

博士論文

距離データを用いた知能ロボットの
視覚機能に関する研究

荒川賢一

2015年11月

距離データを用いた知能ロボットの視覚機能 に関する研究

荒川賢一

内容梗概

人間の作業を代行し，実世界で自律的な行動をおこなう知能ロボットの實現においては，環境をセンシングし，その状況に応じて行動を決定する機能が必須である．実世界の3次元構造を直接的にセンシングするレンジセンサは非常に有効である．本論文では，レンジセンサで得られた距離データを様々なシーンでの知能ロボットの制御に活かす技術の實現について考察する．まず第1章では，知能ロボットの要件としてのセンシング機能について述べ，第2章では，火星探査用ロボットのための自然地形の立体地図作成を目的としたフラクタル幾何に基づく距離画像からの高さデータの補間法，および不確定性分布の算出法について述べる．第3章では，板状部材を構成したワークに対して施す塗装工程のひとつであるシーリングをおこなうロボットを倣い制御するための，レンジセンサからのデータからの作業目標点検出法について述べる．第4章では，第3章で述べるシーリングロボットなど，倣い制御ロボットの手先搭載に適している極細のレンジセンサの構成法について述べる．第5章では，本論文のまとめと，情報システムとしてのロボット研究の今後の方向性について述べる．

A Study on Visual Function of the Autonomous Robots using Range Data

Kenichi Arakawa

Abstract

In the realization process of the robots that perform autonomous actions in the real world, there are essential functions to sense the three-dimensional (3-D) environment and to determine actions according to various situations. For the functions, range sensors for directly sensing 3-D structures in the real world are effective. The target of this thesis is to clarify the implementation of control techniques for the autonomous robots by using the range data acquired by range sensors in various scenes. In the chapter 1, the author surveys the sensing functions required in autonomous robots, Chapter 2 describes a fractal geometry based interpolation method which keeps the original roughness of sensed data, and also a computation method of the uncertainty distribution of the interpolated results. These methods are applicable to 3-D terrain mapping for the Mars exploration robot. Chapter 3 describes a fast detection method of seam feature tracked by the industrial robots for sealing process. Chapter 4 also describes a design method of superfine range sensor suitable for such as the sealing robots described in Chapter 3. Finally in Chapter 5, as the summary of this thesis, we describe a future direction of the research to realize the autonomous robot as an information system for management.

目次

1. 緒言	1
1.1 知能ロボットとは	1
1.2 知能ロボット制御のためのセンシング	3
1.3 本論文の構成	4
2. フラクタル幾何を適用した自然地形のモデリング	5
2.1 まえがき	5
2.2 フラクタル次元の推定	8
2.2.1 フラクタルブラウン関数アプローチ	8
2.2.2 距離画像への適用と実験結果	9
2.3 粗さを保存した地形地図の作成	13
2.3.1 正則化による表面再構成	14
2.3.2 与えられたボルツマン分布に従うフラクタル表面の生成	16
2.3.3 一般のフラクタル次元をもつ表面の再構成	18
2.3.4 実験結果とその考察	21
2.4 不確定性の推定	26
2.4.1 モンテカルロ法による不確定性分布の算出	26
2.4.2 実験結果とその考察	27
2.5 あとがき	31
3. トラッキングロボットによるシーリングのための高速な作業目標点検出	32
3.1 まえがき	32
3.2 シム形状のモデリング	35
3.3 システム構成	37
3.4 作業目標点検出アルゴリズム	41
3.4.1 途切れ位置の決定と途切れ検出	41

3.4.2 途切れからの作業目標点検出	43
3.4.3 誤検出目標点の除去	44
3.4.4 次観測の視野範囲の決定	45
3.5 実験結果とその考察	47
3.6 あとがき	51
4. 狭あい部での断面計測のための極細レンジセンサの構成	52
4.1 まえがき	52
4.2 小型化のための技術的要素	54
4.3 極細レンジセンサの一実現形態	56
4.3.1 ハードウェア	56
4.3.2 キャリブレーション	58
4.4 実験結果とその考察	61
4.4.1 精度評価	61
4.4.2 今後の課題	64
4.5 あとがき	65
5. 結言	66
5.1 知能ロボットに必要な要素	66
5.2 情報システムとしての知能ロボット	67
5.3 今後の方向性	69
謝辞	71
参考文献	73
研究業績	78

図目次

1	地形モデリングの概要	6
2	Perceptron による地形の高さの観測パターン	9
3	フラクタル次元推定における許容域の設定	10
4	フラクタル次元の推定結果	11
5	フラクタル次元推定に用いた距離画像	12
6	補間処理の入力データ	20
7	Szeliski の提案手法による補間結果	21
8	Szeliski の提案手法による補間結果のフラクタル性推定	21
9	提案手法による補間結果	22
10	提案手法による補間結果のフラクタル性推定	23
11	提案手法による距離画像からの高さデータの補間結果	24
12	地形地図のフラクタル性推定	25
13	生成データに対する不確定性地図の推定結果	28
14	距離画像からの不確定性地図の推定結果	29
15	推定された不確定性と補間による誤差の関係	29
16	誤差を不確定性で正規化したものの分布	30
17	典型的なシムの例	34
18	典型的なシムの断面形状および周辺の状態	35
19	シム断面の典型的な 4 つのパターン	36
20	レンジセンサを伴うシーリングシステムの構成	37
21	レーザレンジセンサの光学系	38
22	典型的なシム断面の観測データ	39
23	作業目標点検出アルゴリズムのフロー	40
24	平行に投射されるレーザ光によるシム断面近傍の観測	41
25	部材断面を観測した場合のシム検出	43

2 6	実ワークに対するシーリングパスの構成	48
2 7	先読み型トラッキングロボットシステムの例（シーリング用）	53
2 8	三角測量による距離の計測原理	54
2 9	提案するレンジセンサの構成	56
3 0	光偏向器	56
3 1	極細レンジセンサの試作機	57
3 2	内挿により得られたキャリブレーション結果	60
3 3	LUT を算出するキャリブレーション法の流れ	60
3 4	石膏像の稜エッジの観測結果	61
3 5	球面（ピンポン玉）の一部の観測結果	61
3 6	奥行き方向 0.5mm 間隔の平面の観測結果	62
3 7	走査方向の精度測定のための不連続点検出	63

表目次

1	提案手法により推定されたフラクタル次元	13
2	生成データに対して提案手法により決定されたパラメータ	22
3	実測データに対して提案手法により決定されたパラメータ	25
4	3種のシム断面パターンのシム検出結果	46
5	浮きのない2枚合わせに対する静的観測実験の結果	47
6	実ワークの観測実験における視野制御の効果	49
7	実ワークに対する観測実験の結果	50
8	極細レンジセンサ試作機の仕様	58

第 1 章

緒言

本章では知能ロボットとは何か、および、知能ロボット制御のためのセンシングについて考察したうえで、本論文の構成について述べる。

1.1 知能ロボットとは

近年、日常の生活シーン中にもロボット (robot) が見いだせるようになってきた。たとえば、ルンバなどの掃除機ロボットは複数社が製造し、広く普及し始めている。ロボットという言葉は 1920 年にチェコスロバキア (当時) の小説家カレル・チャペックが発表した戯曲「R.U.R」で初めて用いられたが、その語源はチェコ語で「賦役」(強制労働) を意味する *robota* といわれている。ロボットという言葉が最初に生み出された時より、ロボットの意味は、人間の代わりに何らかの作業を自律的にこなす装置、もしくは機械であった。ちなみに、アイザック・アシモフは 1950 年に刊行された SF 小説「われはロボット」の中で、以下のようなロボット工学 3 原則を記した。

- ・ 第一条 ロボットは人間に危害を加えてはならない。また、その危険を看過することによって、人間に危害を及ぼしてはならない。
 - ・ 第二条 ロボットは人間にあたえられた命令に服従しなければならない。ただし、与えられた命令が、第一条に反する場合は、この限りでない。
 - ・ 第三条 ロボットは、前掲第一条および第二条に反するおそれのない限り、自己をまもらなければならない。
- 2058 年の「ロボット工学ハンドブック」第 56 版、「われはロボット」より

先の戯曲「R.U.R」の中にもロボットを作った人間をロボットが破滅させるという展開が記されているが、その脅威に対するロボットの安全性に関する機能の原則を示したものが上記の3原則である。この考えはSF小説の域を超え、ロボット工学の考えに根差すものとなっている。たとえ知能、もしくは知的能力として人間を超える、いわゆるシンギュラリティ（技術的特異点）[5-6]の状況を迎えたとしても、ロボット工学3原則が機能すれば、ロボットそのものが脅威となることはない。

さて、ロボットが人間を代替しておこなう作業とはいかなるものであろうか。たとえば宇宙空間や衛星表面での作業、もしくは災害復旧や救助などの作業は、人間にとって過酷な環境での作業であるという意味で、まさにロボットがおこなうべきものである。また、大量生産における組立てなどの繰返し作業や、家庭における掃除などの単純ではあるが手間のかかる作業も、ロボットが正確に繰返しおこなってくれることが望まれる。なお、産業用ロボットは工場のラインといった人間の作業におけるベストな環境でないところで作業を代替するという面で、過酷な環境下での作業の代替という色合いも持つ。なお最近の研究（例えば[5-1][5-2]）では、ヒューマノイド（人間型ロボット）や動物のような愛らしい身体性をもつロボットが、老人や幼児とのコミュニケーションを円滑にし、さまざまなコミュニケーション支援に役立つということもわかってきた。

知能を持つ、もしくは知的に自律的に振る舞うロボットを知能ロボットと呼ぶ。昨今、知能ロボットというと人間とインタラクションをおこなうことにより知的に振る舞う人間型のロボットを思い浮かべることが多いが、先に述べた人間には過酷な状況で作業を代替するロボットや、単純作業を正確に繰り返す産業用ロボットにおいても、環境や対象などに適応的に振る舞う知能ロボットは存在する。知能ロボットは状況や環境に合

わせて、適切な行動をおこなうために、外部の環境情報を取り込み、それに合わせて行動を決めるセンサフィードバックが必須である。フィードバックの周期はリアルタイムの場合もあるが、作業自体に時間をかけられる場合にはその許容時間内でフィードバックを構成することも可能である。昨今、ロボットというとサイバーワールド、すなわち仮想世界中で人間に代わってコンピュータ操作を自動的に行うプログラムである、いわゆるボットも含む場合がある。本論文では、実世界中で行動するメカニカルな構造をもつものに限定してロボットと呼ぶ。メカニカルな構造をもつものは高速な制御をおこなうと慣性力でオーバーシュートが生じるなど、フィードバック制御の周期に機能的な限界をもつ。すなわち、実世界中で重い金属などでできたアームなどは、どのようなモータのような駆動系をもってしても思い通り高速に制御することはできない。その意味でも、センサ観測系を含むフィードバックループの周期には、適正な幅（レンジ）が存在することとなる。

1.2 知能ロボット制御のためのセンシング

実世界は 3 次元空間であるので、知能ロボットがその行動を決めるための環境のセンシングはカメラのような 2 次元での観測でなく、距離も含んだ 3 次元の観測がおこなわれることが望ましい。知能ロボットの一例である掃除機ロボットは行動が床面という 2 次元に拘束されており、対象物までの距離を適宜、観測しつつ行動のパスを決定する。すなわち、ロボットがその行動の拘束される自由度そのものの環境の空間情報をセンシングしなければ、知的に自律的な行動をおこなうことはできない。

本論文では、レンジファインダをはじめとする距離センサによって環境の中の位置づけをセンシングしながら自律的に行動・作業をする知能ロボットとして、火星探査を目的とした 6

