにより、 X_j に関する次の関係を得る [56]。(2 つの解のうち 1 つは虚解である)。

$$X_j = \frac{-Q_t z_C \pm r_C \sqrt{Q_t^2 - f^2(r_C^2 - z_C^2)}}{r_C^2 - z_C^2} \quad (3.2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} z_C &= \frac{1}{D_t} \{ f b_t - (l_0 - l_t) r_C \} \\ Q_t &= X_0 z_C + l_0 r_C - f b_j \\ D_t &= X_0 - X_t (> 0) \\ l_t &= \pm \sqrt{f^2 + X_t^2} \end{aligned}$$

であり、 D_t はカメラ 0 とカメラ t の視差に相当する。

この様子を **Fig.3.4** に示した。図において、 X'_j は $r_C = 0$ (通常のエッジ点) の場合の X_j の予測値を表しており、式 (3.2) から、

$$X'_j = X_j|_{r_C=0} = X_0 - \frac{b_j}{b_t} D_t \quad (3.3)$$

である。また、 X_j^* は式 (3.2) の虚解 (Imaginary solution) を表しており、物理的には、カメラ j のレンズ中心 o_j より接触円 C に引くことのできる二本の

接線のうちの一方の像に相当する。Fig.3.4からわかるように、隠れ輪郭点の場合、実際にカメラ j に投影される位置 X_j は、対応する物体表面の曲率のために X'_j よりも少しずれた位置になる。いま、このずれ量を $\varepsilon^j (\geq 0)$ とし、仮定 3.1, 仮定 3.2 のもとで式 (3.2) を変形することにより、次の関係を得る (この導出過程は付録 B に示されている)。

$$X_j = X'_j \pm \varepsilon^j \quad (3.4)$$

$$\varepsilon^j = r_C \frac{\frac{b_j}{b_t} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) D_t^2}{2\{(f + k_t)z_C \mp X'_j r_C\}} \quad (3.5)$$

$$\text{ここに, } k_t = \frac{1}{2f} \left\{ X_0^2 - \frac{b_j}{b_t} (X_0^2 - X_t^2) \right\}$$

式 (3.5) より、カメラから物体までの距離 z_C が小さく、その曲率半径 r_C が大きいほど、すなわち $\frac{r_C}{z_C}$ が大きいほど、ずれ量 ε^j が大きくなるのがわかる。

実際には、複号 (ずれの方向) を特定することはできず、さらに r_C も既知ではないので、式 (3.4) から X_j を直接推定することはできない。しかしながら仮定 3.2 より、 $z_C \gg r_C$ であることに着目すれば、

$$\frac{r_C}{z_C} \leq \gamma \ll 1 \quad (3.6)$$

を満たす正定数 $\gamma (> 0)$ が存在するので、 ε^j の最大値を次のように与えることができる。

$$\varepsilon_{max}^j = \frac{\frac{b_j}{b_t} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) D_t^2 \gamma}{2\{(f + k_t) - |X'_j| \gamma\}} (> 0) \quad (3.7)$$

よって、 X_j の存在範囲は悪くとも以下の様な範囲に限定される。

$$X'_j - \varepsilon_{max}^j \leq X_j \leq X'_j + \varepsilon_{max}^j \quad (3.8)$$

像点に位置決め誤差がある場合

実際には、各像点 $X_k (\forall k)$ には位置決め誤差が含まれる。いま、 X_k の測定値を \hat{X}_k で表すとき、問題 3.1 は次の様に書き換えることができる。

【問題 3.2】 カメラ 0 とカメラ $t (> 0)$ の対応ペア \hat{X}_0, \hat{X}_t が与えられた時、対応するカメラ $j (j > t)$ の像 \hat{X}_j の存在範囲を予測すること。

\hat{X}_0, \hat{X}_t を式(3.4)に適用することにより得られる \hat{X}_j の推定値を \tilde{X}_j と書く(ノイズを含む値を用いて算出された値には \sim を付すものとする)とき, 理論的には,

$$|\hat{X}_j - \tilde{X}_j| \leq \Delta_{max}^j \quad (3.9)$$

となる $\Delta_{max}^j (> 0)$ が存在する.

ここで, 各像点の位置決め誤差の最大値を δ とすれば, Δ_{max}^j は, 簡単な誤差解析によって次の様な値に設定することができる(この導出過程は付録Cに示す):

$$\Delta_{max}^j = 2 \left(\frac{b_j}{b_t} + 1 + 3 \frac{\epsilon_{max}^j}{D_t} \right) \delta \quad (3.10)$$

よって, 式(3.8),(3.9)より \hat{X}_j の存在範囲は以下の様な範囲に限定される.

$$X_j' - \epsilon_{max}^j - \Delta_{max}^j \leq \hat{X}_j \leq X_j' + \epsilon_{max}^j + \Delta_{max}^j \quad (3.11)$$

式(3.11)および式(3.7),(3.10)より, \hat{X}_j の存在範囲の大きさ: $2(\epsilon_{max}^j + \Delta_{max}^j) + 1$ は, カメラの移動距離 b_t が大きくなるほど狭くなることがわかる. なおこの大きさは, 通常のエッジ点のみを想定した場合[37][38][39] ($r_C = 0$ すなわち $\epsilon_{max}^j = 0$)と比べると, 物体表面の幾何学(曲率)を考慮した分だけより広くなることにも留意されたい.

3.3.3 ステレオカメラの移動距離の決定

前節で示したように, カメラの移動距離 b_t が大きいほどステレオ対応探索の範囲をより狭くできるが, b_t が大きすぎると, $\mathbf{X}_L^{(t)}$ (あるいは $\mathbf{X}_R^{(t)}$)の対応付けがより難しくなる. 逆に b_t が小さすぎると, $\mathbf{X}_L^{(t)}, \mathbf{X}_R^{(t)}$ の対応付けは容易になるが, その一方で, ステレオ対応探索範囲が広くなり, 両眼のステレオ対応付けがより困難になるという問題がある. ここでは, $\mathbf{X}_L^{(t)}, \mathbf{X}_R^{(t)}$ の対応を任意の点で一意に決定できるように, 画像情報に基づいてアクティブにカメラの移動距離 b_t を決める. 以下で $b_t (t = 1, 2, \dots)$ の決め方について説明する.

b_1 の決め方

まず, ステレオカメラが初期位置より距離 b_1 だけ移動した場合を考えると, カメラから物体表面までの距離が z_{min} 以上である(3.3.1節のアルゴリズム

の前提条件を参照) とすれば、像点が隠れ輪郭点であるかいかかわらず次式が成立する.

$$\hat{X}_0 - f \frac{b_1}{z_{min}} \leq \hat{X}_1 < \hat{X}_0 \quad (3.12)$$

いま、画像中の特徴点の最小出現ピッチ² を n とすると、式 (3.12) より、 \hat{X}_0 の対応ペア \hat{X}_1 の探索範囲の大きさ: $f \frac{b_1}{z_{min}}$ が n 以下となる条件は次式で与えられる.

$$b_1 \leq n \frac{z_{min}}{f} \quad (3.13)$$

したがって、上式を満たすように移動距離 b_1 を決めれば、移動前後の画像間でエピポーラ線に沿った特徴点の出現順序は変化せず、式 (3.12) の範囲内に存在する像点は高々1点になるために、対応を一意に決定することができる。すなわち、任意の点で対応ペア $\mathbf{X}_L^{(1)} = \{\hat{X}_0, \hat{X}_1\}$ を決定することができる。全く同様に、 $\mathbf{X}_R^{(1)} = \{\hat{X}_j, \hat{X}_{j+1}\}$ も決定することができる。

$b_t (t = 2, 3, \dots)$ の決め方

次に、ステレオカメラが $b_t (t \geq 2)$ だけ移動した場合を考える。この場合には、 $\mathbf{X}_L^{(t-1)} = \{\hat{X}_0, \hat{X}_{t-1}\}$ がすでに対応付けられているので、これを隠れ輪郭モデルに適用することによって、式 (3.11) と同様な次の関係が成立する。

$$X'_t - \varepsilon_{max}^t - \Delta_{max}^t \leq \hat{X}_t \leq X'_t + \varepsilon_{max}^t + \Delta_{max}^t \quad (3.14)$$

$$\text{ここに、 } X'_t = \hat{X}_0 - \frac{b_t}{b_{t-1}} D_{t-1} \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_{max}^t = \frac{\frac{b_t}{b_{t-1}} \left(\frac{b_t}{b_{t-1}} - 1 \right) D_{t-1}^2 \gamma}{2 \{ (f + k_{t-1}) - |X'_t| \gamma \}} \quad (3.16)$$

$$\Delta_{max}^t = 2 \left(\frac{b_t}{b_{t-1}} + 1 + 3 \frac{\varepsilon_{max}^t}{D_{t-1}} \right) \delta \quad (3.17)$$

すなわち、 \hat{X}_0 と対応する像点 \hat{X}_t の存在範囲を式 (3.14) により限定することができる。よって \hat{X}_t の存在範囲の大きさ: $2(\varepsilon_{max}^t + \Delta_{max}^t) + 1$ が³、特徴点の最小出現ピッチ n 以下になるように $b_t (> b_{t-1})$ を決めれば、この範囲内に存

²ある画像に対して任意のエピポーラ線を走査した時、その線上に続けて出現する任意の2特徴点間の画像上での距離(エピポーラ線が走査線と一致する標準配置の平行ステレオカメラではX座標の差の絶対値に相当する)の最小値をその画像の“特徴点の最小出現ピッチ”と定義する[36].

