

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	移動ロボット用地図生成視覚システムの研究
Title(English)	
著者(和文)	吉田和弘
Author(English)	KAZUHIRO YOSHIDA
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第2033号, 授与年月日:1989年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第2033号, Conferred date:1989/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻

昭和63年度博士論文

移動ロボット用

地図生成視覚システムの研究

指導教官 広瀬茂男 助教授

学籍番号 大博6062

氏名 吉田和弘

目 次

第1章 序章	1
1-1 本研究の目的	1
1-2 地図生成視覚システムMARS	2
1-3 本論文の構成と概要	5
第2章 直射日光下で使用できる3角測量レーザレンジファインダ	8
2-1 まえがき	8
2-2 従来の投射光信号検出法	9
2-3 DDD法の導入	10
2-4 パルス位相差法の提案	13
2-5 検証実験	16
2-5-1 試作したLRFの仕様	16
2-5-2 計測実験	21
2-5-3 誤った計測結果に関する考察	27
2-6 本章のまとめ	27
第3章 実時間計測可能な多眼ステレオビジョン	30
3-1 まえがき	30
3-2 従来のSVとその問題点	31
3-3 多眼位相差法の提案	34
3-4 多眼位相差法の処理手順	40
3-5 計算機シミュレーションによる 多眼位相差法の実現性の評価	47
3-5-1 計算機シミュレーションの手順	47
3-5-2 計算機シミュレーションの結果とその考察	49
3-6 多眼位相差法SVの試作	54
3-6-1 カメラ系の試作と予備実験	54
3-6-2 対応付けを行う処理回路	57

3 - 7	計測実験	61
3 - 8	本章のまとめ	61
第4章 可視域の地形を表わす第1次地図の生成		65
4 - 1	まえがき	65
4 - 2	地図の表現形式	65
4 - 2 - 1	G型地形による地形表現	65
4 - 2 - 2	円環メモリ表現の導入	66
4 - 3	第1次地図の実時間生成	70
4 - 3 - 1	計測点の仮想地図上のセル座標 (x_v^* , y_v^*) の誘導	71
4 - 3 - 2	実地図上のセル座標 (x_r^* , y_r^*) への変換	73
4 - 3 - 3	高さ情報の平均値と平均偏差の更新	75
4 - 4	検証実験	78
4 - 4 - 1	揺動外乱の補正効果の検証	78
4 - 4 - 2	4足歩行機械への実装とモデル地形の実時間計測	78
4 - 5	本章のまとめ	80
第5章 死角となる地形の連想的推定補間		83
5 - 1	まえがき	83
5 - 2	A補間法の基本原理	83
5 - 3	前提条件の付加による問題の簡単化	85
5 - 4	A補間法の処理手順	91
5 - 4 - 1	トリー探索を用いる連想的想起	93
5 - 4 - 1 - 1	断面形状を代表する特徴量の抽出	95
5 - 4 - 1 - 2	トリー探索による記憶断面の連想的想起	99
5 - 4 - 2	死角域の立体形状補間	101

5 - 5	検証実験	102
5 - 5 - 1	提案する連想的想起法の有効性の検証	102
5 - 5 - 2	移動計測の計算機シミュレーション	109
5 - 6	本章のまとめ	111
第6章	結論および今後の課題	112
6 - 1	本論文の結論	112
6 - 2	本研究に関する今後の課題	114
6 - 3	謝辞	115
	参考文献	116
	研究業績	120
	付録	122
A	記号表	122
B	レーザの反射を常に焦点の合った状態で受光する光学系	124
C	3角測量型3Dセンサの計測誤差	129

第 1 章

序章

第1章 序章

1-1 本研究の目的

ロボット工学の重要な課題の1つは、知能ロボットの実現である。環境の変化に対応し知能的な活動を行うためには、外界を認識するセンサが不可欠である。特に視覚は重要と思われる。自律的な移動能力を有する知能移動ロボットは、これまでの固定型のロボットでは考えられなかった広い作業範囲と柔軟性に富む物資運搬能力を提供し、ロボットの応用範囲を飛躍的に拡大するものと期待される。このような移動ロボットにとって、視覚は不可欠である。障害物との衝突を回避し、しかも無駄が少ない最適な移動経路を導出するという大局的な判断を行うためである。これまでの移動ロボットの研究においても、視覚の研究は重要な課題となっている¹⁾⁻⁵⁾。また移動ロボット以外でも視覚センサの開発は重要な課題であり、多くの研究が行われてきている(2-1、3-2参照)。このような多くの努力にもかかわらず、移動ロボット用として十分に機能する視覚センサは、FA用などのごく限られた環境で使用するもの以外は、未だに完成されていない。

ここで移動ロボットに汎用に用いる視覚の特徴について考えると、以下のようなものが挙げられる。

- 1) 3次元環境の実時間計測
- 2) 大きく変化し得る計測環境
- 3) ある程度軽量、コンパクトであることが必要
- 4) 環境全体について情報が必要
- 5) 移動する視点
- 6) 距離に依存する要求精度

1) の実時間性は、高速な動作を行うロボットに不可欠な要請である。FAにおける生産ラインのように環境が設定できる場合、処理が比較的容易な2次元視覚センサは有効であり、実時間計測を行うものが実用化されている。しかし移動ロボット用視覚の場合には、より高度な3次元計測を実時間で行わなければなら

ない。逆に3次元計測が実時間で行えるようになれば、FA用の視覚としても活用することにより、より柔軟性が高いFAシステムが構成できると思われる。2)は、移動ロボットが様々な環境を移動するために生ずる。FA用と異なり、整備された環境で計測できるだけでは不十分である。3)は移動ロボットに搭載するために必要な条件である。4)は、移動ロボットの効率的な移動経路を決定するために必要とされる条件である。このため、オクルージョン(隠れ)により視覚センサで観測できない領域(死角域)について、何らかの補間操作が必要である。5)は移動ロボットに特徴的な性質であり、計測物体が1方向だけでなく様々な方向から計測され得ることをも意味する。よって、死角域は時々刻々変化し、対象物体付近を通過した後では十分に小さくなると期待できる。最後の6)は、移動経路の決定を行う際、近距離の場合と異なり、遠距離の物体の位置精度はそれほど必要ないという性質を意味する。遠距離の障害物については、その大略の位置を知るだけで十分有効であると考えられる。

1)～4)に示したように、FA用ロボットと比較して著しく厳しい条件を含むため、汎用の移動ロボット用視覚センサ系は未だに実現されていない。本研究では、そのような視覚システムの実現を目的とする。なお移動ロボットに必要なとされる環境情報は環境の「地図」にほかならない。そこで本研究では、目的の視覚系を地図生成視覚システムMARS (Map Realization System) と呼ぶことにする。MARSの概念を Fig.1-1 で表わしておく。

1-2 地図生成視覚システムMARS

MARSは、Fig.1-2に示すように、

- 1) 3Dセンサによる3次元形状計測系
- 2) 第1次地図を生成するサブシステム
- 3) 3次元情報の不足を補間するサブシステム
- 4) 画像解析系

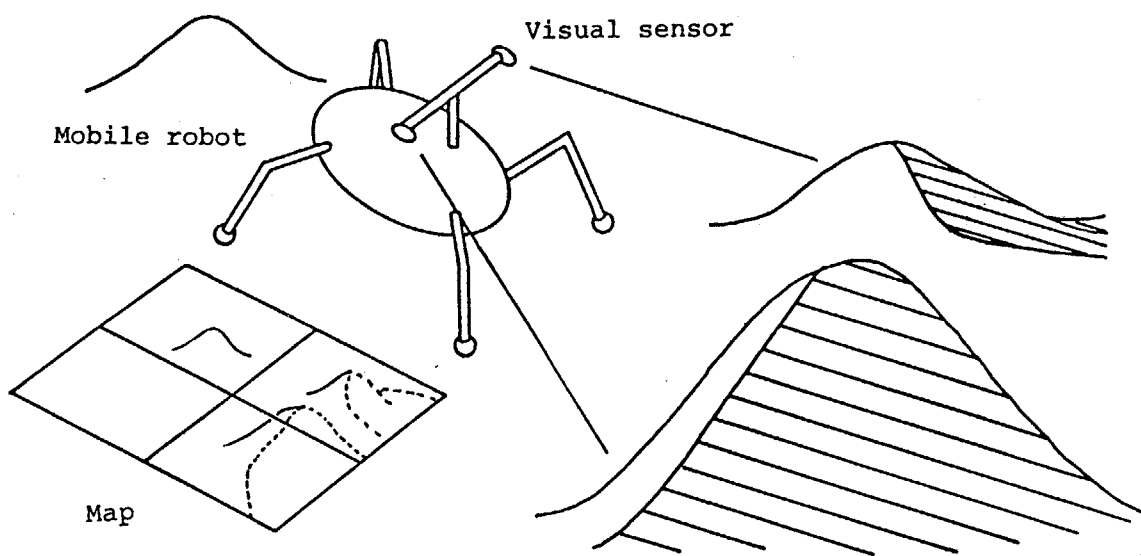


Fig.1-1 MARS (Map Realization System)

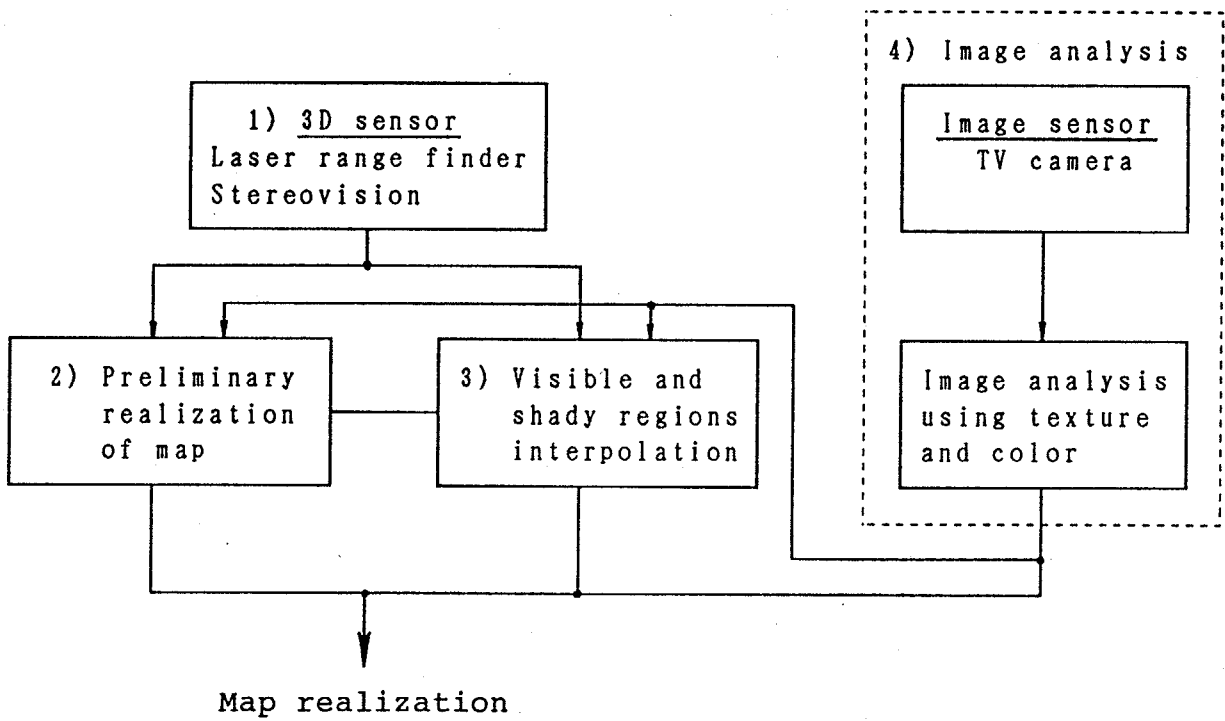


Fig.1-2 Total system of MARS

から成り立つべきであると著者は考えている。

以下では、各サブシステムの概要と問題点を示す。

1) は3次元の形状情報を与えるセンサ系である。3次元情報は移動ロボットの制御に直接用いられる。よってこのセンサが本システムで最も重要であるが、従来の視覚センサでは様々な環境の下で3次元情報を実時間で与えることは困難であった。

2) は、3Dセンサで計測された情報を表現する第1次的な地図を生成するサブシステムである。第1次地図と、次に述べる補間サブシステム及び画像処理系からの情報を統合して最終的な地図は得られる。このサブシステムでは、大きな情報量をもち、しかもロボットに対し相対的に移動する地表の合理的な表記形式と、移動ロボットの揺動と移動量をキャンセルした地図生成法の導入が必要である。

3) は、死角などにより計測できない3次元情報を補間し完全な地図とするためのサブシステムである。1-1で述べたように、移動ロボットは視点を移動するためオクルージョンの問題は軽減される。しかし、十分な情報が得られるのはその障害物に十分に接近するかその近傍を通過した後であって、それ以前に行う経路決定の際にはやはり情報が不足する。歩行機械などが踏破することを目的としている凹凸の著しい不整地においては、このような死角域は広範囲に存在すると考えられる。その補間を正確に行う方法の確立が重要である。

4) は1) から得られる形状情報だけでは与えられない情報、たとえばその地形が草地であるのか、あるいは砂地であるのか、あるいはもっと堅い地面であるのかを判断し、形状だけでは与えられない質的な情報を与えるセンサ系を意味する。これは認識過程を含む高度な処理を要するものであり、解決すべき問題は多い。

1-3 本論文の構成と概要

Fig.1-2 の各サブシステムは独立性が高い。そこで本論文では、サブシステムごとに、その構成法を論ずるものとする。これらのサブシステムの統合により

MARSの実現を試みる。本論文の第1章と第6章を除く各章は、それぞれサブシステムに対応する。第2章、第3章は3Dセンサ系1)に関する検討であり、第4章は第1次地図の生成サブシステム2)に対応する。また第5章は死角域の補間を行うサブシステム3)に対応する。なおサブシステム4)に関する検討には未だ着手していない。

以下で各章の概要を述べる。

第2章では、3Dセンサの1つとして、能動的にレーザ光を投射するレーザレンジファインダ(以下ではLRFと省略する)について論ずる。LRFは、ごく簡単な情報処理により高速に3次元座標が求められるため、MARSの視覚センサに適している。しかし従来のLRFでは、屋外の直射日光下での計測は困難であった。移動ロボットが様々な環境下で活動することを考えると、直射日光のような強力な外乱光の下でも計測を行う機能は、きわめて重要であると考えられる。そこで第2章では、パルス信号を検出する信号処理法と複数の計測系を組合せた冗長計測系を利用する新しいLRF構成法を提案し、この問題の解決を計る。そして、その有効性を直射日光下での計測実験で実証する。

この改良によりLRFの性能は向上されるが、いくつかの問題は残る。最も重要な問題は、遠距離ではレーザの反射が極端に低下し、計測が著しく困難となる点である。これはレーザ投射に伴う問題であり、受動的なセンサではこのような問題は生じない。そこで第3章では、受動センサで代表的なステレオビジョン(以下ではSVと省略する)について検討を行う。従来のSVは膨大な演算処理を必要とし、実時間計測は困難であった。そこで第3章では、多数のカメラから成る計測系を使用し、その冗長情報が成す簡単な関係を判別することにより実時間計測を可能とする新しい多眼SVを提案する。そしてその有効性の実験的な検証を行う。

第4章では、計測された3次元情報を基にした第1次的な地図を生成するサブシステムについて検討を加える。まず地形を表わす地図の表現形式について検討する。実装上の問題として、計算機のメモリ空間にどのように地図を保存するかについても検討する。次に具体的な地図生成法について検討を加える。移動ロボットの揺動と移動量を補正し、異なる時刻のデータを重ね合わせながら広い領域の地図を生成してゆく手法を明らかにする。最後に、4足歩行機械TITANIII

に搭載した視覚センサを用いた計測実験により、導入した手法の有効性を検証する。

第5章では、計測された3次元情報を基に地図を生成する際生ずる情報の不足を補間する方法について検討する。どの型のセンサを用いたとしても、いわゆる「死角」となる領域は環境内に存在し得る。特に起伏の著しい環境では死角域は広く存在する。移動ロボットの場合は、移動と共に複数回計測を行うことにより最終的には死角域は小さくできると期待されるが、経路決定を行う時点では通常不十分な地図しか得られない。そこで本研究では、環境に関する知識を有効に利用し、計測した情報から見えない領域の状態を推定する方法を提案する。これは人間の連想機能を模倣し、利用するものである。本補間法の基本的な有効性は、計算機シミュレーションを主体とした実験により検証する。

以上、検討したサブシステムを統合すれば、MARSの最も基本的なシステムは実現されることになる。

最後に第6章では、結論および今後の課題について述べる。

第 2 章

直射日光下で使用できる

3 角測量レーザレンジファインダ

第2章 直射日光下で使用できる3角測量レーザレンジファインダ

2-1 まえがき

1-1で述べたことから、MARSの視覚センサには、

- 1) 実時間計測が可能、
- 2) 大きく変化する様々な環境下で計測可能、
- 3) 軽量、コンパクト、

であることが要請される。ただし、遠距離の物体の位置精度はあまり重要とはならない。

視覚センサには様々な方式があるが⁶⁾⁷⁾、ここでは参照光を利用し計測を行う能動方式と参照光を用いない受動方式に大別して考える。能動方式ではレーザレンジファインダ(以降LRFと略記する)、受動方式ではステレオビジョンが代表的である。従来のステレオビジョンは膨大な演算処理を必要とし、実時間計測は困難であった。これに対しLRFは、ごく簡単な処理で3次元座標が得られるため、実時間計測の可能性が高い。そこで本章では、MARSの3DセンサとしてLRFを取り上げ、検討を行うことにする。

従来のLRFは、光環境が整備された屋内で使用されるものがほとんどであった。屋外の直射日光下という強力な外乱光のもとで作動するLRFは、火星探査機¹⁾や地上走行車ALV⁸⁾のために開発されたtime-of-flight方式の装置のみである。参照光の伝播時間を基に計測を行うtime-of-flight方式は、測定すべき時間が著しく短くなるため、高精度の装置を用いる必要がある。これに対し3角測量型は、ごく簡単な計測系で要請1)、3)を満足できる。特に、光切断法⁹⁾と呼ばれる縦スリット光と2次元イメージセンサを用いる方式を利用すれば、投射光の走査は横方向の1自由度だけでよく、全空間について高速な計測が可能である。しかし、2)についてはこれまで十分に検討されていなかった。簡便に構成できる3角測量型のLRFで、安全のために低出力レーザを用い、かつ屋外の直射日光下で計測し得る装置は未だ実現されていない。

3角測量型LRFの実用化においては、ビデオ信号上の外乱光の信号と、物体表面で反射され受光された投射光の信号（以降これを投射光信号（reflected optical signals）と呼ぶ）を分離する技術が最大の隘路である。投射光信号が選択的に分離検出できれば、その後の3次元座標の算出は容易にかつ高速に実行できる。

本章では、強力な外乱光から微弱な投射光信号を分離検出する手法について論じ、冗長な計測系とその高速信号処理法を特徴とする新しいLRFを提案する。提案する信号処理法を導入したLRFの性能は、試作した3角測量型LRF装置による屋外直射日光下での計測実験で検討する。

2-2 従来の投射光信号検出法

外乱光から投射光信号を分離する最も容易な第1の手法は、投射光を強力にしてSN比を向上することであろう。レーザ光は、空間的コヒーレンスが高いためビーム性がよく、投射光として望ましい。しかしレーザ光を使用する場合、その出力には安全上の上限がある。

米国のANSI規格およびIEC基準案ではレーザを人体に対する危険度により4つのクラスに分類し、それぞれの安全対策を定めている¹⁰⁾¹¹⁾。これによると、空間にビームとして放射できるのはクラス1および2である。クラス1は微小出力レーザ、クラス2は低出力可視光レーザとして分類されている。人間は眼球に強力な可視光が入射したとき0.25 sec程度でまぶたを閉じる。この人間の反射運動を考慮し、クラス2では波長400~710 nmの可視光に対し、最大1 mWの連続出力が許容されている。つまりLRFには、可視光でしかも1 mW程度のレーザ光しか使用することができない。そのため、この第1の手法は必ずしも有効でない。

SN比を向上する第2の手法は、光学フィルタによりレーザ波長以外の光を除外するものである。干渉フィルタを用いれば著しく鋭利なバンドパス特性が得られる。しかし太陽光中にはレーザと同一波長の光成分は多く含まれる。よって光学フィルタだけでは、外乱光のレベルは低下できても、完全な除外はできない。

なお光学フィルタは、様々な波長を含む通常環境において、イメージセンサに入射する光の総量を低減する。よって、ダイナミックレンジが限られているイメージセンサの機能を最大限に発揮させる効果を有する。

S/N比を向上する第3の手法は、変調光源を用い、点灯時と消灯時の差分検出処理を行うものである。これは多くの場合有効である。しかし点灯、消灯間には実際上ある程度の時間差が生ずる。そのため計測対象が移動する場合や、揺動する移動ロボットに搭載するMARSのためのLRFの場合には、正確な差分が行えず不適當である。

以上のように、従来の技術では、直射日光のような強力な外乱光の下で投射光信号を十分なS/N比で抽出することは困難であった。

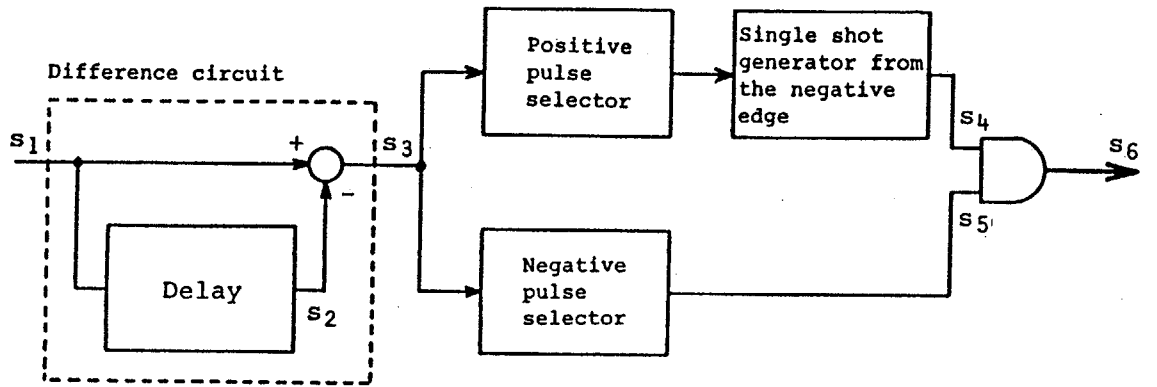
2-3 DDD法の導入

そこで本研究では、まず、ビデオ信号の波形から投射光信号を検出する新しい信号処理法を導入する。これは、ビデオ信号の波形が投射レーザー光（ビーム光あるいは縦スリット光）の反射に対しパルス状の信号を発生する点に注目し、その特性を検出することによって投射光信号を分離するものである。

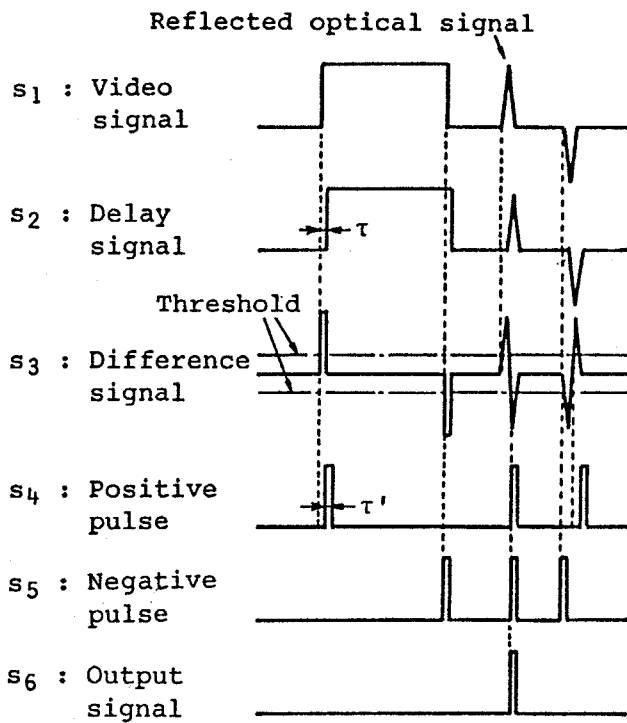
追従型浮動2値化方式¹²⁾を用いてビデオ信号を2値化すれば、パルス成分を検出するある程度良好な特性が得られる。追従型浮動2値化方式とは、2値化する際のしきい値をビデオ信号に遅れて追従する信号、たとえば1次遅れ信号で変化させるというものである。しかし、この方法ではパルス信号のみならず輝度が急変する部分では常に信号が出力されてしまう。明るさの異なる物体が重なり合っている場合など、このような立上りは比較的頻繁に発生すると考えられる。よって、この方式だけでは不十分である。

そこで、この方式に改良を加えた新しい信号処理法を導入することにする。処理回路を Fig. 2-1 (a) に、各点における信号を Fig. 2-1 (b) に示す。

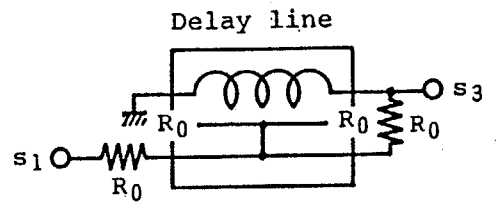
まずビデオ信号 s_1 と、それを遅延時間 τ だけ遅延することにより得られる信号 s_2 との差から差分信号 s_3 を得る。この操作により、平均レベルをまずキャンセルする。ついで、差分信号の正負のパルスをそれぞれあるしきい値で2値化



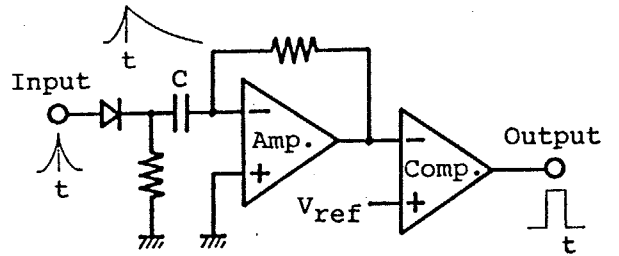
(a) Block diagram of DDD circuit



(b) Signal waveform



(c) Difference circuit using delay line



(d) Peak position detector

Fig.2-1 Principle of DDD method
(Dual signal extraction with Delay and Difference)

する。このとき、なだらかな変化分や小さな変化分は除去される。さらに、正パルスの立ち下がりから一定幅 τ' のパルス s_4 を発生させ、これと負パルス s_5 との論理積を s_6 のようにとる。このようにして、差分信号の正負パルス対に対してだけ出力パルス生成しようとするものである。

つまりこの手法は、ビデオ信号とその遅延信号との差を取るとその差分信号が入力の正パルスに対してだけ正負の順のパルス対を生成するため、その特徴的なパターンを検出することによって入力のパルス、すなわち投射光信号を選択的に検出しようとする信号処理法である。これは鋭いパルス性信号のみを選択するフィルタが構成されることを意味し、本目的に有効と思われる。著者の知る限り、本手法に相当するものはこれまで提案されていなかったと思われる。そこで、以降これを DDD 法 (Dual signal extraction with Delay and Difference method) と呼ぶことにする。

DDD 法の特徴は、ビデオ信号をいったんメモリに記憶させた後ソフトウェア処理を施すということを行わず簡単なハードウェアのみで処理が実行できるため、構成が簡潔であり、処理に実時間性がある点である。

なおビデオ信号の差分信号は、カラーテレビ回路用の遅延線を Fig.2-1 (c) のように接続することで簡単に得られる。

投射光信号の位相 (水平走査線上の位置に相当する) の計測精度は、直接 3 次元座標の計測精度に影響するため重要である。ところが、差分信号を一定しきい値で 2 値化すると、パルス幅の変動により、位相の検出誤差を生ずると考えられる。このような誤差を除くためにはパルスのピーク位置を検出すればよい。これは、ピークホールド回路を利用した Fig.2-1 (d) のような回路で実現できる。その時点までの最大の入力電圧を保持するコンデンサ C への流入電流が終了した時点が、最大値のタイミングを示すからである。これにより、イメージセンサが飽和するなど尖頭部が水平となっていない限り、精度の高い位相の決定を行うことができる。

以上述べた DDD 法の導入により、背景光の輝度変化が比較的滑らかな環境では投射光信号は有効に検出される。しかし、これだけでは外乱光中にパルス状のパターンがある場合には分離できず残されてしまう。そこで DDD 法で検出されるパルスの中で、最大レベルのものを有効な信号とする MaxDDD 法と呼ぶ処理法

と光学フィルタを併用し、より改善された投射光信号の分離を行った¹³⁾。しかし光学フィルタでも除去できない直射日光などの外乱光下では、たとえば Fig. 2-8 (b) のように強力なパルス性の外乱光信号が含まれることがある。また対象物体によってはレーザの反射が著しく小さくなる場合も生ずる。そのため投射光信号は必ずしも最大ピークにはならず、直射日光下での正確な計測は困難であった。

2-4 パルス位相差法の提案

本節では、外乱光から投射光信号を分離する特性をさらに改善するため、第2の手法を導入する。

まず、光学フィルタを用いた周波数領域でのフィルタリングと、DDD法によるパルス性に注目した時間領域でのフィルタリングを前述のように行う。これらの処理だけでは、前述したように複数のノイズパルスが残される。この中から正しい投射光信号を抽出するため、提案する手法ではカメラ系に冗長性をもたせる。そして、その冗長計測系間の相対関係により、投射光信号パルスをノイズパルスから高速に分離するというものである。

LRF系に冗長性を持たせ正確な対応点を探索する手法は、青木らのエピポーラライン（視線像）の特性を用いた方式がすでに提案されている¹⁴⁾。ただしこれは、画像解析処理に基づいた手法である。そのため、情報処理時間短縮のためには演算処理ハードウェアの特別な工夫を必要とすると思われる。

提案する手法は画像解析処理ではなくビデオ信号を直接処理するものである。よって実時間性を有している。

提案する手法の基本的な考え方は、 n 個 ($n \geq 2$) の計測系を組み合わせるものとし、1つの計測点に対する n 組の位置計測値の算出をまず行う。そしてすべての計測系で一致するものがあつたときそのデータを選択する、というものである。

これを実現する最も直感的な手法は、 n 台のLRFの計測値をそれぞれすべて記憶しておき、計測後それらすべての組合せについて正誤判別を行うことである。

しかしこれでは処理手順自体に遅れがあり、また処理時間も長くなる。たとえば $n = 2$ の LRF において、カメラ 1 で m_1 個、カメラ 2 で m_2 個の計測データがとれるとする。この場合には $m_1 \times m_2$ 個という多くの組合せに対して判定処理が必要である。

そのため提案する手法では、Fig. 2-2 のようにカメラを特別な位置関係に配置し、単純で高速な判定を行うようにする。ここで投射光は $x-y$ 平面と直交するスリット光とし、イメージセンサは $y-z$ 平面に平行とする。同時期に走査する互いに鏡面对称のカメラ 1、2 の走査線は y 軸に平行な同一の直線上に配置し、走査線ごとに計測処理を行う。また視野を広げるため、イメージセンサは光軸に対し外側にずらしておく。

Fig. 2-2 のような構成にすると計測点 p に対し次のような関係式が導かれる。

$$\frac{D}{2} = x (\tan \alpha_1 - \tan \gamma) = x (\tan \alpha_2 + \tan \gamma)$$

$$\therefore \tan \alpha_1 - \tan \alpha_2 = 2 \tan \gamma \quad (2-1)$$

ただし角度 α_1 、 α_2 、 γ は、それぞれ反時計方向、時計方向、反時計方向を正にとる。

$\tan \alpha_1$ 、 $\tan \alpha_2$ は、カメラ 1、2 上の投射光信号の位相 u_1 、 u_2 を用いて、

$$\begin{cases} \tan \alpha_1 = (u_1 - u_0) / f \\ \tan \alpha_2 = (u_2 - u_0) / f \end{cases} \quad (2-2)$$

と表わされる。ただし f はレンズ焦点距離、 u_0 は光軸との交点の u_1 (u_2) 座標である。(2-2) 式を (2-1) 式に代入すると、

$$u_1 - u_2 = 2 \cdot f \cdot \tan \gamma = f(\gamma) \quad (2-3)$$

が得られる。(2-3) 式は、カメラ 1、2 の位相差が投射角 γ により決定されることを示している。投射角 γ は既知であるから、 u_1 の値がわかれば u_2 の値が、

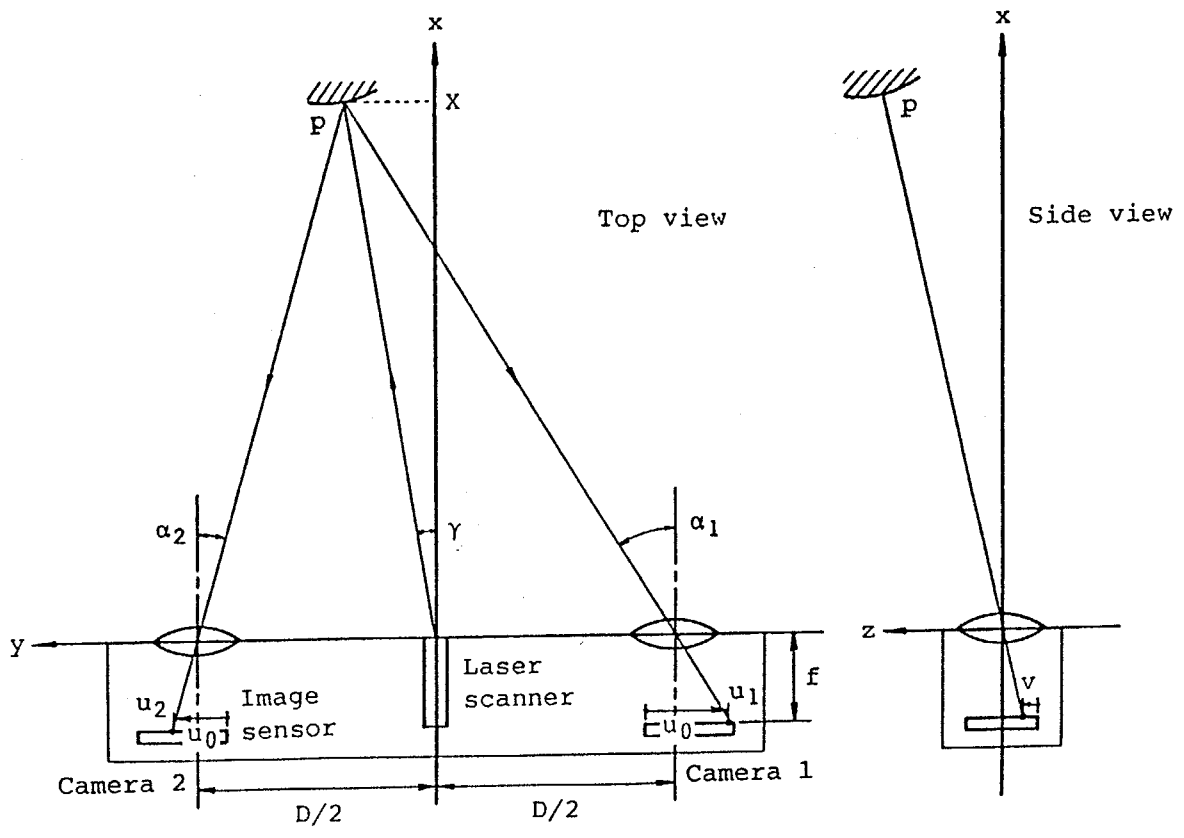


Fig.2-2 Configuration of the multi-camera and laser scanner for pulse phase difference method