本脚歩行ロボット the Ambler と、塗装工程中、成形された板状部材を複数枚、溶接により組み付けた後に、板状部材の端面に施すシーリングをおこなうリーリング用倣いロボットを想定し、それらにかかわるセンシング技術について述べている。それぞれの研究は 15 年以上前に完了したものであり、すでに実用化が遂げられている。レンジファインダそのものについても、すでに当時のものより性能が良いものが異なった方式を含め、登場してきている。しかしながら以下の点で本質的な技術課題を解いており、考案した技術方式、もしくはその基盤となるコア技術には意義がある。

- ・人間の粗さの尺度と相関のあるフラクタル幾何に基づく補間は、情報理論の元にあるシャノンの第二定理におけるナイキスト間隔の概念を超える可能性がある。

- ・高速な倣いロボットの制御に使われるセンシングアルゴリズム考案や、倣いロボット用センサのサイズに関する諸元を満たしたセンサの設計など、産業用知能ロボットにおける最適なセンシング方式の設計論を示す。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、火星探査用ロボットのための自然地形の立体地図作成を目的としたフラクタル幾何に基づく距離画像からの高さデータの補間法、および不確定性分布の算出法について述べる。第 3 章では、板状部材を構成したワークに対して施す塗装工程のひとつであるシーリングをおこなうロボットを倣い制御するためのレンジセンサからのデータからの作業目標点検出法について述べる。第 4 章では、第 3 章で述べるシーリングロボットなど、倣い制御ロボットの手先搭載に適している極細のレンジセンサの構成法について述べる。第 5 章では、本論文のまとめと、今後の課題等について述べる。

第 2 章

フラクタル幾何を適用した自然地形のモデリング

本章では，火星探査ロボットの足取りを決定する地形のマッピングに有効な，フラクタル幾何を適用した自然地形のモデリング技術の研究について述べる．

2.1 まえがき

自立移動を目的とするロボットは，逐一環境を理解しつつ行動を決定しなければならない．自然環境での移動を目的に想定した場合，非接触センサからの観測データに基づく地形のモデリング技術は不可欠である．ここで，地形のモデリングとは，非接触センサにより得られた距離データから任意解像度の 3 次元地形地図を作成し，また，地形の粗さなどの特徴を観測することをいう．

カーネギーメロン大学で開発された 6 本脚の自立歩行ロボット Ambler[2-1]は，搭載された走査型レーザレンジファインダ Perceptron[2-2]により得た距離データから，足元から 10m 程度前方まで，高さ方向で 5m 程度までの範囲をカバーする局所的な 3 次元の地形地図を作成し，岩石，砂などで構成される地表を探索するための足どりもしくは歩行ルートのプランニングなどに利用している．また，局所的な地形地図を統合して，数百 m の範囲に及ぶ広範囲な地形地図を作成するのもミッションの一部となっている．しかしながら，Perceptron をはじめとするレンジファインダで観測される距離データは，センサを原点とする円筒座標系で観測されるため，地形の高さデータとして扱う場合，規則性のある配置にはならない．そこで，任意解像度の地形地図を作成するためには，補間処理が必要となる．従来提案されている補間法，例えば locus 法[2-3]などを用いると，不自然になめらかな結果しか得られない．また，補間により作

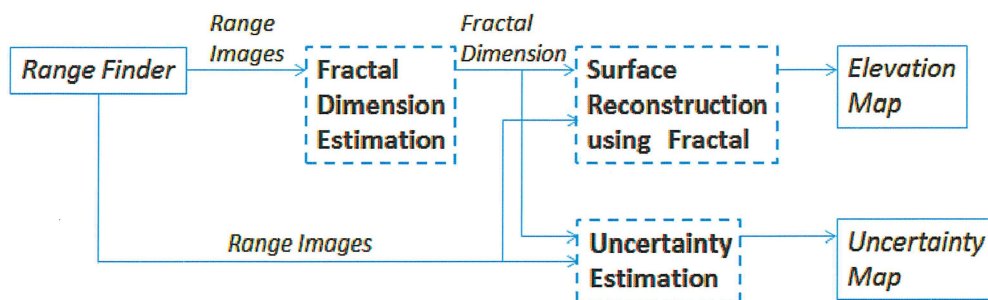


図1 地形モデリングの概要

成された地形地図の各点の高さ情報に関する不確定性がもし推定できれば，足どり等のプランニング結果の信頼度計算や，広範囲の地形地図を得るための局所地形地図の統合演算などに応用可能である．Amblerの各脚先端には力センサが装備されており，それにより脚の接地を検出している．接地のため脚を下方に動作するとき，力センサで状態を検出しながら移動するためには，移動速度をかなり遅くしなくてはならない．高さ情報の不確定性が得られており，不確定範囲の上限からのみ力センサによるセンシングを開始することができれば，脚移動に必要な時間は大幅に短縮される．

ここでは，自然形状に適するフラクタル幾何の考えを上記処理に必要な情報を得る地形のモデリングに適用することを提案する．地形のモデリングは，以下の三つのプロセスから構成される．（図1）

- ・地形の粗さの推定
- ・粗さを保存した任意解像度の地形地図の作成
- ・地形地図の不確定性の推定（不確定性地図の作成）

フラクタル幾何学は1970年代にMandelbrotにより提案され[2-4]，その主な概念はスケールを超えた形状の自己相似性にある（ここで，統計的な意味の自己相似性も併せて考慮している）．

この自己相似性は多くの自然形状に見いだされるものであることは以前からよく知られていた。この概念に基づく特徴量であるフラクタル次元 D は以下のように定義される。ある自己相似パターンを観測スケール γ で観測した時の観測量 N を用いてフラクタル次元 D は次式のように求められる。

$$1 = N\gamma^D \quad \text{or} \quad D = -\log N / \log \gamma \quad (1)$$

このフラクタル次元は、次元という言葉が示す通り、単位の無い量であり、したがって大きさなどのスケールには依存しない。このフラクタル次元は、生成過程に依存するものの、さまざまな自然形状で観測可能である。また心理実験により、フラクタル次元は、人間の知覚する「粗さ (roughness)」の尺度と強い相関があることが知られている [2-5]。

本章では、自然地形の自己相似性に着目し、フラクタル幾何の考えを適用したモデリングについて述べる。具体的には、図 1 に示した各プロセスについて、新たな手法を提案する。次節では、まず直交座標系中に不規則に配置される地形の粗さデータから、元地形の粗さの尺度としてフラクタル次元を推定する手法について述べ、併せて実験結果も示す。2.3 節では、正則化により再構成される表面形状がある種のフラクタル形状になることに着目し、地形データの正則化による補間処理について述べる。この手法を用いることにより、より写實的に表現される自然地形の地図の作成が可能となる。さらに 2.4 節では、2.3 節で述べる手法により得られた地形地図の不確実性の推定法について述べる。正則化に基づく表面再構成で用いられる表面の弾性モデルに物理的な振動を施し、その影響の度合いから不確実性の推定を行う。この手法を用いれば、補間された地形地図の各点の高さデータに対応する不確実性の分布が得られるため、プランニングなどの用途に有用である。この手法を用いて、地形地図とその不確実性地図を距離データから計算し、シミュレーションによりその結果の定量的評価を行う。

2.2 フラクタル次元の推定

2.2.1 フラクタルブラウン関数アプローチ

フラクタルブラウン関数は、フラクショナルブラウン運動などが形成する統計的自己アフィン性を一般的に表現する数学モデルである。ここで、自己アフィン性とは、パターンのある一軸への投影のみ自己相似性を示すことを言う。すなわち、自己アフィン性が各軸で同様に示される場合が自己相似性にあたる。地形のパターンは高さ方向のみ自己相似性を示すという意味で、自己アフィン性をもつと表現する方が妥当である。あるランダムな関数 $f(t)$ が任意の Δt に対して以下のように表されるとき、その関数はフラクタルブラウン関数という。

$$\Pr \left\{ \frac{|f(t+\Delta t) - f(t)|}{\|\Delta t\|^H} < x \right\} = g(x) \quad (2)$$

ここで、 $0 < H < 1$ であり、 $g(x)$ は累積密度関数である。Pentland[2-5]は $g(x)$ がガウス分布関数の場合のフラクタル次元の推定法を提案した。また、横矢[2-6]はその時のガウス分布の平均を 0 と仮定して、等間隔に分布する地形の高さデータから地形のフラクタル次元を推定する方法を示した。ここでも同仮定の下でフラクタル次元推定を考える。なお、粗さに関しては、フラクタル次元だけでなく、ガウス分布の分散もパラメータになりうる。実際、分散を変化させると、主観的に粗さを構成する凸凹の振幅が変わったように感じるが、粗さそのものは変化したようには感じられない。対象とする地形の振幅の範囲は限定されているので、本章ではフラクタル次元のみを粗さの制御パラメータとして推定する。

ここでは、横矢の方法[2-6]について簡単に説明する。式(2)においては、 H は自己アフィンパラメータと呼ばれる。このパラメータはフラクタル次元と以下の関係をもつ。

$$D = N + 1 - H \quad (3)$$

ここで、 N は t の定義域の次元であり、地形の場合は $N=2$ 、す

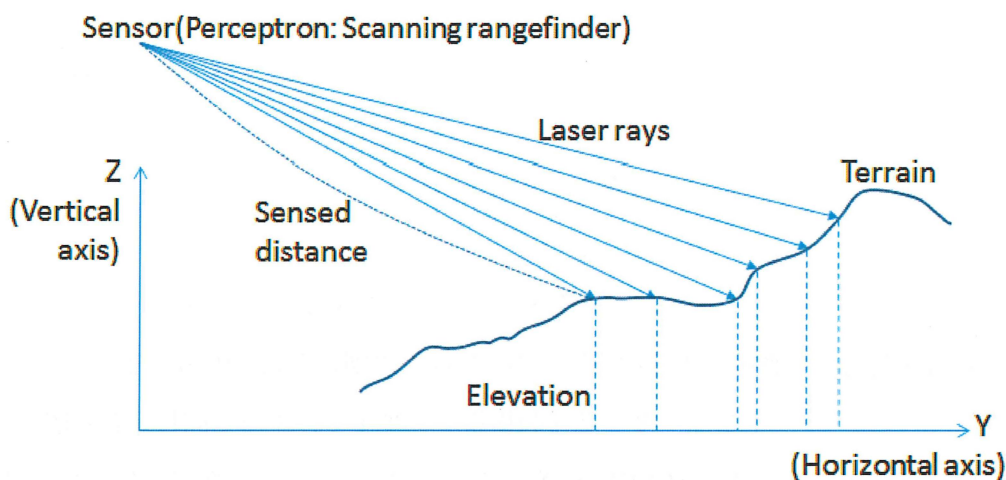


図2 Perceptronによる地形の高さの観測パターン

なわち、 $D=3-H$ の関係をもつ。また、式(2)は以下のように変形できる。

$$E(\Delta f_{\|\Delta t\|})\|\Delta t\|^{-H} = E(\Delta f_{\|\Delta t\|=1}) \quad (4)$$

ここで、 $E(\cdot)$ は期待値を示し、また $\Delta f_{\|\Delta t\|}$ は $\|\Delta t\|$ だけ離れた二つの地点の高さの差を表す。すなわち式(4)より、 $(\log\|\Delta t\|, \log E(\Delta f_{\|\Delta t\|}))$ のプロットは傾き H の直線上に並ぶ。そこで、横矢はさまざまな間隔 $\|\Delta t\|$ の地形の高さのペアについて、その差の平均を計算して、両対数グラフにプロットし、それに直線当てはめを行って、その傾き H を計算した。その H から式(3)を用いて、地形のフラクタル次元 D を推定した。