在する像は高々1点になり、任意の点で対応ペア $\mathbf{X}_L^{(t)} = \{\hat{X}_0, \hat{X}_t\}$ を決定することができる。これは $\mathbf{X}_R^{(t)} = \{\hat{X}_j, \hat{X}_{j+t}\}$ に関しても同様である（具体的な b_t の満たすべき条件は付録 D に示した）。

以上述べた移動戦略は、原理的には文献 [37][40] で示されている手法と同様であるが、本論文ではこれを隠れ輪郭モデルの場合に拡張している点異なる。

3.4 隠れ輪郭の検出

3.3 節で述べたアルゴリズムによって、ある物体表面 S に関して次の様な隠れ輪郭候補点の系列 $\hat{\mathbf{X}}$ を獲得することができる (t_{max} は移動回数を示す)。

- ① 左右のカメラでともに観測される場合。

$$\hat{\mathbf{X}} = \{\hat{X}_0, \hat{X}_1, \dots, \hat{X}_{t_{max}}, \hat{X}_j, \hat{X}_{j+1}, \dots, \hat{X}_{j+t_{max}}\}$$

- ② 左カメラのみで観測される場合。(右カメラではオクルージョンが生じて観測できない時)

$$\hat{\mathbf{X}} = \{\hat{X}_0, \hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_{t_{max}}\}$$

- ③ 右カメラのみで観測される場合。(左カメラではオクルージョンが生じて観測できない時)

$$\hat{\mathbf{X}} = \{\hat{X}_j, \hat{X}_{j+1}, \dots, \hat{X}_{j+t_{max}}\}$$

$\hat{\mathbf{X}}$ を構成する像点が4個以上あれば、式 (3.1) に最小2乗フィッティングさせることにより、同式の複号と Fig.3.2 に示した接触円の中心 (\bar{x}_C, \bar{z}_C) および(曲率)半径 $\bar{r}_C (\geq 0)$ が求まる。ただし、最小2乗誤差が極端に大きい場合には、 $\hat{\mathbf{X}}$ の中に誤った対応が含まれていると考えられるので、後述する隠れ輪郭であるか否かの判定は行わない(たとえば、物体表面を隠すエッジだけが式 (3.11) の予測範囲に入ってしまった場合など)。

隠れ輪郭であるための条件は、 $r_C > 0$ (3.2.2 節参照) であるから、確率 $P\{r_C > 0\} (\in [0, 1])$ が算出できればよい。いま、各像点に含まれる位置決め誤差が $[-\delta, \delta]$ の一様分布にしたがうと仮定すれば、 \bar{r}_C の推定誤差の分散 $\sigma_{r_C}^2$ は、次式で近似的に与えられる [56]。

$$\sigma_{r_C}^2 = \frac{\delta^2}{3} \sum_k \left(\frac{\partial F}{\partial X_k}(\hat{\mathbf{X}}) \right)^2 \quad (3.18)$$

ただし、 $F(\mathbf{X})$ は隠れ輪郭候補点の系列 \mathbf{X} の関数を示しており、 $r_C = F(\mathbf{X})$ である。

直観的には、 \bar{r}_C がより大きくかつ σ_{r_C} がより小さいとき、つまり $K = \frac{\bar{r}_C}{\sigma_{r_C}} (> 0)$ が大きいほど隠れ輪郭である確率 $P\{r_C > 0\}$ が高いといえる。

数学的には、チェビシェフの不等式 [57] によって、

$$P\{r_C > 0\} > P\{|\Delta r_C| < \bar{r}_C\} = 1 - \frac{1}{K^2} = P_{inf}$$

が成立する (Δr_C は r_C の推定誤差)。

そこで本論文では、

$$P_{inf} > T \quad (3.19)$$

を満足する $\hat{\mathbf{X}}$ を“隠れ輪郭点”として検出し、それ以外の $\hat{\mathbf{X}}$ はすべて“通常のエッジ点”とみなす。

なお、式 (3.19) の T は閾値であり、隠れ輪郭判定の際に要求される信頼度に応じて選ばれる。

3.5 実験

提案した手法の有効性を検証するために、人工シーンならびに実シーンを投影したステレオ画像系列を用いて隠れ輪郭の検出実験を行なった。

3.5.1 実験方法

人工シーン

Fig.3.5は、計算機 (SUN SPARC station 1) 上で人工的に作成されたステレオ画像系列の一部を示している。これは、Fig.3.6に示した実験環境をシミュレートしたものである。図に示すように、各画像 i はそれぞれ 370×370 (pixel)、各点 8 ビットで構成されており、焦点距離 $f = 700$ (pixel) = 16 (mm) のピンホールカメラを用いて視点位置 $(b_i, 0, 0)$ (mm) より撮影される状況を想定している。本実験では、基線長 25 (mm) のステレオカメラがその基線に沿って 5 (mm) 間隔で 4 回移動する場合を考える。ゆえに $b_i = 5 \times i$ ($i = 0, 1, \dots, 9$) であり (Table 3.1 参照)、実験に用いた画像は計 10 枚である。なお各画像には、振幅の期待値がゼロ、分散が 1 の画素ごとに無相関なガウスノイズが付加されている。

処理対象となる物体は、Fig.3.5, Fig.3.6に示すように直方体と円柱および円錐で構成されており、円柱と円錐の側面の輪郭線が隠れ輪郭に相当する。な

おこの物体は、円柱部分の半径が 30(mm), 全体の高さが 48(mm) で、カメラより約 250(mm) 前方に配置されている。

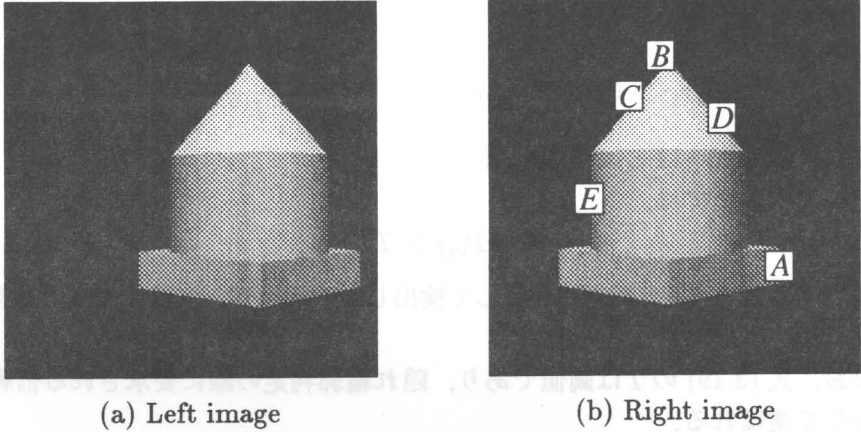


Fig.3.5 Stereo image taken at time $t = 0$ (synthetic scene)

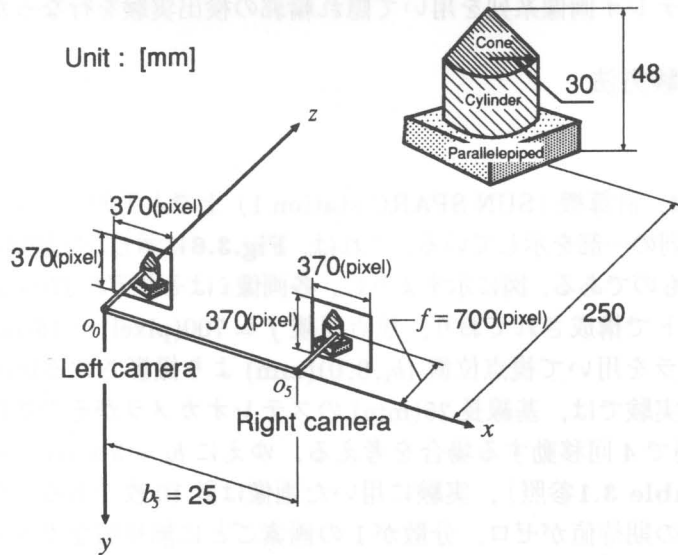


Fig.3.6 A schematic representation of experimental scene (synthetic scene)

Table 3.1 Camera position (synthetic scene)

(Left Camera)		(Right Camera)	
i	$b_i(\text{mm})$	i	$b_i(\text{mm})$
0	0.000	5	25.000
1	5.000	6	30.000
2	10.000	7	35.000
3	15.000	8	40.000
4	20.000	9	45.000

実シーン

実システムにより撮影されたステレオ画像系列の一部を **Fig.3.7**に示す。これは、光軸が平行でかつ水平方向に120(mm)離れた位置にセットアップされた2台のCCDカメラ(焦点距離16(mm), 等価的に約700(pixel))を用いて撮影され、それぞれ $370 \times 370(\text{pixel})$ の分解能で各点8ビットの輝度値を持つ画像として、ホスト計算機SUN SPARC station 1上のフレームメモリ内に取り込まれたものである(実システムの詳細は2.5.1節を参照されたい)。本実験環境の概略図を**Fig.3.8**に示す。

実験のために撮影されたステレオ画像は、人工シーンと同様、5ペア計10枚であり、撮影位置は**Table 3.2**に示すとおりである。**Table 3.2**に示した位置は、3.3.3節で述べた移動戦略に基づいて決定されたものであり、各撮影位置への移動は、上述の実システムを高精度で移動量が測定可能な(移動計測誤差:0.0008(mm), **Table 2.2**参照)並進移動機構に装着して行った。なお、カメラの各パラメータのキャリブレーションは、文献[7]で示された手法を用いて行っている。