あるいは u_2 の値がわかれば u_1 の値が誘導できることになる。

画面走査は、カメラ1、2とも内側から外側に向かって同期して行うものとする。すなわちカメラ1、2の走査方向は、互いに逆方向となる。そうすると u_1 、 u_2 は各走査線の走査時間に対応する。したがって Fig.2-2 の例のように $\gamma > 0$ の場合は、(2-3) 式より $u_1 > u_2$ が成り立つため、カメラ1ではカメラ2よりも既知の $f(\gamma)$ 時間だけ遅れて投射光信号が検出される。また $\gamma < 0$ の場合は、逆にカメラ2でカメラ1よりも $|f(\gamma)|$ 時間だけ後に投射光信号が検出される。 $\gamma = 0$ では同時に投射光信号が検出される。

以上のことから提案する手法では、たとえばレーザスキャナの投射角が $\gamma \geq 0$ である場合には、カメラ2の信号を γ に対応する $|f(\gamma)|$ 時間だけ遅延する。そしてその遅延された信号とカメラ1の信号を比較し、同時に正パルスが検出されるかを判定する。そして検出された場合にのみ、その信号を投射光信号とみなし選択するという操作を行う。

この処理は容易にハードウェアで実現でき、実時間で実行することが可能である。たとえば Fig.2-3 のような回路による処理が考えられる。ここで遅延素子としてはたとえばシフトレジスタを用いればよい。

本方式の最大の特徴は、レーザスキャナの投射角から投射光信号が各カメラ相互で持つべき位相差を導出し、その位相差で実時間的に受光パルスの有意性を判定する処理にある。そこで本方式を以降「パルス位相差法 (Pulse phase difference method) 」と呼ぶ。

2-5 検証実験

2-5-1 試作したLRFの仕様

提案したDDD法とパルス位相差法を含む新しいLRFの性能確認実験を行った。

試作したLRFを Fig.2-4 (a) に示す。これは半導体レーザ (830 nm, 1 mW) のビーム光を投射し、その反射光を2つの対称的に設置した1次元CCDで受光

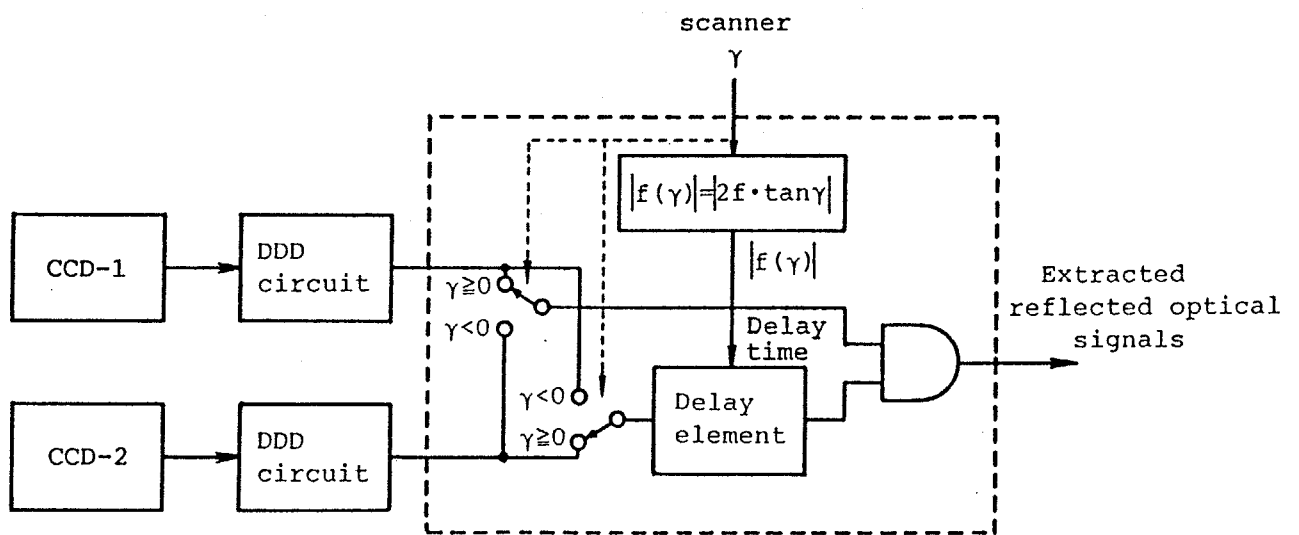
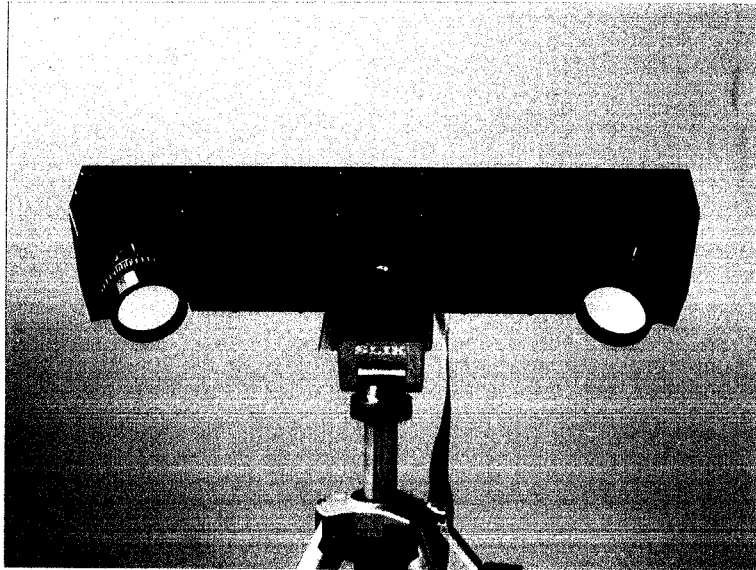
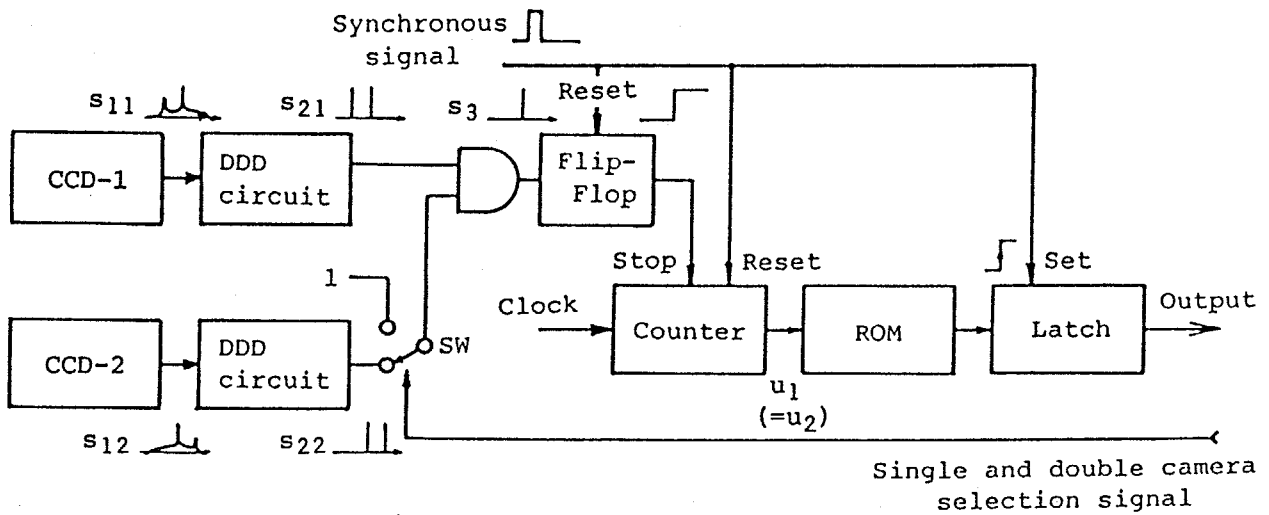


Fig.2-3 Signal processing circuit of pulse phase difference method



(a) Overall view of the laser range finder



(b) Block diagram of the data processing system

Fig.2-4 Constructed laser range finder and its data processing system

して、反射点までの距離を計測するものである。これは第1次試験機であり、2次元イメージセンサとスリット光を用いる光切断法の最も簡略化した形態を用いている。レーザ投射角も $\gamma = 0$ に固定している。このため(2-3)式は、

$$u_1 = u_2 \quad (2-4)$$

となる。この場合、判定処理は遅延素子を必要とせず簡単に実現できる。

また本機ではレンズ系を適当な角度内向させることによって常に焦点の合った像を得る光学系を用いている(付録B参照)。このような機構の導入により、像のぼけによる投射光信号の位相の誤差を低減している。

本LRFの全幅は380mm、レーザと各カメラの中心までの基線長は150mmである。1次元CCDは長さ15.6mm、画素数は1024である。レンズは焦点距離50mm、F2.8のものを用い、光学フィルタは干渉フィルタ(透過波長: 810~850nm)を用いている。計測距離は、移動ロボットのナビゲーションに重要な本体付近の地形計測を考え、0.6~5mとして設計した。計測精度は0.6~1.4mにおいて実測で $\pm 1\%$ 以下であった。この計測誤差は、量子化による誤差(1.4mにおいて $\pm 0.28\%$ (付録C参照))と、パルス幅に伴う誤差(CCDが飽和した場合、DDD回路のピーク位置検出は効果的にはたらない)に起因するものと思われる。

本LRFの処理回路をFig.2-4(b)に示す。まずCCD-1、2から出力されたビデオ信号 s_{11} 、 s_{12} からDDD回路によりそれぞれのパルス成分のみを検出し、出力信号 s_{21} 、 s_{22} を得る。DDD回路はFig.2-1(d)のピーク位置検出回路を利用している。次に s_{21} 、 s_{22} の出力信号の論理積をとり、カメラ1、2で同時に発生したビデオ信号のパルス成分 s_3 を検出する。そして信号 s_3 で走査時間に対応するカウンタをストップし、信号 $u_1 (= u_2)$ を得る。

なお2台のカメラ1、2にそれぞれ複数の信号パルスが存在し、それらの信号 P_1 、 P_2 がたまたまFig.2-5のような位置関係を成すと、いわゆる偽の対応点 P_f を生成する。このような場合、正しい計測点 P_c に対応する投射光信号も得られるのであれば、1走査線上に2つ以上の信号が抽出されることになる。ただしその中のどれが正しい信号かは2眼視では判定できない。よってこの場合には

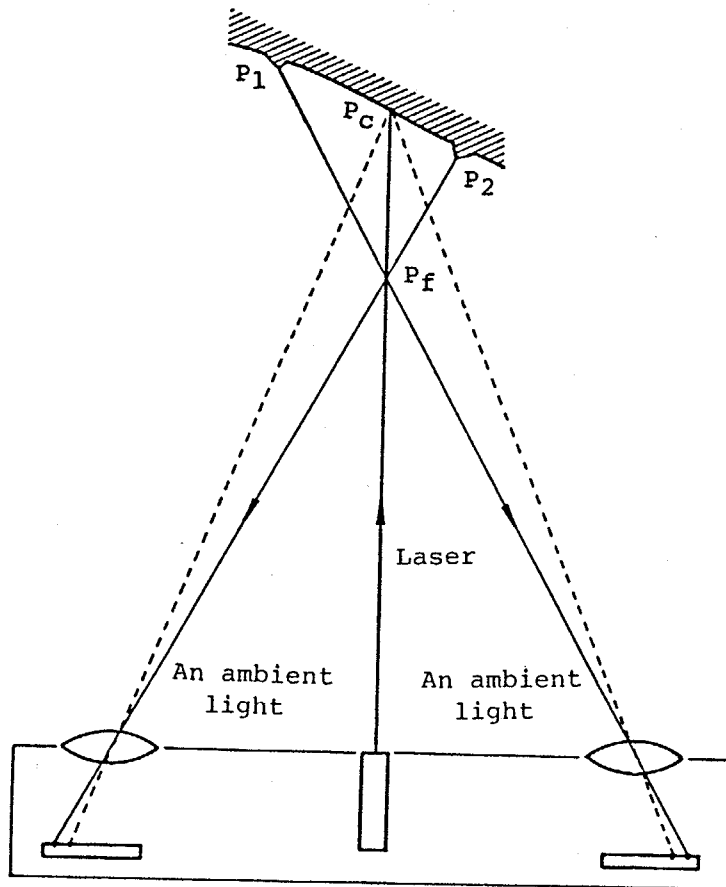


Fig.2-5 An example of fault correspondence

計測できない棄却データと判定することにした。このような処理は一見不適當に思える。しかし棄却の判定は高速に行うことができる。また L R F は C C D の蓄積時間を考慮しても 1 点につき数 msec で計測できる。したがって、誤りの可能性のある情報を積極的に除外しても、視点を移動して計測してゆけば通常は十分な密度の正しい信号の入力が保証できると考えられる。

このようにして得られた信号 u_1 の値は、R O M に記憶されたデータを用いて距離データ (単位: mm) に変換して出力する。なお試作した L R F では Fig. 2-4 (b) のスイッチ SW を付加した。これは処理系からの指令によって動作し、カメラ 1 のみの単眼 L R F のデータも生成する。これは 2-5-2 で述べる比較実験に用いる。

投射光のレーザ出力は 1 mW と設定した。これは 2-2 でも述べた安全性を考慮した結果である。ただし今回使用している半導体レーザは赤外領域のものであり、本来ならば出力 1 mW は許容されない。しかしこの波長のレーザを用いた実験で得られた性能は、波長 700 nm 程度の可視光レーザに交換してもほぼそのまま実現できると思われる。波長による物体の反射率の変化、そして C C D の感度変化は、それほど大きくないためである。そのため、現状で入手しやすい赤外領域の半導体レーザによっても、大略の性能は検証できたと考えている。

なお移動ロボットに搭載する場合、レーザ光は斜め下向きに静止せずに走査しつつ投射される。そのため長時間人間の眼に入射する可能性は低く、この使用条件からも安全性は十分高いと考えられる。

2-5-2 計測実験

提案したパルス位相差法の有効性を検証するために、自然環境の計測を模擬する第 1 の実験を行った。具体的には、L R F としては著しく条件が厳しい直射日光下で Fig. 2-6 のように測定対象上面までの距離を 500 回計測し、正答率、誤答率、棄却率を求めた。「正答率 (Correct rates)」は 5 % 以内の精度で距離が計測できた計測回数の割合、「誤答率 (Error rates)」は 5 % より大きい誤差を含む計測を行った割合、「棄却率 (Reject rates)」は信号がまった

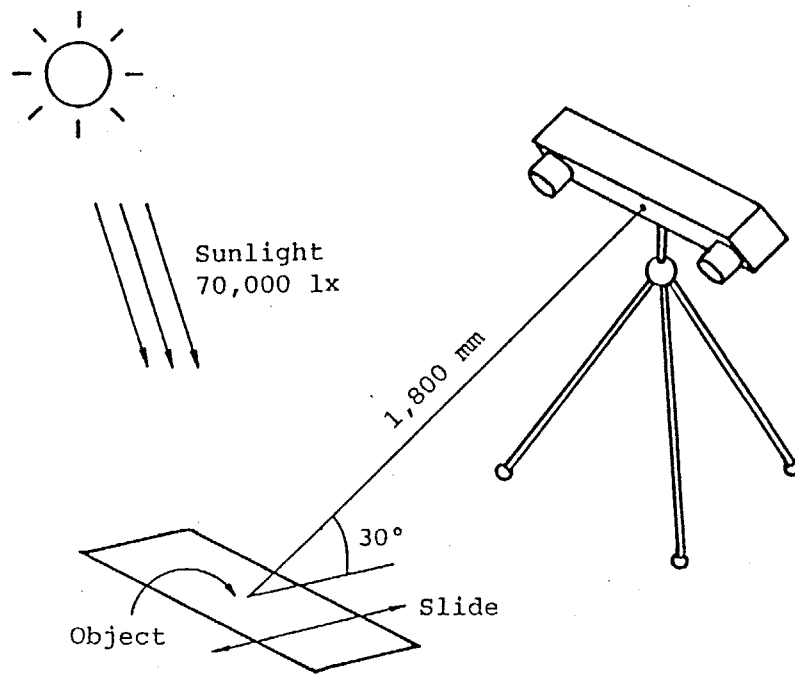


Fig.2-6 Condition of experiment-1

く検出されなかったか、複数検出された結果棄却された割合を表わしている。なお LRF は MARS における通常の計測姿勢を想定し、 30° 下方に傾けている。また距離を一定にして背景光の状態を変化させるため、計測は測定対象を水平方向に若干移動しながら繰り返した。単眼方式と本方式は、前節で述べたスイッチ SW によって順次切り換え、等しい条件での比較を行うようにした。

計測結果の 1 例を Fig.2-7 に示す。(a) はノイズパルスが発生しにくい白紙に対する計測値である。ノイズパルスが発生しなければ、従来の単眼方式でも提案した複眼のパルス位相差法でもその計測結果に差異はほとんど生じていない。

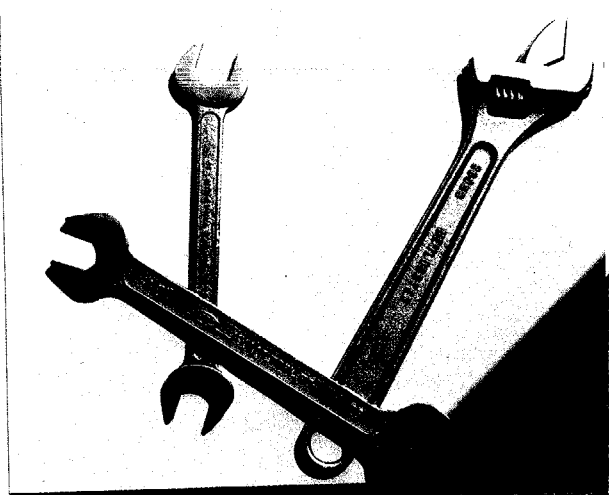
(b) は工具のあるシーン、(c) は砂利表面である。このようなノイズパルスが発生しやすい場合、単眼方式ではほとんど棄却されているのに対し、複眼方式では十分に高い頻度で正確な計測ができていることがわかる。

次に屋外直射日光下での第 2 の実験を行った。予備実験によるとコンクリートの道路、階段等は、直射日光下でもノイズパルス光が少ないため、単眼でも 2~3 m 以内であれば正答率 70~90 %、誤答率 0 % 程度の良好な計測が可能であった。そこで第 2 の実験は、より劣悪な条件で行った。これは Fig.2-8 (a) に示すような直射日光下の樹木と落葉からなる風景の断面形状を計測するものである。断面計測を行うため、カメラはピッチング方向に揺動させている。傾斜角は揺動台回転軸に取り付けたポテンショメータの値を用いている。太陽光の照度は 10 万 lx であった。この状況で落葉面を計測した際得られたビデオ信号波形の 1 例を Fig.2-8 (b) に示す。

本方式の計測結果の断面形状を Fig.2-9 (a) に示す。落葉に覆われた地面は Fig.2-8 (b) のようにパルス性の外乱光が多く、従来の単眼方式では Fig.2-9 (b) のように計測データはほとんど棄却される。それに対し複眼方式ではより確実に信号を抽出し計測を行っており、本方式の有効性が確認された。ただし複眼方式でも未だ若干の誤った計測がなされている。誤計測は計測距離が大きく、レーザの反射状態が悪化すると、さらに高い頻度で発生する。この理由については 2-5-3 で考察する。

Measuring objects	Illumination intensity [lx]	Correctness rate [%]	Error rate [%]	Rejection rate [%]
(a)White surface	70,000	100.0 (99.8)	0.0 (0.0)	0.0 (0.2)
(b)Tools	70,000	96.4 (30.8)	0.0 (0.0)	3.6 (69.2)
(c)Gravel	70,000	44.0 (1.4)	4.0 (0.6)	52.0 (98.0)

*Figures in parentheses indicate the results obtained by conventional single sensor system

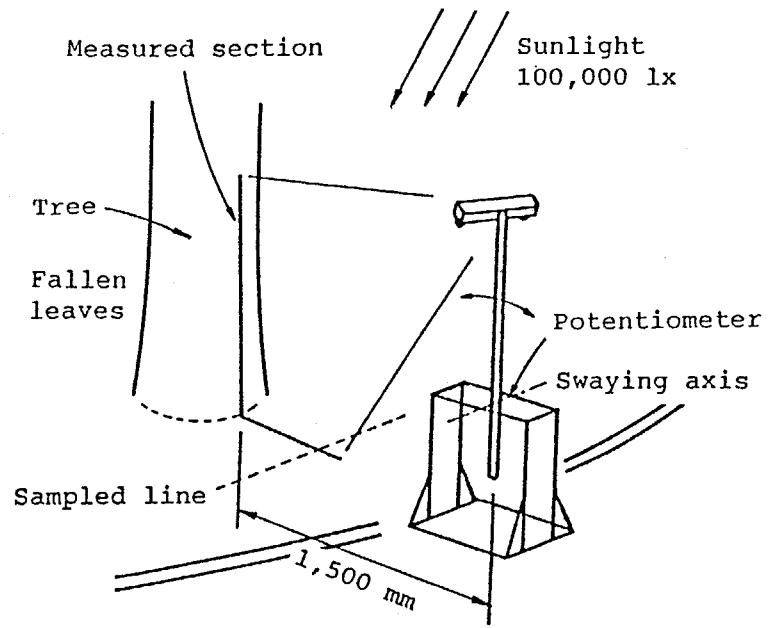
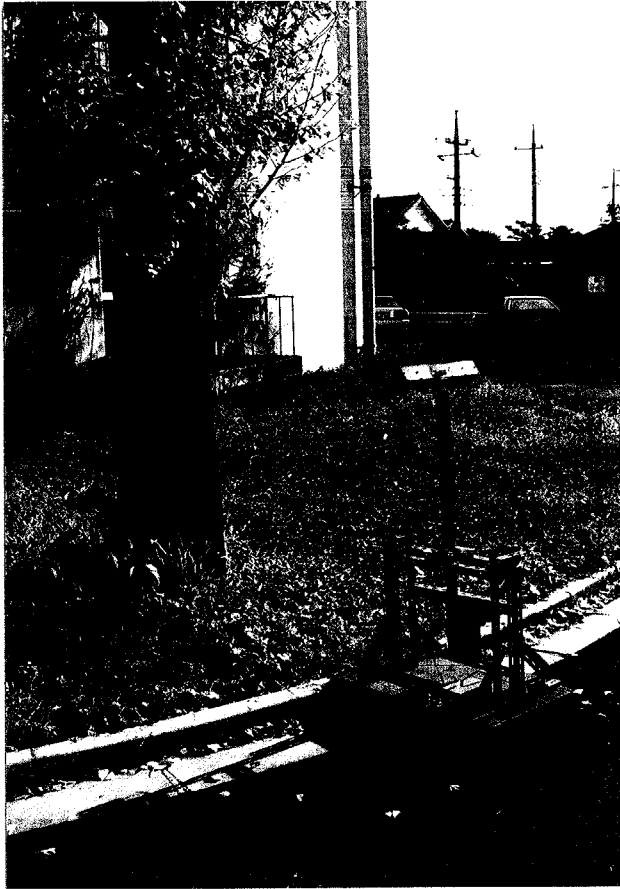


(b) Tools

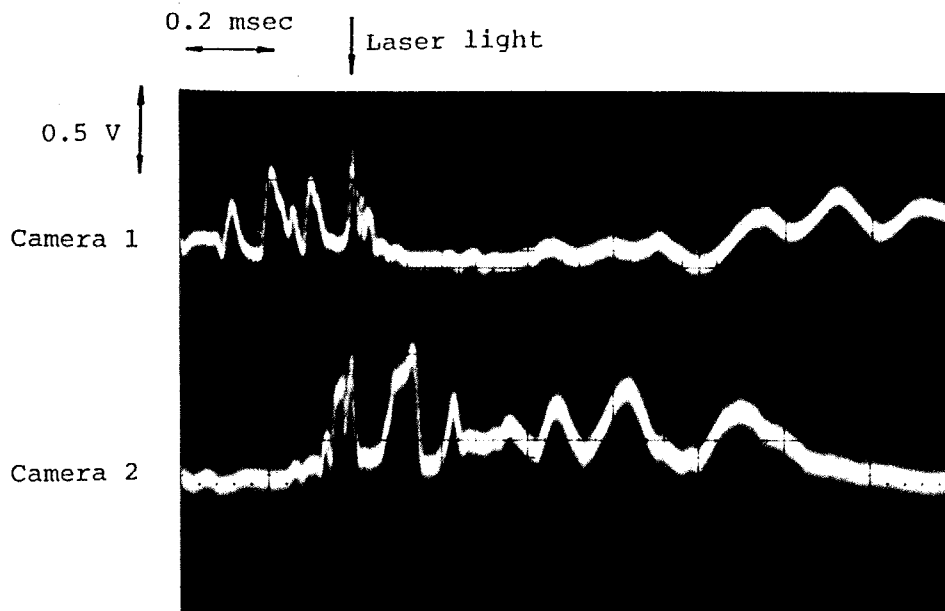


(c) Gravel

Fig.2-7 Results of the experiment-1

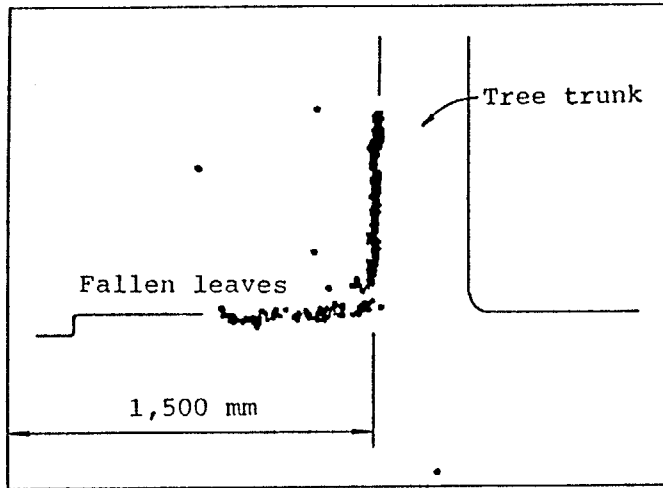


(a) Overall view

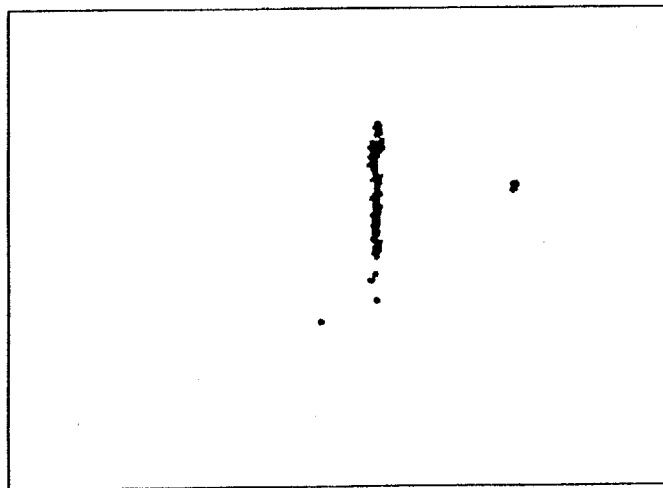


(b) Video signal along the sampled line shown in (a)

Fig.2-8 Experiment-2 in outdoor environment



(a) Dual-sensor system



(b) Single-sensor system

Fig.2-9 A result of the experiment-2 (side view)

2-5-3 誤った計測結果に関する考察

Fig. 2-5 で示したような偽の対応が生じたとしても、レーザの反射さえ検出できれば1走査線上に複数の信号を検出することになり、前述したように棄却される。よって誤った計測はされない。しかしレーザの反射を検出できない場合、たとえば1) レーザの当たっている面の反射率が著しく低い場合、2) 反射面が大きく傾いている場合、3) オクルージョンを生じている場合、4) 強力な背景光が存在しそのために投射光信号の位置でCCDが飽和している場合などでは、1つのノイズパルスのみが検出されることがある。このとき誤った計測結果を生ずる。Fig. 2-9 (a) で誤った計測結果が数点生じたのは、1)、2)、3) などの理由によるものと思われる。

この問題に対しては、カメラを3台以上並べ、より冗長な判断で偽の対応を確率的に減少するという方法が考えられる。たとえば異なる基線長のLRFを組み合わせれば、本方式は一般に n 台(n :偶数)の冗長計測系に拡張可能である。またFig. 2-10のようにカメラ3のレンズ中心点をレーザ光走査軸上に設置する奇数台から成る構成も考えられる。この場合には、カメラ3へのレーザ反射光の入射方向は投射方向と常に一致し、対象物体までの距離には依存しない。よってレーザの反射光が計測可能か否かが、既知の投射角に対応するカメラ3の受光部に信号が入力されているか否かで判定できるという特別の効果が期待できる。この情報を使用すれば、反射光量の低下のために生ずる誤信号は十分に除去できるとと思われる。

2-6 本章のまとめ

本章では、強力な外乱光下で微弱な投射光信号を分離検出するというLRFの最大の問題を解決するため、従来の光学フィルタ法にさらにDDD法とカメラ系の冗長性を加えた計測系を提案した。そしてその効果を、試作したLRFによる真昼の直射日光下での計測実験で確かめた。その結果、提案したLRFは強力な外乱光除去効果を発揮し、投射レーザ光の反射が得られる距離では、簡便な装置

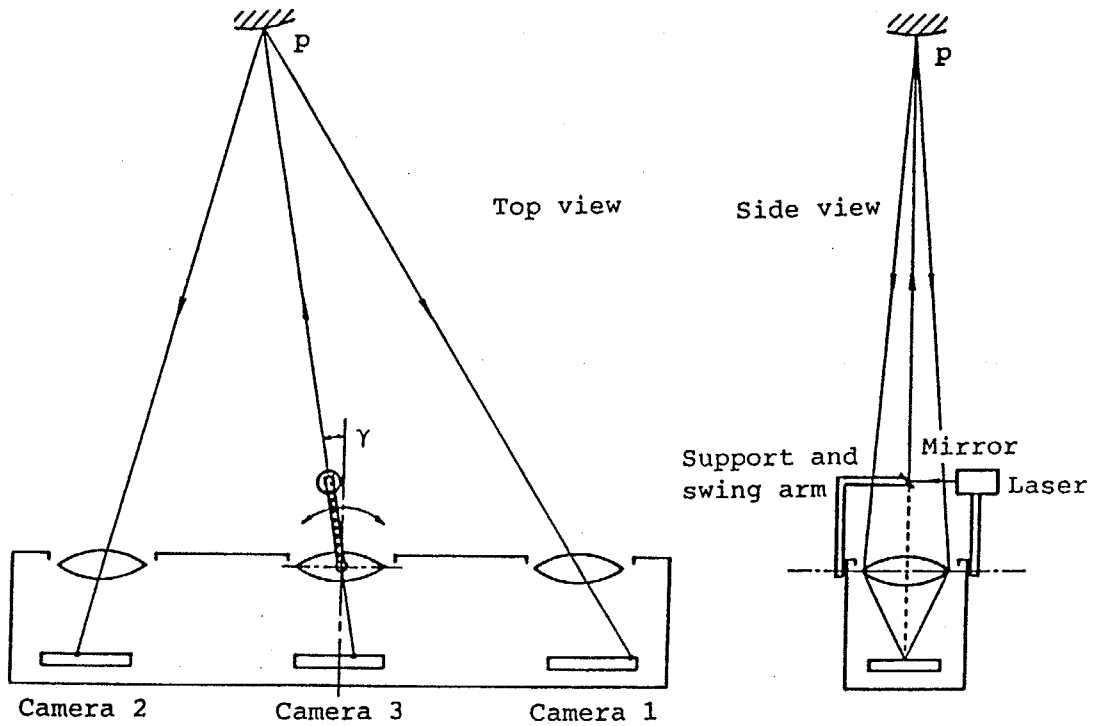


Fig.2-10 Multi-camera laser range finder equipped with additional monitor camera 3 on laser scanner

で計測できる有効な 3 次元視覚系となり得ることを確認した。

なお、本 L R F は屋外の移動ロボットのために開発しているが、いわゆる F A のための 3 D 視覚としても著しく有効であることを最後に指摘しておきたい。その理由は 1) 屋内の外部光条件はアーク溶接の現場においてさえ屋外よりはるかに良く、また計測距離が一般に短いことから確実な信号取り込みが保証されること、2) time-of-flight 方式と比較するとはるかに安価な装置であること、3) 高い精度、実時間性が保証されることなどである。

第 3 章

実時間計測可能な 多眼ステレオビジョン

第3章 実時間計測可能な多眼ステレオビジョン

3-1 まえがき

ステレオビジョン（以降S Vと略記する）は、人間の眼という身近な実用例があり（ただし、人間の視覚系は知識情報処理を含む複雑なシステムであり、ステレオ視が唯一の原理ではない）、3次元計測の最も基本的な原理として、多くの研究者を長期にわたりひきつけてきている。

工学的には以下のような特徴を有する。

- 1) 計測する物体に関する制約が少ない
- 2) 高速なデータ入力が可能

ただし、

- 3) 従来方式では、実時間計測は困難

1) は受動方式の利点である。レーザレンジファインダに代表される能動方式の場合、参照光の反射を検出できることが必要である。よって、遠距離の物体や反射率の低い物体、さらに投射光の当たっている面が大きく傾いている場合の計測は難しい。特に、安全性から低出力レーザを用いると、その制約の影響は顕著である。これに対しテレビカメラは、自然にある大出力の照明を利用するため、遠距離の物体や低反射率の物体でもその画像を検出できる可能性が高い。

2) も受動方式による利点である。能動方式では、参照光が当たっている部分について計測を行う。よって立体形状を得るためには、投射光を走査し、複数回画像入力を行わなければならない。これに対しS Vは、各カメラの1画像が立体形状を得るために必要なすべての情報である。レーザレンジファインダの計測時間短縮のため様々な工夫は成されているが¹⁵⁾⁻¹⁷⁾、データ入力に関する限りS Vは有利である。

このように大きな利点を有するにも関わらずS Vが未だに実用化されていないのは、3)に示した大きな障害があるからである。2)で述べたようにデータは高速に入力できるが、それを解析し3次元情報を抽出する処理、特に対応点の決

定処理に膨大な演算処理を必要とするためである。この問題に対し、専用のハードウェアを構成する研究は盛んで、メーカーを含む様々な研究機関で開発が進められている。しかし、未だに実用化されている汎用SVセンサは存在しないようである。

このような状況のため、MARSの視覚センサなどの高速性を必要とする目的にはSVは不適當であると考えた。そして、第2章ではレーザレンジファインダについて検討を行った。