2.2.2 距離画像への適用と実験結果

横矢の方法では地形の高さデータが等間隔にを仮定している。しかし、我々の用いた走査型レーザレンジファインダ Perceptron[2-3]は、レーザ光を水平軸および鉛直軸を中心に回転する二つの鏡で2次元に投射し、各光線方向の対象物までの距離を測定する。各光線は等しい角度に投射されるので、得られる距離データはセンサを原点とする円筒座標系で分布する。

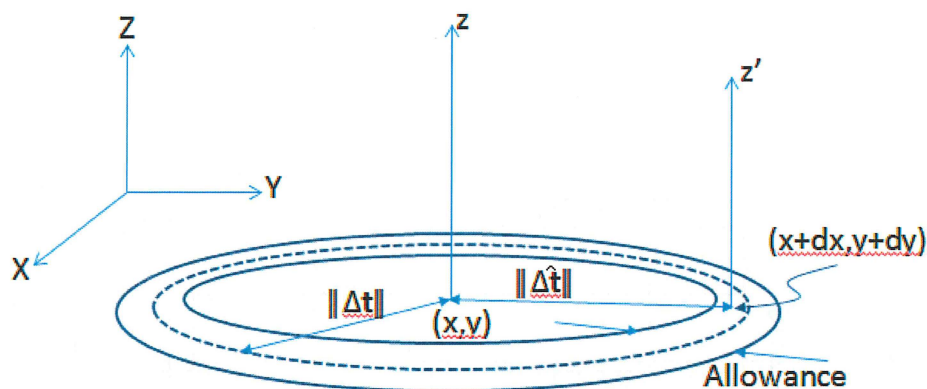


図3 フラクタル次元推定における許容域の設定

その鉛直方向の観測の様子を図2に示す。このように観測された距離データを地形の直交座標系に展開すると、高さデータは一様の間隔には分布しない。ここでは、そのように分布する距離データに対する横矢の方法の拡張を考える。

フラクタルブラウン関数によるフラクタル次元推定では、ある一定の距離感覚に存在する高さデータのペアが複数存在し、その高さの差の平均を期待値とみなせる状況でなければならない。しかし、我々の対象とした距離データからは、十分多くの高さデータペアのサンプルを計算することは期待できない。そこで、図3に示すように、ある間隔 $\|\Delta t\|$ に微小な幅 $\delta(>0)$ の許容域を設定し、非等間隔に配置される高さデータに適用可能にした。すなわち、ある高さデータからの距離が $(d-\delta, d+\delta)$ の範囲にある高さデータは、距離 d にあるとみなす。この許容量を操作することでサンプル数を確保し、統計的に安定した期待値を求める[2-7]。

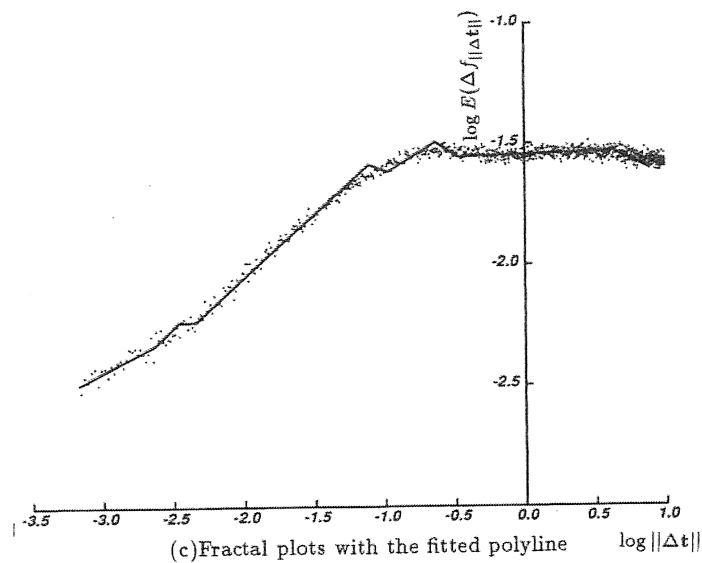
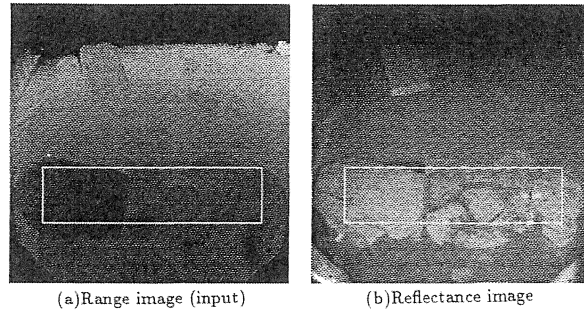


図 4 フラクタル次元の推定結果

図 4 に実験結果の一例を示す．図 4(a)，(b)はそれぞれ Perceptron により観測された距離画像と輝度画像（反射レーザーの強さの分布）である．距離画像で黒く示された領域は，外乱光の影響などで雑音とみなせる距離データや反射率の低い物体などからの反射により信頼できないとみなせる距離データについて，マスキングをしたものである．この距離画像中で白い枠内の部分（主に岩石からなる地形部分にあたる）を直交座標系に展開し，許容幅 δ を 0.2mm に設定して求めた $E(\Delta f_{||\Delta t||})$ を両対数グラフにプロットしたものを図 4(c)に示す．そのプロットした点群に Kurozumi[2-8]の折れ線近似法により直線群を当

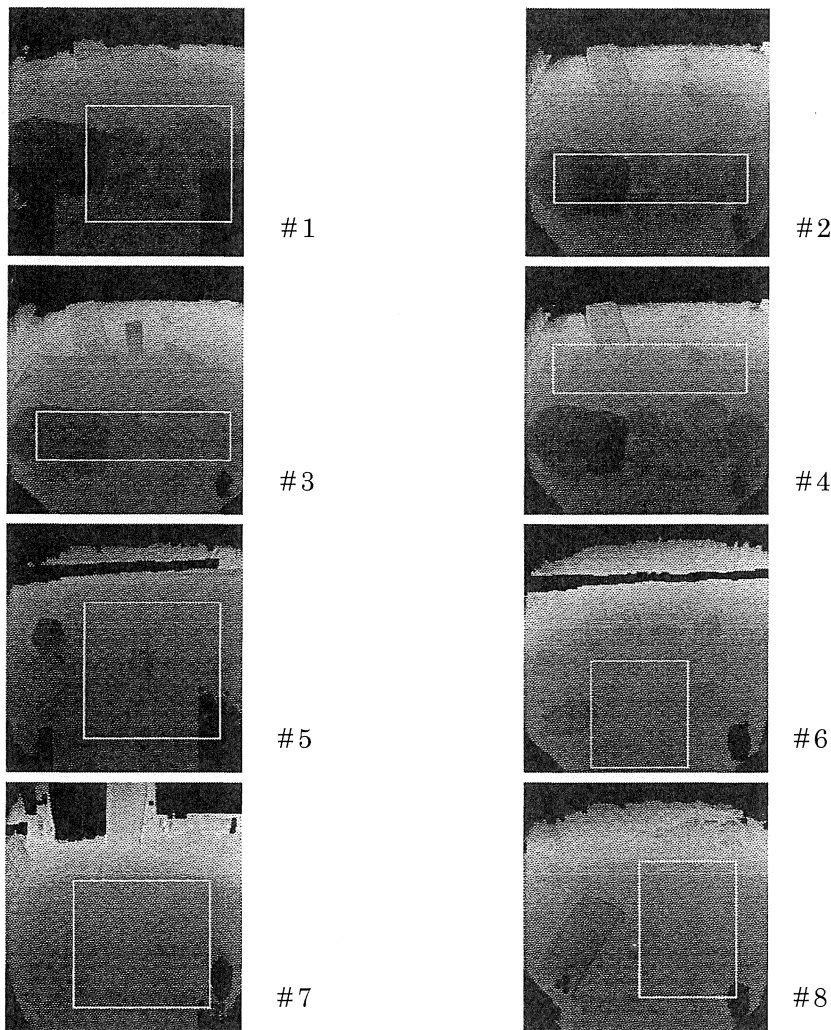


図5 フラクタル推定に用いた距離画像

てはめたものを同時に示している．この直線群の中で，関与する点数が多いものに最小 2 乗近似で直線を当てはめ，その傾きを H として，式(3)によりフラクタル次元 D を求めると， $D=2.512$ であった．

さらに多くの距離画像からフラクタル次元を推定した．対象とした距離画像を図 5 に示す．フラクタル次元の推定に用いたデータは，図 4 の実験と同様に，白枠の内部のみである．あらかじめ被験者に距離画像の示す地形が粗いと思われる順にデ

表 1 提案手法により推定されたフラクタル次元

Pattern#	Fractal dimension (error)
1	2.661 (0.025)
2	2.512 (0.016)
3	2.486 (0.014)
4	2.239 (0.025)
5	2.196 (0.010)
6	2.118 (0.021)
7	2.102 (0.014)
8	2.010 (0.022)

一タ番号を付与するように依頼した。その距離画像のデータ番号順に推定されたフラクタル次元を示したのが表 1 である。データ番号順に推定されたフラクタル次元が減少する。従って、推定されたフラクタル次元が人間の知覚する地形の粗さと強い相関をもつことが明らかである。砂のパターンの微妙な粗さの違いに対しても、フラクタル次元は適切な順序付けを施しているので、フラクタル次元を地形の粗さの尺度とすることは妥当である。なお、表 1 中で error として示されているのは、当てはめた直線の最小 2 乗近似誤差であり、この値が小さいことがデータのフラクタル性の尺度となる。実際、表 1 ではこの値はかなり小さいので、観測した地形はフラクタルであることが判断できる。

2.3 粗さを保存した地形地図の作成

ここでは、不規則に配置された地形の高さデータから任意の解像度の 3 次元地形地図を作成する方法について述べる。その根本となる技術は、フラクタル次元により表現された粗さを保存する補間法である。

フラクタル性を示す形状の生成手法については、コンピュー

タグラフィックスの分野で多く提案されている[2-9].しかしこれらの方法は一般に, 観測データによる拘束を考慮すること(厳密に言えば, 観測データ点をほぼ通るような形状を再構成すること)ができない. 横矢[2-6]は, 観測された地形の高さデータから高い解像度の地形パターンを生成する方法を提案した. これは, フラクタルブラウン関数の性質を示す形状を生成するランダム中点変位法を拡張したものであり, データ点が規則的に格子状に並んでいなければならないという拘束条件を満足しなければならない. Szeliski[2-12]は正則化による表面再構成問題をベイズ推定により解き, そのときに構成される表面形状がフラクタル性をもつことを示した. ここでは, Szeliskiの方法をランダムフラクタルの生成法を用いて拡張し, 不規則なデータ点の配置からも粗さを保存した任意解像度の地形地図を構成できる方法を提案する. この方法では, 高周波成分までフラクタル性を復元することが可能である.