処理対象となる曲面物体は、**Fig.3.7**, **Fig.3.8**に示すように、ほぼ直円柱形のティーカップであり、半径が約40(mm)、全体の高さが約80(mm)で、カメラより約500(mm)前方に配置されている。側面の輪郭線が隠れ輪郭に相当する。なお、曲面物体の背景(カメラより約1200(mm)の距離)には多くの模様(カレンダーの文字)が存在するために、**Fig.3.5**のシーンに比べてステレオ対応候補は多くなり、さらに、オクルージョンが生じている(カレンダーの一部がティーカップにより隠されている)点にも留意されたい。

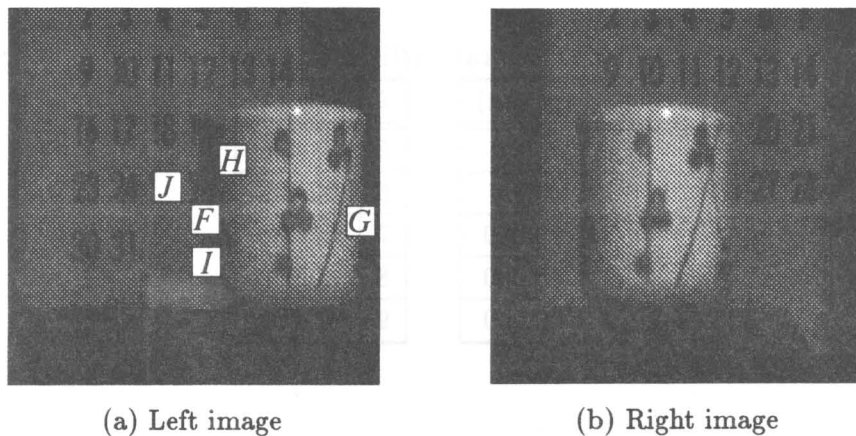


Fig.3.7 Stereo image taken at time $t = 0$ (real scene)

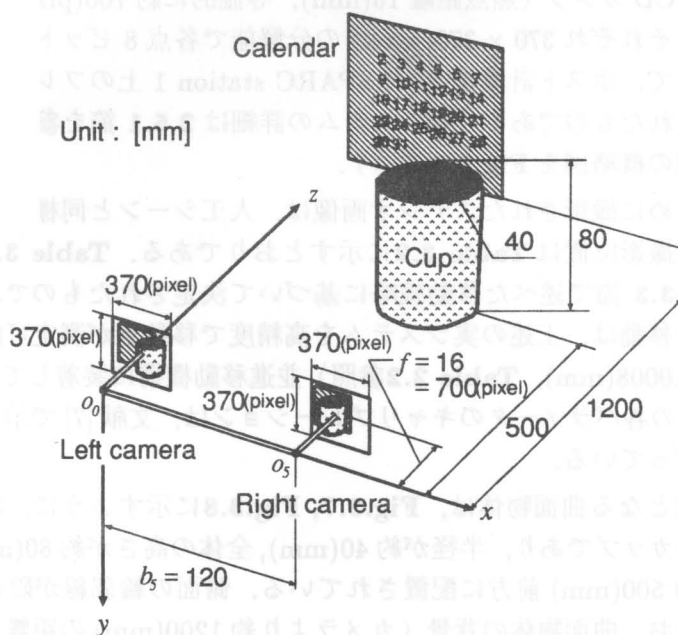


Fig.3.8 A schematic representation of experimental scene (real scene)

Table 3.2 Camera position (real scene)

(Left Camera)		(Right Camera)	
i	$b_i(\text{mm})$	i	$b_i(\text{mm})$
0	0.000	5	120.008
1	2.015	6	122.023
2	4.021	7	124.029
3	8.003	8	128.011
4	16.000	9	136.008

実験方法

まず、すべての画像について、標準偏差 1.5(pixel) のガウス関数のラプラスシアンを積和的に作用させた画像のゼロ交差点を求めることにより、それぞれの特徴画像を作成した [43]。なおノイズ除去のために勾配の大きさがある程度大きいゼロ交差点を特徴点として選択し、さらに、各特徴点の位置決めはサブピクセル法 [44] を用いて行なった。その結果、位置決め誤差の最大値は $\delta = 0.1(\text{pixel})$ と推定された (ただしエピポーラ線方向の勾配を有する点を除く)。

こうして得られた特徴画像系列を入力画像として、本アルゴリズムを適用した。ここで、式 (3.6) の定数 $\gamma = 0.2$ に、また、式 (3.19) の閾値 $T = 0.8(80\%)$ に設定した。

なお、すべてのアルゴリズムは C 言語を用いてインプリメントされている。

3.5.2 結果と考察

人工シーン

隠れ輪郭の検出結果を Fig.3.9 に示す。Fig.3.9 は、Fig.3.5(b) の画像において検出された隠れ輪郭点を太い実線で、通常のエッジ点を細い実線でそれぞれ表し、Fig.3.5(b) の画像にオーバーラップさせたものである。また、図中の矢印の向きは物体表面が存在する側を表している³。さらに、Fig.3.5(b)

³これは、隠れ輪郭モダル (式 (3.1) の複号) より容易に推定される。複号が + と特定された場合は、物体表面は画像中では隠れ輪郭の向かって右側に存在し、複号が - の場合は、向かって左側に存在する [58]。Fig.3.4 を参照。

に示した A, B, C, D, E の5点に関する曲率半径の真値 r_C 、同推定値 \tilde{r}_C 、 \tilde{r}_C の誤差の標準偏差 σ_{r_C} 、ならびに確率の下限值 P_{inf} の算出結果を **Table 3.3** に示す。

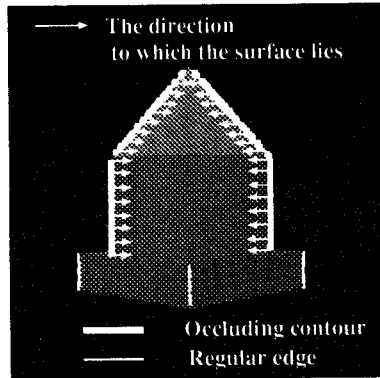


Fig.3.9 Experimental results (synthetic scene)

Table 3.3 Estimated radii of curvature (synthetic scene)

Point	r_C (mm)	\tilde{r}_C (mm)	σ_{r_C}	P_{inf} (%)
A	0.00	0.64	4.69	0.0
B	1.61	2.37	4.49	0.0
C	9.15	12.86	5.17	83.8
D	22.71	20.92	5.08	94.1
E	30.00	28.74	4.50	97.6

Fig.3.9より、円柱部の隠れ輪郭はすべて正確に検出されていることがわかる。また、円柱のすべての隠れ輪郭点において曲率半径の良好な推定値が得られた (**Table 3.3**の E 点を参照)。一方で、円錐の側面は、頂点に近い部分ほど (**Table 3.3**の D 点よりも C, B 点ほど) 隠れ輪郭と認識されにくくなっていることがわかる。これは、円錐面の曲率半径がその頂点に近いほど小さくなり (頂点ではゼロ)、隠れ輪郭である確率の下限值 P_{inf} がより小さくなることに起因する (**Table 3.3**参照)。このような曲率半径の小さい輪郭線を

隠れ輪郭として検出するためには、1) 対象物体に近付く、2) 焦点距離の長いレンズを使用するなどによって、曲率半径の推定値の不確かさをさらに低減させる (σ_{r_C} を小さくする) 必要がある (付録 E の Fig.E.1 を参照)。

次に、カメラ 0 から見た点 A~E の z 座標 (Fig.3.1 参照) の真値 z 、本手法による同推定値 \tilde{z} 、通常のステレオ法による同推定値 \tilde{z}^* を Table 3.4 に示す (\tilde{z}^* は \hat{X} を視線の方程式に最小 2 乗フィッティングさせて得られた結果である)。Table 3.4 より、隠れ輪郭モデルを導入することによって、隠れ輪郭点 B~E の奥行きが、通常の三角測量の原理による計測法に比べてはるかに高精度に推定できることがわかる (\tilde{z}^* の相対誤差: 最大で 14.7% に対して、 \tilde{z} の相対誤差: 1.2% 以下)。一方、通常のエッジ点である A 点では、隠れ輪郭モデルを用いない方が精度が良い。したがって、通常のエッジ点の奥行き推定精度も同時に向上させるためには、“通常のエッジ点” と判定された点については、 (x_C, z_C) に関して (つまり $r_C = 0$ として) 再度最小 2 乗近似を行う必要がある。

Table 3.4 Estimated depth (synthetic scene)

Point	$z(\text{mm})$	$\tilde{z}(\text{mm})$	$\tilde{z}^*(\text{mm})$
A	250.00	260.12	249.99
B	254.22	254.52	249.96
C	262.35	260.55	247.55
D	231.05	228.27	245.62
E	288.07	287.61	245.74

Fig.3.10 は、復元された隠れ輪郭近傍の 3 次元形状⁴ を別の視点から仮想的に観測したものである。円錐面および円柱面の局所形状がうまく復元されている様子がわかる。本手法を用いると、このような曲面の局所 3 次元形状が (特別な補間処理を経ることなく) 直接的に得られる点に留意されたい。

なお、隠れ輪郭の検出に要した時間は、全特徴点数 1224 点 (画像系列 10 枚の平均値) に対して約 17.7 秒であった (ただし特徴画像の作成時間は除く)。

⁴これは、隠れ輪郭と判定された X に対して、その接触円と X の各視線の交点 (Fig.3.2 の $P_0, P_{10}, P_{20}, \dots$ に相当する) の 3 次元位置を計算することにより得られる。

また、隠れ輪郭の検出率は95.3(%)、正答率は100.0(%)であった⁵。

以上、人工シーンを用いた実験より、提案する手法を用いれば、画像中のほとんどすべての隠れ輪郭点を高い信頼度で高速に検出でき、さらに、従来のステレオ法では精度良く推定できないと考えられていた隠れ輪郭の3次元位置（奥行き）も通常のエッジ点と同様に高精度に推定できることが立証された。