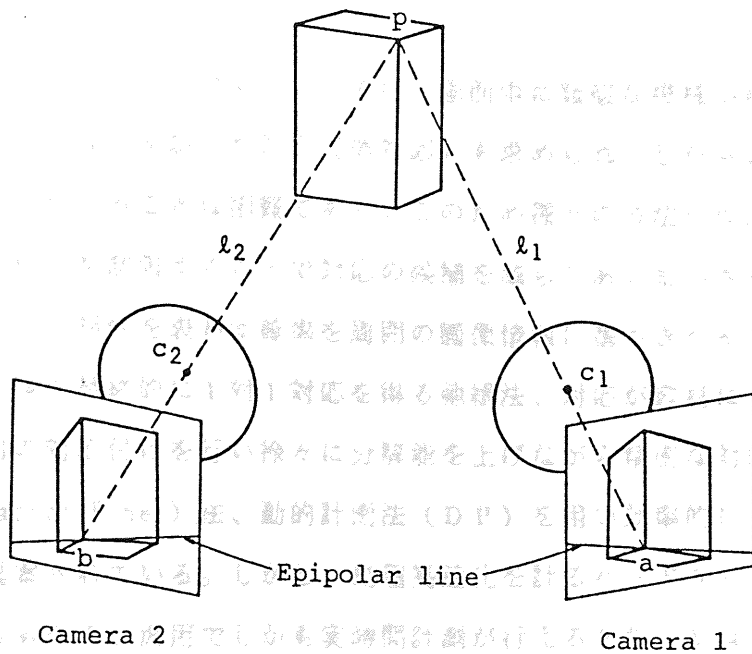
ところが、そこで提案したパルス位相差法について、より原理的な立場から考察したところ、その基本原理は光を投射する機能に依存していないことに気付いた。つまり受動型のSVに関してもこの考え方は有効である。そして、この考えが実時間計測を行うSVを実現することを見出した。

本章では、複数の冗長カメラ系から構成される新しいSV構成法を提案する。その有効性は、計算機シミュレーションおよび実時間計測実験により検証する。

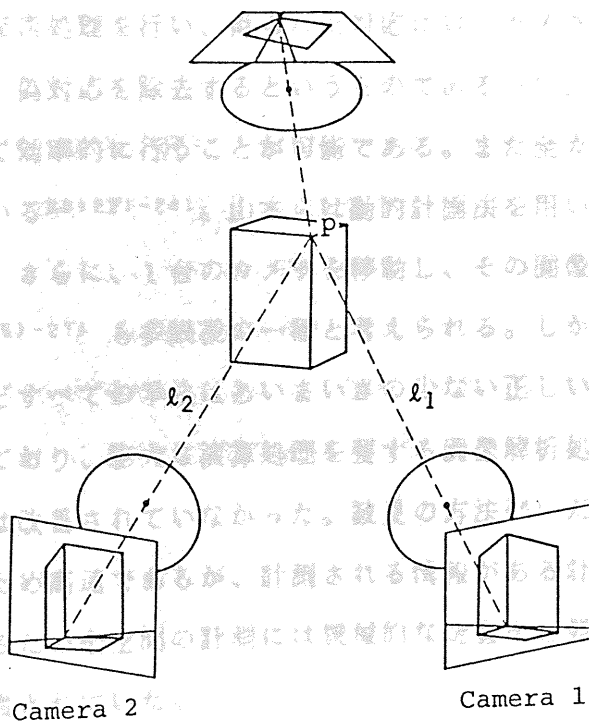
3-2 従来のSVとその問題点

まず、従来のSVについて考える。SVの基本原理は、Fig.3-1(a)のように2台のカメラ1、2で対象物体を撮像し、画像1の上の点、たとえばa点に対応する画像2上の点bを決定し、三角測量により計測点の3次元座標を求める。このとき、対応点決定が最も困難な処理である。

通常よく用いられる手法の基本原理は、各画面に画像処理を施しエッジなどの特徴点を求める。そして、画面1の特徴点aと画面2の特徴点bが対応するか否かは、それぞれの近傍の画像について相関を取り、一致度が十分に高いか否かで判定するというものである。ただし点aが与えられ点bを求めるとき、画面2全面について探索を行う必要はない。なぜなら、視線 l_1 を画面2に投影したエピポーラライン(視線像)上に点bは存在するからである(Fig.3-1(a)参照)。エピポーララインは、計測点pおよびレンズ中心点 c_1 、 c_2 を含む平面と画面との交線として与えられる。特にカメラを平行に配置するとエピポーララインは画面上の水平線となるため、これを走査線に対応させることができ、処理の著しい



(a) Binocular system



(b) Trinocular system

Fig.3-1 Formerly proposed stereovision systems

簡単化が可能である。

このような局所相関に基づく2眼視では、画面中に類似な模様が複数個あるとき正しい対応のみならず誤った対応（偽対応）も求められ、しかもどれが真の対応であるかを判別することは困難である。このため種々の方法が検討されている⁶⁾¹⁸⁾。計測範囲を制限することで対応の候補を減らしあいまいさを減少する方法¹⁹⁾、対応の信頼性を表わす確率を周囲の画像情報に基づきベイスの法則を用いて更新してゆき最終的に1対1対応を得る弛緩法、対応が容易に求められる粗い画像で最初の対応付けを行い徐々に分解能を上げながら精密な対応を求めてゆく伸縮（Coarse-Fine）法、動的計画法（DP）を用い効率的に対応を求める方法などが提案されている。しかし、処理高速化を計るハードウェアの開発は進められているものの、汎用でしかも実時間計測が行える2眼SVは未だ完成されていない。

一方、これらの2眼視と異なり、3台以上の冗長カメラ系を用いる多眼視方式が提案されている²⁰⁾²⁷⁾。多眼視の原理の1つは、Fig. 3-1 (b) のカメラ1、2で通常の対応点探索処理を行い、得られた対応に対しカメラ3の冗長な情報を用いて判定を行い、偽対応を除去するというものである²¹⁾。この処理はエピポーララインを用いて効率的に行うことが可能である。また全カメラを対等に扱う方式も提案されている²⁰⁾²²⁾²⁴⁾。山本らは動的計画法を用いて効率的に対応を決定している²²⁾。さらに、1台のカメラを移動し、その画像の連続変化を求め利用する移動SV²⁵⁾²⁷⁾も多眼視の一種と考えられる。しかし、提案されている多眼視のほとんどすべての手法はあいまいさの少ない正しい対応を求めることに関心が向けられており、膨大な演算処理を要する画像解析処理に依存するため、処理時間については改善されていなかった。数見の方法²⁴⁾だけは特別のハードウェアで処理するため高速であるが、計測される情報がある計測点1点までの距離に限定されているため全空間の計測には機械的な走査を必要とし、長時間を要する問題はやはり残されていた。

3-3 多眼位相差法の提案

3-2で述べた現状を考え、著者はMARSの3Dセンサとしてまずレーザレンジファインダについて検討を行い、パルス位相差法と呼ぶ新しいレーザレンジファインダ構成法を提案した。さらにこれについて検討を進めた結果、パルス位相差法の原理は光を投射する機能に依存しておらず、したがって受動方式であるSVについても有効であることを見出した。このように拡張されたパルス位相差法は、一種の多眼視方式を構成する。

提案する多眼SVはFig.3-2のように構成する。n台($n \geq 3$)のテレビカメラは平行に配置し、画面走査は同期させる。これによりすべてのカメラのエピポーララインは同時刻の水平走査線に対応するため、2次元の画像を1次元画像の集合に分解することができ、走査線ごとの高速な処理が可能となる。さらに重要なことは、任意の計測点pのそれぞれのカメラにおける像の位相に対し、容易に判定できる関係が成立するということである。本方式はこれを利用し、実時間で対応点決定を実行しようとするものである。

その原理を詳しく説明する。Fig.3-3は、観測している走査線と計測点pを水平面に射影したものである。各カメラは同一の構造であるとし、レンズ中心点をy軸上に、光軸はx軸と平行に配置するものとする。ただしy軸の原点の位置は任意である。異なるカメラ、レンズを用いた場合への拡張は容易であるが、簡単のため、ここではこのように設定しておく。

Fig.3-3のような光学系では、点pから各カメラに入射する角度 α_i ($i = 1 \sim n$) 相互に、(3-1)式のような関係が成立する。

$$l_i = x (\tan \alpha_i - \tan \alpha_{i+1}) \quad (i = 1 \sim n-1) \quad (3-1)$$

ここに、カメラの特性から成り立つ関係

$$\tan \alpha_i = \frac{u_0 - u_i}{f} \quad (i = 1 \sim n) \quad (3-2)$$

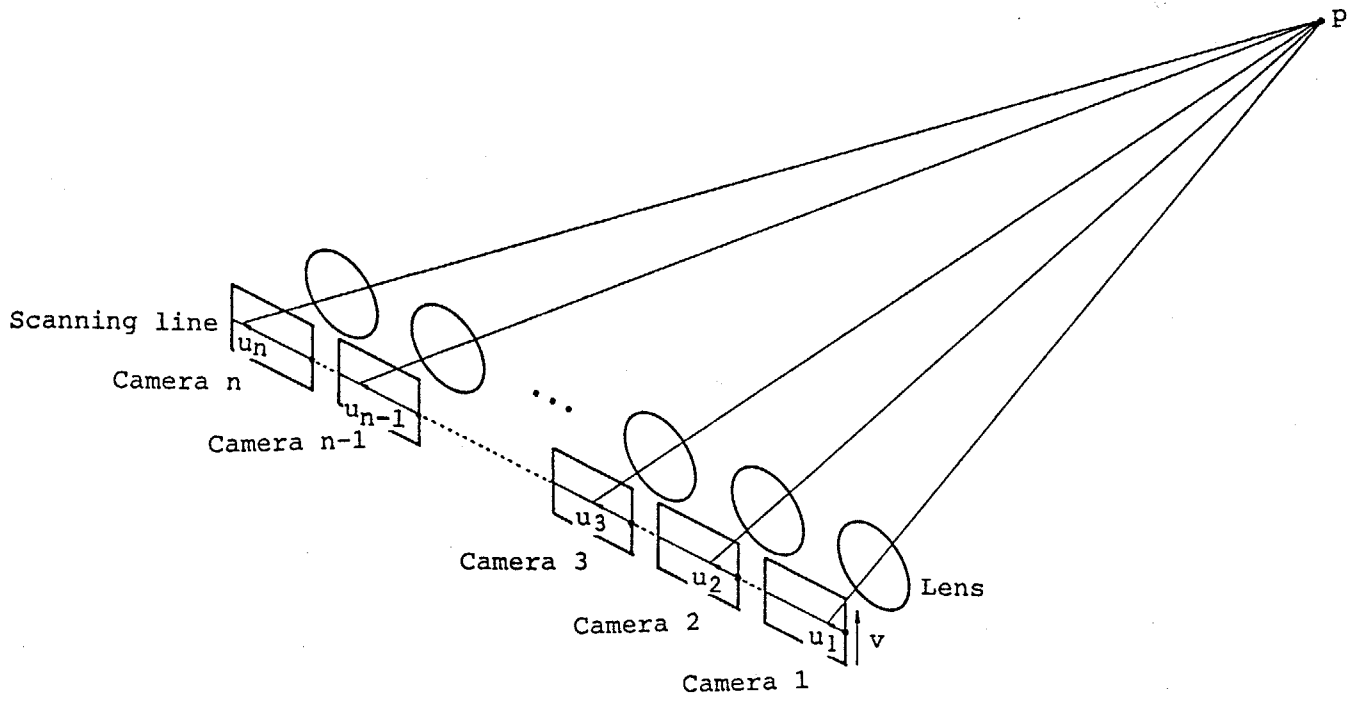


Fig.3-2 Multi-camera system for multi-camera phase difference method

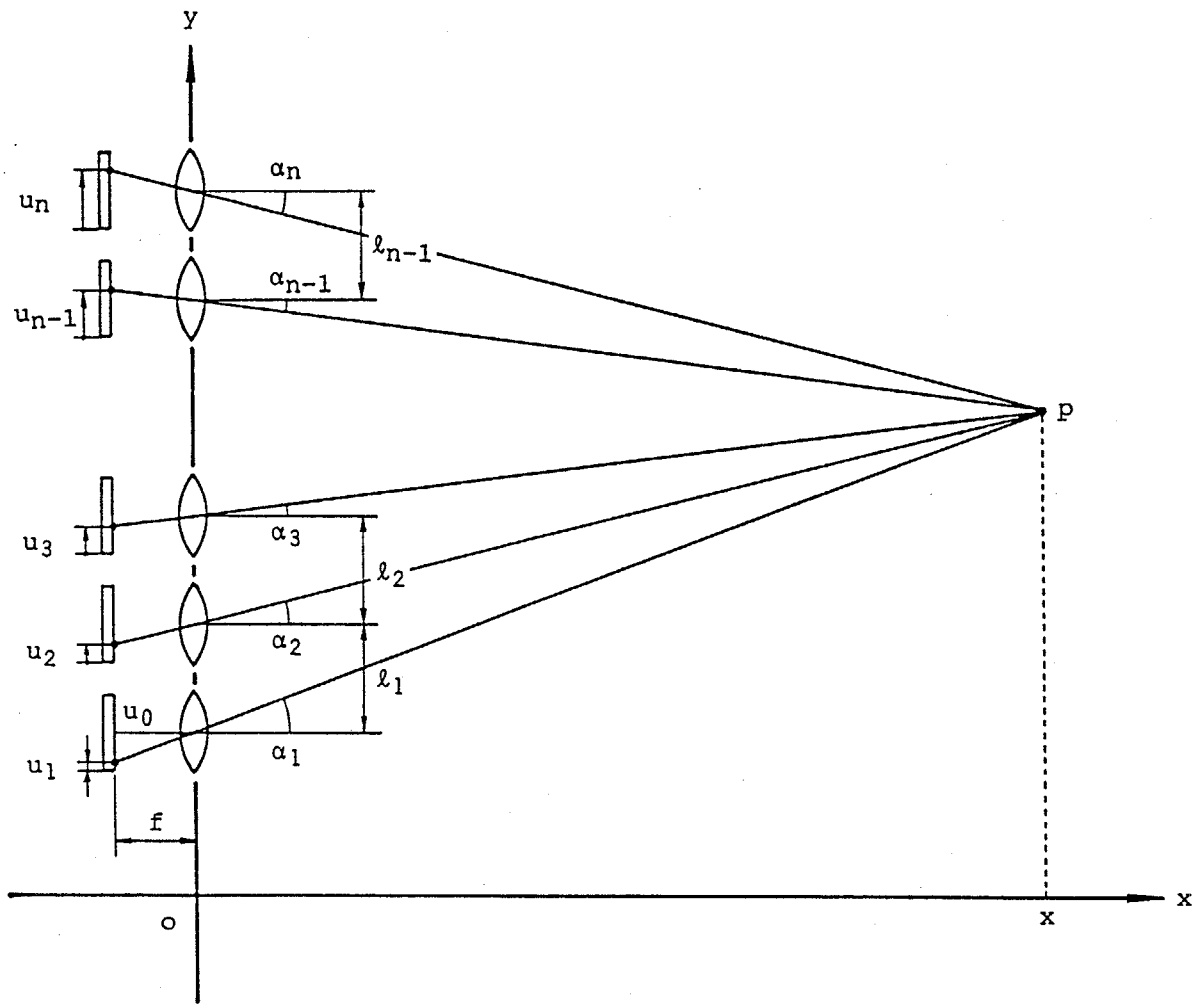


Fig.3-3 Top view of the camera system shown in Fig.3-2

ただし、 f : レンズ焦点距離

u_0 : 光軸が画面と交わる点の位相

を代入すれば、

$$\frac{u_{i+1} - u_i}{l_i} = \frac{f}{x} > 0 \quad (i = 1 \sim n-1) \quad (3-3)$$

が得られる。この右辺はカメラ番号 i に依存しない。特に $l_1 = l_2 = \dots = l_{n-1}$ という構成を考えると、隣接するカメラの点 p の像の位相差 ($u_{i+1} - u_i$) はすべて等しくなる。位相差の値は計測点までの距離 x に対応する。

(3-3) 式は、走査線上の計測点 p の像の分布を Fig. 3-4 のように表わしたとき、それらが直線状に並ぶということを示している。以降、この直線を「対応直線 (Correspondence line) 」と呼ぶ。対応直線の傾きが計測点までの距離を表わし、水平位置が方向を表わす。したがって、対応点の決定は、各走査線で特徴点 (たとえば、輝度が急激に変化する点など) を求めそれらが成す対応直線を見出すという簡単な処理に帰着される。なおこのような性質は、移動ステレオの研究でもすでに明らかとされており、これを基に解析を行う方式も提案されている (25) (26) 。しかし、その目的は対応点決定を正確に行うことに限られており、この性質が実時間計測を実現する点に注目した研究は、これまでになかった。

なお、上記の方法で対応点を決定すると Fig. 3-5 のように偽対応を生ずる可能性がある。水平解像度が十分に高ければ、カメラが最少の3台でも独立な対応直線の特徴点が正確に直線状に並ぶ確率は平均すれば0である。しかし実際の装置では、使用するテレビカメラの画素で量子化されるため水平解像度は制限される。そのため偽対応の発生は完全に0とにならない。このときカメラを多数台用いると、その発生頻度はごく小さくなると期待される。そこで、提案する手法では、カメラ数を増し、確率的に偽対応の発生を抑えることにする。

このように、対応点を位相差の関係式を基に決定する多眼視方式を、以降「多眼位相差法 (Multi-camera phase difference method) 」と呼ぶ。

その処理時間を見積ると次のようになる。走査線1本に対し、カメラ1で m_1

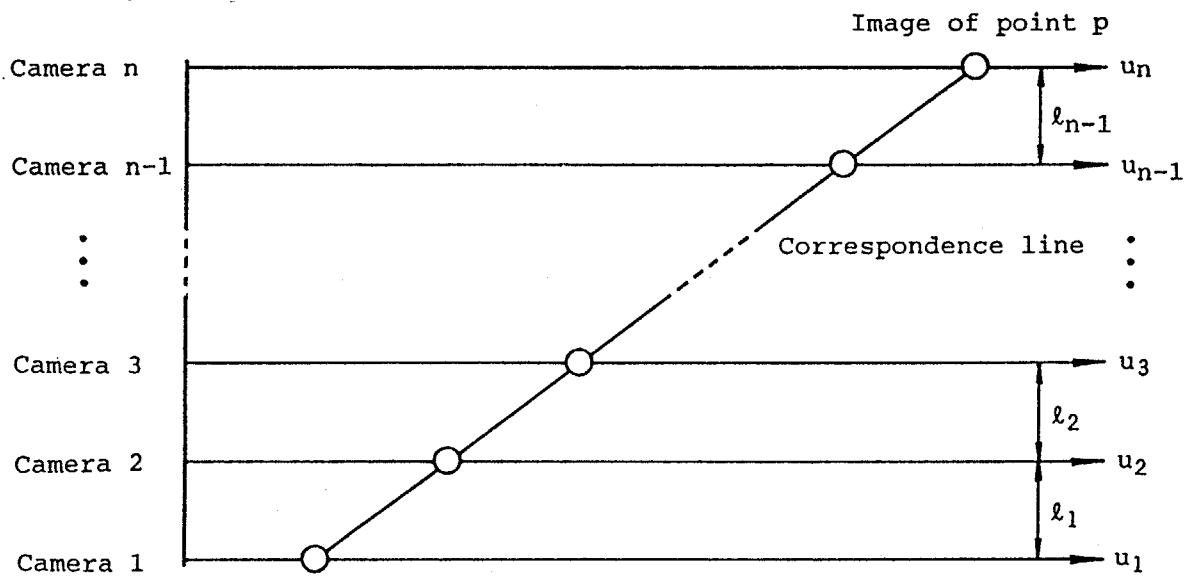


Fig.3-4 Occurrence of correspondence line

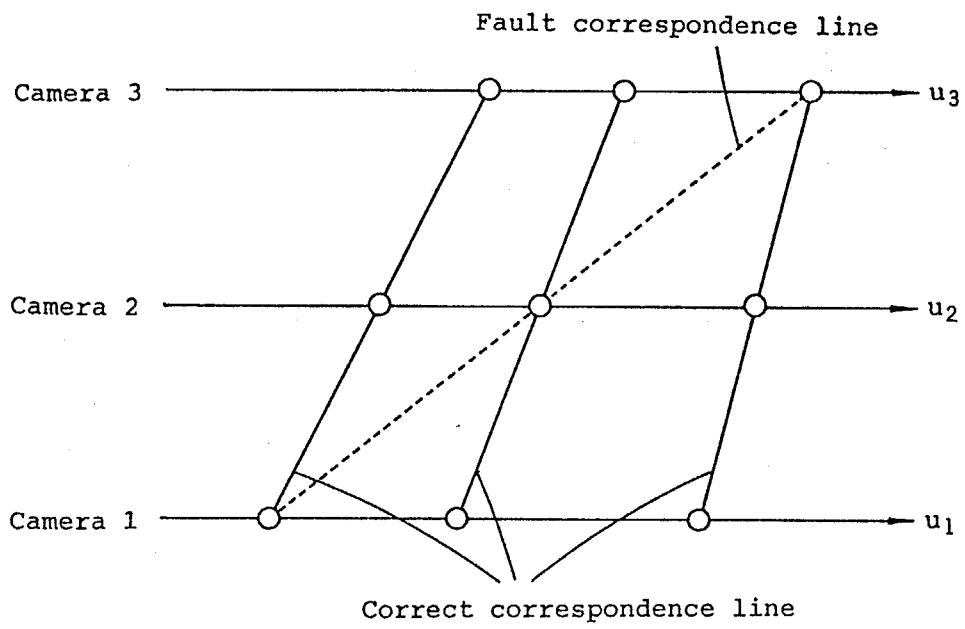


Fig.3-5 Occurrence of fault correspondence

個、カメラ n で m_n 個の特徴点が検出されたとすると、それぞれを結ぶ $m_1 \times m_n$ 個の直線について対応直線であるか判定する必要がある。よって1つの対応直線を判定する時間を T_0 とすると、1走査線の対応点決定に要する処理時間 T_p は

$$T_p = m_1 \cdot m_n \cdot T_0 \quad (3-4)$$

と見積られる。たとえば $m_1 = m_n = 15$, $T_0 = 0.25 \mu \text{sec}$ (4 MHz) とすると、 $T_p = 56 \mu \text{sec}$ となる。これはテレビカメラの1走査線 $64 \mu \text{sec}$ 以下であり、著しく高速で実時間的な処理が可能であることを示している。

なお実際の装置では、Fig. 3-6 のように各カメラをそのレンズ中心点に対し y 方向にずらし、共通視野を広げるものとする。この場合の変更点は各カメラの位相にその移動量に相当する一定のオフセットを加えることだけであり、本質的な変更は必要としない。

また、以下では n 台のカメラは等間隔に配置するものとする。カメラを平均的にできる限り分離することで、位相の量子化に伴う影響を最小とするためである。ただしこのようにすると、周期的なパターンを計測した場合、Fig. 3-7 のように常に偽対応は発生するが、ここではそのような特殊な場合については考えないことにする。

3-4 多眼位相差法の処理手順

多眼位相差法の具体的な処理は、以下のように行う。

- 1) 走査線ごとに特徴点を求める
- 2) カメラ1の特徴点とカメラ n の特徴点のすべての組合せについて判定を行い、対応直線を求める。
- 3) 得られた対応の3次元座標を求める

対応直線の判定は以下のように行う。まず、注目するカメラ1の特徴点とカメ

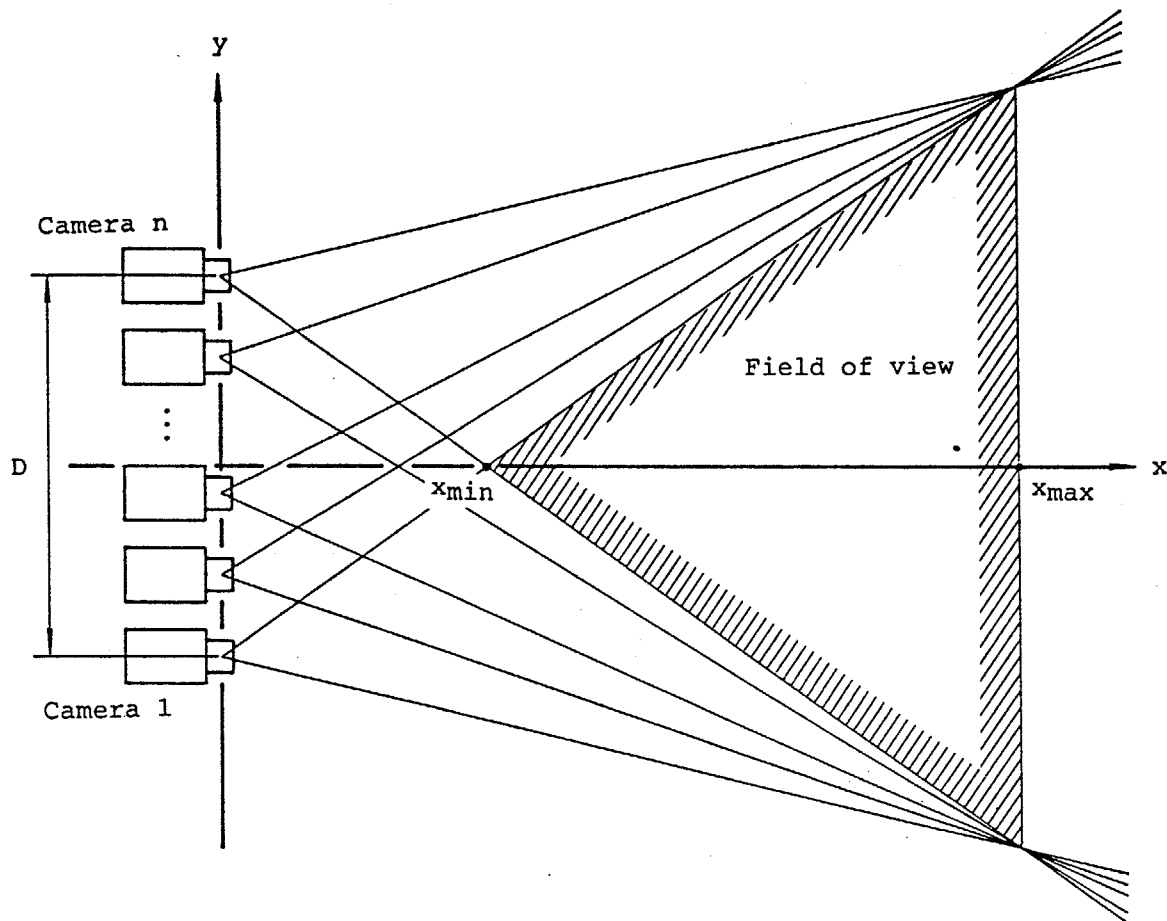


Fig.3-6 Field of view of the multi-camera system

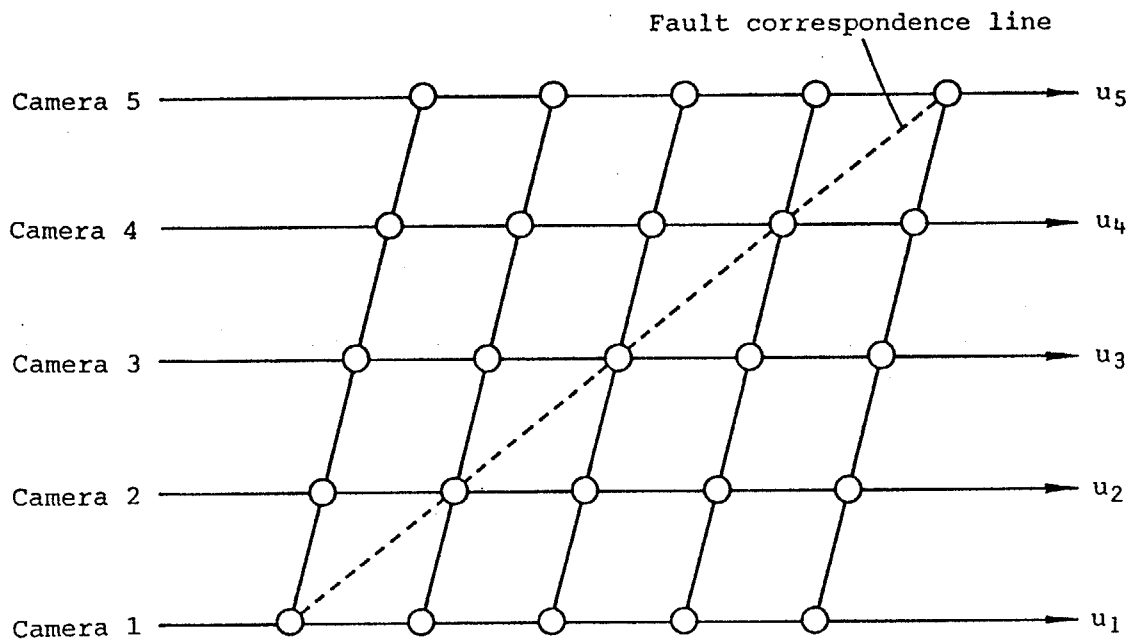


Fig.3-7 Fault correspondence caused by periodical pattern
 (number of camera $n = 5$)

ラ n の特徴点を直線で結び、対応直線の候補を得る。次にその直線と走査線との交点から、それが対応直線であった場合に存在すべきカメラ 2 ~ n - 1 における特徴点の位相を求める。そして各カメラで特徴点の存在を調べ、すべてで特徴点があった場合にその候補を対応直線と判定するというものである。ただしカメラ 1 の特徴点の位相 u_1 とカメラ n の特徴点の位相 u_n に対し、

$$u_1 \geq u_n \quad (3-5)$$

となる組合せは明らかに (3-3) 式と矛盾するためただちに棄却する。

実際の装置では、位相の値はカメラの水平解像度で定まる範囲の整数で量子化される。よって量子化誤差を考慮しないと真の対応も検出できない状態が発生する可能性は高いと考えられる。そこで、カメラ 2 ~ n - 1 の特徴点の存在を確認する際、推定された位相だけでなくその近傍に特徴点が存在するか否かを調べることにする。このときカメラ 1、n の量子化誤差はカメラ 2 ~ n - 1 の量子化誤差に換算されると考える。

位相の量子化の様子を Fig. 3-8 に示す。整数化された位相 u_1^* と位相 u_n^* が対応する場合、整数化が切上げによるとすると、量子化される以前の正しい対応直線は図の斜線部のどこかに存在する。よって、カメラ i における整数化された位相は u_i^* または $u_i^* - 1$ である。したがってカメラ i に特徴点が存在するか否かは、 u_1^* 、 u_n^* を結んだ直線と走査線との交点の位相を切上げた整数値 u_i^* および $u_i^* - 1$ について調べればよい。これは、カメラ 2 ~ n - 1 について特徴点の幅を 2 画素とすることに相当する。

なおオクルージョンを生じた場合、本手法では隠された点の計測は行わない。移動ロボットに搭載した場合、視点の移動に伴いオクルージョンが回避される可能性が高いためと、MARS には 1 - 2 で述べたように死角域の形状を補間する情報処理系を導入するためである。より一般的には、ある台数以上のカメラで直線状に並ぶ特徴点の集合が発見された場合、そのカメラ数で評価される信頼性を有する対応直線として求めてゆくことが考えられる。

2) の操作の結果、ある走査線 v^* において (u_1^*, u_n^*) が一般には複数個求められる。 (v^*, u_1^*, u_n^*) からは、

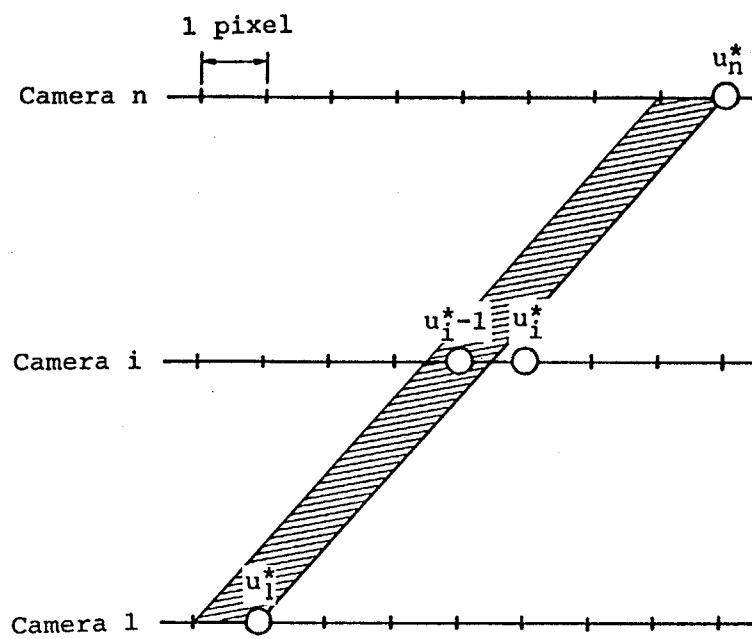


Fig.3-8 Effect of quantization of phase u

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{f D}{u_n - u_1} \\ y = -\frac{D}{2} + x \frac{u_0 - u_1}{f} = x \frac{2u_0 - u_1 - u_n}{2f} \\ z = x \frac{v_0 - v}{f} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (3-6a) \\ (3-6b) \\ (3-6c) \end{array}$$

$$u_1 = \frac{w}{N_p} u_1^*, \quad u_n = \frac{w}{N_p} u_n^*, \quad v = \frac{h}{N_l} v^* \quad (3-7)$$

ただし f : レンズ焦点距離

D : カメラ 1 とカメラ n の間の距離

(u_0, v_0) : 光軸が画面と交わる点の (u, v) 座標

N_p, N_l : 水平および垂直解像度

w, h : イメージセンサの幅および高さ

によって 3 次元座標 (x, y, z) は求められる。ここでは y 軸の原点はカメラ 1 とカメラ n の中央に設定している。

ところで上記の処理手法では計測点の密度をそれほど高くできない問題がある。1 種類の特徴点を扱い、しかもその数には偽対応の発生率から定まる上限があるからである (3-5 参照)。この問題に対し提案する手法では、異なる種類の特徴点について独立に処理する手法を導入する。特徴点は、輝度の立上り点、立下り点だけでなく種々のものが考えられる。カラーカメラを用いれば、RGB のそれぞれについて立上り点、立下り点が特徴点として求められる。また計測点からの反射光量がカメラによらず一定であるとみなされる場合には、輝度の絶対値を用いることが可能である。たとえば、Fig. 3-9 のように、輝度があるしきい値以上となる瞬間の点やしきい値以下となる瞬間の点を特徴点として検出することが考えられる。この場合にはしきい値によって多くの種類の特徴点を検出することが可能である。ただし近距離の計測物体の場合は、カメラにより観測方向が大きく異なり入射光量に変化するため、この処理は使用し難いと予想される。近距離でしかも際だった特徴点をもたない物体の計測を行うためには、能動的に参照光を投射し、物体表面に特徴点を生成すればよい。これは一種の能動方式を構成

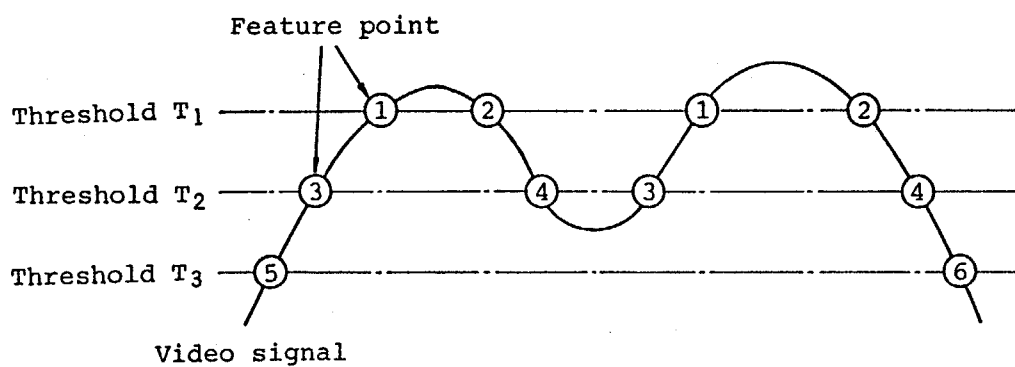


Fig.3-9 6 kinds of feature points detected by slicing

するが、通常のレーザレンジファインダと大きく異なる点は、参照光は単に物体表面に模様を付加することが目的であるため光源は何であってもよく、しかもその精度も問題とならないことである。