2.3.1 正則化による表面再構成

初期視覚問題における逆問題は, 一般に不良設定問題である. 正則化は, 不良設定問題を滑らかさの拘束条件などで解の存在可能空間を制限して解く数学的手法である[2-10]. 例えば, ある曲面 u に対し標本化を施し, データ点 d が観測されたとする. この d から曲面 u を求める表面再構成問題は典型的な不良設定問題であるが, エネルギー $E(u)$ を以下のように設定し, それを最小化するようにして解 u を得ることができる.

$$E(u) = (1 - \lambda)E_d(u, d) + \lambda E_p(u) \quad (5)$$

ここで $E_d(u, d)$ は正則化においてはペナルティ汎関数と呼ばれ, データ適合性の度合を表し, 以下のように計算される.

$$E_d(u, d) = \frac{1}{2} \sum_i c_i [u(x_i, y_i) - d_i]^2 \quad (6)$$

ここで, $u(x_i, y_i)$ は疎なデータ点 d_i から再構成される 2次元の表

面形状を表し， c_i はそのデータの信頼度（例えば，計測における分散の逆数）を表す．

$E_p(\mathbf{u})$ は正則化においては安定化汎関数と呼ばれ，解である曲面 \mathbf{u} の滑らかさに関する拘束を表す．一般に weak membrane や thin plate といったそれぞれ 1 次微分，2 次微分の連続性を考慮した弾性体のモデルが適用されている．さらに，この二つの安定化汎関数のモデルを結合したものも提案されている[2-11]．

$$E_p(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \iint [w_1 (u_x^2 + u_y^2) + w_2 (u_{xx}^2 + 2u_{xy}^2 + u_{yy}^2)] dx dy \quad (7)$$

すなわち，上式で $\{w_1, w_2\} = \{1, 0\}$ ， $\{0, 1\}$ としたものがそれぞれ weak membrane および thin plate の安定化汎関数である．

式(6)で，データ点 d_i が存在する場合のみ対応する対角要素に信頼度 $c_i > 0$ が入り，その他の要素は0の正方行列 A_d を考えると，ペナルティ汎関数は，

$$E_d(\mathbf{u}, \mathbf{d}) = \frac{1}{2} (\mathbf{u} - \mathbf{d})^T A_d (\mathbf{u} - \mathbf{d}) \quad (8)$$

と表せる．また，偏微分を差分の形で表し正方行列 A_p とすれば，安定化汎関数も以下のような 2 次形式で表せる．

$$E_p(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T A_p \mathbf{u} \quad (9)$$

ここで $A = \lambda A_p + (1 - \lambda) A_d$ ， $\mathbf{b} = (1 - \lambda) A_d \mathbf{d}$ とすると，最小化すべきエネルギー式(5)は以下のように \mathbf{u} に関する 2 次形式で表現できる．

$$\begin{aligned} E(\mathbf{u}) &= \frac{1}{2} \mathbf{u}^T A \mathbf{u} - \mathbf{u}^T \mathbf{b} + c \\ &= \frac{1}{2} (\mathbf{u} - \mathbf{u}^*)^T A (\mathbf{u} - \mathbf{u}^*) + k \end{aligned} \quad (10)$$

ここで， $\mathbf{u}^* = A^{-1} \mathbf{b}$ はエネルギーを最小化して得られる最適な曲面の解である．

ある曲面形状 \mathbf{u} に関する事前確率を $p(\mathbf{u})$ ，ある表面 \mathbf{u} を観測し

た時にデータ d が得られる条件付き確率を $p(d|u)$, またデータ d を観測する確率を $p(d)$ とすると, データ d を観測したときに曲面形状が u である事後確率はベイズ則より以下のように求められる.

$$p(\mathbf{u}|\mathbf{d}) = \frac{p(\mathbf{d}|\mathbf{u})p(\mathbf{u})}{p(\mathbf{d})} \quad (11)$$

曲面形状のある点の値およびその点を与えたときの観測値がボルツマン分布であることを仮定すると, 確率 $p(\mathbf{u})$ および $p(\mathbf{d}|\mathbf{u})$ は, 式(5)に示した正規化のエネルギーの各項からボルツマン分布を使い,

$$p(\mathbf{u}) = \frac{1}{Z_p} \exp\left(-\frac{E_p(\mathbf{u})}{T_p}\right)$$

$$p(\mathbf{d}|\mathbf{u}) = \frac{1}{Z_d} \exp(-E_d(\mathbf{u}, \mathbf{d})) \quad (12)$$

と表される. ここで, $Z_p = \sum_u \exp(-\frac{E_p(\mathbf{u})}{T_p})$, $Z_d = \sum_u \sum_d \exp(-E_d(\mathbf{u}, \mathbf{d}))$ であり, T_p はボルツマン分布における「温度」である[2-13]. $p(\mathbf{u})$ はある観測データにおいては一定値であることを考えると, ベイズ則(11)は, この二つの確率から以下のようになり,

$$p(\mathbf{u}|\mathbf{d}) = \frac{p(\mathbf{d}|\mathbf{u})p(\mathbf{u})}{p(\mathbf{d})}$$

$$\propto \exp\left[-\frac{E_p(\mathbf{u})}{T_p} - E_d(\mathbf{u}, \mathbf{d})\right] \quad (13)$$

すなわち, 事後確率 $p(\mathbf{u}|\mathbf{d})$ はエネルギー $E(\mathbf{u})$ からボルツマン分布で求められる確率 $\exp(-E(\mathbf{u}))$ に比例し, したがって, 式(5)におけるエネルギー最小化は, ベイズ則における事後確率最大化と等価である[2-12].

2.3.2 与えられたボルツマン分布に従うフラクタル表面の生成

Szeliski[2-12]は, 安定化汎関数(7)を u のフーリエ変換とパーシバルの等式により, 周波数 f の関数として書き換えた.そして,

それをもとに u が式(7)をエネルギー関数にもつボルツマン分布に従うとすれば，そのパワースペクトルは，

$$S_u(\mathbf{f}) = \frac{1}{w_1|2\pi\mathbf{f}|^2 + w_2|2\pi\mathbf{f}|^4} \quad (14)$$

に従うことを導いた．安定化汎関数として weak membrane や thin plate を考える場合は，それぞれ式(14)で $\{w_1, w_2\} = \{1, 0\}$, $\{0, 1\}$ としたときであるので，その場合の表面のパワースペクトル $S_{weak_membrane}$, S_{thin_plate} は周波数 f に関して次式を満足する．

$$\begin{aligned} S_{weak_membrane}(\mathbf{f}) &\propto |2\pi\mathbf{f}|^{-2} \\ S_{thin_plate}(\mathbf{f}) &\propto |2\pi\mathbf{f}|^{-4} \end{aligned} \quad (15)$$

一方，統計的自己アフィン性をもつ形状 v (R^N 上のフラクタルブラウン関数) のパワースペクトルは，

$$S_v(\mathbf{f}) \propto |2\pi\mathbf{f}|^{-2H-N} \quad (16)$$

を満たすことが知られている[2-9]．ここで， H は式(2)でも用いた自己アフィンパラメータである．式(15)と式(16)を比較することにより，weak membrane および thin plate という安定化汎関数を用いたときにはそれぞれ $H = 1, 0$ に対応することがわかる．特に後者の場合， $D = N + 1 - H = 3$ であり，これは thin plate を安定化汎関数として用いた場合に形成される曲面がフラクタル形状であることを示す．

Szeliski[2-12]はさらに，式(7)で示される安定化汎関数と多重解像度表現での正則化を使い，非整数のフラクタル次元をもつ表面を生成するように拡張した．式(14)において $w_1 = |2\pi f_0|^2 w_2$ とおくと $S_u(\mathbf{f})$ は f_0 の近傍で $S_u(\mathbf{f}) \propto f^{-3}$ と近似できることを実験的に示した．これはフラクタル次元 $D = 2.5$ に相当する曲面である．また，解像度が各階層間で順に半分になる多重解像度ピラミッド表現で，以下の式(17)の関係をもつように安定化汎関数の重みを設定すれば，そのエネルギー最小化（もしくは事後確率最大化）により得られた各階層の表面の和として計算される最終

的に再構成された表面形状のパワースペクトルは、ある周波数域で $|f|^{-3}$ に比例することが実験的に確かめられた。

$$w_m^{l+1} = 2^{2m-3} w_m^l \quad (17)$$

ここで、非負の整数 l は各階層のインデックスを表し、最も解像度の高い階層で $l=0$ であり、低解像度になるにつれて l の値は 1 ずつ増すものとする。また、 $m=1$ または 2 である。

2.3.3 一般のフラクタル次元をもつ表面の再構成

上記の手法を拡張し、一般のフラクタル次元 D において成り立つようにする。式(14)で $S_u(f_0) = k|f_0|^{2D-8}$ (ここで、 k はある正の定数) が成り立つとすれば、その表面は式(16)の関係よりフラクタル次元 D のフラクタル形状であるので、それから安定化汎関数の重み間関係を求めると、

$$w_1 = \frac{f_0^{6-2D}}{k|2\pi|^2} - |2\pi f_0|^2 w_2 \quad (18)$$

となる (この式で $D=2.5$ としても Szeliski の重みと異なることに注意)。この関係を満たす重みを最大解像度の階層 $l=0$ での重み w_1^0 , w_2^0 とし、以下の式で各階層の重みを定めて表面の再構成をおこなえば、フラクタル次元 D のフラクタル表面が得られる。

$$w_m^{l+1} = 2^{2m+2D-8} w_m^l \quad (19)$$

この手法で得られるフラクタル表面は、その自己相似性 (自己アフィン性) を示す周波数域が限られており、一般に低周波数域においてはよく自己相似性を示す。すなわち、式(16)と一致する。しかし、高周波数域では一致しない。そのため、再構成された表面は不自然に滑らかな表面になる。

そこで高周波数成分における粗さを制御するために、温度 T_p を適切に設定することを考える。Szeliski[2-12]によれば、 T_p は局所的なエネルギー分布の拡散を制御するパラメータと定式化している。すなわち、式(10)と(12)より、

$$p(u_i|\mathbf{u}) \propto \exp\left(-\frac{a_{ii}(u_i-u_i^*)^2}{2T_p}\right) \quad (20)$$

が求められ，これは正規分布 $N(u_i^*, \frac{T_p}{a_{ii}})$ と等価である．したがって，ある非負の T_p を設定した場合，事後確率最大化の過程は，正規化過程としての Gauss-Seidel の弛緩法などの繰返し演算によるエネルギー最小化を逐次， $N(0, \frac{T_p}{a_{ii}})$ の乱数を付加しつつおこなう過程として実現できる．ここで，解像度の関数として標準偏差が制御される正規乱数を繰返し加算していくと統計的フラクタル形状であるフラクショナルブラウン運動の軌跡パターンが得られる[2-9]ことを考えると，パラメータ T_p を制御することにより高周波数成分においても自己相似性を示す表面を再構成できる．逐次ランダム加算法では，異なる解像度の階層 l に対して，分散が次式で示される正規乱数を解像度の小さい階層から順に繰り返して加算していき，自然なフラクショナルブラウン運動の軌跡を生成できる．

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_0^2(1-2^{2H-2})}{2^{-2Hl}} = \frac{\sigma_0^2(1-2^{4-2D})}{2^{(2D-6)l}} \quad (21)$$

この考えを多重解像度表現による表面再構成に適用し，フラクタル形状である原表面を再構成する．すなわち，各階層 l のパラメータ T_{pl} をフラクタル次元 D の関数として以下のように定める．

$$\begin{aligned} T_{p0}(D) &= k\sigma_0^2(1-2^{4-2D}) \\ T_{pl}(D) &= T_{pl-1}(D)2^{6-2D} \end{aligned} \quad (22)$$

ここで， σ_0 は単位距離当たりの地形の高さ分布の標準偏差であり，これは Pentland[2-5]により提案されたフラクタル次元の推定法で求めることができる．また， k はフラクタル形状の生成過程に依存する定数である．この定数は未知数であるが，以下の方法を用いて，再構成した地形のフラクタル次元 D^* が推定し