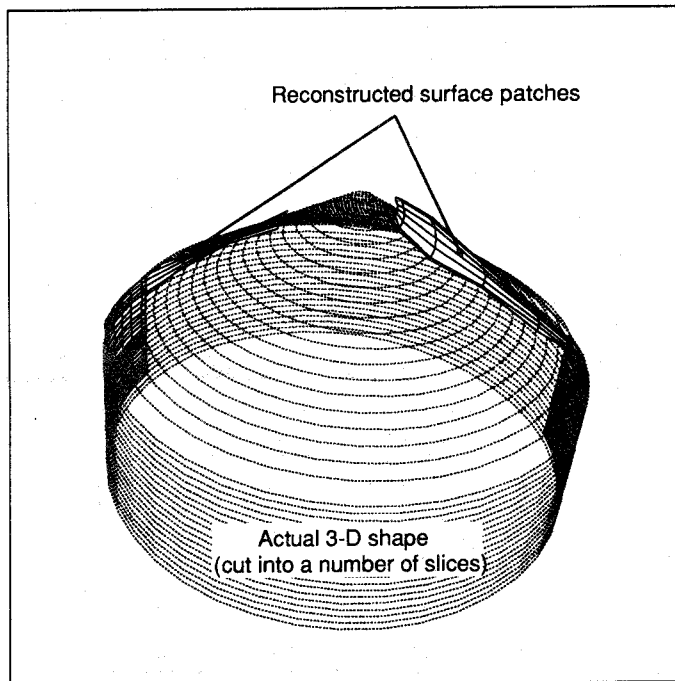


Fig.3.10 Reconstructed surface in the vicinity of contour generators (synthetic scene)

⁵それぞれ次式で定義される値である。

$$\begin{aligned} \text{検出率 (\%)} &= \frac{\text{正しく検出された隠れ輪郭点の数}}{\text{実際の隠れ輪郭点の数}} \times 100 \\ \text{正答率 (\%)} &= \frac{\text{正しく検出された隠れ輪郭点の数}}{\text{検出された隠れ輪郭点の数}} \times 100 \end{aligned}$$

なお実シーンでは、検出結果の正誤判定と実際の隠れ輪郭点数の計数は、人間の手作業により行なった。

実シーン

隠れ輪郭の検出結果を **Fig.3.11(a)** に、オクルージョンの検出結果を同図 (b) に示す。 **Fig.3.11(a)** は、 **Fig.3.9**と同様の結果を実シーン **Fig.3.7(a)** について示したものである。また、 **Fig.3.11(b)** は、 **Fig.3.7(a)** の画像において検出されたオクルージョン点を太い実線で表し、 **Fig.3.7(a)** の画像にオーバーラップさせたものである。さらに、 **Fig.3.7(a)** に示した F, G, H の3点に関する曲率半径の実測値 r_C 、同推定値 \tilde{r}_C 、 \tilde{r}_C の誤差の標準偏差 σ_{r_C} 、ならびに確率の下限值 P_{inf} の算出結果を **Table 3.5** に示す。ここで、曲率半径の実測値 r_C は、もともと対象物体が完全な直円柱でないため、必ずしも真値ではないことに留意されたい (**Table 3.5** の r_C は測定精度 0.05(mm) のノギスを用いて数回測定したものの平均値である)。

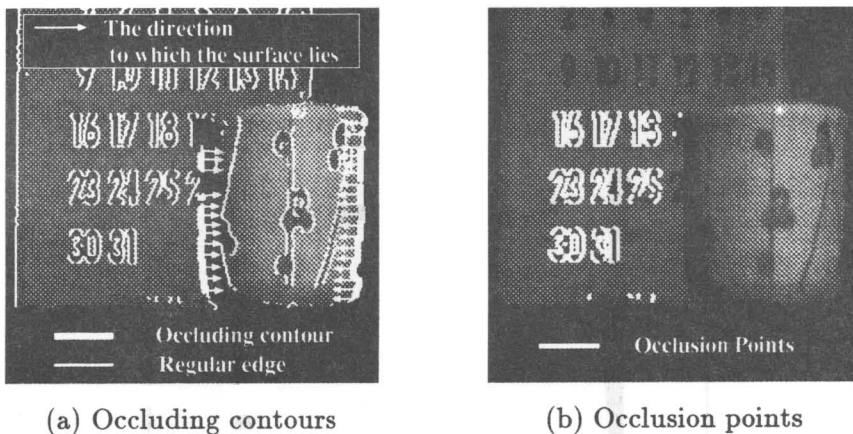


Fig.3.11 Experimental results (real scene)

Fig.3.11(a) より、対象物体のほとんどの側面輪郭線が隠れ輪郭として正確に検出されており、本論文で提案する手法が、実シーンに対しても有効に動作することがわかる。また、 **Fig.3.11(b)** より、実験シーンに存在するほとんどすべてのオクルージョン点も正しく検出されていることがわかる。さらに、 **Table 3.5** より、隠れ輪郭点と判定された点 (F, G) では、その曲率半径も相当精度 (およそ数ミリメートルの精度) で推定可能であることがわかる。一方で、対象物体 (カップ) の左側上部の側面輪郭線が隠れ輪郭として認識されていない。これは、この側面境界付近には表面と輝度が類似した模様

Table 3.5 Estimated radii of curvature (real scene)

Point	r_C (mm)	\bar{r}_C (mm)	σ_{r_C}	P_{inf} (%)
F	39.04	38.53	15.69	83.4
G	39.04	33.86	12.73	85.9
H	0.00	5.01	13.76	0.0

(カレンダーの文字)が存在しているために、特徴画像を作成する処理(3.5.1節)において、カレンダーの文字の輪郭線の方が、あたかも側面輪郭線のように抽出されてしまったためであると考えられる(Fig.3.7参照)。

Fig.3.10と同様にして、隠れ輪郭(カップの側面輪郭)近傍の3次元形状を復元した結果がFig.3.12に示されている。

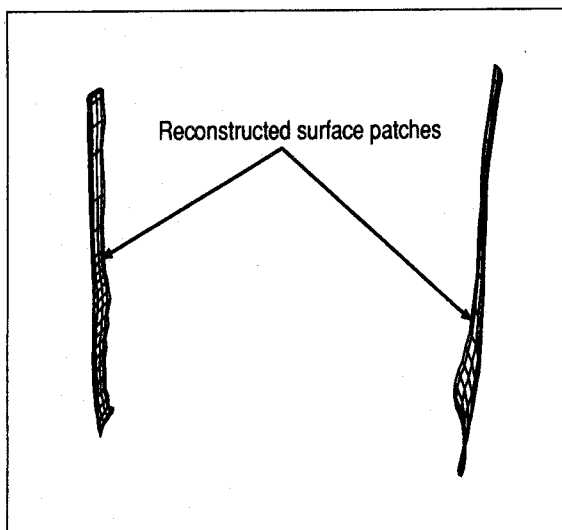


Fig.3.12 Reconstructed surface in the vicinity of contour generators (real scene)

Fig.3.13は、ステレオカメラの移動に伴う対応探索範囲の大きさおよび対応候補の数 n_t の変化を Fig.3.7(a) の I, J 点に関して示したものである。Fig.3.13において、横軸は初期位置 ($t=0$) からのカメラの移動距離を示し

ており、縦軸は式 (3.11) で与えられる対応探索範囲の大きさを示している。また図中、□印は I 点、●印は J 点の対応探索範囲の大きさの変化をそれぞれ示しており、各□、●印の横の数字は探索範囲内に存在する対応候補点の数 n_t (t :移動回数) の推移を表している。Fig.3.13より、カメラの移動にしたがって、対応点の存在範囲が徐々に狭くなり、これに伴い対応候補が次第に絞られていくことがわかる。その結果、4回 (16.000(mm);Table 3.2参照) の移動によって、 I 点では対応が一意に決定され ($n_t|_{t=4} = 1$)、 J 点はオクルージョン点 ($n_t|_{t=4} = 0$) と判定された (Fig.3.7, Fig.3.11(b) 参照)。なお、 I 点の方が J 点より対応探索範囲がやや広がっているが、これは、 I 点の方が J 点よりもカメラにより近いために、物体表面の曲率に依存するずれ ϵ^j をより大きめに考慮しなければならないことに起因する (式 (3.5), (3.7) 参照)。

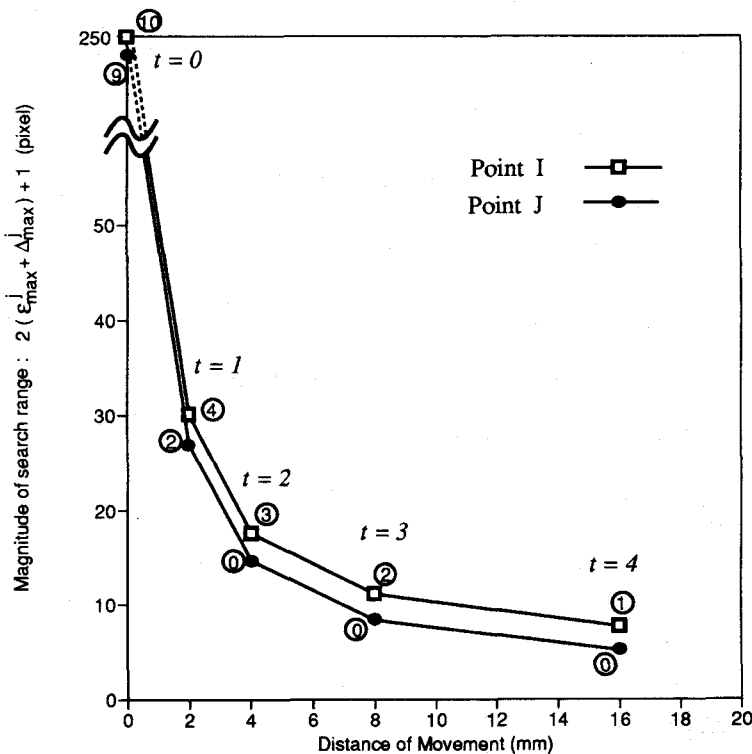


Fig.3.13 The variation of magnitude of search range according to camera motion

本実験において、隠れ輪郭の検出に要した時間は、全特徴点数 4624 点（画像系列 10 枚の平均値）に対して約 23.7 秒で、隠れ輪郭の検出率および正答率はそれぞれ 89.2(%)、98.7(%) であった。