異なる種類の特徴点は、Fig.3-10のように独立に処理を施して対応を求める。これにより、各処理で考慮する特徴点の数を偽対応の発生率から定まる上限値以下に抑えることができる。しかもそれぞれの処理は完全に独立しているため、複数のハードウェアを用いた並列処理が可能である。

以上の処理法によれば、多くの特徴点について実時間で正確に対応を決定することが可能であると思われる。

3-5 計算機シミュレーションによる多眼位相差法の実現性の評価

提案する多眼位相差法の実現性は、偽対応の発生状況で判断されると考えられる。その評価は、S Vを試作し、計測実験を様々な場面において行うことで検証すべきであると思われる。しかしその実施には多大の時間と労力を必要とする。一方、計算機シミュレーションは、その環境の特性が明らかになっている場合には有効な情報を比較的簡単な処理で与える。

本論文では3-6においてS Vを試作し、それによる計測実験を行う。しかし、その計測条件は数種に限られ、偽対応がどの程度の頻度で発生するかという問題に対し定量的なデータを与えることは困難である。そこで本節では、計算機シミュレーションによる評価を行う。これは、試作するS Vの設計指針を与えるだけでなく、偽対応の発生について定量的な評価をも与える。

3-5-1 計算機シミュレーションの手順

提案する多眼位相差法は、カメラを増すことで偽対応が発生する確率を減少させる。したがって、本手法が実用できるか否か、またできるとすればカメラを何台用いるのが適切であるかは、偽対応の発生頻度で決定すべきである。そこで、

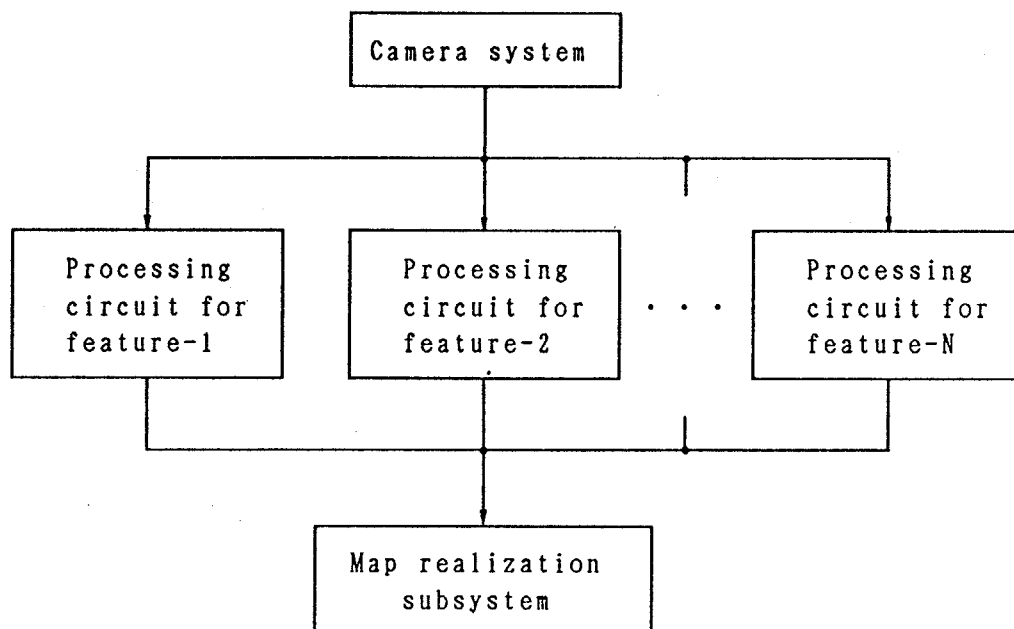


Fig.3-10 Parallel processing for N kinds of feature points

偽対応の発生頻度を見積る計算機シミュレーションを行った。なお偽対応の発生は、

「1 走査線に対応する視野に m 個の計測点を一様ランダムに配置したとき
それらの像が干渉して発生する偽対応の平均個数 N_f 」

で評価する。 $N_f = 1$ が計測が可能であるか否かの目安を与えると考えられる。また、ここではオクルージョンについては考慮しないが、オクルージョンを生じ特徴点が減少すると偽対応の個数も減少するため、 N_f は偽対応の平均個数の上限を与えると考えられる。また上記の評価は、視野を $x-y$ 平面に投影すればわかるように、走査線番号 v には依存しないことを注意しておく。

このような評価を行うためにはモンテカルロ法が適している。その具体的な手順を以下に示す。

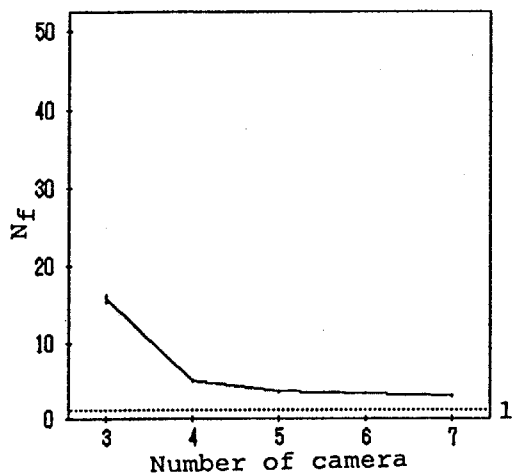
- 1) 乱数を用い、視野 (Fig.3-6 参照) に一様な確率で m 個の点を生成し、各カメラにおける像の位相 u_i ($i = 1 \sim n$) を求める。
- 2) 多眼位相差法の処理を行いすべての対応直線を求め、
偽対応数 = (対応直線の総数) - m
を求める。
- 3) 1), 2) を十分な回数だけ繰り返し、偽対応の平均数 N_f を求める。

なお $S-V$ の全幅 D はカメラ数 n によらず一定と仮定する。

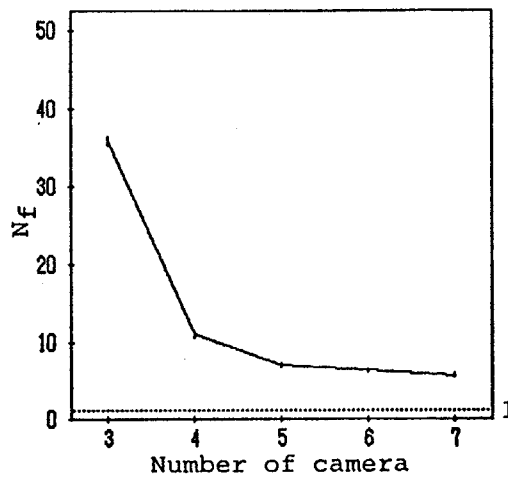
3-5-2 計算機シミュレーションの結果とその考察

3-5-1 で述べた手順にしたがって、計算機シミュレーションを行った。その結果を Fig.3-11 に示す。

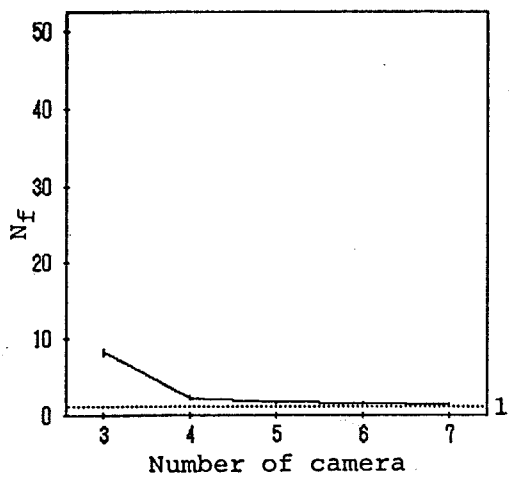
走査線の解像度は 256 と 512 について調べた。通常の白黒テレビカメラのビデオ周波数は 4 MHz に制限されているため、標本化定理から定まる水平解像



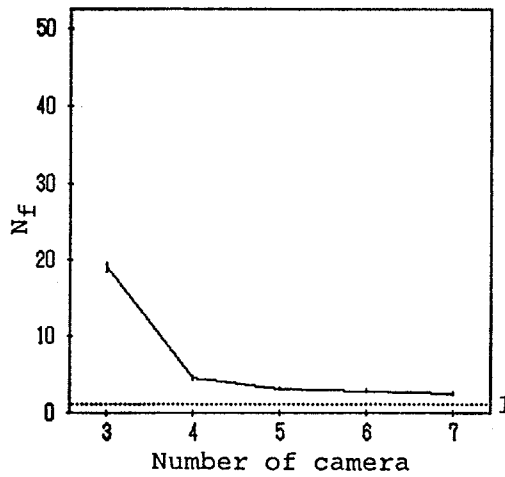
(a) 256 pixels/line, m=15



(b) 256 pixels/line, m=20



(c) 512 pixels/line, m=15



(d) 512 pixels/line, m=20

Fig.3-11 Average number of fault correspondence N_f estimated by Monte Carlo simulation
 ($x_{max}=20$ (m), $D=440$ (mm), $f=16$ (mm), $w=8.8$ (mm))

度の上限は 422 となる。よって、解像度 512 は標準白黒テレビの限界の値である。

モンテカルロ法は 100 試行を 1 組として 10 回行い、合計 1000 回の平均値を求めた。各点には 10 回の平均値の標準偏差を示してある。この大きさが小さいことから、得られたデータの精度が十分に高いことがわかる。

Fig. 3-11 の結果から、カメラを増すことによって、偽対応の発生が抑えられることがわかる。分解能が増すと、当然のことではあるが、成績は向上している。しかし、いずれの分解能でも、カメラ増設の効果はカメラ数が 5 以上では飽和し完全に 0 とはならない。残留した偽対応は量子化誤差によるものと考えられる。その発生状況は Fig. 3-12 (a) に例示されている。このような偽対応による $x y$ 平面上の偽の点は、Fig. 3-12 (b) のように真の座標のごく近傍に生成される。つまり、Fig. 3-11 のシミュレーション結果が示す偽対応には、実質的には大きな障害を与えないものが多く含まれていると考えられる。

そこで、 u_1^* (u_n^*) を共通とし u_n^* (u_1^*) の近傍 $\pm k$ 画素以内に特徴点をもつ Fig. 3-12 (a) のような対応直線は偽対応とみなさない評価を行った。その結果を Fig. 3-11 の結果と合わせて Fig. 3-13 に示す。このように、Fig. 3-11 の偽対応の多くが $k = 1$ の偽対応であったことがわかる。 $k = 2$ とすると、カメラ数が増した場合、偽対応の発生はほとんど 0 となる。なお、このような判定を行うことは、等価的に計測誤差の許容値を増していることに相当する。具体的には、奥行き方向については量子化誤差による値の $(k + 1)$ 倍の誤差を許容することになる。

以上の結果から、カメラを 5 台用いれば考慮すべき偽対応は実用的には十分に低くでき、確実性の高い対応点決定が行えることがわかる。この場合、 $k = 1$ のとき $N_r = 1$ となる m を測定可能な計測点の数とすると、解像度 256 のとき約 15 個、解像度 512 のとき約 20 個までは偽対応少なく計測できることを、この実験結果は示している。

なお以上の結果はパラメータ x_{max} により若干変化する。 x_{max} が小さくなると各カメラの視野の重なる割合は小さくなる。よって共通の視野に含まれない画素の割合が増し、等価的に水平解像度が低下するためである。ただし x_{max} がある程度大きい通常の場合、その変化は十分に小さい。

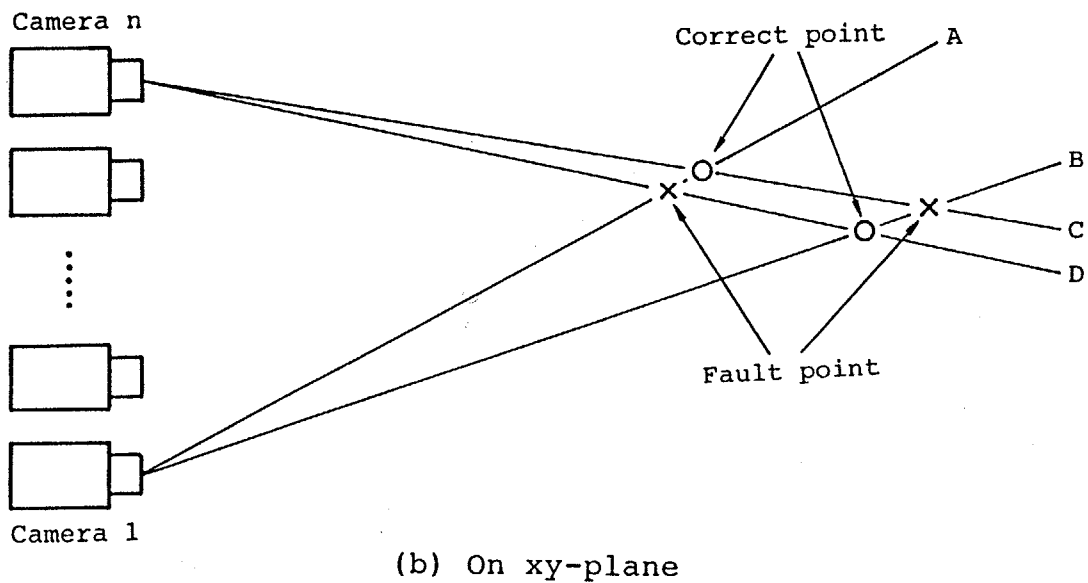
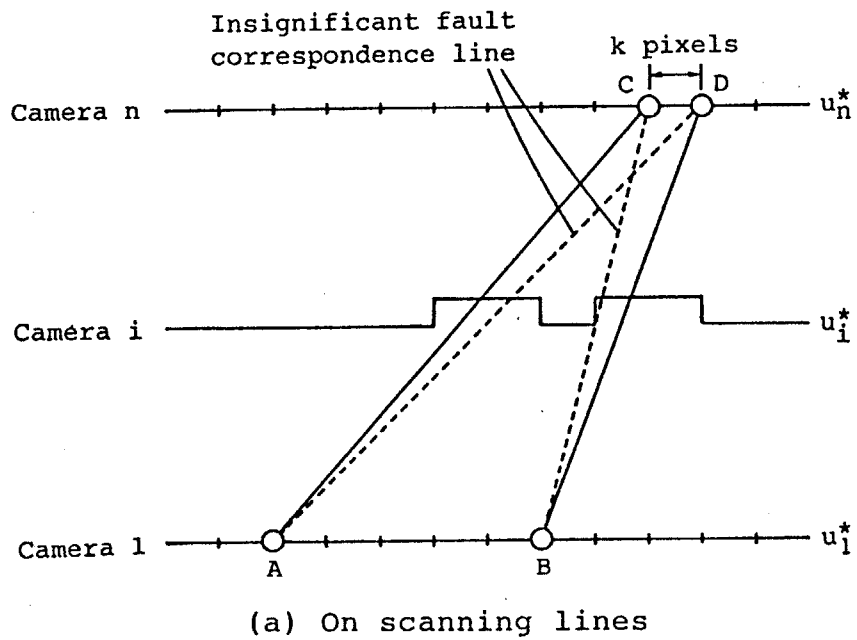
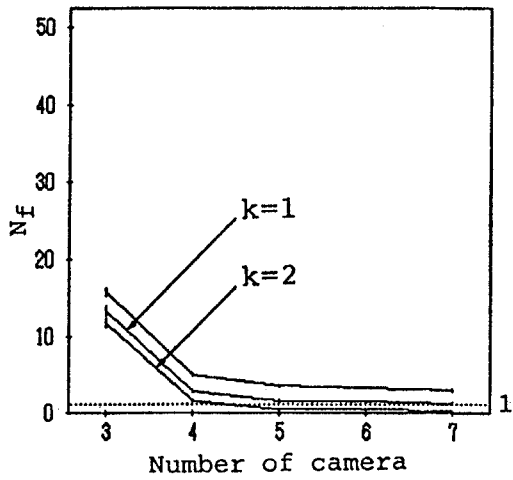
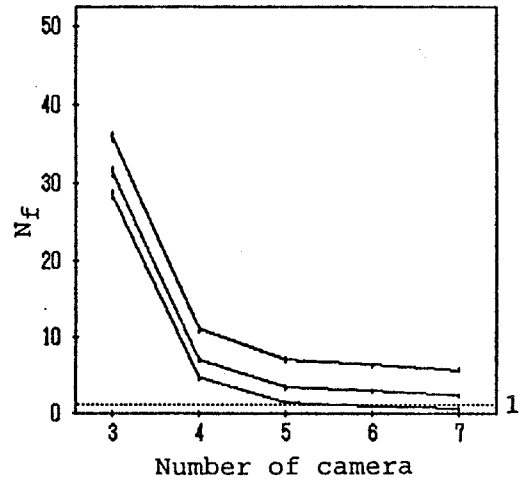


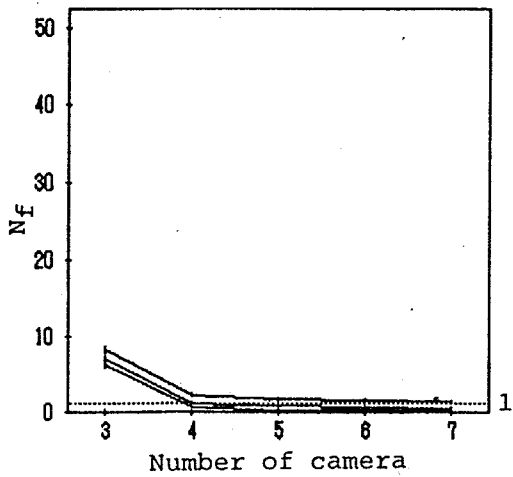
Fig.3-12 Insignificant fault correspondence caused by quantization effect



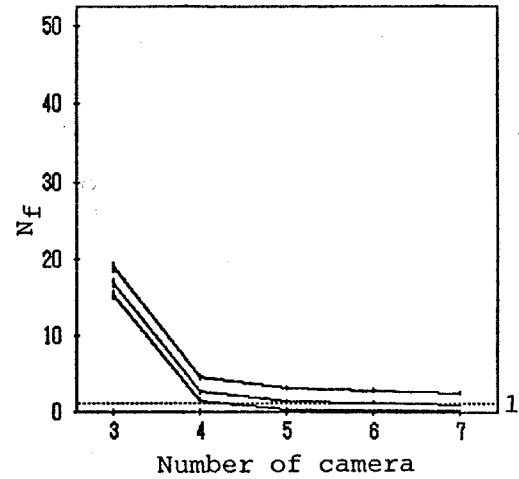
(a) 256 pixels/line, m=15



(b) 256 pixels/line, m=20



(c) 512 pixels/line, m=15



(d) 512 pixels/line, m=20

Fig.3-13 Average number of significant fault correspondence N_f
 ($x_{max}=20$ (m) , $D=440$ (mm) , $f=16$ (mm) , $w=8.8$ (mm))

3-6 多眼位相差法 S V の試作

3-6-1 カメラ系の試作と予備実験

まず多眼位相差法で使用する Fig. 3-14 のようなカメラ系を試作した。

本装置は基本的有効性を検証することを目的とし、安価な白黒 CCD カメラ XC-57 (SONY 製) を 3-5-2 の結果を基に 5 台用いた。イメージセンサの大きさは 8.8×6.6 mm、画素構成は 510 (横) \times 492 (縦) であり、カメラ間の同期を垂直および水平同期信号で行うものである。レンズの焦点距離は、水平面における視野の広さから標準レンズの 16 mm を採用した。ただし、製作上の都合と比較的遠距離の計測を考えたことから、本装置では各カメラをレンズ中心点に対し外側にずらす構成は行っていない。

試作カメラ系の全幅は、移動ロボットへの搭載のためコンパクト化を考え 490 mm とした。カメラ間隔は等しく 110 mm である。

なお本装置における位相の量子化による x 方向の計測誤差は、水平解像度を 256 とすると $x = 10, 20$ m においてそれぞれ $\pm 4.9, \pm 9.8$ % である (付録 C 参照)。

通常このような複数のカメラ系では、光学系のひずみやカメラの取付誤差、および位相の検出誤差のため、対応する特徴点が直線状に並ばなくなることが懸念される。そこで、まずその特性を検討する予備実験を行った。その手順は以下のようである。

- 1) 試作したカメラ系で鉛直の柱状物体を計測する。
- 2) 特徴点はビデオ信号の立上り点とし、ビデオ信号を差分回路 (差分時間 $0.6 \mu \text{sec}$) で差分、2 値化し、その立上りのタイミングをロジックアナライザで測る。
- 3) 多眼位相差法の処理を得られたタイミングについて行い、対応直線を求める。ただし、タイミングは水平解像度に応じて整数化し、位相の値に変換する。またカメラの水平方位の微小なずれは、位相にオフセットを加えることにより補正する (Fig. 3-15 参照)。

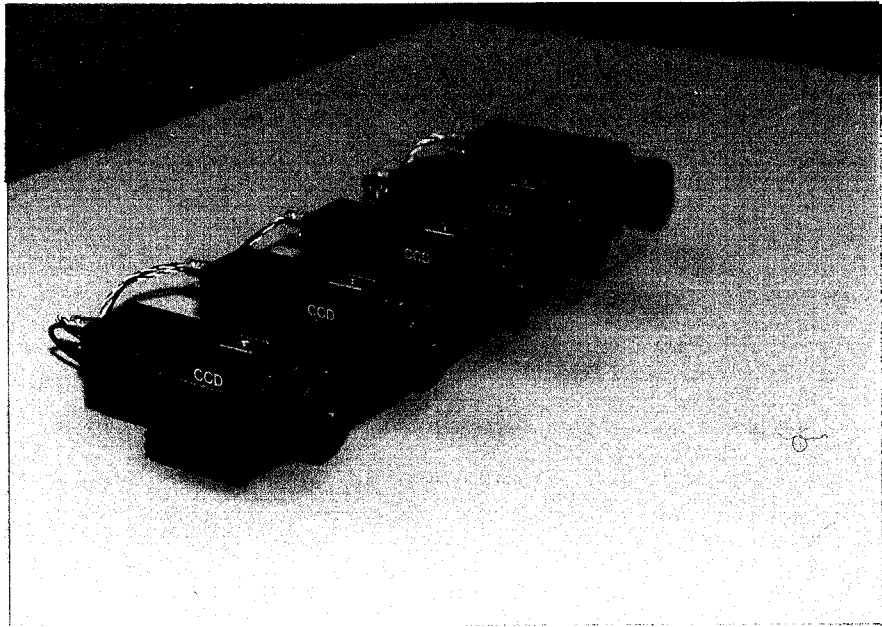
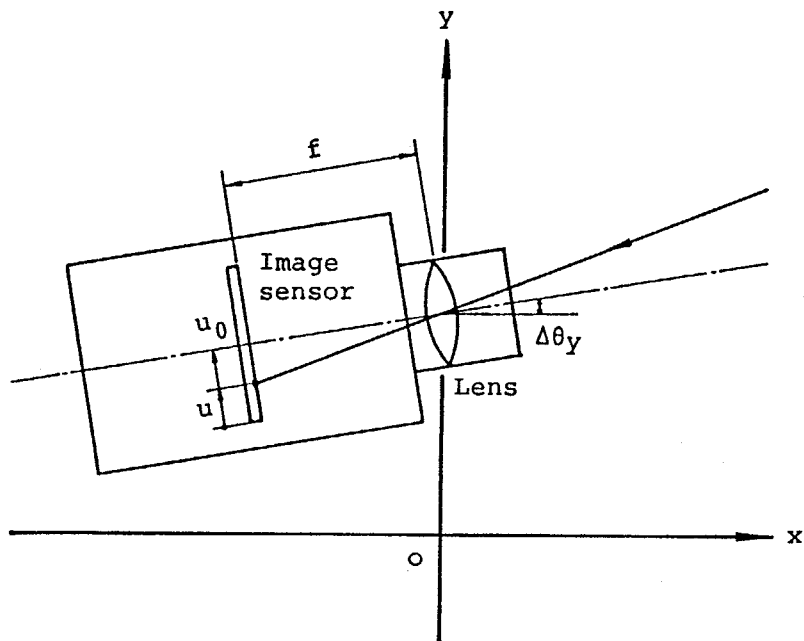


Fig.3-14 Constructed camera system for
multi-camera phase difference method



$$u' - u_0 = -f \cdot \sin \Delta \theta_y + (u - u_0) \cos \Delta \theta_y$$

$$\therefore u' \approx u + C \quad (C = -f \cdot \Delta \theta_y : \text{const.})$$

u : Measured value
u' : Correct value

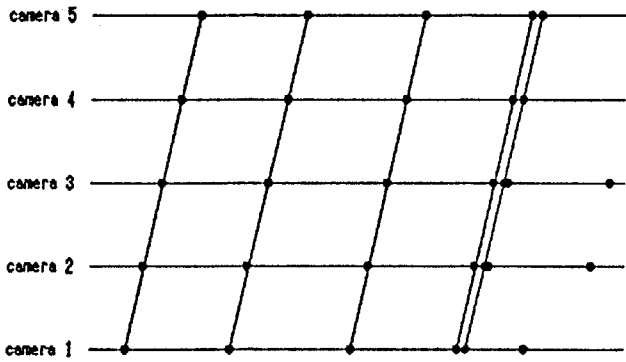
Fig.3-15 Effect of camera setting error in yaw rotation

結果を Fig. 3-16 に示す。これは画面の中央の走査線における結果であるが、画面上方の走査線でも同様な結果が得られている。解像度 256 の場合は、Fig. 3-16 (a), (b) に示すように対応直線が十分に高い精度で得られており、カメラの取付誤差、位相の検出誤差などの影響は十分に小さいことが確認された。また Fig. 3-16 (b) に示すように、画面の左端から右端に伸びる対応直線も高い精度で求められている。このことから、レンズ系のひずみによる影響も十分に小さいことが確認できた。ただし解像度を 512 とすると Fig. 3-16 (c) のように精度は十分でない。この原因は、主に光学系による画像のひずみであると考えられるが、容易に改善することが可能である。たとえば、ある画面上の座標 (u^*, v^*) が入力されたとき正しい座標 u^{**}, v^{**} を出力するテーブル $u^{**}(u^*, v^*)$, $v^{**}(u^*, v^*)$ を用意すればよいからである。また、差分の 2 値化の立上り位置は、波形によって若干変動することが予想されるが、2 階微分のゼロクロス点を検出すれば安定に検出できると言われている。これらの改良により、解像度 512 についても安定した特徴点抽出が可能となると思われる。

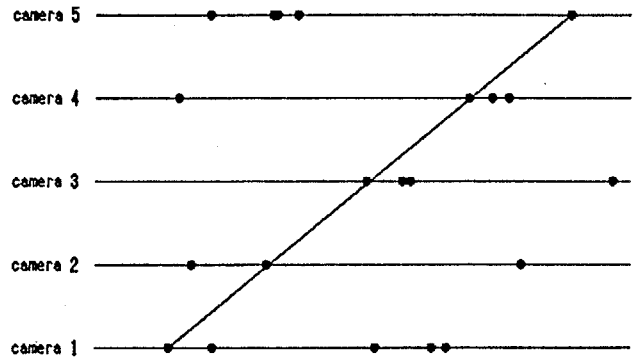
このように、多眼位相差法実現の際大きな問題となると考えられていたカメラ系の精度は、解像度 256 の場合には、実測によるとかなり良好なものであることがわかった。解像度 512 の場合はこのままでは十分とは言えないが、改良可能であると思われる。今回は、処理回路製作の都合上水平解像度を 256 とするため、この程度の精度で問題ない。

3-6-2 対応付けを行う処理回路

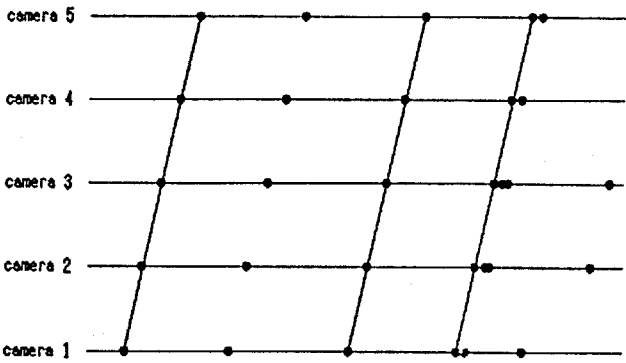
対応直線を求める処理回路は、具体的には Fig. 3-17 に示すように構成した。ここで RAM 1 および RAM 5 には、カメラ 1 とカメラ 5 から得られる特徴点の位相 u_1^* , u_5^* の値をそれぞれ順番に記憶しておく。特徴点は、ビデオ信号を微分回路（1 次進み回路）で微分し、その出力を 2 値化して得られる立上り点としている。水平解像度は、ビデオ信号をクロックパルスで分割し、256（ただし、有効範囲は 20~248）としている。一方 RAM 2~4 には、カメラ 2~4 からの信号により各位相に特徴点が存在するか否かを 0, 1 で表わし記憶しておく。



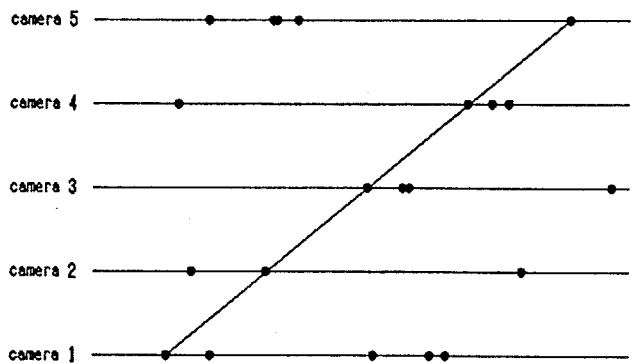
(a) Correspondence lines for objects 8(m) away (256 pixels/line)



(b) Correspondence line for object 1(m) away (256 pixels/line)



(c) Correspondence lines for objects 8(m) away (512 pixels/line)



(d) Correspondence line for object 1(m) away (512 pixels/line)

Fig.3-16 Results of experiment on accuracy of the camera system

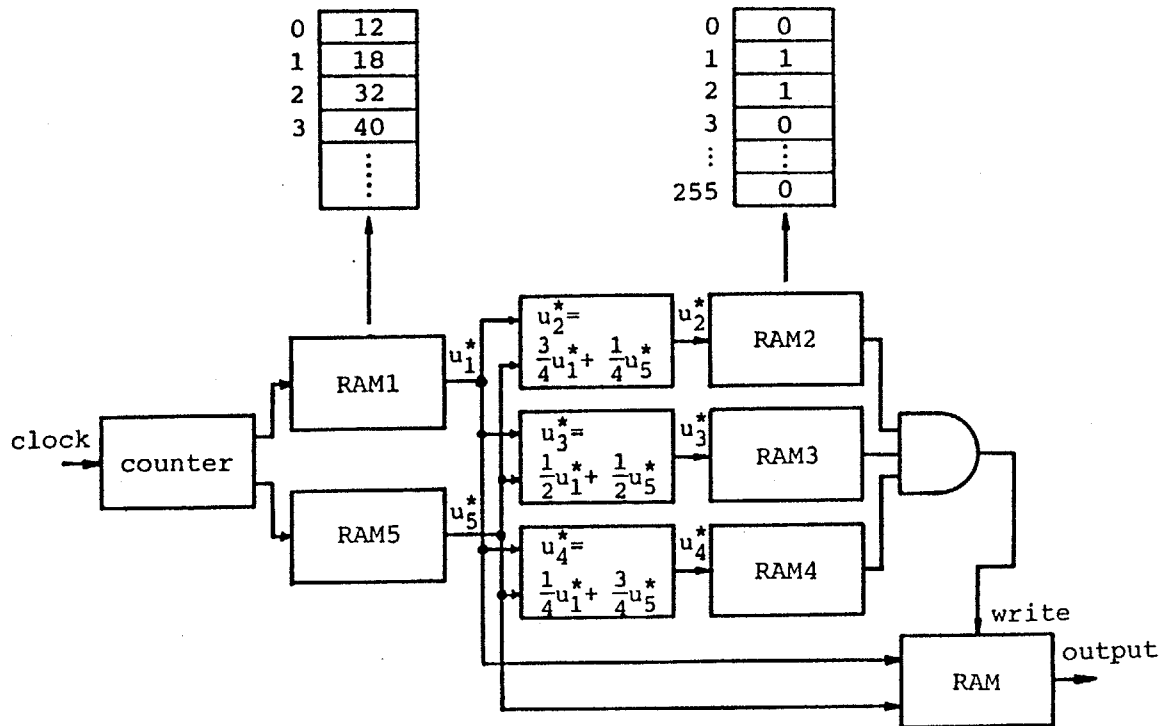


Fig.3-17 Block diagram of the correspondence extraction circuit

ただし 3 - 4 で述べたように、位相の量子化誤差を吸収するため、1 つの特徴点に対し連続する 2 画素に 1 を立てる。

このように特徴点が記憶されているとし、本処理回路は次のような動作を行う。まず u_1^* , u_5^* を読み出し、 $u_1^* < u_5^*$ ならばそれが対応直線上にあると仮定して u_2^* , u_3^* , u_4^* を求める。次に、求められた u_2^* , u_3^* , u_4^* のすべてで特徴点が存在するか否かを RAM 2 ~ 4 を読み出して調べ、存在する場合に u_1^* , u_5^* を対応するデータとして記録する。以上の処理はすべての u_1^* , u_5^* の組合せに対し行う。

u_1^* , u_5^* の記憶データはそれぞれ 15 個までとし、それ以上の入力があった場合には偽対応の発生が過大となるため計測不能と判定する。最終的に得られる対応は 31 個まで記憶可能である。これ以降検出されたものは無視される。1 走査線における特徴点数が 15 のとき、小さな誤差しか生じないものを含むすべての偽対応の平均数が 3.5 であるから、記憶データ数 31 は十分に余裕があると考えられる。またクロック周波数は $f = 4.3 \text{ MHz}$ とした。よって 1 走査線の最大組合せ数 225 に対し $52.3 \mu \text{ sec}$ で処理可能である。1 走査線の走査時間は

$64 \mu \text{ sec}$ であるから、この間に処理を行うことができる。したがって計測は偶数走査線で行い、続く奇数走査線で対応点決定を行うことができる。結果として走査線ごとに (u_1^*, u_5^*) の組が順番に記憶される。記憶アドレスを走査線番号に対応させることで v^* の値は間接的に記憶される。

(v^*, u_1^*, u_5^*) の組から (3-6) 式、(3-7) 式を用いて 3 次元座標は求められる。その演算を高速に行う方法としては、テーブル参照法が考えられる。今回は、ソフトウェアによる演算を行った。プログラムをアセンブリ言語で記述した結果、演算時間は実測で 1 点につき $12 \mu \text{ sec}$ である (マイコン PC-9801 RA (NEC 製、CPU 80386、クロック 16 MHz) を使用した場合)。したがって、1 画面のデータ $31 \times 119 = 3689$ 個 (ただし、この中で独立なものは $15 \times 119 = 1785$ 個) を得るために要する演算時間は 44 msec であり、十分に高速に 3 次元座標が得られることがわかった。処理回路の制御なども考えると、実際の計測時間は最大で 61 msec である。