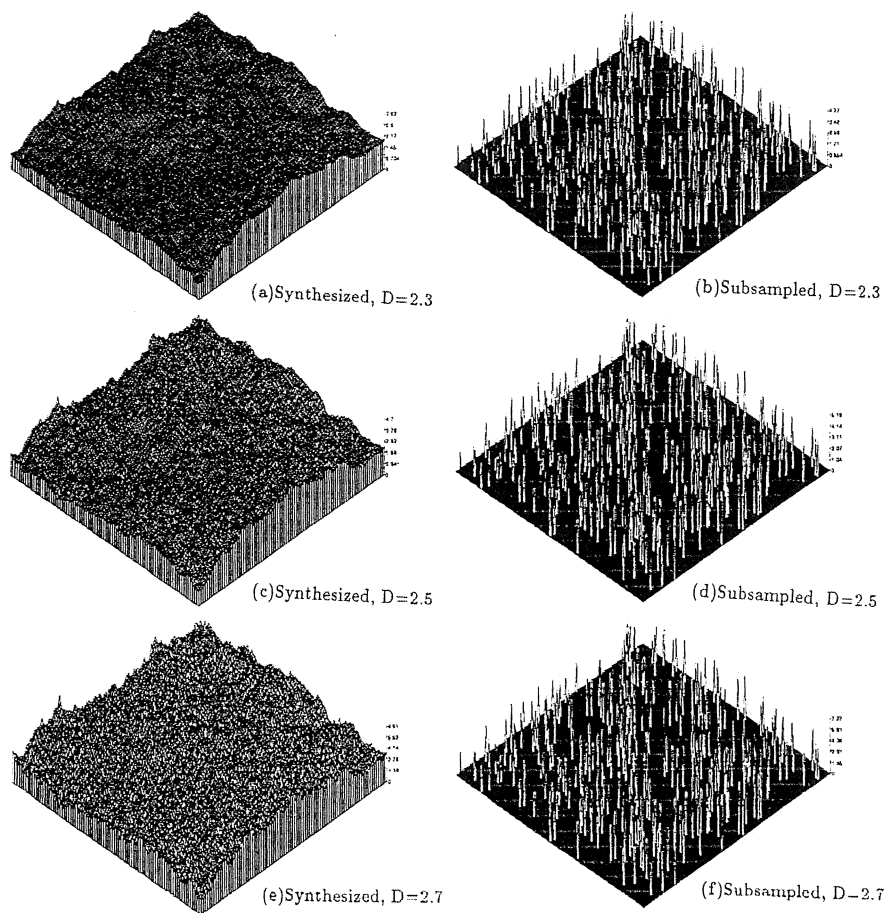


図 6 補間処理の入力データ

た値 D に最も近くなるような $T_{p0}(D)$ を求めて、式 (22) から計算することができる。

$$D = Est(\mathbf{d})$$

$$T_{p0}(D) = \left\{ T_{p0} \mid \min_{T_{p0}} (Est(Int(\mathbf{d}, D, T_{p0})) - D)^2 \right\} \quad (23)$$

ここで、 $Est(\cdot)$ は 2.2 節で示したフラクタル次元の推定法により推定されたフラクタル次元を、また $Int(\cdot)$ はこの節で示したフラクタル表面の再構成パターンを示す。

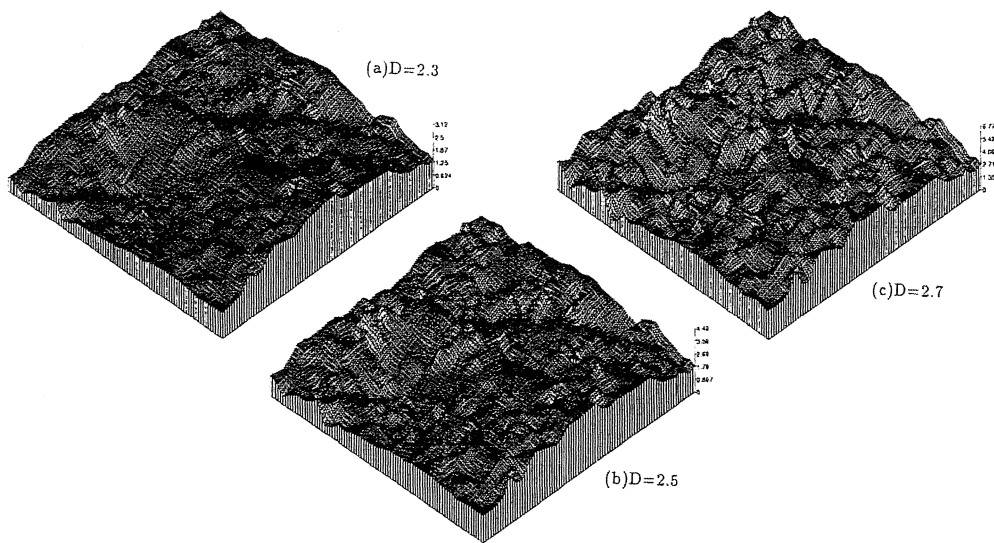


図 7 Szeliski の提案手法による補間結果

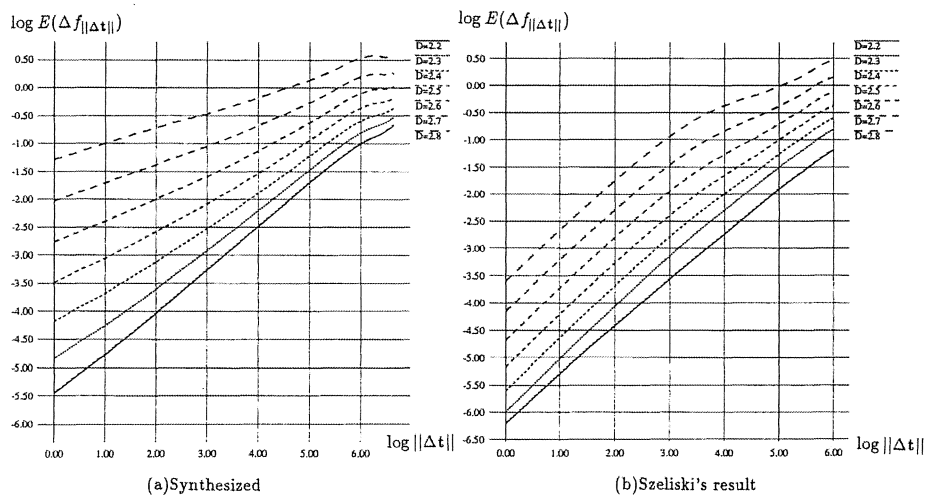


図 8 Szeliski の提案手法による補間結果のフラクタル性推定

2.3.4 実験結果とその考察

まず、Szeliski の手法で生成した地形データを補間した結果を示す。図 6 は、フラクタル次元 D を 2.3, 2.5 および 2.7 と設定してランダム中点変位法 [2-9] で生成した (模擬) 地形データ, 99% のデータを間引いた補間処理の入力データを示す。また, 図 7 に Szeliski の提案手法による補間結果を示す。ここで, 重

表2 生成データに対して提案手法により決定された
パラメータ T_{p0}

D	D^*	T_p	$ D^* - \bar{D} $
2.2	2.236	4.4×10^{-6}	6.0×10^{-2}
2.3	2.308	1.5×10^{-5}	4.4×10^{-2}
2.4	2.390	4.5×10^{-5}	2.6×10^{-2}
2.5	2.476	1.4×10^{-4}	1.8×10^{-2}
2.6	2.561	4.1×10^{-4}	1.7×10^{-2}
2.7	2.643	1.3×10^{-3}	3.5×10^{-2}
2.8	2.716	3.8×10^{-3}	5.6×10^{-2}

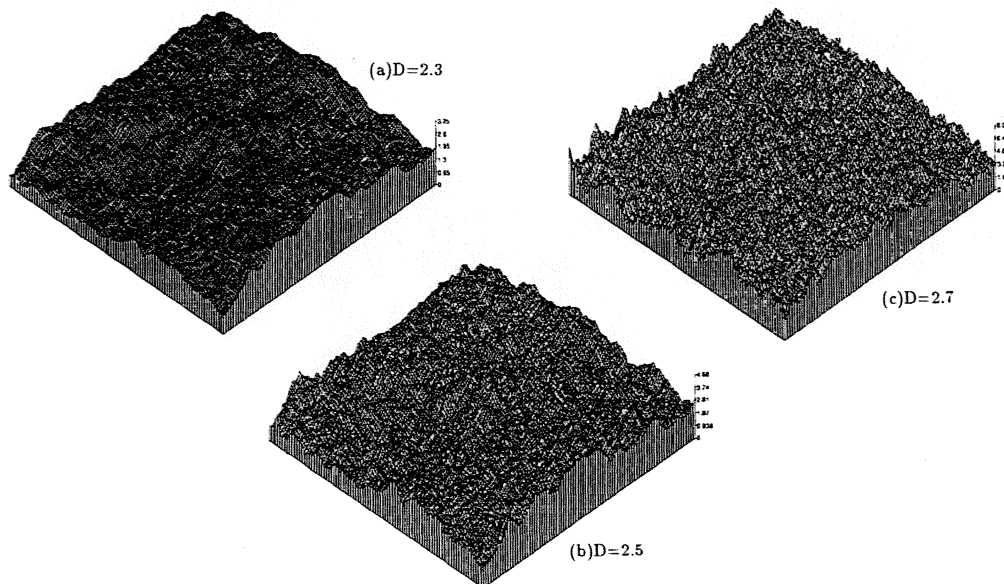


図9 提案手法による補間結果

み w_m は式(18)を用いて定めた。この結果から明らかなように、Szeliskiの方法によれば高周波数成分において粗さを保存しないので、全体として滑らかな印象を受ける。この結果を定量的に評価するために、2.2で示したフラクタル次元の推定法を用いて、その傾向を観察すると図8(b)に示すように、近傍の高さの差の平均（すなわち高周波数成分）においてはプロットした曲線の傾きが本来の曲線（図8(a)）よりも大きくなっており、フラクタル次元が2に近く滑らかであることがわかる。

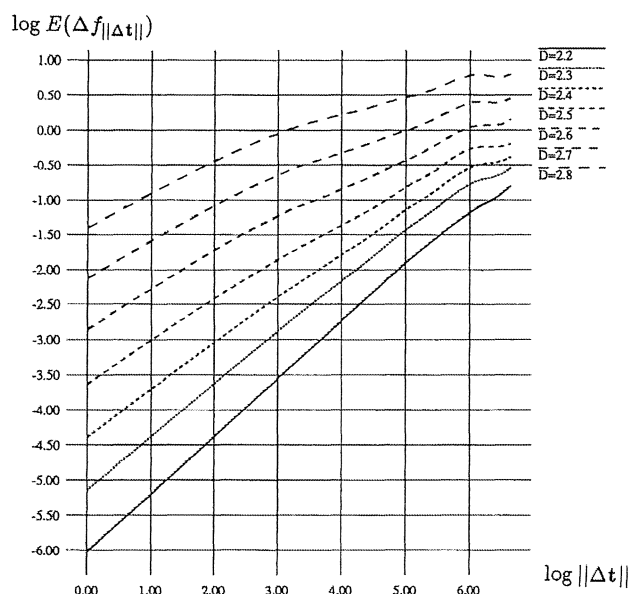


図 10 提案手法による補間結果のフラクタル性判定

次に 2.3.3 で述べた提案手法を用いて、パラメータ T_{p0} を設定し、間引いた高さデータを補間してみた。フラクタル次元 $D=2.4$ のときの生成地形データにおいて式 (23) を使い、定数 k を求めると、 $k = 4.7 \times 10^{-7}$ であった。この値を用いて求めた T_{p0} の値を表 2 に示す。