以上、実シーンを用いた実験により、本手法を用いれば、従来隠れ輪郭の誤認識が発生しやすい [32] とされていた複雑なシーン（背景に模様がありオクルージョンが生じているシーン）に対しても、ほとんどすべての隠れ輪郭をロバストに検出できることが立証された。

3.6 結言

本章では、ステレオカメラをアクティブに移動させたときの隠れ輪郭の見え方の変化をモデル化した隠れ輪郭モデルを用いて、曲面の隠れ輪郭を高い信頼度で検出する一方法を提案した。隠れ輪郭モデルは、通常が多面体の稜線エッジだけでなく、曲面物体の輪郭線の見え方も同時に表すことができる物体表面とその像の関係を表す幾何モデルであり、従来の視線の方程式をより一般化（拡張）したものである。提案した手法の有効性を人工画像ならびに実画像を用いた実験により示した。

提案した手法の最大の欠点は、通常の平行ステレオの欠点 [43] と同様、カメラ配置の関係上、エピポーラ線方向（走査線方向）に近い勾配を有する隠れ輪郭の検出が困難である点である。しかしこの問題は、カメラを上下（あるいは前後）方向にも移動させることによって容易に解決することができると考えている。

本章で提案した方法は、曲面の隠れ輪郭を各画像中より正確に検出できるだけでなく、推定された物体表面の奥行きと曲率から、隠れ輪郭線近傍の局所 3 次元形状を同時に復元することができるという利点もある。したがって、提案する手法の応用として

- ① 物体のモデル（一般化円錐 [59] など）との照合による対象物体の認識や位置・姿勢の高速推定 [22].
- ② 多くの視点から獲得される局所形状の融合による対象物体形状の完全な復元 [60][52][53].
- ③ 対象物体（障害物）を安全かつ滑らかに回避する経路計画への利用 [61].

などが挙げられる。

第 4 章 結論

本研究では、ステレオカメラをアクティブに運動させることにより環境の面情報を獲得する 2 種類の方法を提案した。これらは、従来、ステレオ視をロボットの 3 次元視覚として利用するのに大きな障害となっていたステレオ視の原理的な 2 つの問題点：

- 模様のない様な物体表面の 3 次元情報が得られない。
- 曲面物体の隠れ輪郭線の正しい 3 次元情報が得られない。

を個々に解決する一方法をそれぞれ示したものである。

以下に、本研究の主要な結果を示す。

- 前者の問題を解決するためには、ステレオ対応によって得られたエッジ特徴点の 3 次元情報をもとに、これら特徴点間の 3 次元情報を補間する方法、すなわち、エッジ特徴点間の面情報を獲得する方法を確立する必要がある。本研究では、ステレオカメラをアクティブに運動させることにより得られるエッジ特徴点の隠れ情報を用いて各特徴点間の面情報を獲得することにより、環境の面構造を復元する一方法を提案した。提案した手法を用いれば、偽の面が発生することなく、有効な面構造だけが正しく復元できることを実シーンを用いた実験により立証した。
- 従来の研究ではほとんど議論されていなかった面情報を効率良く獲得するためのカメラの移動戦略や視点の選択法に対する一つの解答を与えた。具体的には、予め複数の視点位置を用意したり、やみくもに大量の観測を行うのではなく、現在までの観測によって獲得された不完全な面構造に基づいて、新たな面情報が最も多く獲得できる可能性のある視点位置を逐次予測し、その視点位置へカメラをアクティブに移動させることによって現在の面構造を効率良くリファインできる一戦略を導入した。本戦略の有効性を実シーンを用いた実験により確認した。具体的には、少ない観測回数で有効な面構造が復元可能であることを示した。

- 後者の問題を解決するためには、まず、ステレオ画像中に観測される特徴点を「通常のエッジ点」と「隠れ輪郭」に分類する方法、すなわち、画像中から曲面の隠れ輪郭を検出する方法を確立する必要がある。本研究では、ステレオカメラをアクティブに運動させたときの画像特徴点の見え方の変化を「隠れ輪郭モデル」に当てはめることによって、曲面の隠れ輪郭を高い信頼度で検出する一方法を提案した。本研究で導入した「隠れ輪郭モデル」は、通常多面体の稜線エッジだけでなく、曲面物体の隠れ輪郭線の見え方も同時に表すことができる物体表面とその像の関係を表す一般的な幾何モデルであり、従来の視線のモデルをより一般化（拡張）したものである。提案した手法を用いれば、画像中のほとんどすべての隠れ輪郭を高い信頼度で検出できることを人工シーンならびに実シーンを用いた実験により確認した。
- 後者の問題を解決するためには、さらに、検出された「隠れ輪郭」に対応する曲面の3次元情報も獲得できる方法、すなわち、隠れ輪郭線近傍の面情報を獲得する方法を開発する必要がある。本論文で提案した手法を用いれば、従来のステレオ法では精度良く推定できないと考えられていた各隠れ輪郭に対応する物体表面の3次元情報（奥行き、曲率）が、通常のエッジ点の推定精度と同等精度で推定できることが人工シーンをを用いた実験により立証された。これは、本手法を用いると、画像中の隠れ輪郭が検出できるのみならず、隠れ輪郭線近傍の局所3次元形状も同時に復元可能であることを意味している。

本研究で提案した2種類の方法は、ステレオ視における上述の2つの問題を個々に解決するための方法であり、両者の問題が同時に起こる場合を明示的に考慮したものではない。しかし、提案した2つの方法を統合化することは可能である。基本的には、ステレオカメラをアクティブに運動させたときの画像特徴点の見え方の変化を隠れ輪郭モデルに当てはめてステレオ対応付けを行うことにより、画像中の特徴点を「通常のエッジ点」と「隠れ輪郭」に分類し、それぞれの3次元位置を別々の方法で特定化した後、一連の“面構造復元アルゴリズム”を適用すればよい。ただし、「復元すべき面の候補の表現方法」、「曲面の復元を効率良く行うための（隠れ輪郭の見え方を考慮した）視点選択法」など新たに解決・考慮すべきいくつかの問題が生じる。これらに関しては、本研究の重要な応用課題である「環境のモデリング・地図作成問題」[45]への適用を含めて今後の研究課題としたい。

付 録

A 視点ヒストグラム要素 h_{ij}, h_{mn} が Fig.2.11 のようになる理由

Fig.2.11の $h_{ij}(v), h_{mn}(v)$ は、現在の視点 v_P において、アルゴリズム 2.2, アルゴリズム 2.3 を適用しても状態が決定されなかった2つのアーク e_{ij} および e_{mn} に関して計算された視点ヒストグラム要素をそれぞれ表したものである。以下に同図のようになる理由を示す。

- ① Fig.2.11の例において、視点ヒストグラム要素 $h_{ij}(v)$ が同図のようになる理由：

図中の全特徴点のうち、アーク e_{ij} に関して考慮すべき特徴点は、その両端点を除く x_m, x_k, x_n の3点である。ここで、 x_m に対して生成される視線は、図から明らかなように、全視点区間 $[v_l, v_u]$ において、決してアーク e_{ij} と交差することはない、すなわち、全区間 $[v_l, v_u]$ で条件 (P6) を満たさない。また、 x_k に関して生成される視線は、区間 $[v_A, v_B]$ においてのみ条件 (P6) を満足するが、その一方で、これらは常に視線 $v_P x_k$ の交差パターンと一致するために、条件 (P7) を満足することはない。一方、 x_n に関して生成される視線は、区間 $[v_l, v_C]$ においてのみ両条件 (P6), (P7) を満足する。以上をまとめると、 e_{ij} に関しては、視点区間 $[v_l, v_C]$ においてのみ、条件 (P6), (P7) を同時に満足する視線が生成可能である。ゆえに、ヒストグラム要素 $h_{ij}(v)$ は Fig.2.11 に示すとおりとなる。 □

- ② Fig.2.11の例において、視点ヒストグラム要素 $h_{mn}(v)$ が同図のようになる理由：

図中の全特徴点のうち、アーク e_{mn} に関して考慮すべき特徴点は、その両端点を除く x_i, x_j, x_k の3点である。ここで、 x_i, x_j に対して生成される視線は、図から明らかなように、全視点区間 $[v_l, v_u]$ において、決してアーク e_{mn} と交差することはない、すなわち、全区間 $[v_l, v_u]$ で条件 (P6)

を満たさない。一方、 x_k に関して生成される視線は、全区間 $[v_l, v_u]$ で条件 (P6) を満足するが、①と同様の理由によって、区間 $[v_A, v_B]$ では条件 (P7) が満たされない。よって、 e_{mn} に関しては、視点区間 $[v_l, v_A)$ ならびに $(v_B, v_u]$ においてのみ、条件 (P6), (P7) を同時に満足する視線が生成可能である。ゆえに、ヒストグラム要素 $h_{mn}(v)$ は Fig.2.11 に示すとおりとなる。□

B 式 (3.4) の導出

(i) 式 (3.1) の複号が+のとき

$$l_t = \sqrt{f^2 + X_t^2} \quad (\text{B.1})$$

$$X_j - X'_j < 0 \quad (\text{B.2})$$

なる関係が成立する (Fig. 3.4(a) を参照).