3-7 計測実験

試作したSVを用いて計測実験を行い、多眼位相差法の有効性を検証する。

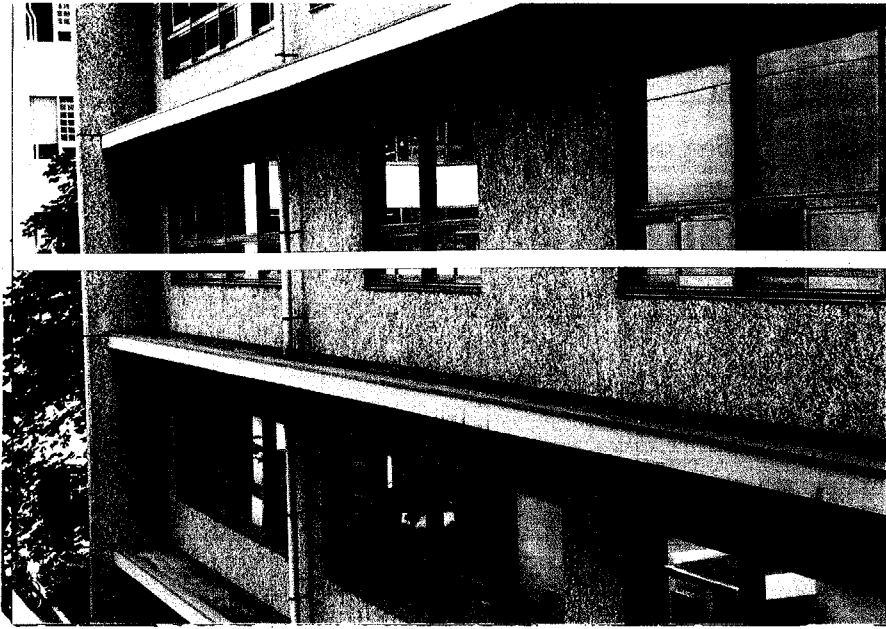
まずSVの1つの長所である遠距離計測の可能性を示すため、Fig.3-18 (a)のような8 m 前方の建物までの距離を測った。特徴点はビデオ信号の立上りとしているため、Fig.3-18 (a) に示した白線の部分では窓枠の点が検出されている。その水平面上における位置を求めると Fig.3-18 (b) のようになる。座標と共にひし形の誤差領域も示した。遠距離の計測が実現されることが確認された。

次に本手法の最大の利点である実時間性を検証する実験を行った。Fig.3-19 (a) のように約 1.6 m 前方の対象物にスリット光を走査しながら投射し、移動する特徴点の3次元座標を連続的に計測した。結果を Fig.3-19 (b) に示す。これは連続する2回の計測につき1回の割合で計測結果を保存しておき、すべての計測を行った後3Dグラフィクス表示したものである。スリット光の走査時間は (b)で約 2 sec、(c)で約 1 sec である。(b)に示すように密度の高い計測が行われており、実時間性は実証されたと思われる。なおスリット光の走査速度が増した (c)の場合計測が困難となっているのは、CCDの蓄積時間内に像が移動することにより画像にぼけを生じ、位相の検出誤差が増しているためと思われる。これについては、いわゆるシャッターカメラを用いれば解決できると思われる。

3-8 本章のまとめ

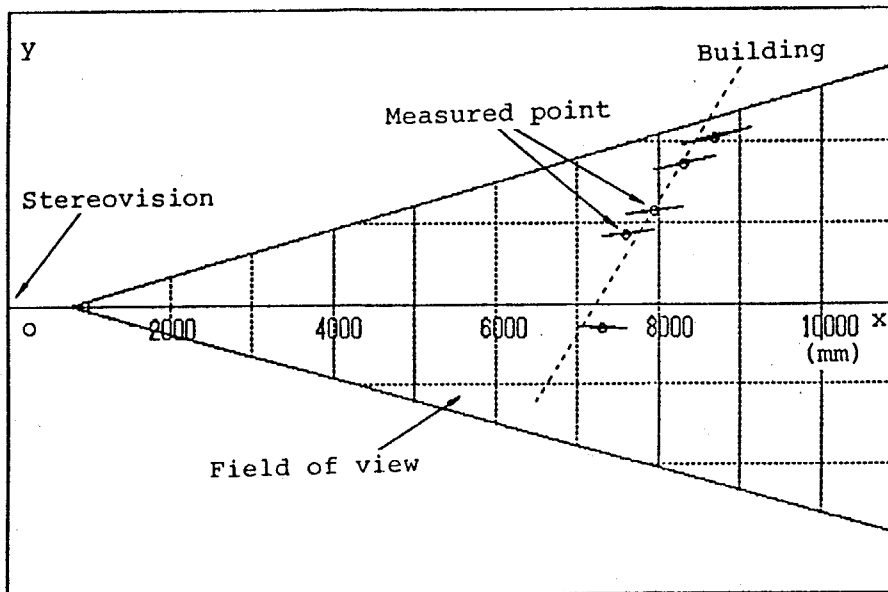
本章では、SVの最も大きな障害と考えられる実時間性の問題を解決するため、複数のカメラから成る冗長計測系を用い、対応直線の探索という簡単で高速な処理を特徴とする「多眼位相差法」を提案した。その実現性を計算機シミュレーションにより定量的に検討した。そしてその結果を基に5台のカメラから成るSVの実モデルを試作し、計測実験を行った。その結果は、本手法が、1画面の最大1800点について60 msec 程度の実時間計測を行えることを示した。

なお、SVの全幅Dおよびレンズの焦点距離fを適当に選択すれば、より遠距



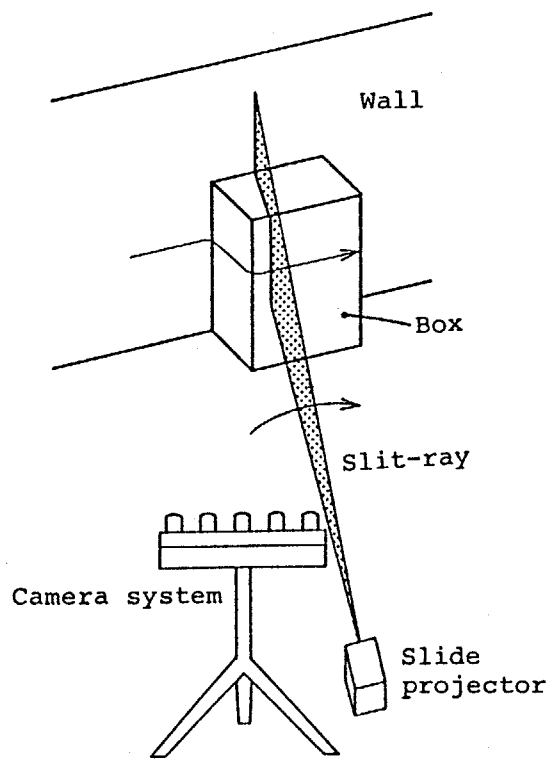
A sampled horizontal plane

(a) Object scene

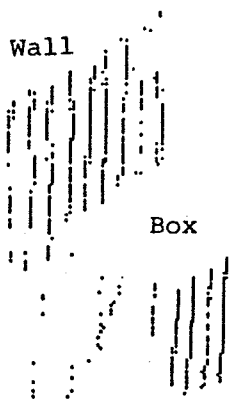


(b) Measured result on the horizontal plane shown in (a)

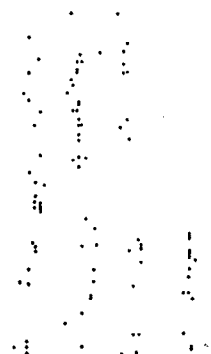
Fig.3-18 Experiment for measuring object points at distance of 8 (m)



(a) Condition of the experiment



(b) Measured result with 2(sec) slit-ray scanning



(c) Measured result with 1(sec) slit-ray scanning

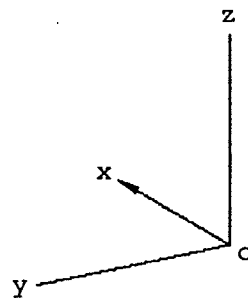
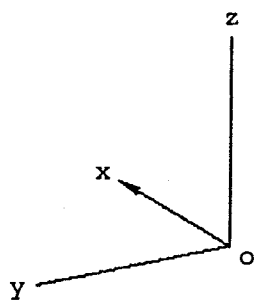


Fig.3-19 Real-time measuring experiment with the proposed method and slit-ray projection

離の計測についても精度良く実行することが可能である。たとえば 8.8×6.6 mm の CCD を水平解像度 512 で使用する場合、 $D = 600$ mm, $f = 28$ mm と設定すれば、100 m 前方における x 方向の計測誤差を ± 10 % 以下とすることが可能である（付録 C 参照）。

最後に、多眼位相差法は MARS という移動ロボットのための視覚センサとして開発したが、他の多くの視覚センサの応用分野にとっても著しく有効であることを強調しておきたい。

第 4 章

可視域の地形を表わす 第 1 次地図の生成

第4章 可視域の地形を表わす第1次地図の生成

4-1 まえがき

第2章および第3章で検討した3Dセンサから得られる膨大な3次元情報を整理しながら蓄積するため、第1次的な地図を生成する。第1次地図は、移動ロボットの周囲の可視域の地形を詳細に記述し、ナビゲーションのための情報を提供するものである。MARSで生成する最終的な地図は、この情報と死角域の補間情報(第5章参照)および画像解析系からの情報を統合して得られるものであり、移動ロボット近傍の地形を記述する局所的な地図と、より広範囲で特徴的な情報のみ記述する大局的な地図とから成る。

本章では、局所的な情報を記述する第1次地図の生成について具体的に論ずる。まず第1次地図の表現形式について検討する。次に移動ロボットの揺動と移動量をキャンセルし地図を生成する具体的な定式化を示す。これらの手法の有効性は、4足歩行機械TITAN IIIに搭載した視覚センサによる計測実験で検証する。

4-2 地図の表現形式

4-2-1 G型地形²⁸⁾による地形表現

MARSの最終生成物の1つである大局的な地図は、大きな山の位置、大きさ、大きな谷の位置、大きさなどの特徴的な情報のみを抽出して保持することが望ましい。しかし、移動ロボットの周囲の地形を詳細に記述する局所的な地図もまた重要である。移動ロボットが障害物を乗り越える際、地形に関する詳細な情報がなければ、その効率的な実施は困難だからである。

地形の3次元形状を記述する地図の表現形式としてはいくつか考えられるが、移動ロボットのナビゲーションへの利用を想定すると、地表上各点の高さ情報を記述する形式が適していると思われる。そこで本研究で用いる第1次地図は、移

動ロボットの周りの環境を水平面について格子状のセルに分割し、そのセルに対応した2次元配列に地表高さを記録する Fig.4-1 のような形式とする。このような地形表現を広瀬らは「G型地形」と呼んでいる²⁸⁾。G型地形として地形を記述すると、キノコ型のようなオーバーハングのある地形を計測した場合、同一セルに大きく異なる複数の高さ情報が存在することになるため、記述が不正確になる問題が生ずる。しかし、このような特殊な状況への対応までを考慮した地図表現に処理を拡張しようとする、処理時間がいたずらに長くなってしまふことが予想される。また一般の荒地地形では、このような状況を考慮しないですむ場合が多い。そこで本論文では、2次元配列のG型表現を地図表記の基本とする。

地図の各セルでは、地表が水平でない限りそのセル内の各点で地表高さは異なり、通常複数個の高さ情報が得られる。そこで、地図の各セルの高さは、その計測値の平均値として与えることにする。こうすると地図全体は平滑化され、現実的な地形表現が可能となる。しかし平均化処理を行ってしまうと、移動ロボットの移動障害となる段差や壁面も同時に平滑化され、その存在は逆に検出しにくくなる。

この問題を解決するため提案する第1次地図では、各セルごとに地表高さの平均偏差も求め、それも同時に地図情報として利用することにする。「平均偏差」とは、各セルの地表の高さのばらつき度合を示すものである。よって、段差、壁面、さらに鋭利な突起などを含むセルでは平均偏差は大きくなるため、その値を判別処理すれば障害物の存在を検出できると思われる。

4-2-2 円環メモリ表現の導入

移動ロボットのナビゲーションに利用する情報を得るためには、移動動作と同期した地形計測が必要である。このような移動ロボットのための視覚システムでは、計測した地形をメモリ空間に表記するための地図の形式に特別の考察を必要とする。たとえばメモリ空間にロボット位置を固定した表記形式をとると、ロボットの移動に伴い逐次地図全体をシフトしてゆく処理が必要となる。このような多量のデータ転送を伴う操作を実行し続けることは、実時間処理上望ましくない。

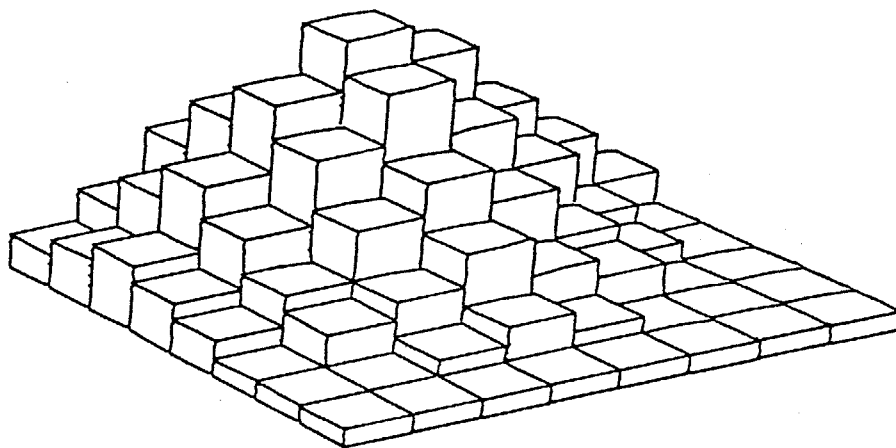


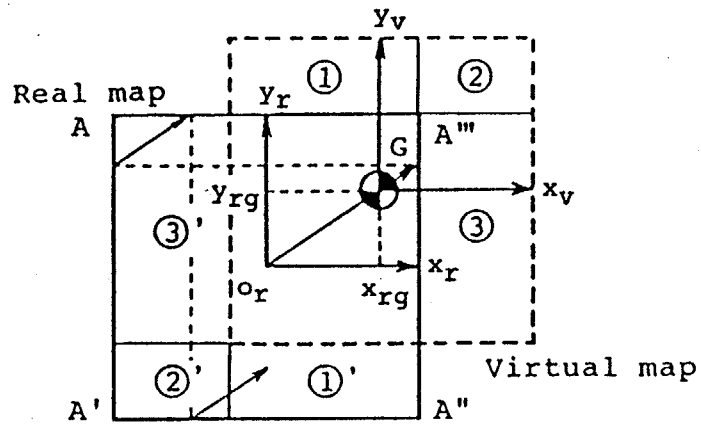
Fig.4-1 G-type terrain representation

一方、十分大きなメモリ空間に地表を固定し、その上をロボットが移動してゆく表記形式も考えられる。この場合データ転送は常に必要とはならない。しかし、必要以上のメモリ領域を確保しなければならない。またメモリの外周部にロボットが移動した場合には、大きな地図をメモリ上の始点に復帰するメモリ転送操作がやはり必要となる。

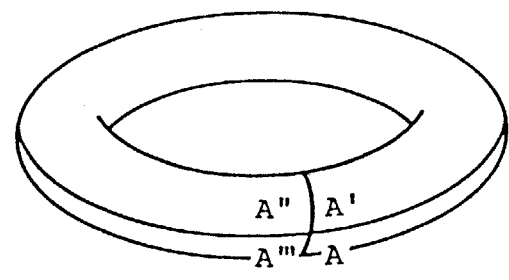
そこで本論文では、必要な地図領域と同じ大きさのメモリ領域を使用し、ロボットのメモリ空間に対する相対位置を指すポイントの値を更新することで、地図領域自体がメモリ空間上を連続的にロボットと共に移動してゆく新しい表記形式を導入する。提案する地図表記法の概念を Fig.4-2 に示す。Fig.4-2 において「実地図 (Real map) 」とは物理的にメモリ空間内に実在する地図、「仮想地図 (Virtual map) 」とはその領域がロボットと共にメモリ空間内を移動し観測している地形に対応するソフトウェア的に構築された地図と定義する。また Fig.4-2 の G 点は仮想地図の原点であり、ロボットの位置に対応する。

この G 点が、たとえば図の細線のように実地図上を右上に移動する場合を考えよう。このとき提案する方式では、仮想地図の実地図の x_r 方向限界を越えた領域③は、反対側の領域③' に書き込む処理を行う。ちょうど実地図の記憶領域が x_r 方向については円筒状につながっていると考えればよい。また y_r 方向についても同様な関係を適用し、①は①' に、②は②' に書き込む。このようにすると、概念上、実地図の記憶領域は Fig.4-2 (b) のように円環 (トーラス) を構成し、端がない記憶領域が実現される。よって仮想地図は際限なくこの記憶領域の上を移動できることになる。このようなメモリ空間における 2 次元配列の表記形式を以降「円環メモリ表現 (Torus memory representation) 」と呼ぶことにする。これは通信などに用いられるリングバッファ²⁹⁾ を 2 次元に拡張したものと考えられる。この考え方は、一般の n 次元の場合に拡張できる。

このような円環メモリ表現の地図は、一見その地図参照操作が複雑であり実用的でないように思えるが、実際はそうではない。なぜなら、地図の大きさを $2^8 \times 2^8$ セル、仮想地図上で任意の点 p が含まれるセルの要素番号を表わす座標を (x_v^*, y_v^*) 、実地図上のロボットを表わす G 点のセル座標を (x_{rg}^*, y_{rg}^*) とし、すべての変数を 8 ビット整数で表現しオーバーフローを無視すれば、実地図における点 p のセル座標 (x_r^*, y_r^*) は、



(a) Virtual map allocation in real map of memory area



(b) Conceptually constructed torus

Fig.4-2 Torus memory representation

$$\begin{cases} x_{r^*} = x_{v^*} + x_{rg^*} \\ y_{r^*} = y_{v^*} + y_{rg^*} \end{cases} \quad (4-1)$$

とすることで求められるからである。この演算はモジュール演算に対応するが、演算手順は著しく単純化されている。また地図の大きさをより一般的な $2^m \times 2^n$ セルとした場合も、シフト演算またはマスク処理により (4-1) 式と同様に容易に演算できる。移動する G 点のセル座標の更新についても、同様な演算で行うことが可能である (4-3-2 参照)。

提案する円環メモリ表現は、

- 1) 限定されたメモリ空間でロボットの移動に連続的に際限なく対応できる。
- 2) 移動に伴う操作は、ロボット位置座標 (x_{rg^*}, y_{rg^*}) を更新することとそれに伴う比較的少数のセルのイニシャライズ処理だけのため、高速な記憶処理が可能である。
- 3) 地図参照処理はほとんど複雑化されない。

などの特長を有している。なお 2) で必要なイニシャライズ処理についても、4-3-3 で述べる平均的にデータを累積する手法を用いれば、省略できる可能性がある。導入する計算法が、最初は無関係な初期値のため大きな誤差を含んでいたとしても、大量の計測データが入力されれば正しい値に漸近する効果を有するためである。

4-3 第1次地図の実時間生成

第1次地図生成過程で行う処理は、

- 1) 計測点の仮想地図上のセル座標 (x_{v^*}, y_{v^*}) の誘導
- 2) セル座標 (x_{v^*}, y_{v^*}) の実地図上のセル座標 (x_{r^*}, y_{r^*}) への変換
- 3) 高さ情報を納めるセル (x_{r^*}, y_{r^*}) における平均値と平均偏差の更新

である。以下ではそれぞれについて説明する。

4-3-1 計測点の仮想地図上のセル座標 (x_v^*, y_v^*) の誘導

3D センサから得られた3次元座標を1枚の仮想地図上に表現するためには、まずセンサ座標系 $o-x y z$ から、仮想地図座標系 $o_v-x_v y_v z_v$ に変換しなければならない。その具体的な処理は以下のように行う。なお各座標系は Fig. 4-3 のように設定する。また、ここでは簡単のため、計測された3次元座標 (x, y, z) は移動ロボット座標系 $o_m-x_m y_m z_m$ における値 (x_m, y_m, z_m) に変換されているものとする。

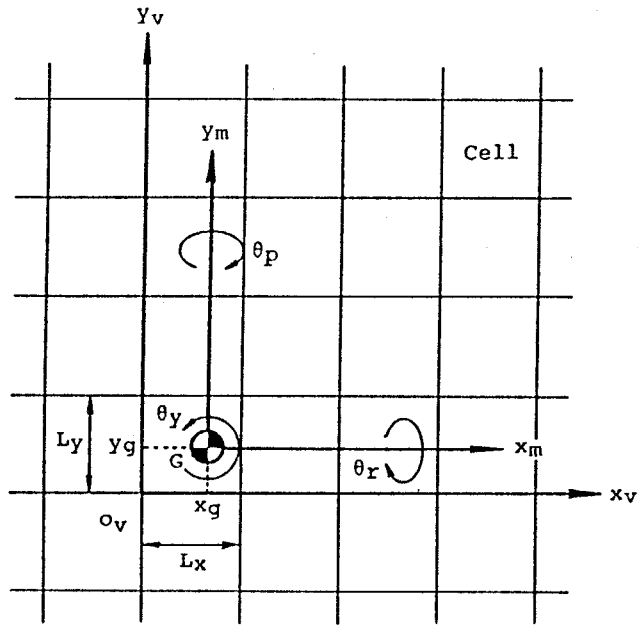
計測された座標 (x_m, y_m, z_m) は、水平な仮想地図の座標系 $o_v-x_v y_v z_v$ では、移動ロボットの傾斜角（ロール角 θ_r 、ピッチ角 θ_p 、ヨー角 θ_y ）および位置 (x_g, y_g, z_g) を考慮し、

$$\begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_y & -\sin \theta_y & 0 \\ \sin \theta_y & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_p & 0 & \sin \theta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_p & 0 & \cos \theta_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ 0 & \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{pmatrix} \quad (4-2)$$

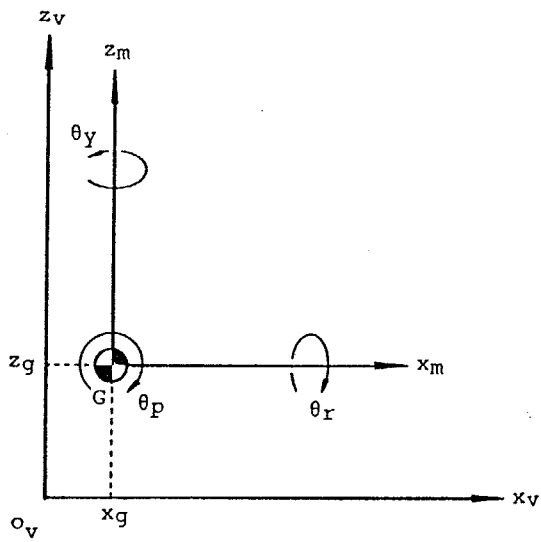
により変換される。 θ_r 、 θ_p が微小である場合には (4-2) 式は

$$\begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_y & -\sin \theta_y & 0 \\ \sin \theta_y & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & \theta_p \\ 0 & 1 & -\theta_r \\ -\theta_p & \theta_r & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{pmatrix} \quad (4-3)$$

と近似できる。なお、後の実験に用いる4足歩行機械モデル TITAN III には胴体を常時なるべく水平に保つ制御が施されており、実測ではその水平度は $\pm 5^\circ$ 以内程度である。よって (4-3) 式の近似による各要素の誤差は 0.008 以下であり、実用上は十分小さいと思われる。



(a) Top view



(b) Side view

Fig.4-3 Mobile robot and map coordinate systems

このようにして求められた (x_v, y_v) からセル座標 (x_v^*, y_v^*) は、

$$\begin{cases} x_v^* = [x_v / L_x] \\ y_v^* = [y_v / L_y] \end{cases} \quad (4-4)$$

として導出する。ただし L_x, L_y はセルの大きさを表わし、記号 $[]$ はガウス記号である。

4-3-2 実地図上のセル座標 (x_r^*, y_r^*) への変換

実地図のセル座標 (x_r^*, y_r^*) への変換は、(4-1) 式により行う。このとき必要とされる移動ロボットの位置 G の座標 (x_{rg}^*, y_{rg}^*) は、移動ロボットの移動履歴から求めておく。本節では、座標系を Fig. 4-4 のように設定し、 (x_{rg}^*, y_{rg}^*) の更新手順を具体的に説明する。

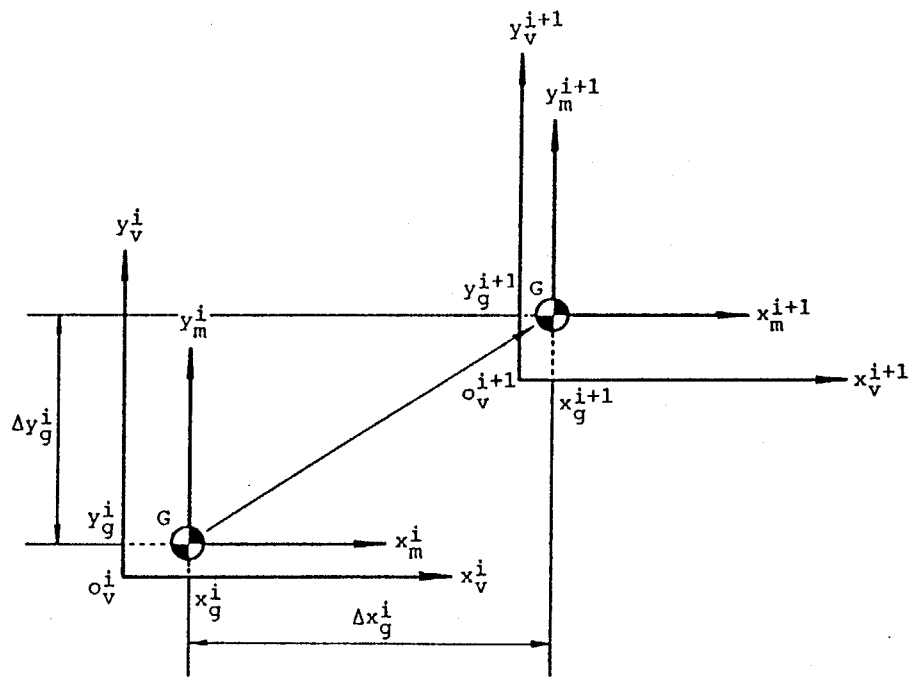
時刻 t_i における点 G のセル座標を $(x_{rg}^{*i}, y_{rg}^{*i})$ とすると、時刻 t_{i+1} における点 G のセル座標 $(x_{rg}^{*i+1}, y_{rg}^{*i+1})$ は、(4-1) 式と同様に、

$$\begin{cases} x_{rg}^{*i+1} = x_{rg}^{*i} + \Delta x_{rg}^{*i} & (4-5a) \\ y_{rg}^{*i+1} = y_{rg}^{*i} + \Delta y_{rg}^{*i} & (4-5b) \end{cases}$$

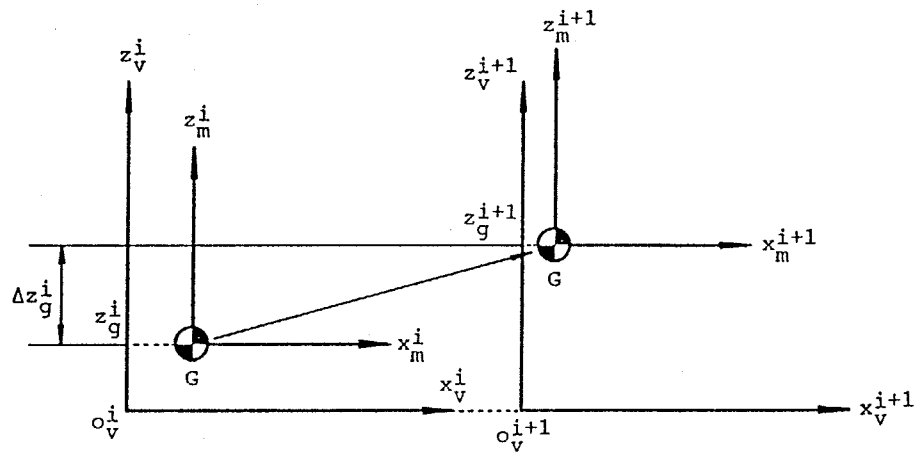
として求められる。ここで、セル座標で表わした時刻 $t_i \sim t_{i+1}$ における点 G の移動量 $(\Delta x_{rg}^{*i}, \Delta y_{rg}^{*i})$ は、 (x_g^i, y_g^i) 、 $(\Delta x_g^i, \Delta y_g^i)$ から次式で求める。

$$\begin{cases} \Delta x_{rg}^{*i} = [(x_g^i + \Delta x_g^i) / L_x] & (4-6a) \\ \Delta y_{rg}^{*i} = [(y_g^i + \Delta y_g^i) / L_y] & (4-6b) \end{cases}$$

また (x_g^i, y_g^i, z_g^i) の更新は、



(a) Top view



(b) Side view

Fig.4-4 Locomotion of point G and coordinate systems

$$\begin{cases} x_g^{i+1} = x_g^i + \Delta x_g^i - L_x \Delta x_{rg}^{*i} & (4-7a) \\ y_g^{i+1} = y_g^i + \Delta y_g^i - L_y \Delta y_{rg}^{*i} & (4-7b) \\ z_g^{i+1} = z_g^i + \Delta z_g^i & (4-7c) \end{cases}$$

により行う。

なお、 $L_x = 2^i$ 、 $L_y = 2^j$ (i, j : 整数) とし、各座標値を整数とすると、(4-6)式の右辺は単純なシフト演算に帰着され、高速に演算できる。また (4-7a)式、(4-7b)式も簡単なモジュール演算となるため、(4-1)式と同様にシフト演算やマスク処理等の簡単な演算で求めることが可能である。

このようにして求めておいた (x_{rg}^*, y_{rg}^*) と、4-3-1で求めた (x_v^*, y_v^*) を (4-1)式に代入することにより、計測された高さ情報 z_v を納めるセルの座標 (x_r^*, y_r^*) は求められる。

4-3-3 高さ情報の平均値と平均偏差の更新

求められたセル (x_r^*, y_r^*) に高さ情報 z_v を書き込む処理はその平均高さと平均偏差を求めることで行うが、実時間性を保持するため高速に行う必要がある。そのため、次のような逐次的な演算法を導入する。

平均値は、 z_n を第 n 計測値、 \bar{z}_n を第 n 平均値として

$$\bar{z}_n = \begin{cases} z_1 & (n = 1) \\ p \cdot \bar{z}_{n-1} + (1-p) \cdot z_n & (n = 2, 3, \dots) \end{cases} \quad (4-8)$$

と求める。ここで p は、重みを定める定数 ($0 < p < 1$) である。

また平均偏差 s_n は (4-8)式から得られた \bar{z}_n を用いて、

$$s_n = \begin{cases} 0 & (n = 1) \\ p \cdot s_{n-1} + (1-p) |z_n - \bar{z}_n| & (n = 2, 3, \dots) \end{cases} \quad (4-9)$$

と求める。

このような逐次的な平均値と平均偏差の算出法は、次のような特徴を有する。

- 1) 通常の算術平均あるいは平均偏差のように標本数を記録しておかなくても逐次的に実行できる。そのため地図の記憶量は少なく済み、移動ロボットのための実時間処理に適する。
- 2) 過去の計測値ほど重みを小さくした平均値が求まる。移動しつつ前方地図の更新を行ってゆく場合には、過去の計測値であるほど対象物体から遠くで計測された場合が多い。よって、その重みを小さくするいわば忘却効果を与えることは合理的である。

ここでいう「忘却効果」の意味を定量的に説明しておく。

$$z_n = \begin{cases} 0 & (n \leq N; N \geq 1) \\ 1 & (n \geq N + 1) \end{cases} \quad (4-10)$$

とするステップ応答を調べると、(4-8), (4-10) 式から

$$\begin{aligned} \bar{z}_n &= 1 - p^{n-N} \\ &= 1 - \exp(-(n-N)/T_0) \quad (n \geq N) \end{aligned} \quad (4-11)$$

ただし、 $T_0 = 1/\log(1/p)$

が得られる。この応答の様子を Fig.4-5 に示す。(4-11) 式からも明らかなように、これは時定数 T_0 の 1 次遅れ応答となっている。 T_0 を「忘却時定数」と呼ぶことにすると、 $p = 0.5$ の場合にはその値は 1.4 (単位は観測回数) である。定数 p を調整し最適な平均値算出法を求めることは、系の忘却時定数を調整していることにほかならない。

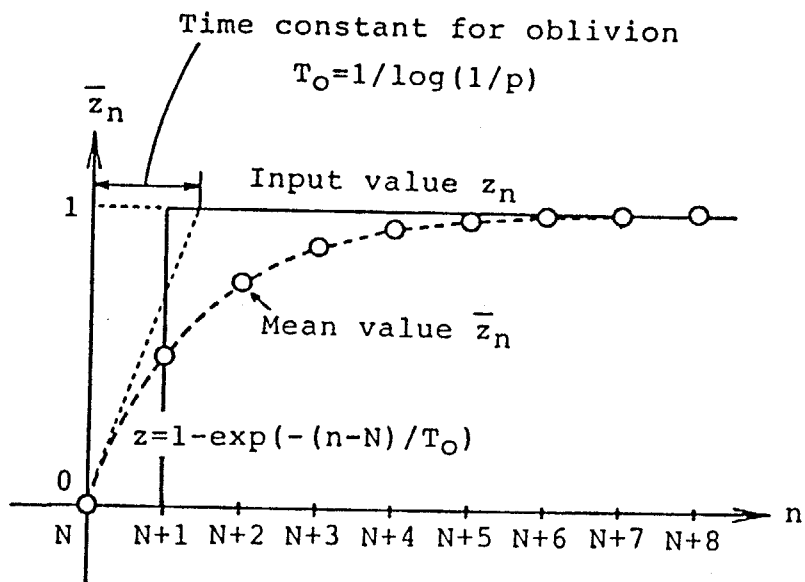


Fig.4-5 Time response of the mean value \bar{z}_n in case of the proposed sequential calculation method

4-4 検証実験

4-4-1 揺動外乱の補正効果の検証

まず、揺動外乱の補正効果についての検証を行う。具体的には、視覚センサを Fig.4-6 (a) のように揺動台に取り付け、揺動しながら床面の計測を行う。そして、4-3-1 で述べた補正をした場合としない場合の結果を比較する。

視覚センサは、縦スリット光を投射し、テレビカメラで受光する光切断法のレーザレンジファインダである¹³⁾。光源は出力 30 mW の半導体レーザ、テレビカメラは CCD カメラ (SONY 製 XC-37) を用い、全幅は 600 mm である。ソフトウェアはアセンブリ言語を用いて記述し、画面座標から移動ロボット座標系 $o_m - x_m y_m z_m$ における 3 次元座標を得るための演算時間は、1 点につき約 240 μ sec である (マイコン PC-9801E、(CPU 8086, 8 MHz) を使用した場合)。よって、1 画面入力時間 16.7 msec 中の計測点数は走査線 4 本ごとの約 60 地点である。また、地図の生成および投射レーザスリット光の 80 ステップの水平方向の走査を含む 1 回、最大 4800 点の計測時間は 4 sec である。