また、 $D=2.3$ 、 2.5 および 2.7 において、その T_{p0} を用いて提案手法により補間した結果を図 9 に示す。原データおよび補間の入力としたデータは図 6 に示したものと同一である。図 7 と比較すれば明らかなように、図 9 の補間結果はフラクタル次元に従って粗く見え、生成データ（すなわち、真値）から受ける印象に非常に近いものになっている。2.2 に示したフラクタル次元の推定法を補間結果に適用した結果を図 10 に示す。図 8(b) と比較すると、高周波数成分においても線形性（すなわち、自己相似性）が保たれており、またフラクタル次元に従って傾き

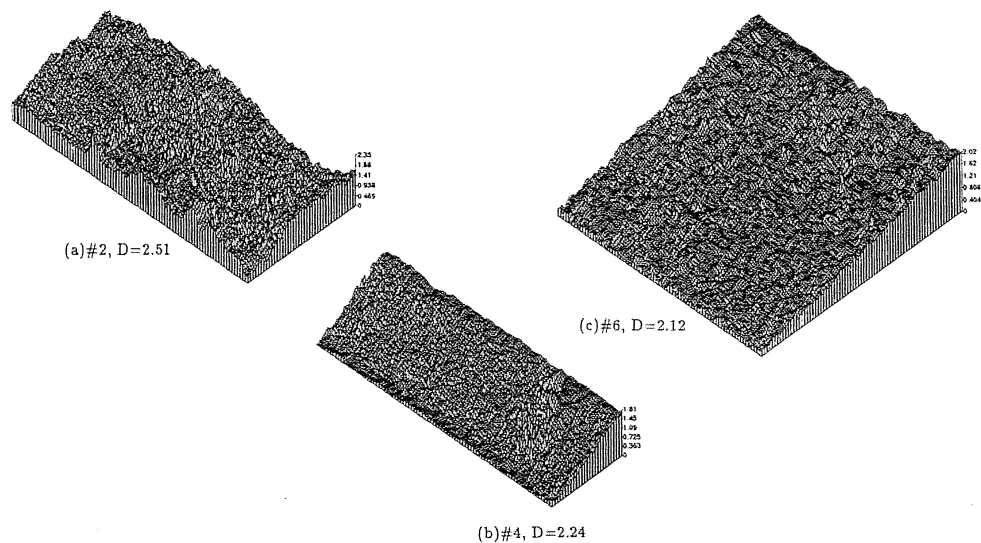


図 11 提案手法による距離画像からの高さデータの補間結果

が小さくなっていることがわかる。フラクタル次元は知覚される粗さに度合に適應する尺度であるので、粗さを保存した補間が実現されていることが定量的に示された。また、フラクタル次元推定法のグラフで縦軸切片の値は、式(2)の $g(x)$ を平均 0 のガウス分布としたときの標準偏差に相当する。これは、パターンの高さ方向の振幅の大きさを決定する地形情報の再構成には重要なパラメータの一つである。補間結果の縦軸切片の値を生成データからのフラクタル次元推定のグラフ（図 8(a)）の縦軸切片の値と比較すると、7 パターンの差の平均で $2^{-0.207} = 0.866$ 倍、差が最大である $D=2.2$ の場合でも $2^{-0.550} = 0.683$ 倍程度であり、振幅の大きさもほぼ復元されている。

さらに、レンジファインダ Perceptron により観測された地形データを提案手法で補間してみた。図 5 からそれぞれ岩石、砂からなる地形の観測データとして、2, 4 および 6 を選択した。そのフラクタル次元はそれぞれ表 1 における 2, 4 および 6 のエントリに対応する。まず、図 5#4 のデータで式(23)に示した方法を用い k を求めると、 $k = 4.0 \times 10^{-2}$ であった。その k から求め

表 3 実測データに対して提案手法により決定された
パラメータ T_{p0}

Pattern#	D^*	T_p	$ D^* - \bar{D} $
2	2.51	1.0×10^{-4}	1.6×10^{-2}
4	2.24	1.8×10^{-7}	4.5×10^{-2}
6	2.12	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-1}

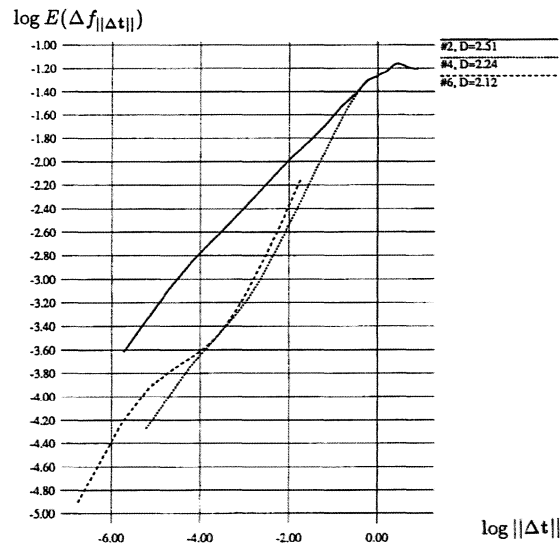


図 12 地形地図のフラクタル性判定

た T_{p0} を表 3 に示す。また、その T_{p0} を用いて補間を施した結果がそれぞれ図 11(a)~(c)である。その補間結果のフラクタル次元を 2.2 に示した方法で求め、原データから求めたフラクタル次元との差を求めたものを表 3 に同じく示す。

補間結果の自己相似性を示すために、フラクタル次元推定法で用いた高さ変化の期待値の分布をプロットしたものが図 12 である。これは、図 10 ほどではないが線形性をほぼ示しており、自己相似性を示す地形パターンが再構成されていることがわかる。なお、この線形性を悪化させた原因としては、観測された地形高さデータ自体がすべてのスケールにおいて一定の

フラクタル次元をもつという過程を満たしていないためと考えられる。

2.4 不確定性の推定

距離センサで実世界を観測したとき，ある性質をもつセンサの観測誤差が必ず重畳する．例えばレーザレンジファインダ Perceptron に関しては，計測された距離の 2 乗に比例する標準偏差をもつ正規雑音が重畳することが知られている [2-3]．しかし，観測した距離データが密な地形地図をそのまま表しているわけではないの，前節で述べたような手法で補間をおこない地形地図を作成することとなる．このとき，地形地図の各地点の高さに関する不確定性はどのような分布を表すであろうか．この節では，観測された地形の高さデータに関する不確定性（一般に確率分布の標準偏差にあたる）が既知の時に，補間という処理によって伝搬した不確定性を推定する方法について述べる．

2.4.1 モンテカルロ法による不確定性分布の算出

Szeliski は事後確率最大化により再構成された表面について，その伝搬した不確定性をモンテカルロ法を用いて算出する方法を提案した．事後確率最大化は式 (10) に示されるエネルギーの最小化と同値である．このエネルギーの示すボルツマン分布の確率を考えると，それは平均 u^* ，共分散行列 A^{-1} の多変数正規分布となる．したがって，再構成された表面の高さ u_i^* の不確定性である標準偏差は，行列 A^{-1} の対角要素の正の平方根である．しかし，地形地図が $n \times n$ であるとするると行列 A の大きさは $n^2 \times n^2$ であるので，直接にその逆行列を求めることは難しい．

ここで，不確定性の意味を再び考え直すと，弾性膜で表面を形成したときに，制御点（表面の再構成の場合は観測された高さのデータ点）に加えられた振動の影響を各点が受ける度合い

であるとみなすことができる。2.3で示した表面再構成の方法は、非零の T_p を設定した場合、正規分布に従う振幅の振動を重畳しつつ繰返しによりエネルギーが最小である表面を生成する過程として実現されている。その過程で各点の高さ u_i を時系列で観測しておき、その高さの変化の標準偏差を振動による影響の度合いとして計算する。これをモンテカルロ法による不確定性の推定法という。実際には T_p により振動の振幅にあたる標準偏差を制御しているので、 T_p が大きいときには推定される不確定性は全体的に大きくなる。しかし、不確定性の応用を考えると、多くの場合、地形地図中での相対的な大きさを参照するだけであるので、この推定方法で問題はないと考えられる。

2.3で示したフラクタル補間の方法では、自己相似性を示す表面を再構成するような非零の T_p を使っている。そこで、この補間法において不確定性を求めるには、以下のような方法を使う。エネルギー最小化過程のある時点 t で、各地点の高さを u_{it} とすると、 $\sum_t u_{it}$ 、および $\sum_t u_{it}^2$ をそれぞれのカウンタに累算しておく。エネルギーが最小化した（正確には安定状態になった）時点でカウンタの値から次式のように求めた標準偏差 σ_{ui} を推定すべき不確定性とする。ここで t_{conv} は収束時点（までのサンプル数）とする[2-14]。

$$\sigma_{u_{it}}^2 = \frac{\sum_{t_{conv}} u_{it}^2}{t_{conv}} - \left(\frac{\sum_{t_{conv}} u_{it}}{t_{conv}} \right)^2$$

2.4.2 実験結果とその定量的評価

図6に示したフラクタル次元が $D=2.5$ のときの生成地形データから99%のデータを規則的に間引いたもの（すなわち 10×10 点の格子から1点のみ残したもの）についてフラクタル補間を施すと同時に、モンテカルロ法により推定した不確定性の分布（不確定性地図）を求めた。推定された不確定性の定性的な性

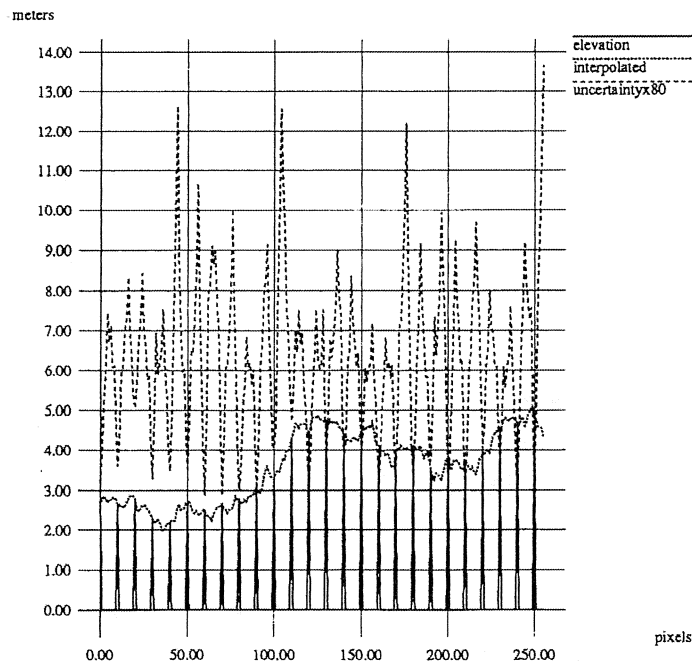


図 13 生成データに対する不確定性地図の推定結果

質を確認するために、そのある断面を図 13 に示す（不確定性のみ 80 倍してある）。明らかに、データ点から離れるにつれて、不確定性が増していることがわかる。

レーザレンジファインダ Perceptron により観測された砂の地形データの一部（図 14(a)）を補間し、同時に求めた不確定性地図の一部を示したものが図 14(b)である。(a)のデータ点の分布と比較すると、データ点が密なところは推定された不確定性が小さいことがわかり、不確定性の直観的性質に矛盾しない。

次に推定された不確定性の定量的な性質を調べる。図 13 の結果は生成データに対して施されたものであるので、地形地図の解（すなわち、間引く前の密な地形データ）がわかっている。そこで、各地点の推定された不確定性 $v_i (= \sigma_{ui})$ と地形地図の誤差 $u_i^* - \hat{u}_i$ の分布を図 15 のようにプロットすることができる。ここで、 u_i^* はエネルギー最小化により得られた地形の高さであり、