3.3.2 節で示した仮定 3.1 より $\forall t; f^2 \gg X_t^2$ が成り立つ。よって、 l_t は次のように近似できる。

$$l_t = \sqrt{f^2 + X_t^2} = f \sqrt{1 + \frac{X_t^2}{f^2}} \approx f + \frac{X_t^2}{2f}$$

上式を式 (3.2) に代入して整理すれば次式を得る。

$$X_j = X'_j + r_C \frac{T_t \pm \sqrt{T_t^2 + S_t}}{r_C^2 - z_C^2} \quad (\text{B.3})$$

ここに、

$$\begin{aligned} T_t &= -(f + k_t)z_C - X'_j r_C \\ S_t &= (X_j'^2 - 2fk_t - k_t^2)(z_C^2 - r_C^2) \\ k_t &= \frac{1}{2f} \left\{ X_0^2 - \frac{b_j}{b_t} (X_0^2 - X_t^2) \right\} \end{aligned}$$

ここで、仮定 3.1, 仮定 3.2 より、

$$T_t = -(f + k_t) \left\{ z_C + \frac{X'_j}{f + k_t} r_C \right\} < 0 \quad (\text{B.4})$$

$$\begin{aligned} S_t &= \{f^2 - (f + k_t)^2 + X_j'^2\} (z_C^2 - r_C^2) \\ &\approx (X_j'^2 - 2fk_t)(z_C^2 - r_C^2) \\ &= \frac{b_j}{b_t} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) D_t^2 (z_C^2 - r_C^2) > 0 \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

よって、

$$\begin{aligned} 0 < S_t &\approx \frac{b_j}{b_t} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) D_t^2 (z_C^2 - r_C^2) \\ &< \left(\frac{b_j}{b_t} D_t \right)^2 z_C^2 \ll f^2 z_C^2 \approx T_t^2 \end{aligned}$$

が成立するので、次の関係を得る.

$$\sqrt{T_t^2 + S_t} \approx \sqrt{T_t^2} + S_t \frac{1}{2\sqrt{T_t^2}} = -T_t - \frac{S_t}{2T_t} \quad (\text{B.6})$$

ここで式 (B.2) が成り立つためには、式 (B.3) より

$$X_j - X'_j = r_C \frac{T_t \pm \sqrt{T_t^2 + S_t}}{r_C^2 - z_C^2} < 0$$

すなわち、 $T_t \pm \sqrt{T_t^2 + S_t} > 0$

が成立しなければならない.

ところが式 (B.4), (B.5), (B.6) より,

$$T_t + \sqrt{T_t^2 + S_t} = -\frac{S_t}{2T_t} > 0 \quad (\text{B.7})$$

$$T_t - \sqrt{T_t^2 + S_t} = 2T_t + \frac{S_t}{2T_t} < 0 \quad (\text{B.8})$$

となり、 $T_t - \sqrt{T_t^2 + S_t}$ は不適.

ゆえに、式 (B.3) は

$$\begin{aligned} X_j &= X'_j + r_C \frac{T_t + \sqrt{T_t^2 + S_t}}{r_C^2 - z_C^2} \\ &= X'_j - r_C \frac{\frac{b_j}{b_t} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) D_t^2}{2\{(f + k_t)z_C + X'_j r_C\}} \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

となる.

(ii) 式 (3.1) の複号が-のとき

$$l_t = -\sqrt{f^2 + X_t^2} \quad (\text{B.10})$$

$$X_j - X'_j > 0 \quad (\text{B.11})$$

なる関係が成立する (Fig.3.4(b) を参照).

(i)と同様に $l_t \approx -f - \frac{X^2}{2f}$ のように近似し、これを式(3.2)に適用して全く同様の議論を展開すれば、次の関係を得る.

$$X_j = X'_j + r_C \frac{\frac{b_j}{b_i} \left(\frac{b_j}{b_i} - 1 \right) D_t^2}{2\{(f + k_i)z_C - X'_j r_C\}} \quad (\text{B.12})$$

式(B.9),(B.12)をまとめると式(3.4)を得る. □

C 式(3.10)の導出

ここでは、 $X_k (k = 0, t, j)$ の測定値を \hat{X}_k で表し、 \hat{X}_0 と \hat{X}_t を用いて計算される値には \sim を付すものとする。

いま、 $X_0, X_t (t > 0), X_j (j > t)$ に関する次の様な関数 $F(X_0, X_t, X_j)$ を考える。

$$F(X_0, X_t, X_j) = \bar{X}_j(X_0, X_t) - X_j \quad (C.1)$$

$$\text{ここに, } \bar{X}_j = X_j' + r' \frac{\frac{b_j}{b_t} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) D_t^2}{2\{(f + k_t)z_C - X_j'r'\}} \quad (C.2)$$

$$r' = \pm r_C \quad (r_C \geq 0) \quad (C.3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Delta F &= |F(X_0, X_t, X_j) - F(\hat{X}_0, \hat{X}_t, \hat{X}_j)| \\ &= |\bar{X}_j - \hat{X}_j| \end{aligned} \quad (C.4)$$

なる値を考えると (式(3.9)の左辺に相当)、誤差の伝播法則 [62] により、 ΔF は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta F &= \left| \frac{\partial F}{\partial X_0}(\hat{X}_0, \hat{X}_t, \hat{X}_j) \right| \Delta X_0 + \left| \frac{\partial F}{\partial X_t}(\hat{X}_0, \hat{X}_t, \hat{X}_j) \right| \Delta X_t \\ &+ \left| \frac{\partial F}{\partial X_j}(\hat{X}_0, \hat{X}_t, \hat{X}_j) \right| \Delta X_j \end{aligned} \quad (C.5)$$

$$\text{ここに, } \Delta X_k = |X_k - \hat{X}_k| \quad (C.6)$$

上式の各偏微分係数は、計算の結果、式(C.7)~(C.9)で与えられる。

$$\frac{\partial F}{\partial X_0} \approx \left(1 - \frac{b_j}{b_t}\right) \left[1 - \frac{r' b_j}{2 b_t (f + k_t) z_C - X_j' r'} \frac{3D_t}{2}\right] \quad (C.7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial X_t} \approx \frac{b_j}{b_t} \left[1 - \frac{r'}{2} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1\right) \frac{3D_t}{(f + k_t) z_C - X_j' r'}\right] \quad (C.8)$$

$$\frac{\partial F}{\partial X_j} = -1 \quad (C.9)$$

ここで、

$$\left| \frac{r' b_j}{2 b_t (f + k_t) z_C - X_j' r'} \frac{3D_t}{2} \right| = \frac{|r'| b_j}{2 b_t (f + k_t) z_C - X_j' r'} \frac{3D_t}{2}$$

$$\approx \frac{3 r_C}{2 z_C} b_j \frac{D_t}{f b_t} \leq \frac{3}{2} \gamma \frac{b_j}{z_{min}} < 1$$

同様に,

$$\left| \frac{r'}{2} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) \frac{3 D_t}{(f + k_t) z_C - \tilde{X}'_j r'} \right| < 1$$

が成り立つので、式 (C.7), (C.8) の [] 内は常に正である。

ゆえに各像の位置決め誤差の最大値を δ と置けば、式 (C.5) ~ (C.9) より、

$$\begin{aligned} \Delta F &\leq \left[\left| \frac{\partial F}{\partial X_0}(\hat{X}_0, \hat{X}_t, \hat{X}_j) \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial X_t}(\hat{X}_0, \hat{X}_t, \hat{X}_j) \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial X_j}(\hat{X}_0, \hat{X}_t, \hat{X}_j) \right| \right] \delta \\ &= \left[\left| 1 - \frac{b_j}{b_t} \right| \left\{ 1 - \frac{r' b_j}{2 b_t} \frac{3 \tilde{D}_t}{(f + \tilde{k}_t) \tilde{z}_C - \tilde{X}'_j r'} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \left| \frac{b_j}{b_t} \right| \left\{ 1 - \frac{r'}{2} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) \frac{3 \tilde{D}_t}{(f + \tilde{k}_t) \tilde{z}_C - \tilde{X}'_j r'} \right\} + 1 \right] \delta \\ &= \left[\left(\left| 1 - \frac{b_j}{b_t} \right| + \left| \frac{b_j}{b_t} \right| + 1 \right) \right. \\ &\quad \left. - \left\{ \left| 1 - \frac{b_j}{b_t} \right| \frac{b_j}{b_t} + \left| \frac{b_j}{b_t} \right| \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) \right\} \frac{r'}{2} \frac{3 \tilde{D}_t}{(f + \tilde{k}_t) \tilde{z}_C - \tilde{X}'_j r'} \right] \delta \\ &\leq \left[2 \left(\frac{b_j}{b_t} + 1 \right) + \frac{r_C}{2} \frac{b_j}{b_t} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) \frac{6 \tilde{D}_t}{(f + \tilde{k}_t) \tilde{z}_C - |\tilde{X}'_j| r_C} \right] \delta \\ &\leq \left[2 \left(\frac{b_j}{b_t} + 1 \right) + \frac{b_j}{b_t} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) \frac{6 \tilde{D}_t \gamma}{2 \{ (f + \tilde{k}_t) - |\tilde{X}'_j| \gamma \}} \right] \delta \\ &= 2 \left(\frac{b_j}{b_t} + 1 + 3 \frac{\tilde{\epsilon}_{max}^j}{\tilde{D}_t} \right) \delta \tag{C.10} \end{aligned}$$

$$\text{ここに, } \tilde{\epsilon}_{max}^j = \frac{\frac{b_j}{b_t} \left(\frac{b_j}{b_t} - 1 \right) \tilde{D}_t^2 \gamma}{2 \{ (f + \tilde{k}_t) - |\tilde{X}'_j| \gamma \}} \tag{C.11}$$