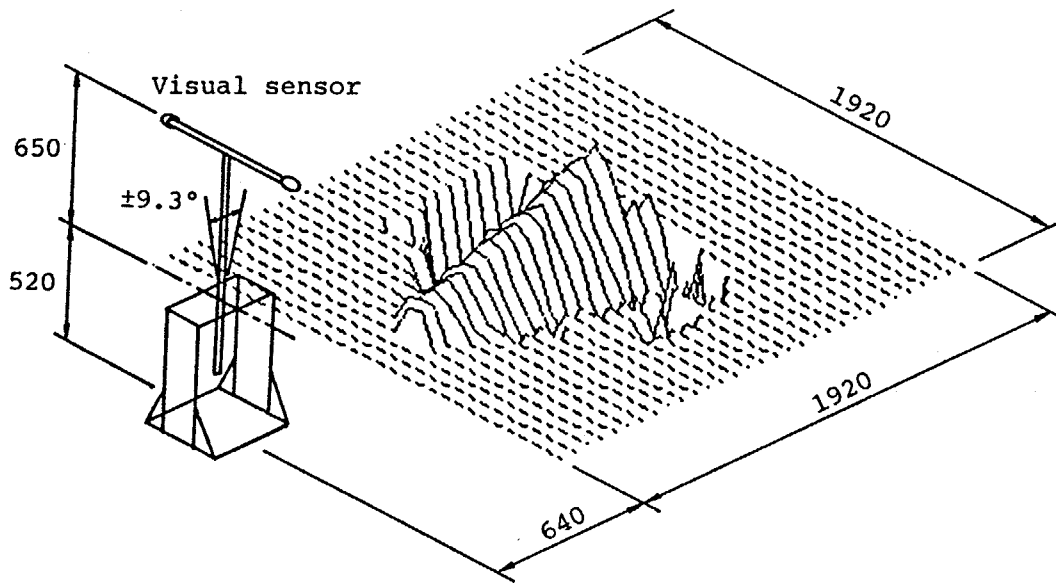
このようなレーザレンジファインダを用いて、ピッチ方向に 0.6 Hz、最大振れ角 $\pm 9.3^\circ$ で揺動させながら床平面を計測し、地図生成を行なった。なお傾斜角は揺動軸に固定したポテンショメータから得ている。

結果を Fig.4-6 に示す。点線で表わされた領域は計測装置の視野外となり計測されなかった領域であり、正しい床平面の位置を表わしている。

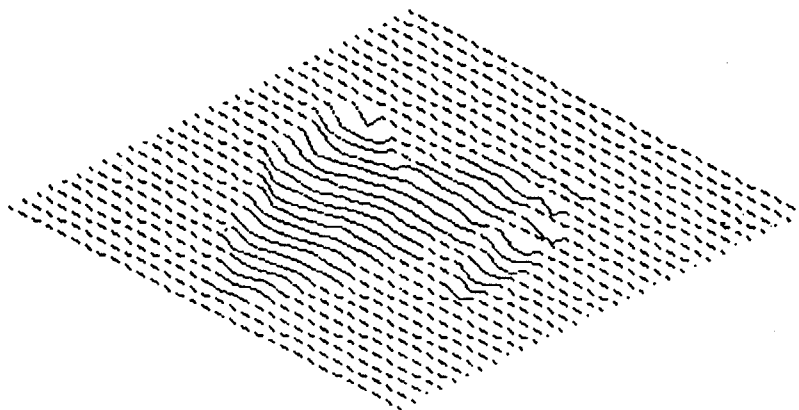
傾斜角による補正を加えることにより、ほぼ正確な平面として実時間計測できていることがわかる。

4-4-2 4足歩行機械への実装とモデル地形の実時間計測

次に、第一次地図生成法の妥当性を検証する実験を行った。具体的には、4足歩行機械 TITAN III²⁸⁾ に視覚センサを搭載し、移動しながら前方に置かれたモデル地形を計測して、本章で導入した手法により第 1 次地図を実時間的に生成



(a) Without compensation



(b) With compensation

Fig.4-6 Effect of posture compensation while measuring flat floor (Pitching motion 0.6(Hz))

した。なお視覚センサは、4-4-1 で用いた光切断法レーザレンジファインダを用いている。また歩行機械の移動量は、TITAN III の各脚の位置をモニターするポテンショメータの値から求めている。実験の様子を Fig. 4-7 (a) に示す。

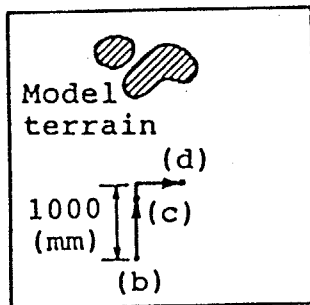
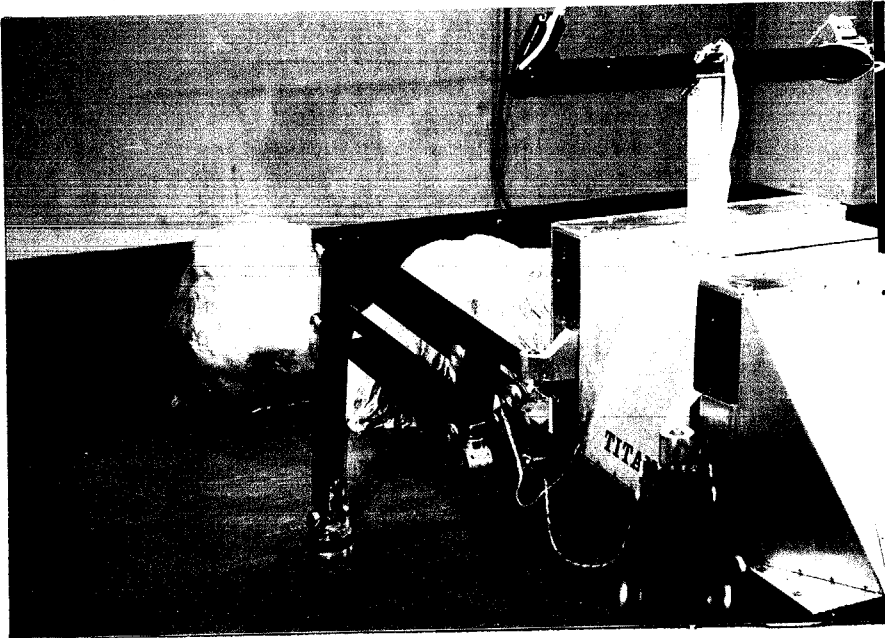
TITAN III はこのように L 字型に歩行し、その歩行速度は約 10 mm/sec である。

生成された地図を Fig. 4-7 (b)~(d) にグラフィック表示した。ただし地図の大きさは 128×128 セル、各セルの大きさは 64 mm × 64 mm とし、(b)~(d) ではその一部の 64×64 セルの領域を表示してある。処理プログラムはアセンブリ言語で記述しており、投射スリット光一本の約 60 個の計測値は、スリット光を走査してゆくステップ間隔 33.3 msec 以内に地図に記録されている（マイコンは PC-9800 E を使用）。このことから、本生成手法は十分に実時間性があることが確認された。なお (b)~(d) は、(4-8)、(4-9) 式のパラメータを $p = 0.5$ （忘却時定数 $T_0 = 1.4$ ）としたときの連続した計測結果である。モデル地形の形状がほぼ正確に計測できていることがわかる。また (d) のときの平均偏差の分布を (e) に示す。このようにモデル地形の垂直に近い側面の位置では床平面での値に比べて大きくなっており、その値から垂直部の存在が判別できることがわかる。

4-5 本章のまとめ

本章では、3D センサから得られる 3 次元情報を基に第 1 次地図を生成する手法について、具体的な検討を行った。まず地図の表現形式について考慮し、大きな容量を有する地図を限られたメモリ空間に効率的に表現する移動ロボットに適した円環メモリ表現を導入した。また移動ロボットの揺動外乱のキャンセリング、忘却効果を伴い滑らかな地図を生成してゆく手法について、具体的に論じた。そして、導入した手法が実用的に有効であることを、4 足歩行機械 TITAN III に搭載した視覚センサを用いた計測実験で明らかにした。

(a)



Walking velocity
10 (mm/sec)

Fig.4-7 Results of model terrain measuring experiment by the visual system mounted on the moving quadruped walking vehicle TITAN III
(a) Terrain, TITAN III, and its path of locomotion
(b)-(d) Measured results from the position noted on (a)
(e) Mean deviation map

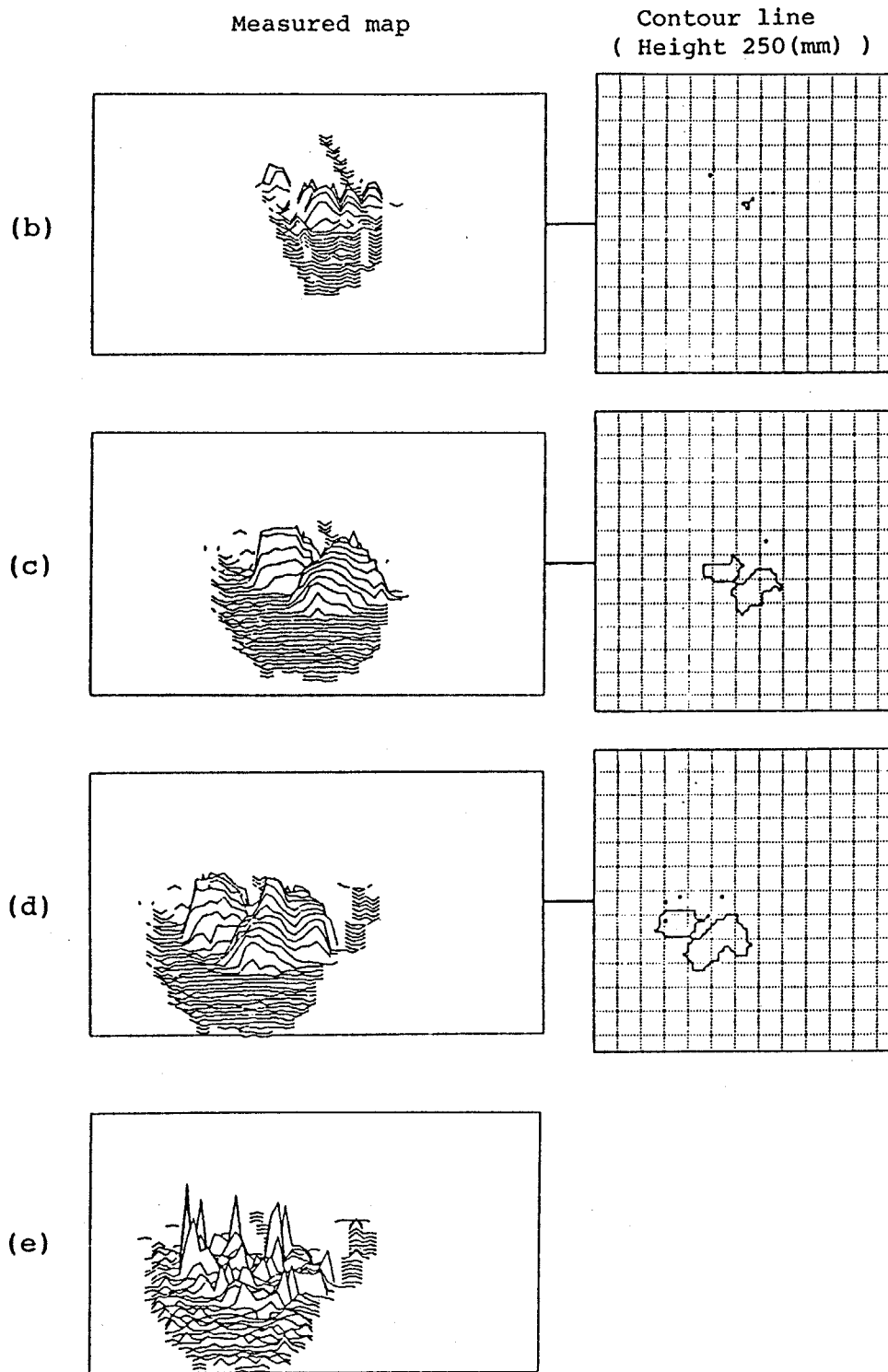


Fig.4-7 Results of model terrain measuring experiment by the visual system mounted on the moving quadruped walking vehicle TITAN III
 (a) Terrain, TITAN III, and its path of locomotion
 (b)-(d) Measured results from the position noted on (a)
 (e) Mean deviation map

第5章

死角となる地形の連想的推定補間

第5章 死角となる地形の連想的推定補間

5-1 まえがき

第2章および第3章で検討した3Dセンサは、計測点の3次元座標の集合を与える。それを蓄積してゆくことにより、第4章で述べたように環境の第1次的な地図は生成される。この処理は一見何も障害がないように思われるが、実は検討すべき重要な課題を含んでいる。視覚センサの「死角」に関する問題である。

どの型の視覚センサを用いてもオクルージョン（隠れ）による計測不可能な領域（以下ではこれを死角域と呼ぶ）の発生は避けられない。たとえば Fig.5-1 のような環境を計測する場合、ドットで示した領域は死角域となり、その3次元情報を得ることはできない。歩行機械が踏破する Fig.5-1 のような凹凸の著しい地形の場合は特に、死角域は広い範囲にわたって存在すると考えなければならない。

このため、計測された情報だけから生成される第1次地図は不完全なものとなる。移動ロボットに伴った視点の移動により死角域は時々刻々変化し、最終的には全体の3次元情報が得られると考えられる。しかし、ロボットの効率的な移動経路を導出するためには、障害物に到達する前にその情報を入手していなければならない。したがって、死角域の地形について信頼性の高い補間を行うことは、きわめて重要であると考えられる。

ここで我々自身の視覚について考えてみると、当然死角域は存在し得るが行動を起こす際の大きな障害とはなっていないことに気付く。本論文では、これが人間の連想機能により実現されていると考え、それを模倣することを試みる。以下では、本手法を「A (Associative) 補間法」と呼ぶ。

5-2 A補間法の基本原理³⁰⁾

死角域の地形を補間する最も単純な方法は、周辺の観測された地形情報を用い適当な補間曲面を定めて内挿する方法であろう³¹⁾。しかし死角域について正し

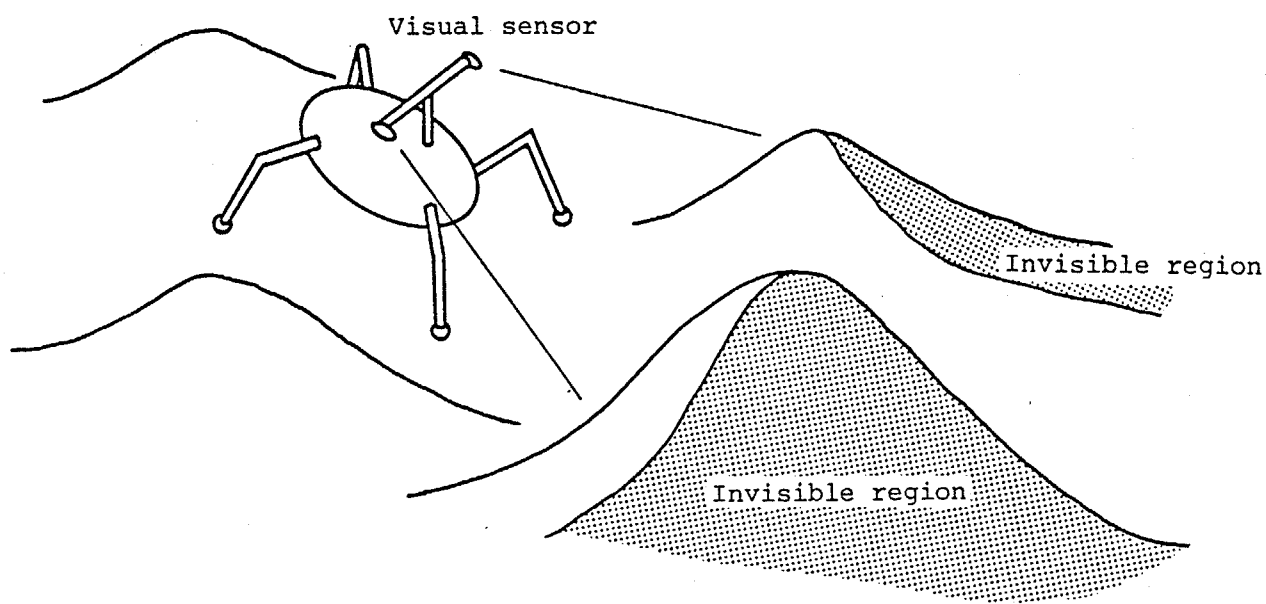


Fig.5-1 Occurrence of invisible regions

く補間する能力に限界があることは明らかである。

ここで我々の視覚の認識過程について考えてみよう。我々はたとえ死角となる領域があったとしても、通常環境であれば、容易にかつ正しく不足した情報を補っていると思われる。通常「死角」を意識することさえほとんどない。これは、それまでの経験による「知識」を用い死角域の状態を無意識のうちに想像する能力が、視覚情報処理系に存在しているためと思われる。たとえば、「今見えている物体は”机”であるから、形状はこのようになっている。したがって、今見えない領域はこのような状態であろう」などと無意識に推定しているものと思われる。その具体的な処理は、まず観測された情報から特徴を抽出し、それを基準として記憶情報と照合し関連する知識を連想する。そしてその連想結果を死角域に当てはめ死角域の状態を推定する、というものであると考えられる。本論文で導入するA補間法とは、このような機能をMARSに実現しようとするものである。これは我々の視覚系で重要な役割を果たしていると思われる知識を導入するものである。よって、今後、可視域の計測処理にも適用することにより、ごく少数の計測結果から多くの情報を得る視覚処理系にも発展が期待できる。

5-3 前提条件の付加による問題の簡単化

A補間法はその基本原理が示すように物体認識にほかならない。認識結果を用いて関連する知識を引き出し、それを基に補間する。ただし移動ロボットのナビゲーションに最も重要な情報は物体の形状情報のみである。よって、人工知能(AI)に関連して研究されている意味論的な認識過程とは異なり、大幅に簡単化できると考えられる。

本論文では、研究の初期段階としてA補間法の機能を限定し、問題を簡単化してその実現を計る。

具体的には、以下のような前提条件を仮定する。

- 1) 扱う情報は3次元の形状情報に限定する。
- 2) 3次元の物体形状は1枚の水平断面形状で代表できるものとする。

3) 環境内で計測されたデータはその後の知識として利用できるものとする。

1) は物体のもつ情報の中から処理で扱うものを制限するものである。物体のもつ情報としては、位置、大きさ、形、色、テクスチャ等が考えられる。これらすべてを総合的に評価すれば、信頼性の高い物体認識が可能であろう。しかし、形状のみを用いて対象物体の認識が行えれば、実用的に有効である。またこれは、今後、他の情報をも用いた処理系に発展してゆく基礎ともなり得ると考えられる。

2) は、物体の形状的特徴が1枚の代表的な水平断面の形状に圧縮されているとするものである。この仮定を採用したのは次の3つの理由からである。第1の理由は、物体の3次元形状は Fig. 5-2 のように2次元断面の積層として表現できるため、各断面はそれぞれ立体形状の特徴を保存していると考えられることである。比較的単純な立体の場合、1枚の代表的な水平断面の周上を通過するように補間曲面を定めることにより、たとえば Fig. 5-3 (a) のように立体図形を比較的良好に再現することができる。第2の理由は、重力方向という基準が存在するため、水平断面は安定して抽出することが可能であることである。これに対したとえば垂直断面は、切断方向および位置を定める有効な一般的基準が存在しない。第3の理由は、移動ロボットの経路決定に際し、オーバーハングのない通常の障害物は、Fig. 5-4 に示すように移動ロボットが乗り越えられる最大の高さの水平断面でモデル化できることである。移動経路の決定問題は、この高さの平面の2次元で扱うことができると考えられる。

よって本論文では、3次元の物体を移動ロボットが通過できる最大の高さの水平断面で代表させることにする。なお水平断面を安定に抽出するため、ここではほぼ水平な面上に物体が配置された環境を考えることにする。

このように3次元形状を1枚の2次元形状で代表させることは、問題を著しく単純化するが、その適用範囲は制限される。よって、このような前提が有効である例を示しておくことは重要であろう。

例1) 林

Fig. 5-5 (a) のように木が散在する環境を移動しようとするとき、木の裏側の広い領域が死角域となり、地図生成を妨げることが予想される (Fig. 5-5 (b))

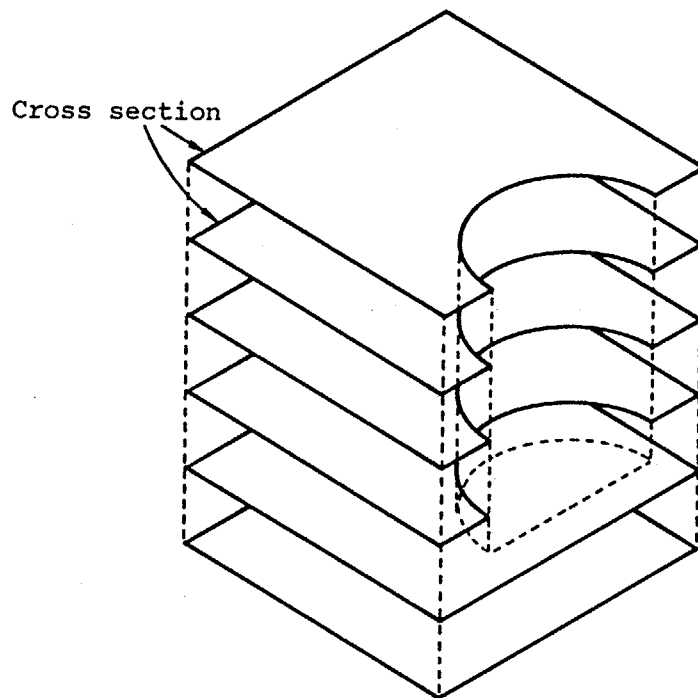


Fig.5-2 Cross sections for 3D representation

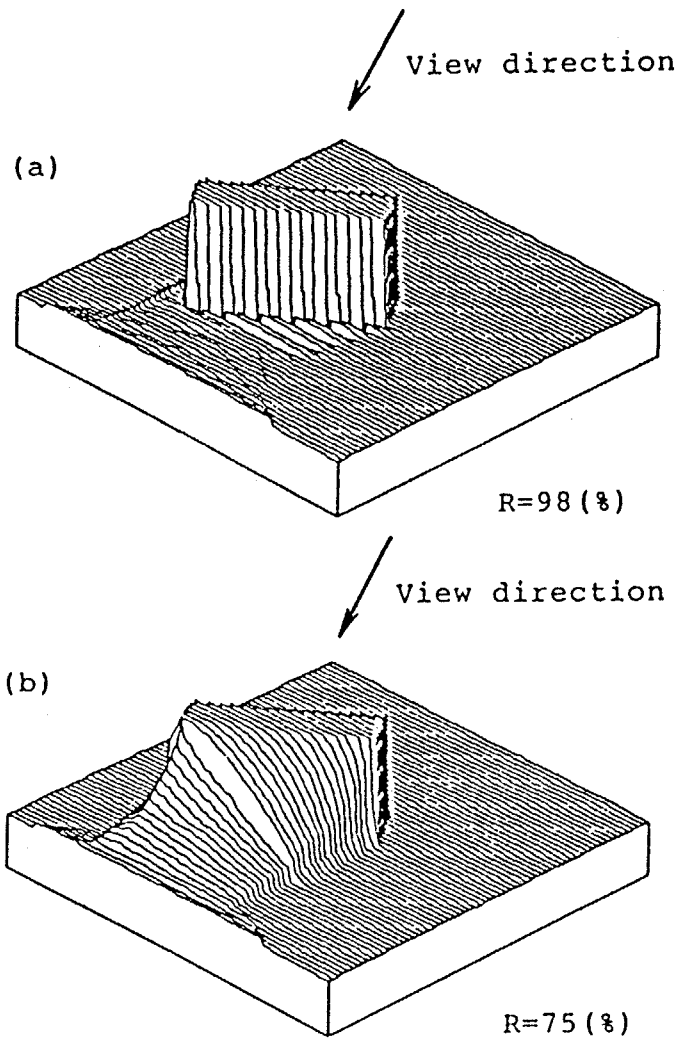


Fig.5-3 Comparison of invisible area estimation methods
 (a) Estimated map using a cross section
 (b) Estimated map with only cubic curve interpolation

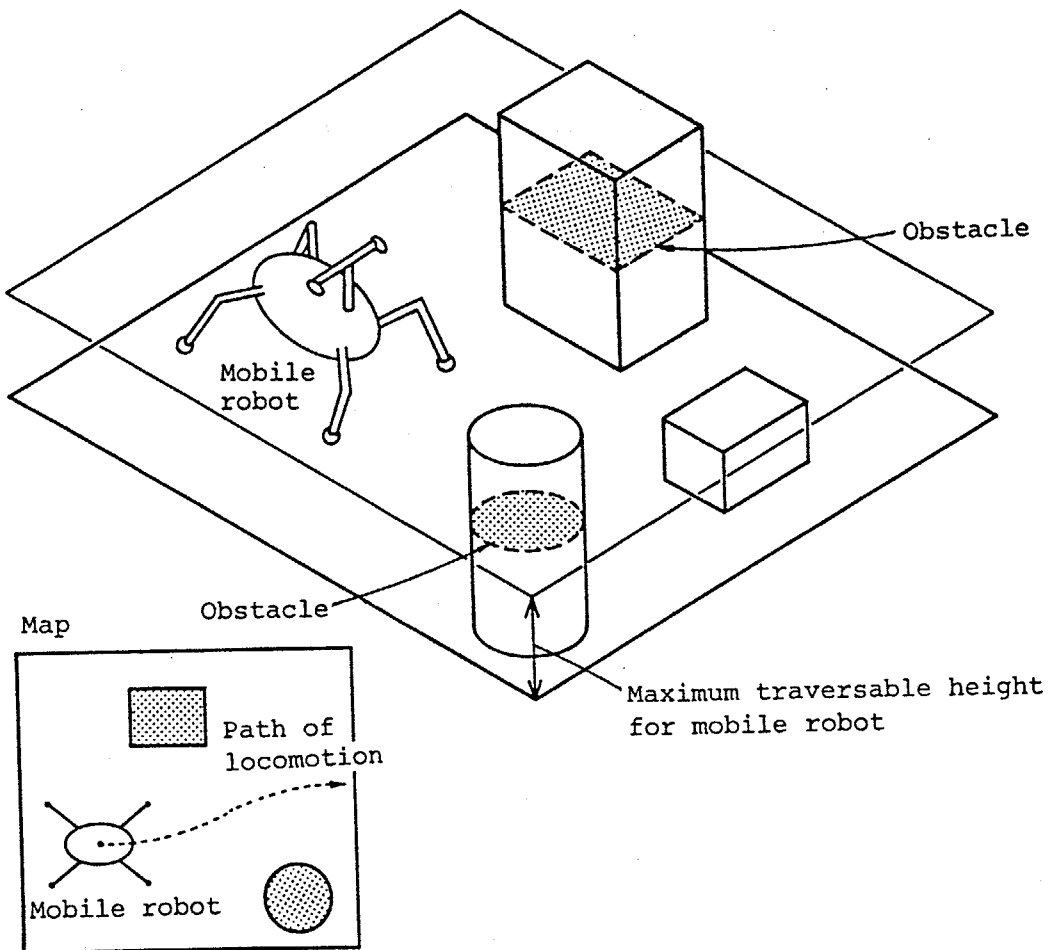
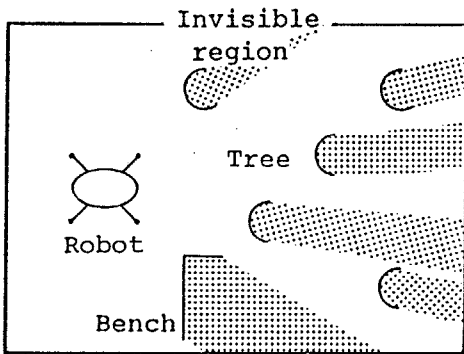


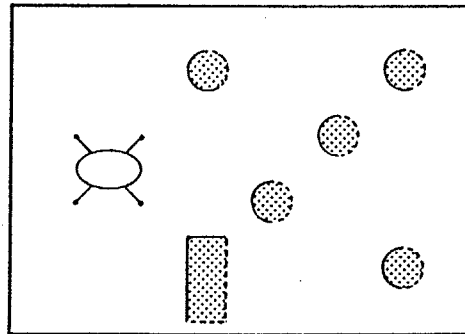
Fig.5-4 Dominant cross section for mobile robot navigation



(a) An example of forest



(b) Measured result



(c) Estimated cross sections

Fig.5-5 Measurement in forest

しかし、この環境では木が多いことを知っており円状の断面形状を記憶していたとすれば、それを当てはめて補間することが可能である（ Fig.5-5 (c) ）。

例 2) 駐車場

今度は Fig.5-6 (a) のような駐車場について考えてみよう。駐車場には、大小様々な自動車、オートバイ等が置かれ、時々刻々変化する死角域が発生する（ Fig.5-6 (b) ） 。このとき、自動車等の断面形状を持っていたとすれば、それを用いた有効な補間が可能である（ Fig.5-6 (c) ） 。また同様に人間についても有効であると思われる。

前提条件の 3) は、類似形状の物体が環境内に複数存在し、過去の計測から得られた知識が新たに計測された物体の形状推定に利用し得ることを意味する。このことから、計測した物体の特徴量を記憶してゆく学習的な処理を行うことにより、次第に正確な補間が行えるようになると考えられる。

5 - 4 A 補間法の処理手順

5 - 3 の前提条件により、A 補間法の具体的な処理は次のような手順となる。

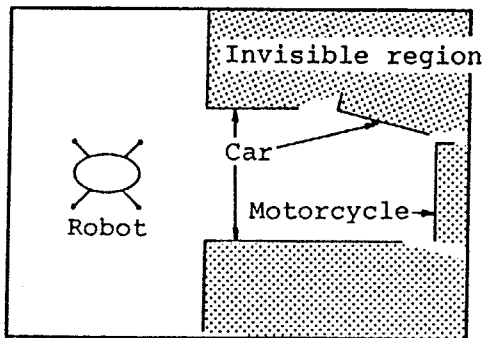
- 1) 観測された物体の水平断面の抽出
- 2) 入力断面に該当する記憶断面（知識）の連想的想起
- 3) 連想された記憶断面を用いた死角域の立体形状補間

なお 2) の連想的想起を行った結果、該当する記憶情報が見つからなかった場合、その計測対象について移動と共にさらに計測を続け、十分な情報が得られた時点で新たな記憶情報として登録する。このような学習的な処理の導入により、移動に伴って環境の情報が集積されるにつれ、次第に正確な連想を行うようになる。

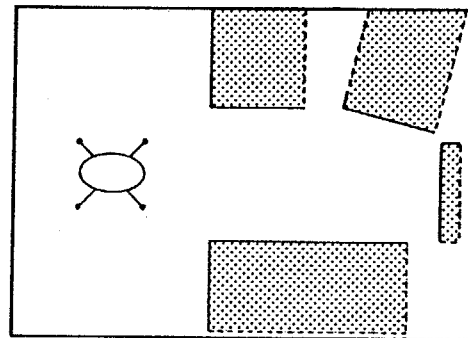
以下では A 補間法で重要な 2) と 3) の処理について具体的に検討する。



(a) An example of parking lot



(b) Measured result



(c) Estimated cross sections

Fig.5-6 Measurement at parking lot

5-4-1 トリー探索を用いる連想的想起

A補間法で最も重要な処理は連想処理である。本研究ではこのためまず次のような手法を導入した（詳細は文献³²⁾参照）。

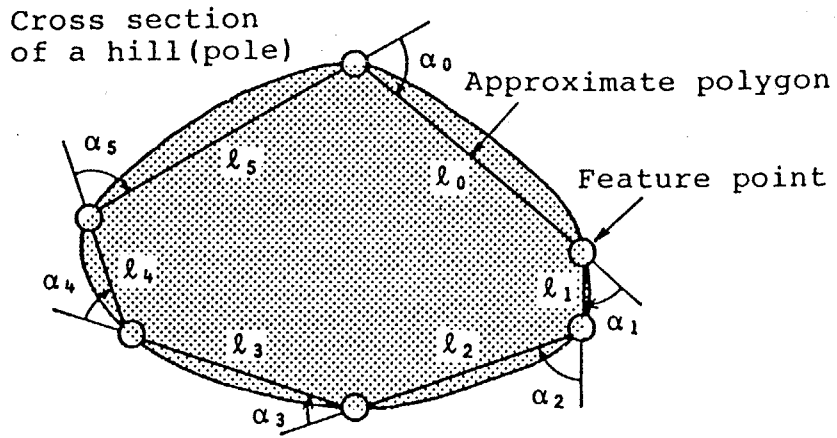
まず、水平断面の情報を圧縮するため、

「断面を一定外角 α_t 以上の n 角形で近似したとき、
各辺の長さ l_0, l_1, \dots, l_{n-1} 、偏角 $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}$ 、
および断面近傍の表面の傾き p_0, p_1, \dots, p_{n-1}
を要素とする $3n$ 次元ベクトル」（Fig. 5-7 (a) 参照）

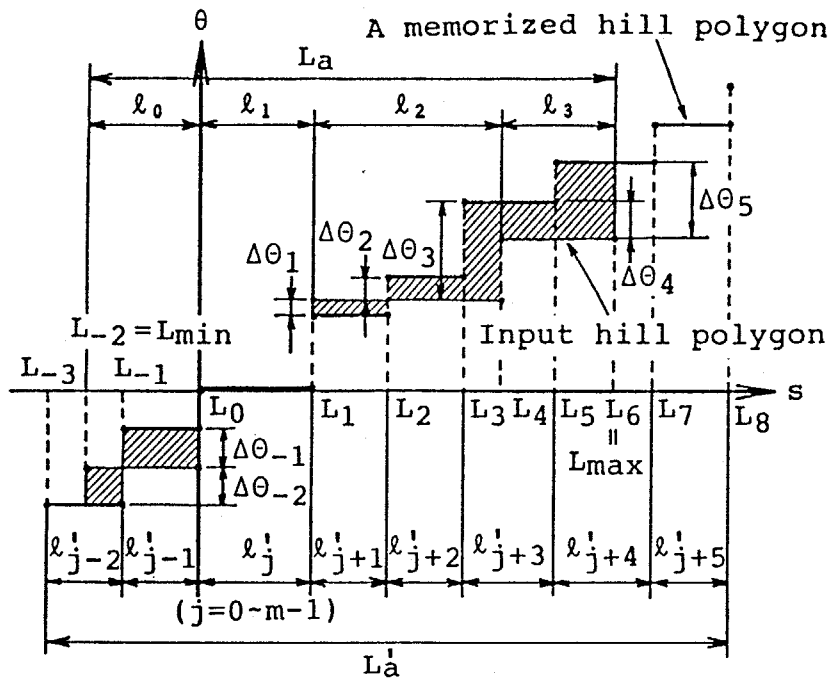
という特徴量を導入した。基準点を通る直径の数列³⁰⁾、各種のモーメント、フーリエ係数なども考えられるが、死角により図形の一部の情報しか得られない場合を考慮すると、断面の周形状のみに依存する上のような特徴量の方が適している。この特徴量を抽出するため、断面の周に接するベクトルを走らせ、その方向を表わすフリーマンコードを評価することで角などの特徴的な点を検出し、それらを頂点とする近似多角形から特徴量を抽出する手法を提案した。