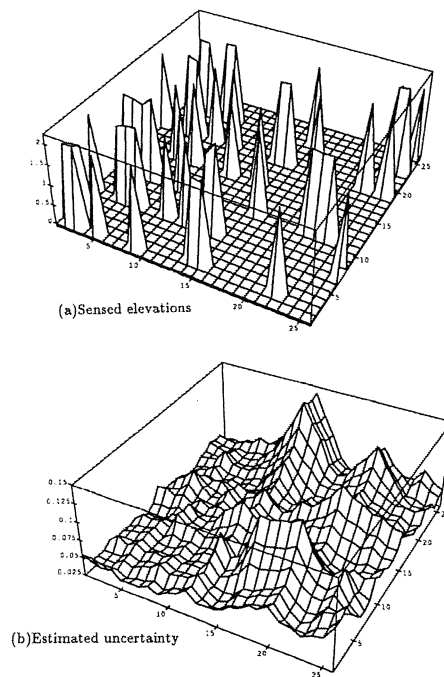


図 14 距離画像からの不確定性地図の推定結果

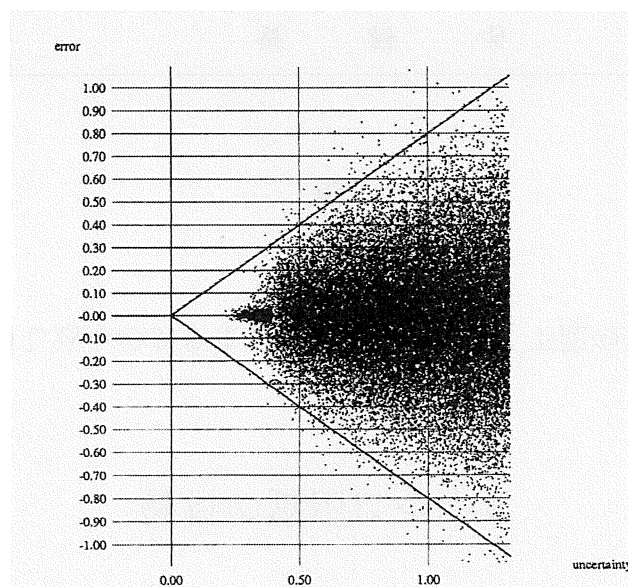


図 15 推定された不確定性と補間による誤差の関係

\hat{u}_i は正しい地形の高さである．図 15 には傾きが 0.8 および -0.8 の原点を通る直線を重畳して示してあるが，ほとんどのプロッ

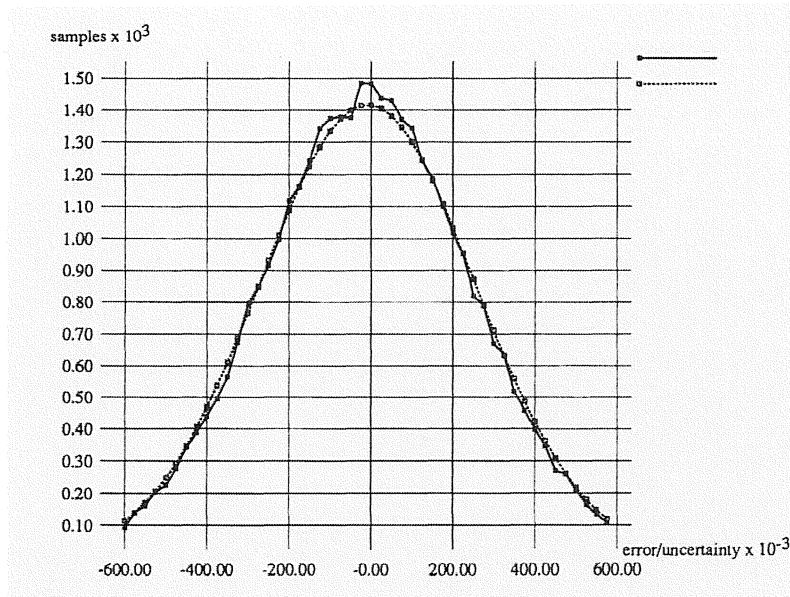


図 16 誤差を不確実性で正規化したものの分布

トした点は 2 本の直線の範囲内にあることがわかる。また，横軸から離れるにつれて，その密度が小さくなっていつている。

この観察により， $(u_i^* - \hat{u}_i)/v_i$ は正規分布 $N(0, k^2)$ に従うことが推測

できる。図 16 にその分布を実線で示す。この分布の平均は 8.5×10^{-3} ，標準偏差は 0.263 であり，平均の絶対値は標準偏差に比べて非常に小さいので零とみなすことができる。そこで，図 16 に破線で示した正規分布 $N(0, 0.263^2)$ との相関を χ^2 検定により仮説検定すると，5% の有意水準で二つの分布の同一性の仮説を棄却できない。すなわち，ある程度の危険性は伴うものの $(u_i^* - \hat{u}_i)/v_i$ は正規分布 $N(0, k^2)$ に従うと言える。各地点での推定さ

れた不確実性 v_i は，確率的に定まる値ではないので次の式が成り立つ。

$$u_i^* - \hat{u}_i \sim N(0, (kv_i)^2) \quad (24)$$

すなわち，地形地図に対応する不確実性地図が推定されていることがわかる。

2.5 あとがき

本章では，屋外を移動する自律ロボットの経路決定などに有効な手法として，地形データのモデリングに関する体系的アプローチを提案した．このアプローチでは，以下のような情報を得ることができる．

- 非等間隔に標本化された地形の高さデータから，地形の粗さを推定できる．
- 非等間隔に標本化された地形の高さデータを元の地形の粗さを保って補間し，写実的な地形地図を作成できる．
- 得られた地形地図に対応する不確定性地図を作成できる．

今後の課題としては，

- 補間において不連続線を考慮していないので，エッジの存在する岩石などの個々の物体の正確な形状を復元できない．
- 補間において全スケールで一定のフラクタル次元をもつ地形形状を仮定しており，スケールごとにフラクタル次元が変化するような，より一般的な地形形状を復元できない．

などが挙げられる．

第 3 章

トラッキングロボットによるシーリングのための 高速な作業目標点検出

本章では，塗装工程の一つであるシーリングに知能ロボットを適用する場合において，シーリング材を塗布すべき作業目標点をレンジセンサから得られた断面データから検出する手法の研究について述べる．

3.1 まえがき

知能ロボットによる各種産業の構造変革が進んでいるが，組立て関連の産業の各工程においても，ロボット導入による自動化による作業効率向上が図られている．塗装工程の一つであるシーリング工程はすでにかかなりの割合でロボットによる自動化が実施されているものの，ティーチングプレイバック方式を適用しているため，対象物の変化に対応するためには，再教示など低効率を許容した運用を強いられる状況にあった．シーリングは，板状部材などで対象物を組み立てる際に，外部からの水分侵入に対する防水や，塗料の乗りにくい端部の防錆の目的で，部材が構成する合わせ目であるシム（seam）にシーリング材と呼ばれる塗料を塗布する塗装作業である．一般には 0.6mm から 2mm 程度までの金属薄板が構成する，ところどころに浮きのある連続的な曲線状シムに対して施される．

自動車の車体製造に関して言えば，従来は人手によりシムをなぞりながら主に接触倣いによってシーリング材の塗布をおこなっていた．しかし，曲線の形状が多彩であるだけでなく，接触倣いが不可能な対象も多々存在するため，早くからティーチングプレイバック方式のロボット導入による自動化が検討され，実用化されてきた．現状では車体のかかなりの割合のシムに対するシーリングがロボットによりおこなわれている．実際

に製造ラインを流れる車体の形状には個体差があり，また位置決め精度にもばらつき幅があるために，シムの位置は一定ではない．それに対してティーチングプレイバック方式によるシーリングをおこなうとすれば，上記の原因による位置ずれを許容するため，防水等の機能実現に必要な量以上のシーリング材を塗布せねばならない状況にあり，材料使用効率の面で不合理な問題があった．そこで，シムの位置ずれを非接触で観測し，それによりシーリング材を塗布するロボット軌跡を制御することができれば，必要とされるシーリング材を適切な量とすることができる．しかしながら，シーリングに適用するセンシングに関しては，以下のような条件が存在する．

1. 部材組付け用基準穴などからシムまでの相対的な位置精度は保証できないため，シムそのものの位置を直接，観測しなければならない．
2. 薄板端部の 3 次元的に形状が変化するシムを高信頼度で検出せねばならない．すなわち，シム以外の部分を誤って検出する頻度が極力少なくなくてはならない．
3. ロボットの軌跡再現精度を考慮したうえで，シーリング塗布幅以内でカバーできる精度でシム位置を算出しなければならない．
4. 従来のロボットによるシーリングの高速性を損なってはならない．生産ラインの現状での運用を考え，タクトタイムの増加は許されない．

従来，シーリングのためのセンシングとしては，ビジョンベースの方法として，シムを含むワークの基準穴などの 3 次元位置を計測し，それから相対的なシムの位置を算出する方法が提案されている[3-1][3-2]．しかし，上記の条件 1.にあるように板状部材に関しては，その端部の製作精度は期待できないために，基準穴等の観測しやすい特徴の位置からの相対的位置関係は利用できない．また，シムそのものの断面形状をスリット光投

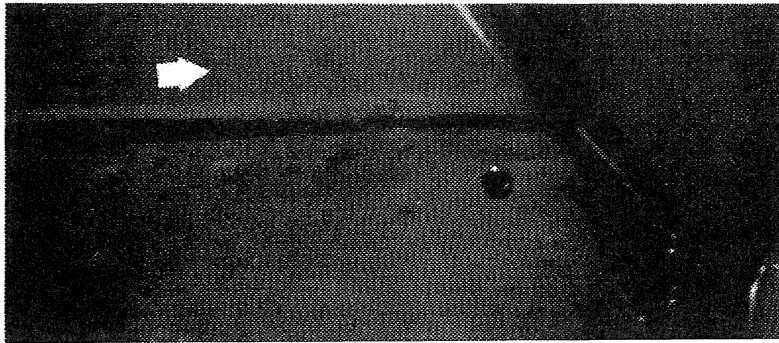


図 17 典型的なシムの例

影型の光切断法で計測し，その像にパターンマッチングを施して，シーリング材を塗布すべき作業目標点（以下，単に作業目標点と呼ぶ）を検出する方法も提案されている[3-1][3-3][3-4]．ここでも同様な距離センサを使用し，シム近傍の3次元断面データから作業目標点を検出する点で類似性がある．しかしながら，上記の条件2.にあるように複雑に変化する形状に対応するために，検出すべきパターン（もしくはそれを決定するパラメータ）を固定した手法では，検出を失敗する可能性が多々ある．また，条件2.および4.に関連し，センシングの高信頼性や作業を含めた実時間性（検出許容時間）の面まで考慮に入れた手法は提案されていない．作業に先立ち観測した画像からのシムの位置ずれ検出法[3-5]も考えられるが，あらかじめ観測時間を必要とする点で4.のタクトタイム条件を満足しないか，工程増を招く．

本章では，シム近傍の断面データから処理パラメータを適応的に決定しつつ，シム特有の途切れ特徴を高速に，しかも高信頼度で検出する方法を提案し，またそれから作業目標点を実時間で高精度の検出する方法を示す．まず次節で，シムの分類とその断面形状モデルを示す．3.3節にて，想定しているシーリングロボットシステムの概要を示し，3.4節では，シム断面形状モデルに従った作業目標点検出アルゴリズムを提案する．3.5