ゆえに、 Δ_{max} は、次のような値に設定することができる。

$$\Delta_{max} = 2 \left(\frac{b_j}{b_t} + 1 + 3 \frac{\tilde{\epsilon}_{max}^j}{\tilde{D}_t} \right) \delta \quad \square$$

D 移動距離 $b_t(t = 2, 3, \dots)$ の満たすべき条件

$b_t(t \geq 2)$ が満たすべき条件は,

$$F = 2(\varepsilon_{max}^t + \Delta_{max}^t) + 1 - n \leq 0 \quad (D.1)$$

である。ここに, 式(3.16),(3.17)より,

$$\begin{aligned} F &= \frac{\frac{b_t}{b_{t-1}} \left(\frac{b_t}{b_{t-1}} - 1 \right) \gamma D_{t-1} (D_{t-1} + 6\delta)}{(f + k_{t-1}) - |X'_t| \gamma} \\ &\quad + 4\delta \frac{b_t}{b_{t-1}} + (4\delta + 1 - n) \end{aligned} \quad (D.2)$$

である。

仮定 3.1 より, 任意の k に対して $\frac{\hat{X}^2}{f^2} \leq \rho \ll 1$ となる正数 $\rho (> 0)$ が存在するので,

$$\begin{aligned} &(f + k_{t-1}) - |X'_t| \gamma \\ &= f + \frac{1}{2f} \left\{ \left(1 - \frac{b_t}{b_{t-1}} \right) \hat{X}_0^2 + \frac{b_t}{b_{t-1}} \hat{X}_{t-1}^2 \right\} - |X'_t| \gamma \\ &\geq f \left[1 + \frac{\rho}{2} \left(1 - \frac{b_t}{b_{t-1}} \right) - \sqrt{\rho} \gamma \right] \\ &\approx f \left[1 + \frac{\rho}{2} \left(1 - \frac{b_t}{b_{t-1}} \right) \right] > 0 \end{aligned} \quad (D.3)$$

よって式(D.2),(D.3)より,

$$\begin{aligned} F \leq F' &= \frac{\frac{\gamma}{z_{min}} \left(\frac{fb_{t-1}}{z_{min}} + 6\delta \right)}{1 + \frac{\rho}{2} \left(1 - \frac{b_t}{b_{t-1}} \right)} \left(\frac{b_t}{b_{t-1}} - 1 \right) b_t \\ &\quad + 4\delta \frac{b_t}{b_{t-1}} + (4\delta + 1 - n) \end{aligned} \quad (D.4)$$

が成立する。ゆえに, $F' \leq 0$ となるように b_t を決めれば, 条件式(D.1)は任意の点で満たされる。これを b_t について整理すれば, 次の b_t に関する高々2次の不等式を得る。

$$Ab_t^2 + Bb_t + C \leq 0 \quad (D.5)$$

ここに,

$$A = \frac{\gamma}{z_{min} b_{t-1}} \left(\frac{fb_{t-1}}{z_{min}} + 6\delta \right) - \frac{2\rho\delta}{b_{t-1}^2}$$

$$B = \frac{1}{b_{t-1}} \left[4\delta + \frac{\rho}{2}(n-1) \right] - \frac{\gamma}{z_{min}} \left(\frac{fb_{t-1}}{z_{min}} + 6\delta \right)$$
$$C = \left(1 + \frac{2}{\rho} \right) (4\delta + 1 - n)$$

ただし式 (D.3) より,

$$b_{t-1} < b_t < \left(1 + \frac{2}{\rho} \right) b_t \quad (\text{D.6})$$

である。すなわち、式 (D.5), (D.6) を満たすように b_t を決めれば良い。

E 曲率半径の推定値の不確かさ σ_{r_C} の低減

σ_{r_C} は式(3.18)により与えられる。いまFig.3.5に示したシーンについて、レンズの焦点距離 f およびカメラから物体までの距離 z を変化させたときの同図(b)のC点に対する σ_{r_C} を式(3.18)により算出した結果をFig.E.1に示す。ここで、他のパラメータ($b_i; i=0, \dots, 9, \gamma, \delta$ など)は、3.5.1節に示した値と全く同一のものを使用している。Fig.E.1より、 f が大きく z が小さいほど、 σ_{r_C} が小さくなることがわかる。

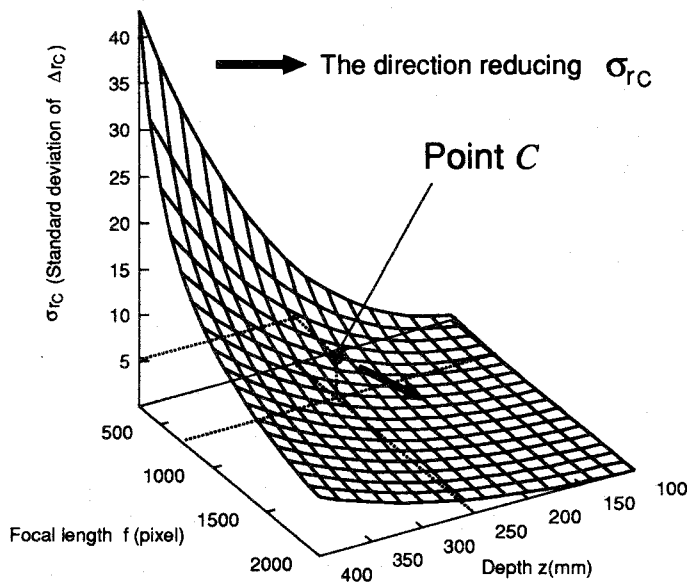


Fig.E.1 The variation of σ_{r_C} to the variation of f and z

謝 辞

本研究に際して終始一貫御指導，貴重な御助言ならびに暖かい励ましの御言葉を頂きました宮崎文夫教授，丸典明助手に心から深く御礼申し上げます。そして，論文作成にあたりましては，吉川孝雄教授ならびに谷内田正彦教授から多くの御意見を賜りました。厚く御礼申し上げます。

さらに，実際の実験では，田中麻紀さん（本学大学院生），紺野博之氏（現：奈良先端大大学院生），小川晋平氏（本学部生）に御協力，御尽力頂きました。ここに絶大なる感謝の意を表します。

また，本研究に関して有益な御意見を賜りました升谷保博助手，実験等におきまして貴重な御助言を頂きました林清重技官にも深く感謝致します。

最後になりましたが，物心両面で激励して下さいました両親や弟達，研究室の先輩後輩の皆様，ならびに友人達に心から感謝の意を表します。

西川 敦

1995年1月

参考文献

- [1] 特集：“知能ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol. 9, No. 1, pp. 65-127 (1991).
- [2] 井口征士，佐藤宏介：三次元画像計測，昭晃堂 (1990).
- [3] Bertero, M., Poggio, T. and Torre, V.: “Ill-posed problems in early vision”, *Proc. of IEEE*, Vol. 76, No. 8, pp. 869-889 (1988).
- [4] 池内克史：“単眼視による 2 次元画像からの 3 次元情報の再構成”，情報処理，Vol. 24, No. 12, pp. 1421-1428 (1983).
- [5] Dhond, U. R. and Aggarwal, J. K.: “Structure from stereo – A review”, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 19, No. 6, pp. 1489-1510 (1989).
- [6] 江尻正員，大田友一，池内克史：マシンビジョン，昭晃堂 (1990).
- [7] 伊藤稔：“ロボットビジョンのモデリング”，日本ロボット学会誌，Vol. 7, No. 2, pp. 215-220 (1989).
- [8] 谷内田正彦：ロボットビジョン，昭晃堂 (1990).
- [9] Koenderink, J. J.: “What does the occluding contour tell us about solid shape ?”, *Perception*, Vol. 13, pp. 321-330 (1984).
- [10] Grimson, W. E. L.: *From Images to Surfaces*, MIT Press, Cambridge (1981).
- [11] Grimson, W. E. L.: “An implementation of a computational theory of visual surface interpolation”, *Comput. Vision Graph. Image Process.*, Vol. 22, pp. 39-69 (1983).
- [12] Terzopoulos, D.: “Multilevel computational processes for visual surface reconstruction”, *Comput. Vision Graph. Image Process.*, Vol. 24, pp. 52-96 (1983).