このようにして得られた特徴量は Fig. 5-7 (b) のような $\theta-S$ 平面 (θ : 偏角、 S : 周長) で一致度を評価する。具体的には、計測された断面の代表辺 l_i (たとえば、欠落がない辺の中で最も長い辺) と比較する記憶断面の 1 辺 l_j' を等しいと考え、記憶断面全体を (l_i/l_j') 倍して重ね合わせる。ただし、 l_i, l_j' の長さが大きく異なる場合は不一致とみなす。そして、偏角の偏差を周長に対して平均し、その値により一致度を評価する。これは直観的には Fig. 5-7 (b) の斜線部の面積で一致度を評価するものである。この操作を記憶断面の辺 l_j' の番号 j を変化させ入力断面と相対的に回転させながら繰り返す、さらにそれをすべての記憶断面に対して実施することで一致度の高い記憶断面とその方向は選択される。

しかしこの手法では、記憶断面の個数が増すと多くの処理時間を要するという問題が残されていた。また1つの水平断面がいくつかの小部分に分割された場合、



(a) Feature values



(b) Matching on θ - s plane

Fig.5-7 Formerly proposed data processing method for A-interpolation

Fig.5-7 (b) では誤差が大きくなるため、一致度の正確な評価が行いにくいという問題もあった。

本論文では、処理時間短縮のため人工知能 (AI) でよく用いられるトリー探索法を導入する。移動ロボットの経路決定は、適当な距離だけ移動した時点ごとに行えば十分である。よってA補間法の実行も間欠的でよい。本手法はこの性質を利用し、補間処理の間の時間に記憶情報をオフライン的に弁別木として整理しておく。そして実時間性が重要なオンラインの連想的想起は、高速なトリー探索で行うというものである。

また水平断面が分割された場合でも正確な照合を行うため、より局所的な特徴量を導入する。これにより1水平断面に関する特徴量は増加することになるが、上述の効率的なトリー探索の導入のため処理時間的な問題は生じない。

以下では連想的想起の具体的な処理手順について説明する。

5-4-1-1 断面形状を代表する特徴量の抽出

導入する特徴量は、

「断面の近似多角形を辺ごとに分割したときの両端の角 α_0, α_1 と辺長 l
および断面近傍における表面の法線ベクトルの仰角 p を成分とする
4次元ベクトル」 (Fig.5-8 参照)

である。 Fig.5-8 の断面は7個の特徴ベクトルで表わされる。このような局所的な特徴量を用いることにより、図形が細分された場合でも記憶情報との正確な照合処理が可能である。

特徴量抽出は近似多角形の抽出により行う。その処理手順はすでに文献³²⁾ で検討したが、近似を開始する点の位置により近似多角形の形状が変化する問題は十分には解決されていなかった。そこで本論文では、新たに頂点位置を保持する処理手法を導入する。その具体的な処理手順は、次の4段階から成る (Fig.5-9 参照)。

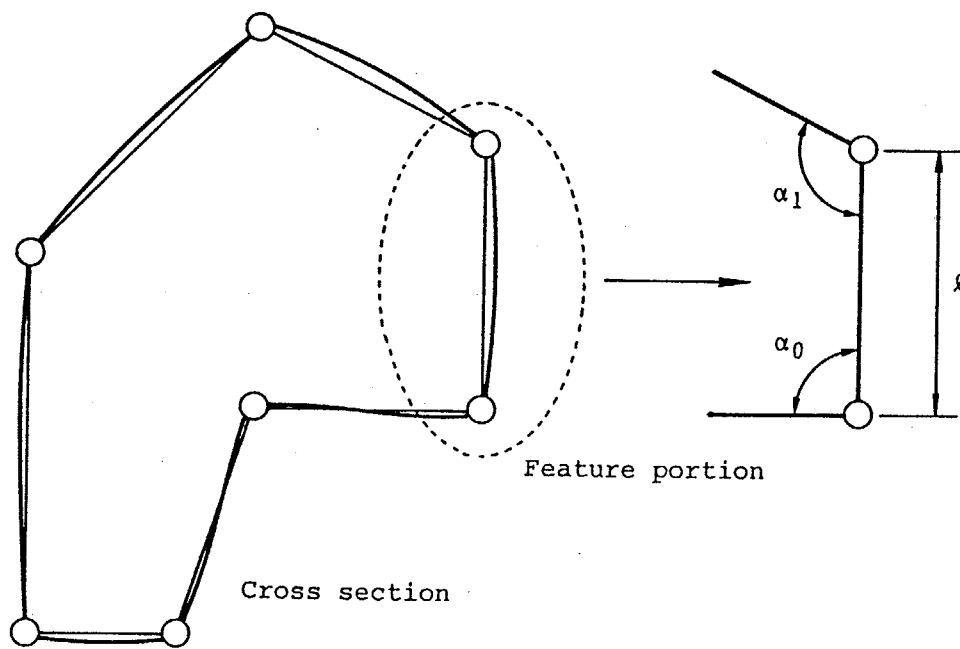
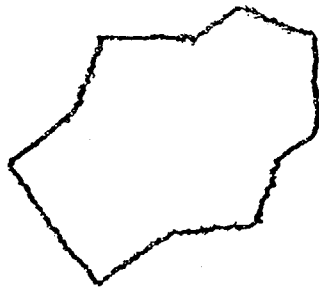
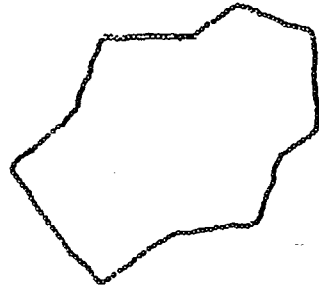


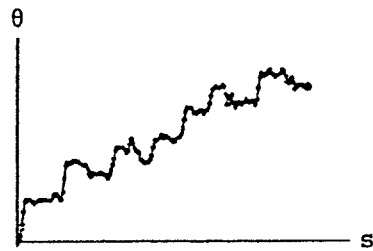
Fig.5-8 Local feature of cross section



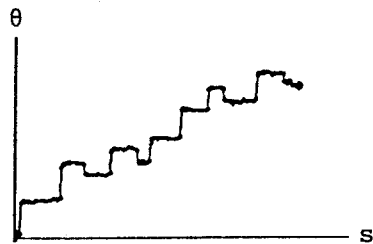
(a) Input cross section



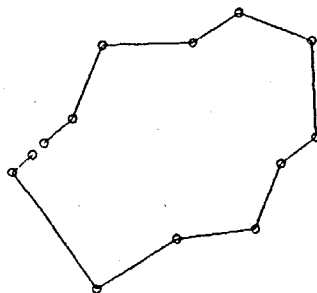
(b) Preliminary smoothing



(c) θ - s representation



(d) Edge hold smoothing



(e) Feature polygon

Fig.5-9 Polygonal approximation process

(1) 第1次平滑処理

計測データはノイズなどの影響を受けており、またデータ密度も一様ではない。そこで、まず、データを間引いたり線形補間することによってデータ密度を一様にする。次に2次元座標値の平均化によって平滑化する。Fig.5-9 (a)の図形を処理した例をFig.5-9 (b)に示す。

(2) $\theta - S$ 線図の生成

断面形状データより偏角 θ -周長 S 線図を生成する。Fig.5-9 (b)の $\theta - S$ 線図をFig.5-9 (c)に示す。なお点 p_i における偏角 θ_i は、

$$\theta_i = \sum_{k=2}^i (p_{k-2}p_k \text{ と } p_k p_{k+2} \text{ のなす角}) \quad (5-1)$$

で求める。

(3) 頂点保持平滑処理

Fig.5-9 (c)の $\theta - S$ 線図から頂点を検出するために、頂点をできる限り保つ平滑化処理を行う。このために新しい処理法を導入する。これは $p_{i-k} \sim p_i$ (実験では $K=4$ としている)の θ の平均値を θ_1 、標準偏差を σ_1 、 $p_i \sim p_{i+k}$ の値を θ_2 、 σ_2 とするとき、

$$\theta_i = \begin{cases} \theta_1 & (\sigma_1 \leq \sigma_2) \\ \theta_2 & (\sigma_1 > \sigma_2) \end{cases} \quad (5-2)$$

により偏角 θ_i を修正してゆく手法である。エッジを保つスムージング³³⁾の1種である。この処理を行った後の $\theta - S$ 線図をFig.5-9 (d)に示す。

(4) 多角形近似

頂点保持平滑化を行った $\theta - S$ 線図において、偏角 θ がある程度大きく変化している点を頂点とする多角形を生成する。以降これを特徴多角形と呼ぶ。求められた特徴多角形をFig.5-9 (e)に示す。このように頂点の位置を保持した近似多角形が得られる。

このようにして求めた特徴多角形から Fig.5-8 の特徴量は抽出されることになる。なお、曲率が小さい滑らかな曲線ばかりから構成される断面形状の場合、頂点の位置が近似処理の開始点の位置に依存して大きく変動することは避けられない。よって多角形近似は適当でない。しかしもし1箇所でも検出可能な角があれば、そこを基準として安定した多角形近似が可能である。

5-4-1-2 トリー探索による記憶断面の連想的想起

5-4-1-1で導入した特徴量を基に、計測された情報を記憶情報と照合する。記憶情報はオフライン的に弁別木として整理しておく。実時間性を要する連想的想起は、高速に行えるトリー探索により行う。

弁別木は Fig.5-10 に示すような特徴量ベクトルの成分 α_0 , α_1 , 1 の値によって枝分かれする構造とする。成分 p は本論文では照合処理には用いない。それぞれの値は適当に離散化して表現し、多角形近似の誤差の影響を受けにくくする。その葉には物体番号とその物体における特徴部分の番号を登録しておく。ただし離散化の影響等により、葉に登録される特徴部分は必ずしも1つではない。

このような弁別木の生成は、それまでに生成されている弁別木を探索し、該当する葉があればそこに物体番号、特徴部分番号を追加し、当てはまるものがない場合は新たに枝を追加してその葉に記入するという処理を繰り返すことで行う。照合の結果一致する記憶情報が得られなかった場合、このように弁別木を成長させる学習的処理により、知識を拡大してゆくことになる。

連想処理は、生成された弁別木を探索し、該当する枝を発見することで行う。記憶情報は弁別木として整理されているため、該当する記憶情報の探索は特徴量の数値の単純な比較だけで行える。以前の方法³²⁾のように一致度を演算により求めることは必要ない。また、たとえば角 α_0 が異なる多くの特徴ベクトルが最初の比較で棄却されるなど効率的に探索が行える利点も有する。

なお特徴ベクトルの要素はそれぞれ離散化しているため量子化誤差を生ずる。これにより該当する情報が見出されない誤りを防ぐため、たとえば記憶断面の角 α_0 について 10, 20, 30, … と離散化した場合、比較される入力断面の角 α_0

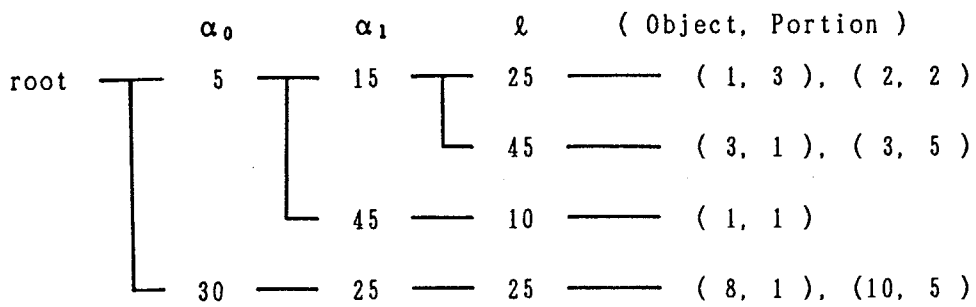


Fig.5-10 Produced discrimination tree for portion matching

については 5, 15, 25, … と離散化し、1 つの値に対し 2 つを対応させることにする。これにより、一致すると判定される特徴部分の数は増すと思われるが、正しいデータが棄却される誤りは除かれる。

以上のような探索処理により、一般には複数の特徴部分が連想される。次に行う処理は、入力断面の各部分における照合の結果得られた記憶断面候補に関する情報を統合し、該当する記憶断面の特定を行うことである。具体的には、得られた複数の候補のうち、特徴部分の並ぶ順序を保ちかつ多くの部分で一致するものを正しい記憶断面とみなす処理を行う。さらに、得られた記憶断面を計測断面に重ね合わせ、Fig. 5-11 のように矛盾するものを棄却する処理の追加も考えられる。

5-4-2 死角域の立体形状補間

5-4-1 の処理によって該当する記憶断面が見出されると、それに付随した形状情報を引き出し、方向を合わせて重ね合わせるにより死角域の立体形状を補間することができる。しかし、この方法では大きな情報量をもつ 3 次元情報を記憶しておかなければならない。そこで本論文では、5-3 で導入した前提条件 2) に基づき、再生された断面の周に接する滑らかな曲面により補間する手法を導入することにする。その具体的な処理手順は次の 2 段階から成る。

- 1) 記憶断面を死角域に当てはめ、その断面内部のみの立体形状を補間する。このとき特徴ベクトルの成分 p も利用する。なお記憶断面が全周をカバーしていない場合は、閉曲線とするための補間処理を初めに行っておく。
- 2) すべての断面に対して 1) が試みられた後、残りの死角域すべてを立体形状を補間する。

補間曲面は境界において滑らかに接続されるように生成する。よって 1) の処理により再生された断面の情報は表面の傾き p も含めすべて地図に書き込まれ、2) の処理においては参照する必要はない。この簡単化により処理の高速化を計

るものである。なお、該当する記憶断面が見出されなかった場合（可視域の計測点以外の領域を含む）については、2）の処理のみが実行される。つまり過去の情報を用いない補間が実施されることになる。

1) および 2) で行う補間曲面の生成は、地図の x 方向および y 方向に対し境界で連続性を保つ滑らかな曲線を独立に生成する。そして、たとえば補間点 p の高さ z_p は Fig.5-12 のように x 方向の補間曲線による高さを z_x 、可視域までの最短距離を l_x 、y 方向の補間曲線による値を z_y 、 l_y とすると、

$$z_p = \frac{z_x l_y + z_y l_x}{l_x + l_y} \quad (5-3)$$

のように重み付き平均値を求めることで行う。

補間曲線はスプライン関数が有効である³⁰⁾³¹⁾。スプライン関数は自在定規のように滑らかな曲線による補間を実現できる。しかしその生成には比較的長い処理時間を要する。そこで本論文では、より簡単な 3 次曲線による補間法を導入する。ただし、補間地形の下端の傾きが水平に近くかつ上端の傾きが垂直下向きに近い場合は、簡単に両端点から引いた 2 直線による直線補間を行うことにする。鋭く立ち上がる地形に安定に対応するためである。また、地図の領域の外側を地図の平均高さとする仮定を設けることで、地図の境界で異常な高さとなる誤りを防ぐことにする。

5-5 検証実験

5-5-1 提案する連想的想起法の有効性の検証

実モデルを 3D センサで計測し、そのデータに 5-4-1 で導入した手法で連想的想起を行う実験を行った。具体的には、2-5-1 で述べたレーザレンジファインダを用い、Fig.5-13 (a) のような発砲スチロールで作成した約 250mm × 250mm × 100mm の 12 個の対象物について、断面全体の形状を Fig.5-13 (b)

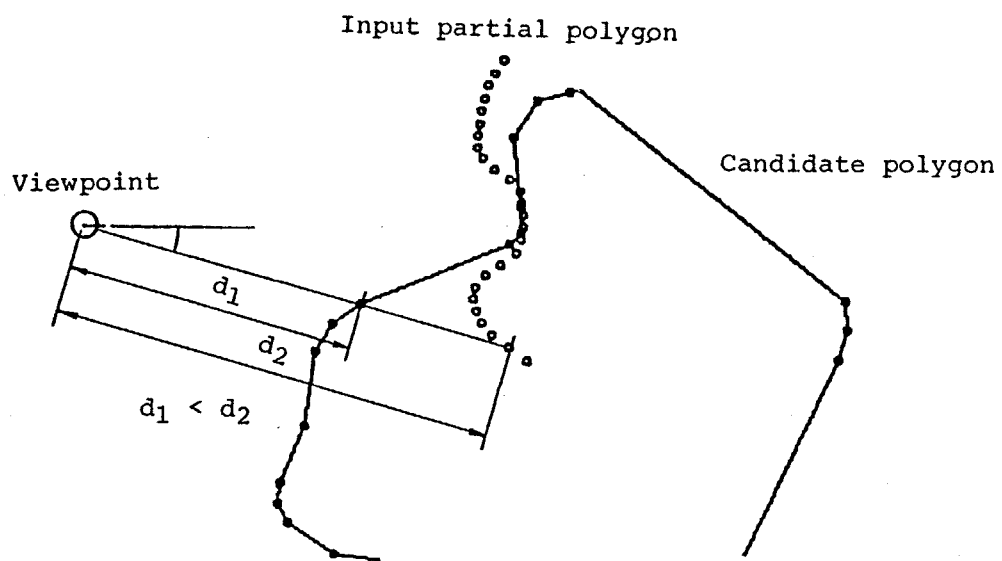


Fig.5-11 An example of inconsistent candidate polygon

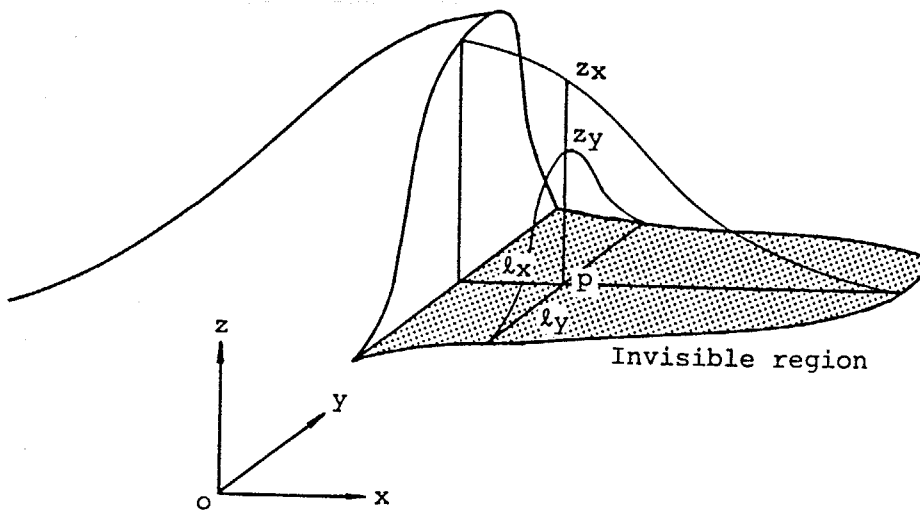
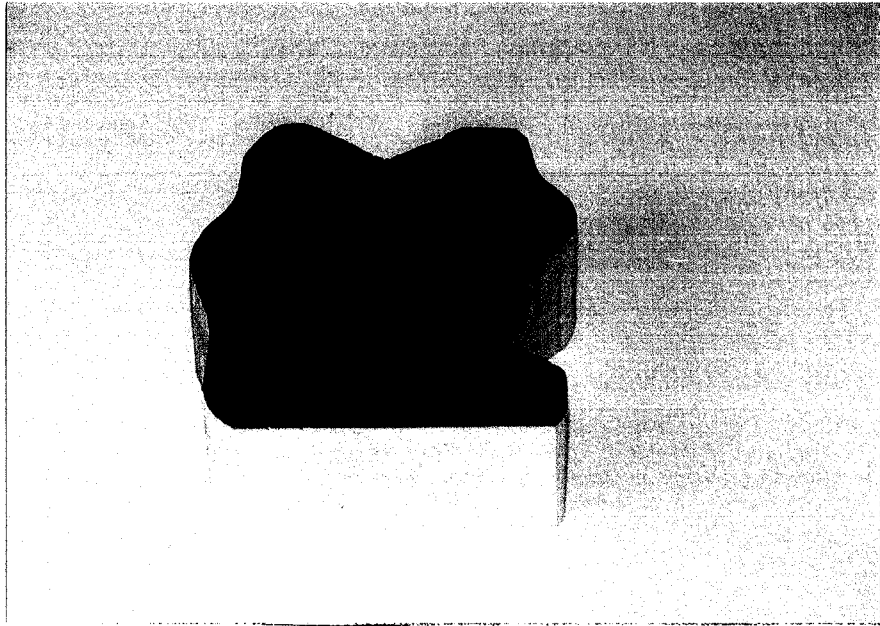
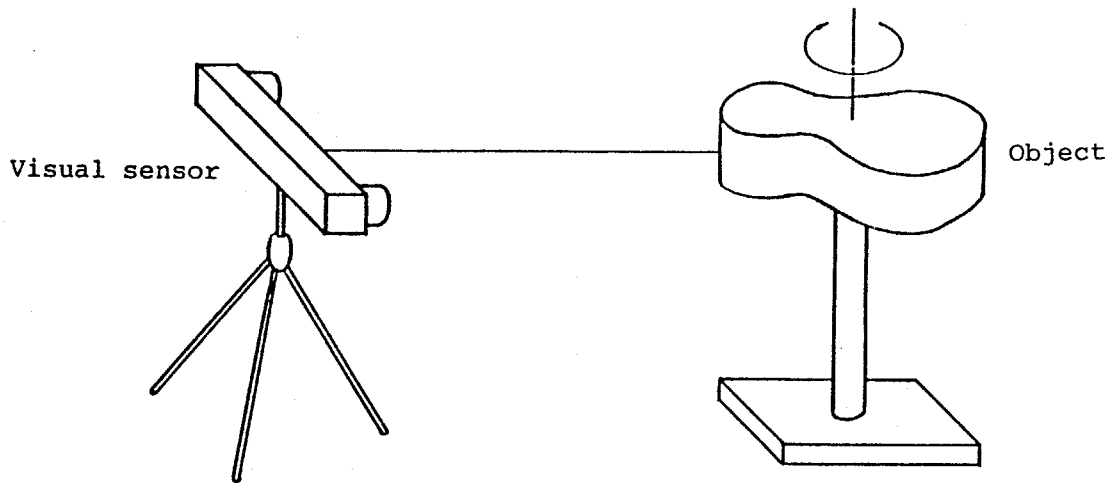


Fig.5-12 3D interpolation with interpolation curves



(a) An example of styrol object



(b) Measurement of object shape

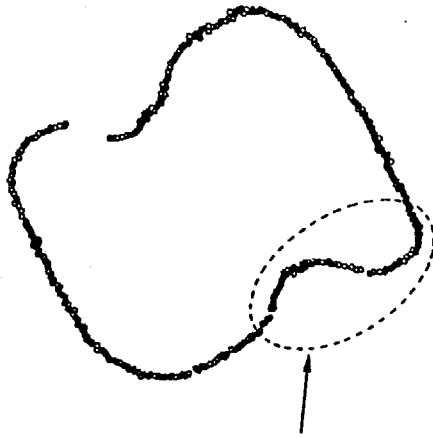
Fig.5-13 Object model and its shape measurement

のようにして測った。そして得られたデータを基に記憶情報の弁別木を生成した。また断面全体のデータから一部分を抜き出し、計測断面を模擬するデータを生成した。

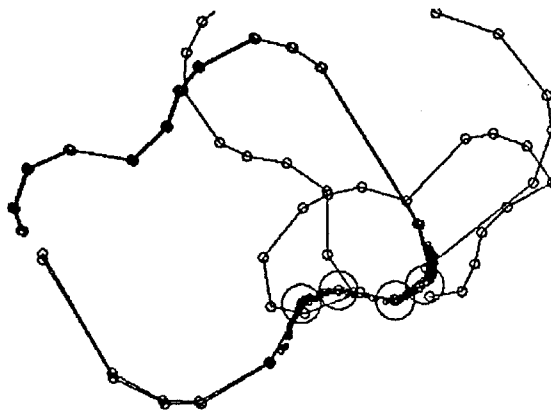
このような入力断面に対し連想的想起を行った結果の1例を Fig. 5-14 に示す。入力断面の各特徴部分に対し弁別木による探索を行った結果、各部分では記憶されている総数 177 個の特徴ベクトルの中から 2~3 個にまで絞り込むことが可能であった。しかし、各部分で照合された結果をすべて表示した Fig. 5-14 (b) からわかるように、対象物体の候補の絞り込みは未だ十分でない。そこでこれらの候補の中から同一物体でしかも特徴部分の番号が並ぶものを選択すると Fig. 5-14 (c) のようになる。計測結果を模擬した入力断面が小さいにもかかわらず、ほとんどの場合で最終結果として1つの物体、姿勢を特定することができた。ただし、入力断面に特徴的な部分が含まれていない場合には、該当する記憶特徴ベクトルは得られない。

また1つの断面から2つの模擬計測断面を生成し、それぞれについて照合結果を求めると、たとえば Fig. 5-15 のようになる。この実験結果例は、分割された部分断面が入力されたとき、それぞれにA補間法を施すことにより、それらが1つの物体のものであるか否かを判別できる可能性を示していると思われる。

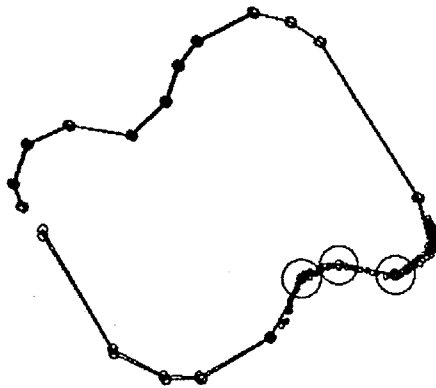
以上の処理を行うソフトウェアはC言語を用いて記述した。その結果、マイコン PC-9801 VX (NEC製、CPU 80286、80287、10 MHz) による処理時間は、オフラインの弁別木生成処理で1つの図形について平均 0.72 sec、オンラインの連想処理で1つの図形につき平均 0.37 sec であった。ただし、オンライン処理の処理時間の多くは断面形状から特徴ベクトルを抽出する前処理に費やされており、照合処理の平均時間は 50 msec に過ぎない。よって、記憶データが増した状況においても連想的想起に費やす時間は短く、全体の処理時間もそれほど増加しないことを注意しておく。



(a) Input partial cross section



(b) Local matching result



(c) Final consistent result

Fig.5-14 A result of matching experiment with the proposed method

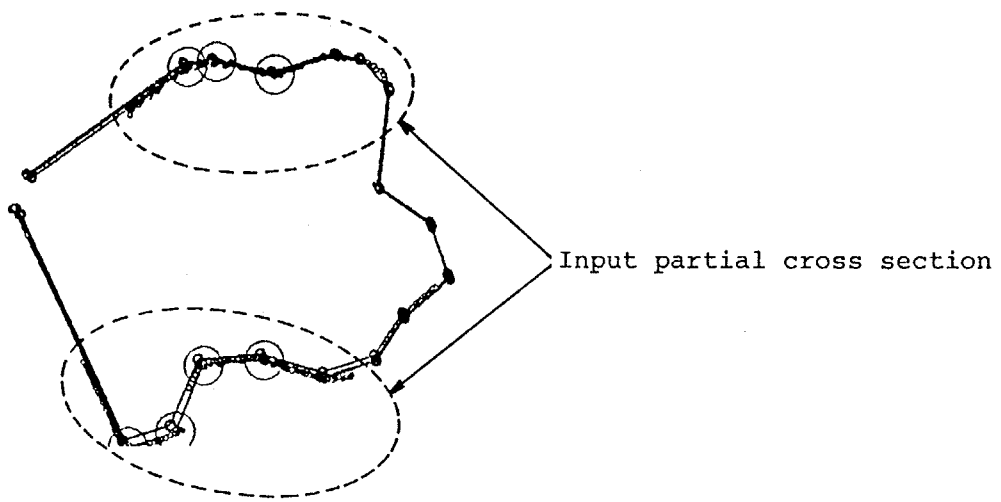


Fig.5-15 Matched results with
2 input cross sections

5-5-2 移動計測の計算機シミュレーション

次に、移動ロボットに搭載した視覚センサで移動しながら環境を計測し、そのとき生ずる死角域の地形をA補間法により補間してゆく状況を模擬した計算機シミュレーションを行った。ただし記憶断面の連想的想起法は文献³²⁾で提案した手法を用いている(5-4-1参照)。実験条件は次の通りである。

- 1) 高さ 1000 mm の柱状のモデル地形を地表上 1500 mm から移動しつつ計測してゆく状況とする。
- 2) 最初、記憶情報は持たないものとする。
- 3) 移動と共に計測を続けた結果、その対象物体の近辺を通過した時点では断面全体の情報が得られていると仮定する。よって、該当する記憶データがなく学習を行う場合、地形モデルの完全な断面を登録する。
- 4) 多角形近似の偏角のしきい値 α_t は 30° とする。

A補間法を適用して補間した結果を Fig.5-16 (a)~(e) に示す。そのときの正解率Rの推移をA補間法を行わない場合と比較して (f) に示す。ただし「正解率R」とは、補間すべき領域の中でP型地形、O型地形に正しく補間した割合と定義する。ここでP型地形とは歩行機械にとって山 (Pole) として障害になる地形 (ここでは単純に 250 mm 以上の高さをもつ地点とする)、またO型地形とは移動ロボットの対地適応性により平坦地とみなせる地形 (高さ 250 mm 未満の地点) である²⁸⁾。

(a) では記憶断面がないので正解率Rが低いが、(b)、(c) では (a) での記憶断面が学習されている。よってその記憶データが照合されたため、A補間法の正解率Rは行わない場合の結果より向上している。(d) はまた記憶断面がなく正解率Rに差が生じないが、(e) では (d) の記憶断面を用い正解率Rが上昇するという過程となっている。このシミュレーション結果から、A補間法によれば平均して高い正解率Rで補間ができることが予想される。

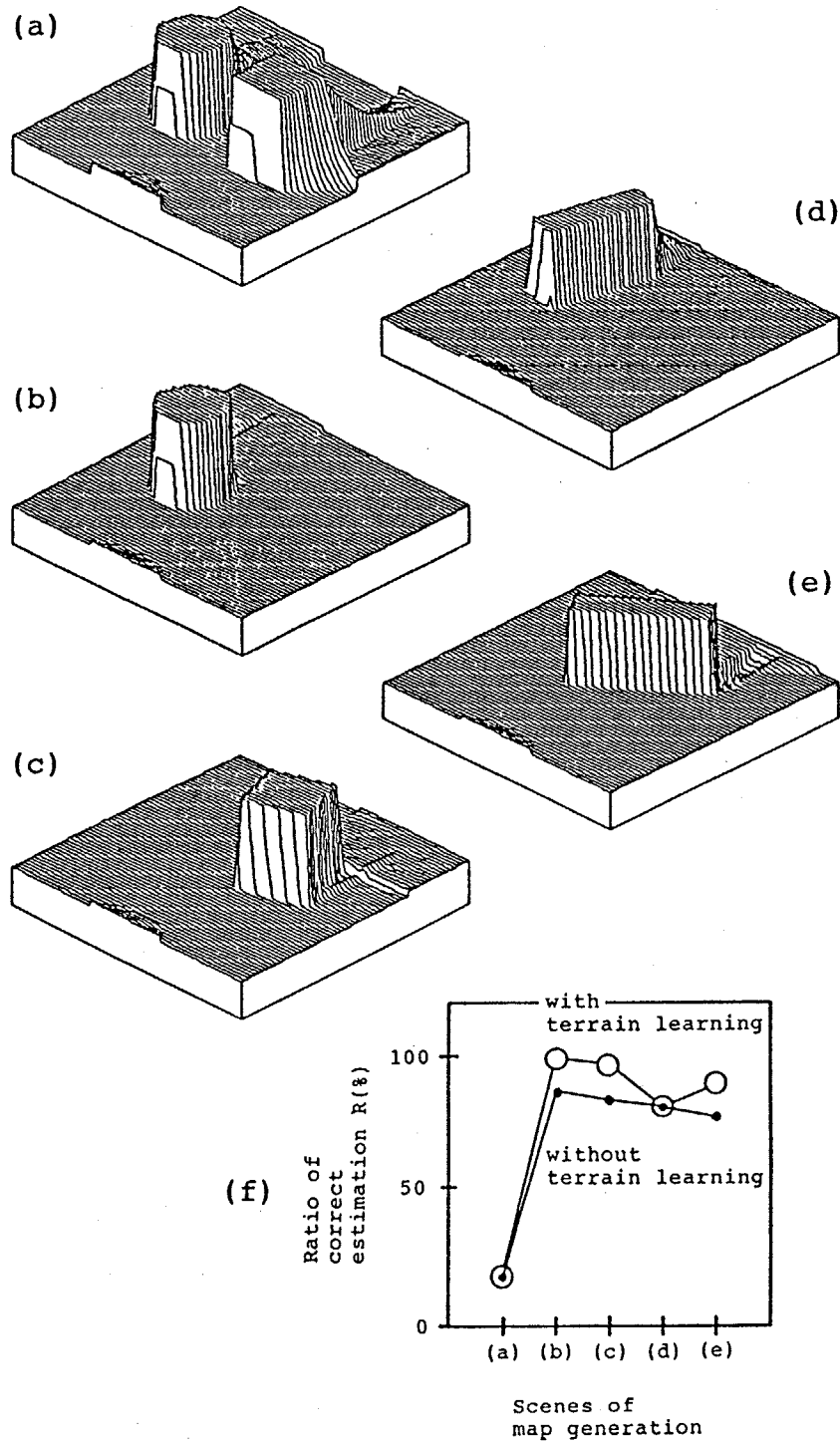


Fig.5-16 Terrain map generation experiments with the proposed A-interpolation method
 (a)-(e) Sequentially generated maps
 (f) Transitions of ratio of correct estimation R(%) during locomotion of scene from (a) to (e)

5-6 本章のまとめ

本章では、地図を生成する際障害となる死角域の問題について、人間の連想機能を模倣するA補間法を提案しその解決を試みた。これは3次元物体を2次元の水平断面で代表させ、その形状の照合により記憶断面(知識)を連想して補間に利用するものである。なお、記憶情報は計測結果を学習してゆくことにより次第に蓄積されるものとする。

本論文では、水平断面形状を表わす局所的な特徴量と高速なトリート探索法を導入し、正確かつ高速なA補間法の連想的想起を試みた。そしてその有効性を実験的に検証した。その結果、連想的想起に要する処理時間は1つの入力断面につき0.4 sec であり、十分な高速性が得られることが確認された。また移動ロボットに搭載した視覚センサが移動しながら計測してゆく状況を模擬した計算機シミュレーション実験を行い、学習効果を含むA補間法の有効性を検証した。

なお提案するA補間法は、単に移動の問題に限らず一般的な視覚情報処理系にとって重要な考え方であると思われる。たとえば生産ラインにおける機械部品の認識システムでもオクルージョンが1つの問題となっているが³⁴⁾⁻³⁶⁾、本研究は3次元のオクルージョン問題に対する1つのアプローチを与えるものと思われる。従来の手法は薄い物体を上方から観測して得られる2次元情報のみを扱うものである。これに対し提案した手法は、3次元情報から構成される地図から2次元情報を切り出し処理することにより、間接的に3次元情報を扱う。よって今後複数の高さの水平断面を扱うことにより、より複雑な3次元形状の物体の処理に発展できる可能性を有していると思われるからである。