- [13] Terzopoulos, D.: "The computation of visible-surface representations", *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.*, Vol. 10, No. 4, pp. 417-438 (1988).
- [14] 横矢直和: "多重スケールでの正則化によるステレオ画像からの不連続を保存した曲面再構成", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1667-1675 (1993).
- [15] Herman, M., Kanade, T. and Kuroe, S.: "Incremental acquisition of a three-dimensional scene model from images", *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.*, Vol. 6, No. 3, pp. 331-340 (1984).
- [16] Herman, M. and Kanade, T.: "Incremental reconstruction of 3D scenes from multiple, complex images", *Artif. Intell.*, Vol. 30, pp. 289-341 (1986).
- [17] 正井康之, 大田友一, 池田克夫: "ステレオ視における線画の解釈", 情報処理学会論文誌, Vol. 28, No. 7, pp. 705-713 (1987).
- [18] 八木康史, 津戸明広, 谷内田正彦: "移動視により得られたワイヤフレームモデルからの空間構成の理解", 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 477-480 (1993).
- [19] Lim, H. S. and Binford, T. O.: "Curved surface reconstruction using stereo correspondence", In *Proc. of the DARPA Image Understanding Workshop*, pp. 809-819 (1988).
- [20] 植芝俊夫, 富田文明: "水平三眼ステレオによる遮蔽輪郭線からの曲面形状復元", 技報 CV-70-2, 情報処理学会研究報告 (1991).
- [21] Rao, K. and Nevatia, R.: "Computing volume descriptions from sparse 3-D data", *Int. J. Computer Vision*, Vol. 2, No. 1, pp. 33-50 (1987).
- [22] Chung, R. C. and Nevatia, R.: "Recovering LSHGCs and SHGCs from stereo", In *Proc. of the DARPA Image Understanding Workshop*, pp. 401-407 (1992).
- [23] Boissonnat, J. D., Faugeras, O. D. and Bras-Mehlman, E. L.: "Representing stereo data with the delaunay triangulation", In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1798-1803 (1988).

- [24] Faugeras, O. D., Bras-Mehlman, E. L. and Boissonnat, J. D.: "Representing stereo data with the delaunay triangulation", *Artif. Intell.*, Vol. 44, pp. 41-87 (1990).
- [25] Takizawa, H., Shirai, Y. and Miura, J.: "Selective refinement of 3-D scene description by attentive observation for mobile robot", In *Proc. IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1118-1125, München, Germany (1994).
- [26] 杉本和英, 富田文明: "ステレオ画像の境界表現に基づくシーンの解釈", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D-II, No. 3, pp. 524-533 (1993).
- [27] Echigo, T.: "Segmentation of a 3D scene into free areas and object surfaces by using occluded edges of trinocular stereo", In *Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 863-868, Osaka, Japan (1991).
- [28] 安野貴之, 鈴木智: "時空間画像の遮蔽解析を用いた面構造復元", 情報処理学会論文誌, Vol. 34, No. 10, pp. 2174-2183 (1993).
- [29] Malik, J.: "Interpreting line drawing of curved objects", *Int. J. Computer Vision*, Vol. 1, pp. 73-103 (1987).
- [30] Horaud, R. and Brady, M.: "On the geometric interpretation of image contours", *Artif. Intell.*, Vol. 37, pp. 333-353 (1988).
- [31] Chung, R. C. and Nevatia, R.: "Use of monocular groupings and occlusion analysis in a hierarchical stereo system", In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 50-56 (1991).
- [32] 穴吹哲士, 谷内田正彦: "三眼視による曲面境界線の分類と三次元情報の獲得", 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 1, pp. 39-44 (1991).
- [33] Geiger, D. and Yuille, A.: "Stereo and eye movement", *Biological Cybernetics*, Vol. 62, pp. 117-128 (1989).
- [34] Vaillant, R. and Faugeras, O. D.: "Using extremal boundaries for 3-D object modeling", *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.*, Vol. 14, No. 2, pp. 157-173 (1992).

- [35] Cipolla, R. and Blake, A.: "Surface shape from the deformation of apparent contours", *Int. J. Computer Vision*, Vol. 9, No. 2, pp. 83-112 (1992).
- [36] 西川敦: "ステレオビジョンによる環境の3次元情報の獲得", 修士論文, 大阪大学 (1992).
- [37] Maru, N.: *Study on passive and active stereo algorithms for 3-D robot vision*, Ph.D. dissertation, Osaka Univ. (1993).
- [38] 西川敦, 丸典明, 宮崎文夫, 有本卓: "微小運動視差に基づいた両眼視差の曖昧さの解消", 第35回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 341-342, 京都私学会館 (1991).
- [39] 丸典明, 西川敦, 宮崎文夫, 有本卓: "アクティブなカメラ運動による両眼視差候補の限定", 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 185-186, 筑波大学第3学群 (1991).
- [40] 西川敦, 丸典明, 宮崎文夫, 有本卓: "アクティブなカメラ運動による両眼視差の検出", 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 187-188, 筑波大学第3学群 (1991).
- [41] 西川敦, 丸典明, 宮崎文夫: "アクティブなステレオ視からの隠れ情報に基づく面構造の復元", 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 701-702, 九州大学工学部 (1994).
- [42] 田中麻紀, 丸典明, 宮崎文夫: "アクティブなステレオ視覚システムによる移動物体の3次元追跡", 日本機械学会第4回ロボットセンサシンポジウム講演論文集, pp. 139-144, つくば市 (1994).
- [43] Grimson, W. E. L.: "Computational experiments with a feature based stereo algorithm", *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.*, Vol. 7, No. 1, pp. 17-34 (1985).
- [44] 野村由司彦, 相良道弘, 成瀬央, 井手敦志: "エッジ位置計測のサブピクセル化と誤差解析", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J73-DII, No. 9, pp. 1458-1467 (1990).

- [45] Miura, J. and Shirai, Y.: "Modeling obstacles and free spaces for a mobile robot using stereo vision with uncertainty", In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 3368-3373 (1994).
- [46] Ayache, N. and Faugeras, O. D.: "Building, registering, and fusing noisy visual maps", *Int. J. Robotics Research*, Vol. 7, No. 6, pp. 45-65 (1988).
- [47] Marr, D.: *Vision*, W. H. Freeman and Company (1982).
- [48] Blake, A. and Cipolla, R.: "Robust estimation of surface curvature from deformation of apparent contours", In *Proc. 1st European Conf. Computer Vision*, pp. 465-474 (1990).
- [49] Barrow, H. G. and Tenenbaum, J. M.: "Interpreting line drawings as three-dimensional surfaces", *Artif. Intell.*, Vol. 17, pp. 75-116 (1981).
- [50] Brady, M., Ponce, J., Yuille, A. and Asada, H.: "Describing surfaces", In Hanafusa, H. and Inoue, H. eds., *Robotics Research: The Second Int. Symp.*, pp. 5-16, MIT Press (1985).
- [51] Basri, R. and Ullman, S.: "The alignment of objects with smooth surfaces", *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 57, No. 3, pp. 331-345 (1993).
- [52] Zheng, J. Y.: "Acquiring 3-D models from sequences of contours", *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.*, Vol. 16, No. 2, pp. 163-178 (1994).
- [53] 鄭絳宇, 岸野文郎: "連続シルエットを用いた3次元モデルの復元とその未知領域の検出", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D-II, No. 6, pp. 1114-1122 (1993).
- [54] 西川敦, 丸典明, 宮崎文夫, 有本卓: "アクティブなステレオビジョンによるオクルーディングエッジの検出", 第36回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 1-2, 京都私学会館 (1992).
- [55] Vaillant, R. and Faugeras, O. D.: "Trinocular stereovision using figural continuity, dealing with curved objects", In *Preprints of NASA Conf. Space Telerobotics*, Vol. 3, pp. 235-244 (1989).

- [56] 西川敦, 丸典明, 宮崎文夫: “ステレオビジョンによる曲面の隠れ境界認識の一方法”, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 205-208, 金沢大学工学部 (1992).
- [57] Derman, C., L.J.Gleser, and I.Olkin, : *A guide to probability theory and application*, Holt, Renahalt and Winston, Inc., 227 pp. (1973).
- [58] 西川敦, 丸典明, 宮崎文夫: “表面の3次元幾何学情報を利用したアクティブな両眼ステレオ視”, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 457-460, 電気通信大学 (1993).
- [59] Rao, K. and Medioni, G.: “Generalized cones: Useful geometric properties”, In Shapiro, L. and Rosenfeld, A. eds., *Computer Vision and Image Processing*, pp. 185-208, Academic Press, Inc. (1992).
- [60] Szeliski, R. and Weiss, R.: “Robust shape recovery from occluding contours using a linear smoother”, In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 666-667 (1993).
- [61] Blake, A., Brady, M., Cipolla, R., Xie, Z. and Zisserman, A.: “Visual navigation around curved obstacles”, In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2490-2495 (1991).
- [62] 戸川隼人: 計算機のための誤差解析の基礎, サイエンス社 (1974).

関連論文

1. 丸典明, 西川敦, 宮崎文夫, 有本卓: “アクティブなカメラ運動による両眼視差の検出”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 2, pp. 272–280 (1993).
2. 西川敦, 丸典明, 宮崎文夫: “アクティブなステレオビジョンによる曲面の隠れ輪郭の検出”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1654–1666 (1993).
3. 西川敦, 丸典明, 宮崎文夫: “アクティブなステレオ法を用いた3次元曲面物体の形状計測”, 画像ラボ, Vol. 5, No. 6, pp. 31–37 (1994).
4. 西川敦, 小川晋平, 丸典明, 宮崎文夫: “アクティブなステレオ視からの隠れ情報に基づく面構造の復元”, 電子情報通信学会論文誌投稿中 (1995).
5. Maru, N., Nishikawa, A., Miyazaki, F. and Arimoto, S.: “Active detection of binocular disparities”, In *Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 263–268, Osaka, Japan (1991).
6. Maru, N., Nishikawa, A., Miyazaki, F. and Arimoto, S.: “Active binocular stereo”, In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 724–725, New York, U.S.A. (1993).
7. Nishikawa, A., Maru, N. and Miyazaki, F.: “Detection of occluding contours and occlusion by active binocular stereo”, In Yoshikawa, T. and Miyazaki, F. eds., *Experimental Robotics III*, Lecture Notes in Control and Information Sciences 200, pp. 255–266, Springer-Verlag (1994).
8. Nishikawa, A., Ogawa, S., Maru, N. and Miyazaki, F.: “Detecting object surfaces by using occlusion information from active binocular stereo”, to be submitted to *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan (1995).