また移動ロボットの位置同定問題への応用も考えられる。移動ロボットの絶対位置をたとえば車輪の回転角を測る内界センサで計測すると累積誤差が問題となる。この問題に対し、建築物内のようにあらかじめ地図が与えられるとすれば、計測情報を地図情報と照合することにより移動ロボットの位置同定が可能である³⁷⁾⁻⁴⁰⁾。この場合も、2次元の水平断面に注目しA補間法と同様な処理を行えば、有効な処理が可能であると思われる。

第6章

結論および今後の課題

第6章 結論および今後の課題

6-1 本論文の結論

本論文は、知能移動ロボットの効率的なナビゲーションに不可欠な視覚システムを地図生成視覚システムMARSと呼び、その検討を行った。その最も基本的な構成要素である1) 3Dセンサ、2) 第1次地図生成サブシステム、3) 死角域の形状補間サブシステムのそれぞれについて、具体的に構成法を検討した。

3Dセンサは、本目的に適するものが未だ実現されていなかったため、重点的な検討を要した。MARSは様々な環境下で移動しながら実時間計測を行うため、特別な考察を必要とした。具体的には、3角測量レーザレンジファインダと多眼ステレオビジョンを取り上げ、その性能向上を計った。

参照光を利用する3角測量レーザレンジファインダは、簡単な装置および処理で3次元計測を行えるため、MARSの3Dセンサとしても実用性が高い。しかし直射日光下での計測は、従来方式では困難であった。MARSは移動ロボットが活動する様々な環境下で計測を行うため、このような強力な外乱の下で計測を行える機能はきわめて重要だと思われる。そこで投射光を受光した信号がパルス信号となる点に注目しそれを選択抽出する「DDD法」と呼ぶ信号処理法と、複数のレンジファインダの冗長情報が成す簡単な関係を利用する「パルス位相差法」と呼ぶレーザレンジファインダ構成法を提案した。そして提案した手法の有効性を計測実験で検証した。その結果、DDD法とパルス位相差法を用いた試作レーザレンジファインダは、直射日光下の草地という著しく条件が厳しい環境においても、良好に計測可能であることを示した。

一方、受動方式のステレオビジョンは、遠距離まで計測できるなど利点が多い。しかしその実現は、対応点の決定処理に要する膨大な演算処理の長い処理時間のため阻まれてきた。このため、本論文では、パルス位相差法の考え方を延長し、多数のカメラから成る計測系から得られる冗長情報に生ずる簡単な判定条件を用いて対応点を決定する「多眼位相差法」を提案し、この問題の解決を計った。そして、実時間計測を行うステレオビジョンが本手法によれば構成できることを実験的に示した。このような実時間計測を行うステレオビジョンセンサの実現は、

移動ロボットの視覚系のみならずFA用ロボットなど多くの応用においてきわめて有効であると思われる。

以上述べた近距離の計測を行う小型のレーザレンジファインダと遠距離の計測を行うステレオビジョンを併用することにより、広い測定レンジをもつMARSのための3Dセンサ系は有効に機能するものと思われる。

3Dセンサ系から得られた3次元情報は、第1次地図として整理、保存される。本論文ではその生成法の具体的な検討を行った。大きな容量をもちしかもロボットに対し相対的に移動する地形を表わす地図を計算機メモリ空間に効率的に保存するため、「円環メモリ表現」を導入した。また移動ロボットの揺動および移動量をキャンセルしながら地図を生成する具体的な定式化を示した。そして、その有効性を4足歩行機械TITAN IIIに搭載した視覚センサによる計測実験で検証した。

このときオクルージョンのため計測不可能な死角域が発生し、地図生成の大きな障害となる問題が生ずる。そこで本論文では人間の連想機能を模倣する「A補間法」を導入し、この問題の解決を計った。A補間法は、物体の観測された部分の特徴を記憶情報と照合して一致する知識を引き出し、連想された形状情報をあてはめることにより死角域の地形を補間するというものである。なお知識は環境の計測結果を学習的に獲得してゆくものとする。本論文では研究の初期段階として、3次元物体を1枚の水平断面で代表させて扱う簡単化を行った。そして、水平断面形状を表わす局所的な特徴量とそのトリー探索で高速な連想を行う処理手法を明らかにした。本手法の基本的な有効性については、計測と計算機シミュレーションによる実験で示した。なお、提案したA補間法の応用は、死角域の形状推定に限定されない。たとえば移動ロボットの位置を同定する処理についても、屋内地図の水平断面に注目し、A補間法を適用することで、効率的に行えるものと思われる。

以上述べたサブシステムを統合することにより、

- 1) 3次元環境の実時間計測
- 2) 大きく変化し得る計測環境
- 3) ある程度軽量、コンパクトであることが必要

- 4) 環境全体について情報が必要
- 5) 移動する視点
- 6) 距離に依存する要求精度

等の特徴とする移動ロボット用視覚システムの実現が可能となったと考えている。

最後に、MARSは移動ロボットに限らずたとえばFA用ロボットなどについても著しく有効であることをあらためて強調しておきたい。従来のFA用ロボットは2次元視覚とそのために整備された環境を用いているが、MARSのように3次元視覚を基本とすれば、より高度な機能を容易に実現できると思われるからである。2次元視覚は計測する3次元物体を2次元に変換したためあいまいさを生じ、問題を複雑化していると考えられる。たとえば計測する方向、位置で計測対象の形状、大きさは異なるため、視点を固定する制限を設けるか、発生したひずみを補正する複雑な処理を必要とする。これに対し3次元視覚では、原理的にこのような問題は存在しないためである。

6-2 本研究に関する今後の課題

本論文ではMARSについてサブシステムごとに検討した。今後は、各サブシステムの統合によるシステムの完成とそのシステムとしての有効性検証が必要である。次に、大局的な地図生成法を含む、より機能を拡大したMARSの実現が必要となると思われる。また各サブシステムについても、各章で述べた課題を解決し、より充実した機能の実現が必要であろう。さらに、MARSの移動ロボット用視覚以外の応用についての検討も重要であると考えている。

6-3 謝辞

本研究の遂行に当たり逐一御指導下さった東京工業大学機械物理工学科 広瀬茂男助教授に深甚なる感謝の意を表します。本研究について常に熱心に御討論いただいた同学、梅谷陽二教授に深く感謝いたします。熱心に御指導いただいた神奈川工科大学 田口幹助教授に深謝いたします。

また熱心に御討論いただいた本学機械物理工学科 伊能教夫助手、吉田和哉助手、ならびに特にセンサの試作における機械加工に御協力下さった鈴木秀昭技官に感謝の意を表します。

貴重なアドバイスをいただいた生田幸士氏（現 カリフォルニア大学サンタバーバラ校）に感謝いたします。

視覚研究グループとして共同で研究を行った高橋信輔氏（現（株）日立製作所）国枝紀氏（現（株）石川島播磨重工業）、虎谷泰昌氏（現（株）キャノン）、そして本学修士課程 長谷川忠明氏に深く感謝します。高橋氏と国枝氏にはレーザーレンジファインダについて、虎谷氏と長谷川氏にはA補間法について多大な御協力をいただいたことを銘記しておきます。

また第4章で導入した円環メモリ表現の基本的アイディアは福田靖氏（現（株）東芝）によるものです。ここに銘記し、感謝の意を表します。

最後に、事務手続き等大変お世話になった梅谷研究室秘書 宮本雅子氏、ゼミ等における熱心な討論および論文作成に当たり多大な御協力をいただいた梅谷研究室研究生 青木実仁氏（（株）高岳製作所）、Dragomir Nenchev氏、同研究室院生 米田完、馬書根、高木達雄、藤森光章、森島昭男、藤原宏、三宅潤の諸氏、および同研究室学部生の諸君に深く感謝いたします。

参考文献

参考文献

第1章

- 1) C.N. Shen and C.S. Kim, "A Laser Rangefinder Path Selection System for Martian Rover Using Logarithmic Scanning Scheme", Proc. IFAC Symp., Automatic Control in Space, Oxford, U.K., (1979)
- 2) 自律移動ロボット (ALV) 特集号、日本ロボット学会誌、Vol. 5、No. 5、(1987)
- 3) T. Kanade, C. Thorpe, and W. Whittaker, "Autonomous Land Vehicle Project at CMU", Proc. 1986 ACM Computer Science Conf., pp. 71-80 (1986)
- 4) V. Graefe and K.D. Kuhnert, "Towards a Vision Based Robot with a Driver's License", Proc. 1988 IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 627-632 (1988)
- 5) 広瀬、"障害物の2次元的な分布の認識手法 - 知能自動車の人工眼 -"、計測自動制御学会論文集、Vol. 21、No. 2、pp. 137-144 (1985)

第2章

- 6) 谷内田、"視覚を用いた3次元位置・形状の計測とその応用"、システムと制御、Vol. 29、No. 10、pp. 631-638 (1985)
- 7) 出澤、"ロボットのための距離検出法"、計測と制御、Vol. 26、No. 2、pp. 103-110 (1987)
- 8) M. Hebert and T. Kanade, "First Results on Outdoor Scene Analysis Using Range Data", Proc. Image Understanding Workshop, pp. 224-231 (1985)
- 9) 宮本、北村、白井、"レンジファインダによる3次元物体の計測"、電子技術総合研究所彙報、Vol. 35、No. 3、pp. 297-307 (1971)
- 10) American National Standards Institute, "ANSI Standard Z136.1" (1980)

- 11) International Electrotechnical Commission, Technical Committee No. 76; Laser Equipment 76 (Central Office) 6 (1980)
- 12) ”画像処理ハンドブック”、同編集委員会編、昭晃堂、pp. 606-607 (1987)
- 13) 広瀬、吉田、田口、”地図生成視覚システム MARS の研究 (背景光と揺動外乱のキャンセリング)”、日本ロボット学会誌、Vol. 4、No. 3、pp. 241-252 (1986)
- 14) 青木、谷内田、辻、”パターン投影法と2台のカメラを用いた3次元物体の計測”、電子通信学会論文誌、Vol. J68-D、No. 3、pp. 384-391 (1985)

第3章

- 15) 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)
- 16) K.L. Boyer and A.C. Kak, ”Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 1, pp. 14-28 (1987)
- 17) 荒木、田中、藤野、佐藤、”高速3次元形状計測装置の試作”、電子情報通信学会論文誌、Vol. J71-D、No. 10、pp. 2059-2068 (1988)
- 18) 福永、笠井、”ステレオ画像法とその応用”、システムと制御、Vol. 30、No. 4、pp. 220-227 (1986)
- 19) 日経メカニカル 1986. 2. 10, pp. 39-41 (1986)
- 20) H.P. Moravec, ”Visual Mapping by a Robot Rover”, Proc. 6th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, pp. 598-600 (1979)
- 21) 北村、谷内田、”三眼視による三次元情報の計測”、日本ロボット学会誌、Vol. 5、No. 2、pp. 131-138 (1987)
- 22) 山本、大田、池田、”水平配置3眼ステレオ視による隠れの改善”、情報処理学会論文誌、Vol. 29、No. 9、pp. 898-906 (1988)

- 23) R. Y. Tsai, "Multiframe Image Point Matching and 3-D Surface Reconstruction", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-5, No. 2, pp. 159-174 (1983)
- 24) 数見、公開特許広報 (A) 昭57-175206 (1982)
- 25) R. C. Bolles, H. H. Baker and D. H. Marimont, "Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion", Int. J. Computer Vision, Vol. 1, pp. 7-55 (1987)
- 26) 山本、"連続ステレオ画像からの3次元情報の抽出"、電子通信学会論文誌、Vol. J69-D, No. 11, pp. 1631-1638 (1986)
- 27) R. Jain, S. L. Bartlett, and N. O'Brien, "Motion Stereo Using Ego-Motion Complex Logarithmic Mapping", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 3, pp. 356-369 (1987)

第4章

- 28) 広瀬、福田、菊池、"4足歩行機械の制御システム"、日本ロボット学会誌、Vol. 3, No. 4, pp. 304-324 (1985)
- 29) "マイクロコンピュータ応用ハンドブック"、同編集委員会編、昭晃堂、pp. 542-552 (1983)

第5章

- 30) 広瀬、前川、梅谷、"地図作成型視覚システムの情報処理" 日本ロボット学会誌、Vol. 2, No. 3, pp. 191-199 (1984)
- 31) C. S. Kim and C. N. Shen, "Estimating Planetary Terrain Slopes from Range Measurement Using a Two Dimensional Spline Smoothing Technique", Proc. IFAC Symp., (1981)

- 32) 広瀬、吉田、虎谷、” 地図生成視覚システム MARS の研究 (実時間地図構成法の検討)”、日本ロボット学会誌、Vol. 6、No. 1、pp. 14-25 (1988)
- 33) 長尾、” 画像認識論”、コロナ社、pp. 18-22 (1983)
- 34) R. C. Bolles and R. A. Cain, ”Recognizing and Locating Partially Visible Objects: The Local-Feature-Focus Method”, The Int. J. Robotics Research, Vol. 1, No. 3, pp. 57-82 (1982)
- 35) A. M. Wallace, ”Feature Determination and Inexact Matching of Images of Industrial Components”, IEE Proc., Vol. 132, Pt. E, No. 6, pp. 309-315 (1985)
- 36) T. F. Knoll and R. C. Jain, ”Recognizing Partially Visible Objects Using Feature Indexed Hypotheses”, IEEE J. Robotics and Automation, Vol. RA-2, No. 1, pp. 3-13 (1986)
- 37) K. Sugihara, ”Location of a Robot Using Sparse Visual Information”, Proc. 4th Int. Symp. Robotics Research, pp. 319-326 (1987)
- 38) T. Tsubouchi and Shin'ich Yuta, ”The Map Assisted Mobile Robot's Vision System - An Experiment on Real Time Environment Recognition -”, Proc. 1988 IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 659-664 (1988)
- 39) 中村、上田、” 移動ロボット位置決めのための垂直エッジパターン分布マッチング手法”、計測自動制御学会論文集、Vol. 18、No. 6、pp. 576-582 (1982)
- 40) M. Yachida, T. Ichinose and S. Tsuji, ”Model-Guided Monitoring of a Building Environment by a Mobile Robot”, 8th Int. Joint Conf. Artificial Intelligence, pp. 1125-1127 (1983)

研究業績

[印刷論文]

- 1) 広瀬、吉田、田口、”地図生成視覚システムMARSの研究(背景光と揺動外乱のキャンセリング)”、日本ロボット学会誌、Vol.4、No.3、pp.241-252 (1986)
- 1') S.Hirose, K.Yoshida and K.Taguchi, "The Study of a Map Realization System (Cancellation of Ambient Light and Swaying Motion of a Robot)", Advanced Robotics, Vol.2, No.3, pp.259-276 (1987)
- 2) 広瀬、吉田、虎谷、”地図生成視覚システムMARSの研究(実時間地図構成法の検討)”、日本ロボット学会誌、Vol.6、No.1、pp.14-25 (1988)
- 3) K.Yoshida and S.Hirose, "Laser Triangulation Range Finder Available under Direct Sunlight", Proc. 1988 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1702-1708 (1988)
- 3') 吉田、広瀬、”直射日光下で使用できる三角測量レーザーレンジファインダ”、計測自動制御学会論文集、Vol.24、No.5、pp.445-451 (1988)

[講演論文]

- 1) 広瀬、吉田、田口、梅谷、”地図生成視覚システム(MARS)の研究 その1 背景光と揺動外乱のキャンセリング”、第3回日本ロボット学会学術講演会予稿集、pp.281-284 (1985)
- 2) 広瀬、吉田、虎谷、”地図生成視覚システム(MARS)の研究 その2 地図構成法の検討とその実時間生成実験”、第3回知能移動ロボットシンポジウム予稿集、pp.73-78 (1986)
- 3) 広瀬、吉田、”レンジファインダの背景光外乱除去性能の改善手法”、第25回SICE学術講演会予稿集、pp.511-512 (1986)

4) 吉田、広瀬、”地図生成視覚システム(MARS)の研究 その4 位相差推定法の提案と実験的検討”、第26回SICE学術講演会予稿集、pp.627-628 (1987)

5) 吉田、広瀬、”地図生成視覚システム(MARS)の研究 その5 多眼ステレオビジョンによる高速3次元計測の実現”、第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集、pp.443-444 (1987)

6) 吉田、広瀬、”地図生成視覚システム(MARS)の研究 その6 多眼位相差法ステレオビジョンの検討”、第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集、pp.553-554 (1988)

7) 広瀬、吉田、長谷川、”地図生成視覚システム(MARS)の研究 その7 知識工学的手法による地図の連想的推定補間”、第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集、pp.555-556 (1988)

付録

- A 記号表
- B レーザの反射を常に焦点の合った状態で受光する光学系
- C 3角測量型3Dセンサの計測誤差

付録 A 記号表

本論文で用いた主な記号および座標系を以下に示す。

第 2 章、第 3 章

L R F : レーザレンジファインダ

S V : ステレオビジョン

n : カメラ数

D : 3 角測量型視覚センサの両端カメラ間距離

l_i : カメラ間隔 ($i = 1 \sim n - 1$)

f : レンズ焦点距離

w, h : イメージセンサの幅および高さ

N_p, N_l : 水平解像度および垂直解像度

γ : L R F の参照光投射角

α_i : カメラ i ($i = 1 \sim n$) への入射角

u_i, v : 計測点の像の位相 ($i = 1 \sim n$) および鉛直座標

u_0, v_0 : 光軸と画面の交点の u, v 座標

u_i^*, v^* : 整数化位相 ($i = 1 \sim n$) および走査線番号

N_f : 偽対応平均個数 (計測点数 : m)

x_{max} : S V の視野上限

o - x y z : センサ座標系

第4章

L_x, L_y : 第1次地図のセルの幅

\bar{z}_n, s_n : 第1次地図セルの平均高さおよび平均偏差

p : \bar{z}_n, s_n 算出における重み定数

T_0 : 忘却時定数

$\theta_r, \theta_p, \theta_y$: 移動ロボットの仮想地図座標系に対する角度
(ロール角、ピッチ角、ヨー角)

$O-x_yz$: センサ座標系

$O_m-x_my_mz_m$: 移動ロボット座標系

$O_r-x_ry_rz_r$: 実地図座標系

$O_v-x_vy_vz_v$: 仮想地図座標系

[] : ガウス記号

第5章

α_0, α_1, l, p : 物体水平断面の局所特徴量ベクトルの成分 (近似多角形の注目する辺の両端の角、辺長、および表面の傾斜角)

θ, S : 断面周上の偏角および周長

R : A補間法の正解率 (P型地形、O型地形に正しく補間した領域の割合)

付録B レーザの反射を常に焦点の合った状態で受光する光学系

Fig.A-1 のような光学系について考える。ここでは簡単のため薄いレンズを仮定し、第1主平面と第2主平面は一致させておく。一般のレンズの場合は、点 p のある側は第1主平面を、点 p' のある側は第2主平面を Fig.A-1 の主平面とみなして考えればよい。

ガウスの定理より、焦点の右側にある任意の点 $p(x, y)$ とその像 $p'(x', y')$ に対し、

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{-x'} = \frac{1}{f} \quad (\text{A-1})$$

ただし、 f : レンズ焦点距離

が成立するから、

$$\begin{cases} x = \frac{f x'}{f + x'} & (\text{A-2}) \\ y = -y', \quad \frac{x}{-x'} = \frac{f y'}{f + x'} & (\text{A-3}) \end{cases}$$

となる。よって、点 p が直線

$$l_1: y = (-\tan \gamma) x + d \quad (\text{A-4})$$

上を移動すると、(A-2) 式、(A-3) 式を (A-4) 式に代入して、

$$y' = (\tan \beta) x' + d \quad (\text{A-5})$$

$$\text{ただし、} \tan \beta + \tan \gamma = d / f \quad (\text{A-6})$$

となる。これは、点 p の像 p' の軌跡が、レンズ主平面と直線 l_1 の交点 A

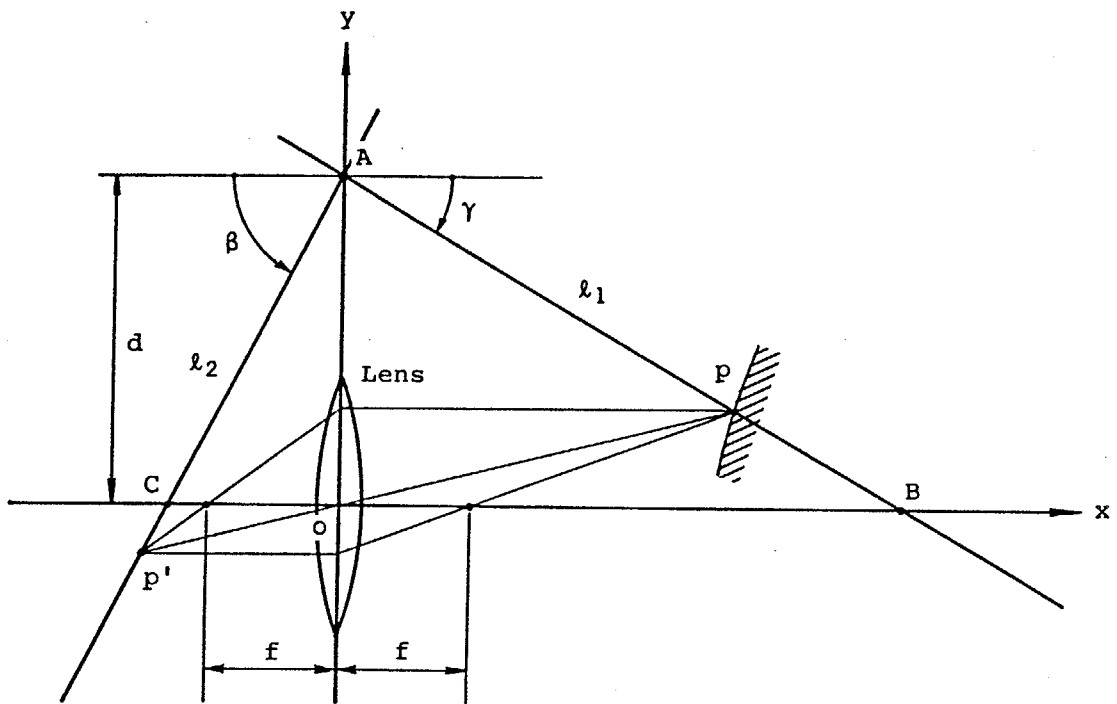


Fig.A-1 Principle of self-focus lens system for laser range finder

(0, d) と点 B の像 C ($f d / (f \cdot \tan \gamma - d)$, 0) を通る直線 l_2 となることを示している。ただし、 γ ($0 < \tan \gamma < d / f$)、 d (> 0) の選び方は任意である。

このことから、レーザビームを l_1 に沿って投射し、イメージセンサをその受光面が l_2 上となるように配置すれば、計測対象上の反射点までの距離にかかわらず常に焦点の合った反射点の像を得ることが可能となる。

この性質は、スリット光と 2 次元イメージセンサを用いた Fig.A-2 のような光学系でも実現可能である。光軸を含む任意の平面 S で切断したとき、スリット光との交線は点 B、イメージセンサとの交線は点 C をそれぞれ通り、かつそれらの直線はレンズ主平面上の点 A で交わり、Fig.A-1 の関係が満足されるためである。

また γ を変化させて投射光を空間走査した場合も、たとえば Fig.A-3 のような機構を用いて (A-6) 式を満たすようにイメージセンサの角度 β を変化させれば、上記の性質を保つことが可能である。

以上より、レーザの反射を常に焦点の合った状態で受光する光学系は、走査スリット光と 2 次元イメージセンサを用いる光切断法で利用できることがわかる。これにより、精度の高い計測が可能である。

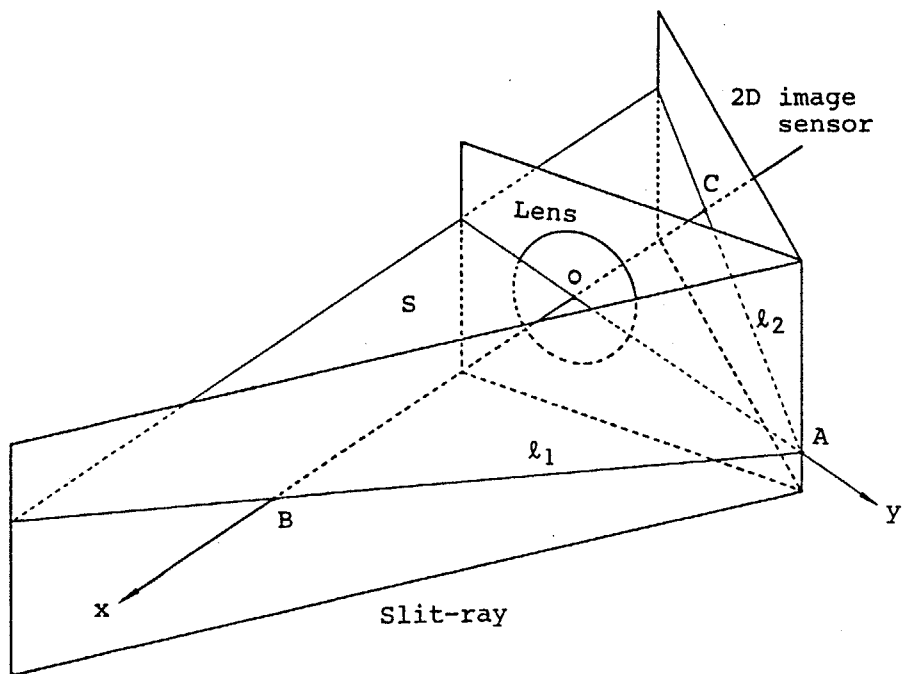
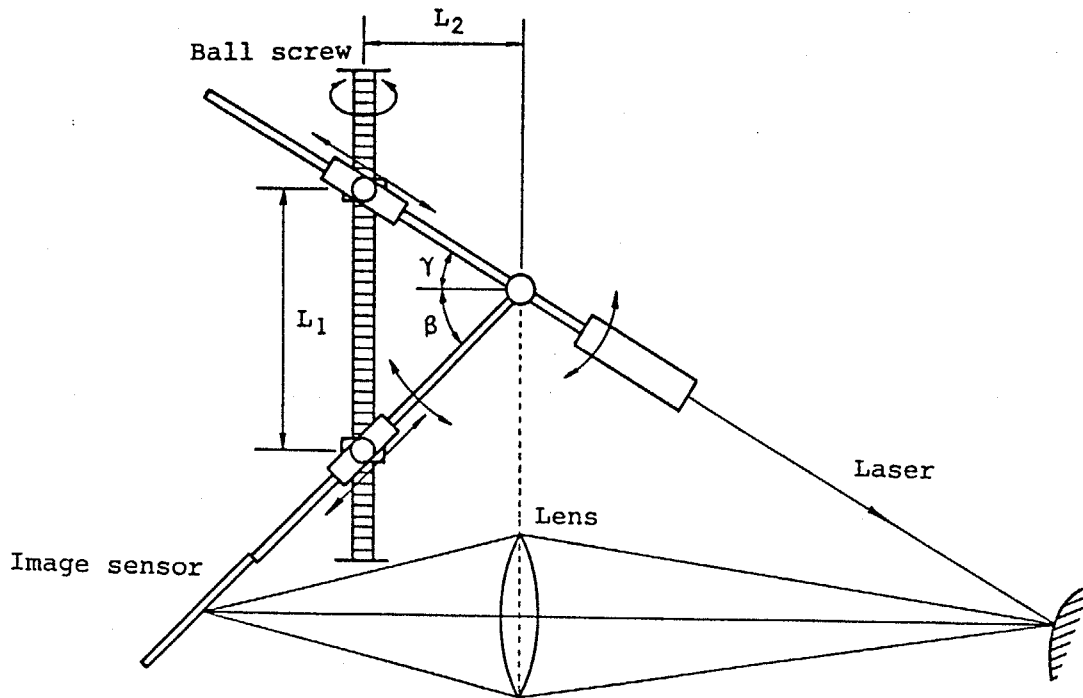


Fig.A-2 Self-focus lens system for slit-ray and 2D image sensor system



$$\tan\beta + \tan\gamma = L_1/L_2 : \text{const.}$$

Fig.A-3 An example of self-focus mechanism with scanning light

付録 C 3角測量型3Dセンサの計測誤差

Fig.A-4 のような3角測量型センサにおいて、 (v, u_A, u_B) からの3次元座標 (x, y, z) を導出する処理は、(3-6) 式と同様に、

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{f D}{u_B - u_A} \end{array} \right. \quad (\text{A-7a})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y = x \frac{2u_0 - u_A - u_B}{2f} \end{array} \right. \quad (\text{A-7b})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z = x \frac{v_0 - v}{f} \end{array} \right. \quad (\text{A-7c})$$

により行なう。

このとき、位相の量子化誤差による計測誤差が生ずる。これは、Fig.A-4 のドットで示す6面体の内部の点が点 p で代表されるために生ずる誤差である。その誤差の大きさを求めるために (A-7) 式をそれぞれ微分すると、

$$\left\{ \begin{array}{l} dx = \frac{x^2}{f D} du_A - \frac{x^2}{f D} du_B \end{array} \right. \quad (\text{A-8a})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} dy = \frac{x}{f} \left(\frac{y}{D} - \frac{1}{2} \right) du_A - \frac{x}{f} \left(\frac{y}{D} + \frac{1}{2} \right) du_B \end{array} \right. \quad (\text{A-8b})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} dz = \frac{x z}{f D} du_A - \frac{x z}{f D} du_B - \frac{x}{f} dv \end{array} \right. \quad (\text{A-8c})$$

と求まる。

位相の量子化による最大誤差 $\Delta u_A, \Delta u_B, \Delta v$ は、

$$\Delta u_A = \Delta u_B = \frac{w}{N_p} \times \frac{1}{2} = \frac{w}{2N_p} \quad (\text{A-9a})$$

$$\Delta v = \frac{h}{N_i} \times \frac{1}{2} = \frac{h}{2N_i} \quad (\text{A-9b})$$

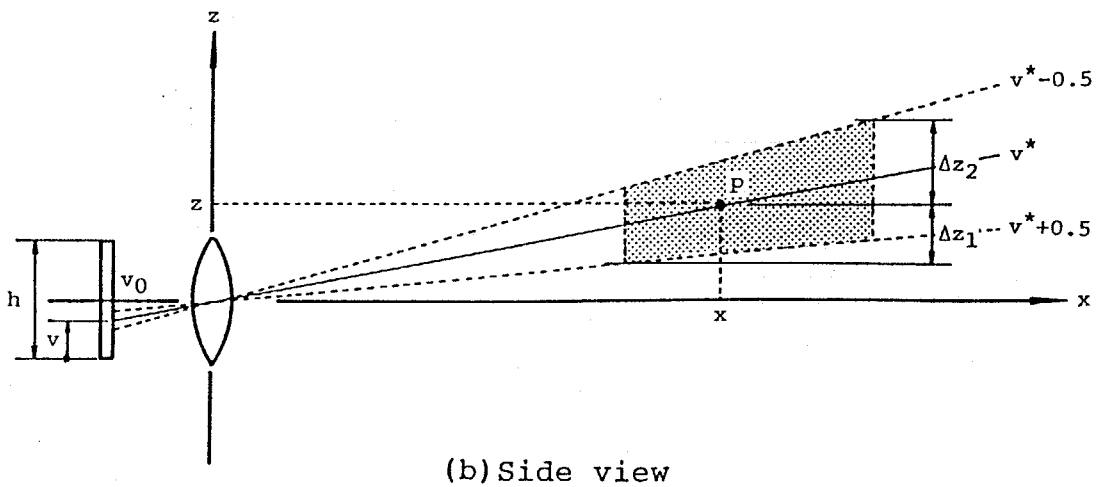
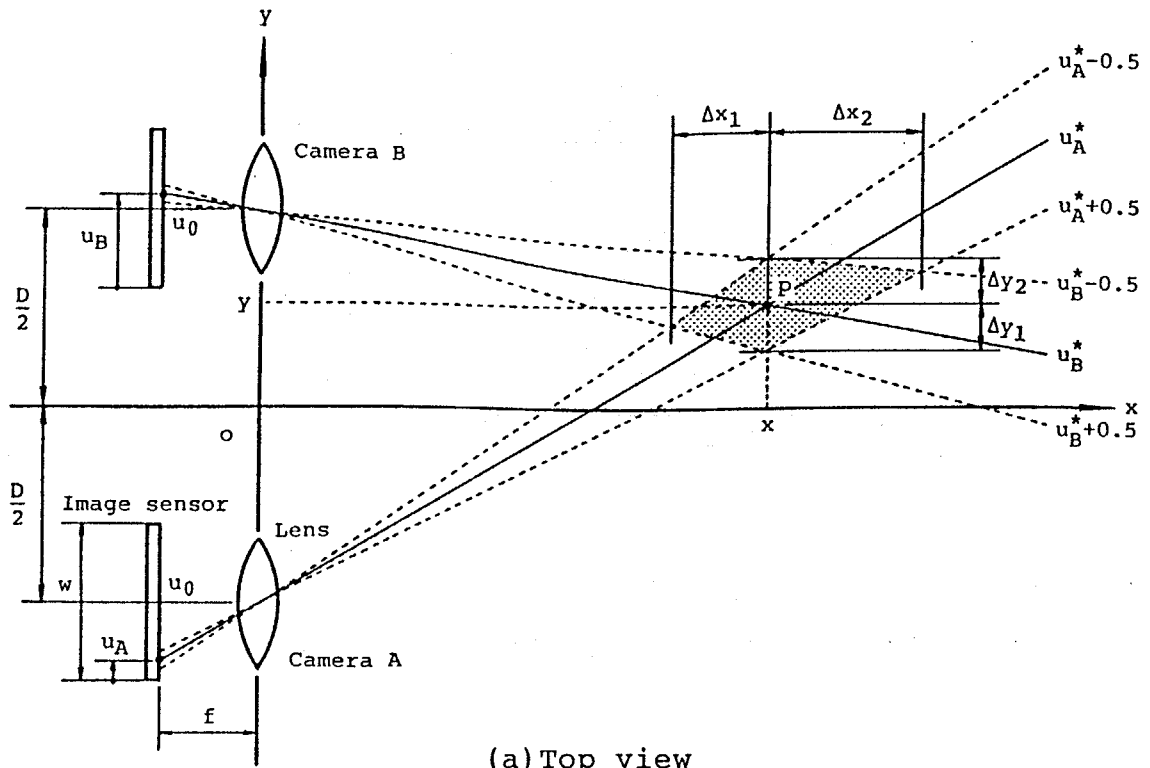


Fig.A-4 Measurement error caused by quantization of phase u and v

ただし、 w , h : イメージセンサの幅および高さ

N_p , N_1 : 水平解像度および垂直解像度

であるから、 x , y , z の Δu_R , Δu_B , Δv による最大誤差 Δx ($= \Delta x_1 = \Delta x_2$), Δy ($= \Delta y_1 = \Delta y_2$), Δz ($= \Delta z_1 = \Delta z_2$) を (A-8) 式の微分で近似すれば、

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta x = \frac{w}{f D N_p} x^2 \end{array} \right. \quad (A-10a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta y = \begin{cases} \frac{w}{f D N_p} x |y| & (|y| \geq \frac{D}{2}) \\ \frac{w}{2 f N_p} x & (|y| < \frac{D}{2}) \end{cases} \end{array} \right. \quad (A-10b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta z = \frac{w}{f D N_p} x |z| + \frac{h}{2 f N_1} x \end{array} \right. \quad (A-10c)$$

と求まる。