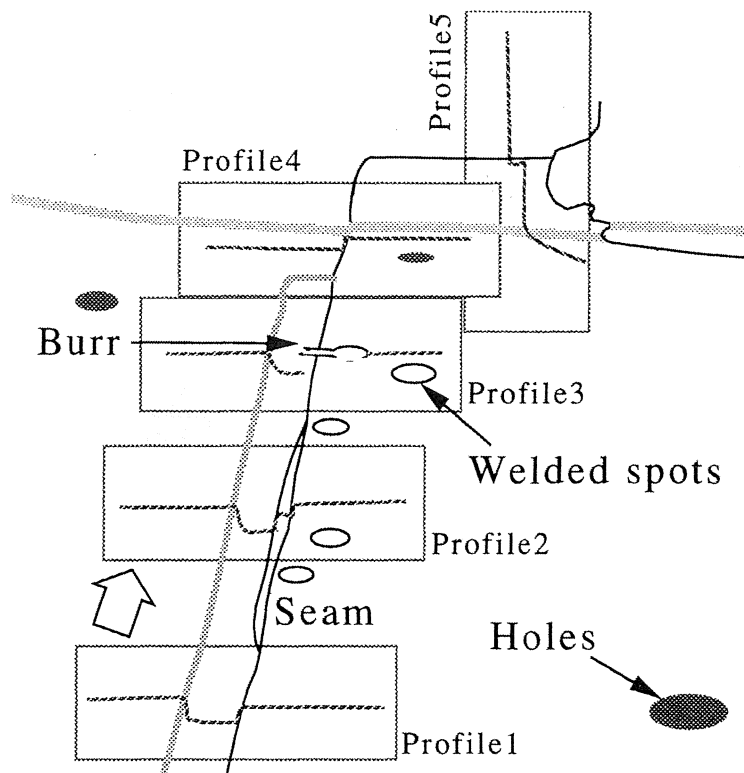


図 18 典型的なシムの断面形状および周辺の状態

節において，実際の自動車車体に対するその観測性能の評価実験，およびその結果の考察を述べ，最後に本開発システムの有効性をまとめ，今後の課題を示す．

3.2 シム形状のモデリング

鋼板をプレスして成型した板状の部材を溶接などで組み付けて構成される工業製品では，部材の重なった合わせ目，すなわちシムにシーリング材を塗布するシーリングが製作工程に必ず含まれている．具体的なシムの例を図 17 に示す．これは，自動車車体のエンジンルームの一部であるが，数多くの部材を組み合わせているため，複雑な形状のシムが複数存在している．そのシムの一部を断面形状がわかるように模式的に示したも

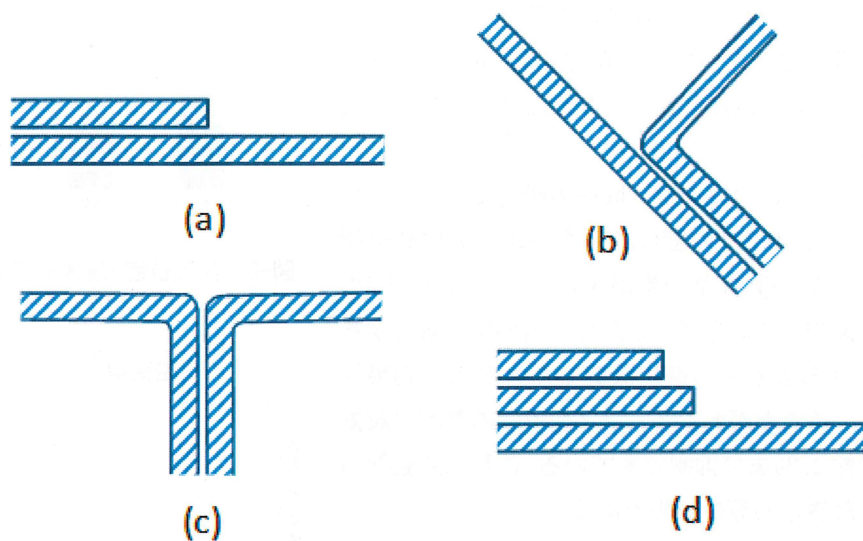


図 19 シム断面の典型的な 4 つのパターン

のを図 18 に示す。これからわかるようにシムの曲線的な形状だけでなく、シムの近傍の断面形状も連続的ではあるが、3次元で複雑に変化している。

各種製品のシムを調査した結果、得られたシーリングを施すべきシムの典型的な断面形状を図 19 に示す。部材の合わせ方により示されている 4 種のパターンにおおよそ分類できる。本来、防水を主目的にするシーリングでは、合わせ目に板状部材の浮きによる隙間が存在することが多い。また、次節で示すレンジセンサで断面を観測した場合、隙間が存在しなくてもシムに途切れが観測される。(詳細は次節で説明する。)

さらに、図 18 で示した典型的なシムの様子からわかるように、シムの近傍には穴、板の折れ目などのセンシングに対して障害になるものが多く存在する。また、シムは分岐する場合があります、さらに並行して存在する場合もある。

上記の状況を考えると、センシングのためのシム形状のモデルは以下のようにまとめられる。

- シーリングの対象ワークの位置ずれだけでなく、シム自体も

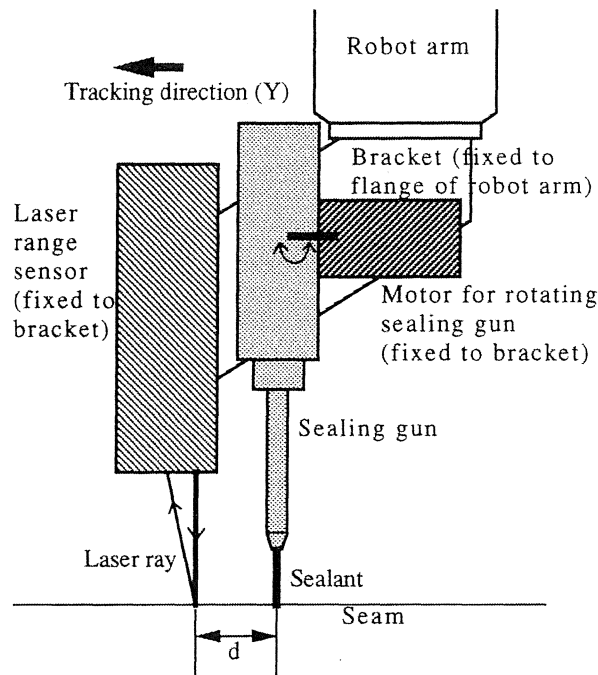


図 20 レンジセンサを伴うシーリングシステムの構成

- 板状部材の浮きなどのために 3 次元的に変化する。したがって、観測するには断面形状などの 3 次元形状が必要である。
- シムの断面形状は連続的に様々に変化するが、概して図 19 に示した 4 種のパターンに分類できる。シム断面形状の本質的な特徴は途切れである。
- シムの近傍にはセンシングの際に誤検出しそうな障害が多々存在する。したがって、シムの連続性を仮定した誤検出抑制が高信頼度実現のためには必要である。

3.3 システム構成

3.2 で述べたように、シムの位置観測のためには、3 次元形状の観測を連続的におこなう必要がある。ロボットにより連続的なシムを敷きながら、正確な位置にノズルが追従しつつ、シーリング材を塗布するシステムを想定する。そこで、ロボット手

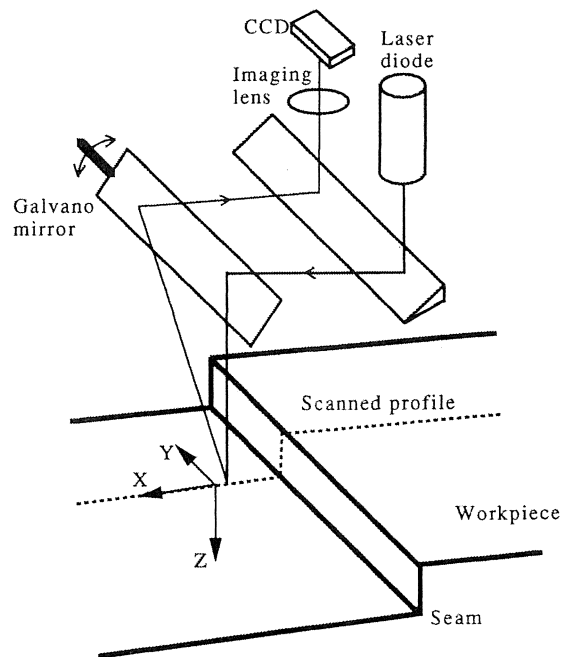


図 21 レーザレンジセンサの光学系

先に固定されたセンサにより、シム近傍の 3 次元断面を計測し、それからシムの正確な位置を算出するセンシングシステムの構成をここでは提案する。

シーリングは通常、線速度 300mm/s 以上の高速性が要求され、また速度の変化は塗布品質悪化の原因となるため、一定速度で動作する必要がある。多軸ロボットの動作自体をセンシング情報により制御する場合、上記の条件を満足する実現形態は現状では難しい。そこで、ロボットの手先に 1 軸の自由度をもった揺動型のシーリングガン（ノズル）を装着し、またそれから数十 mm 程度シム追従方向前方（先読み方向）に離して、断面計測をおこなうレンジセンサを配置した（図 20 参照）。ロボットはティッキングプレイバック動作をおこない、シムの計測断面内での並進成分をセンサで観測したデータから算出しつつ、ガン先を作業目標点を逐次向かせることで、位置ずれを吸収した塗布を可能としている。

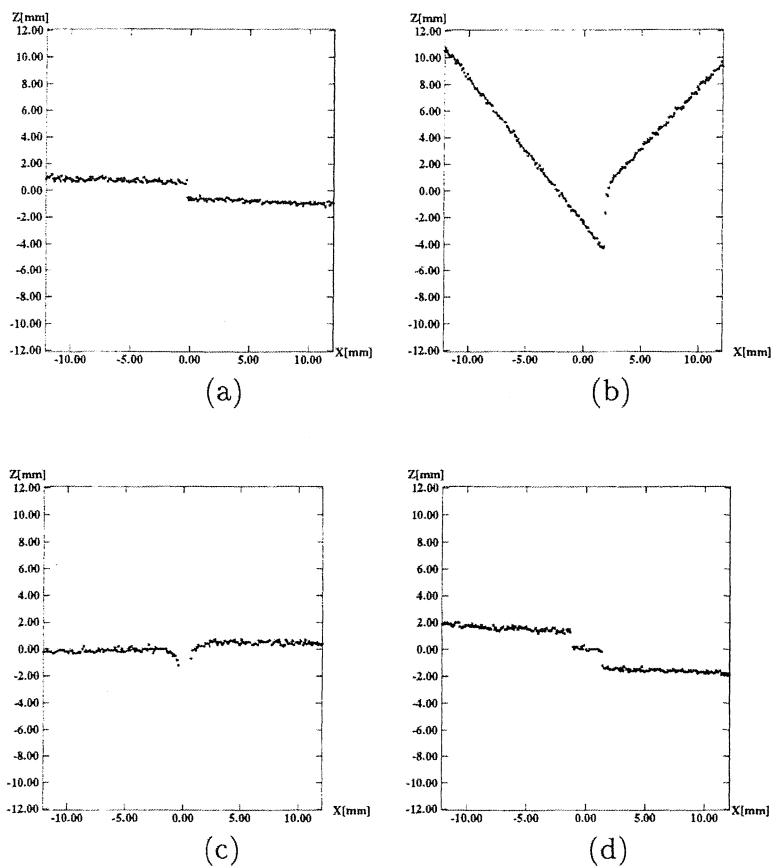


図 22 典型的なシム断面の観測データ

使用したレンジセンサは溶接にも使用可能なもの[3-6]で、断面の測距方式は図 21 に示すように三角測量方式である。図 19 に図示したシムの典型的な断面パターンの観測データ例を図 22 に示す。この断面計測データは 256 点の距離を測定した座標点列からなる。三角測量方式では放射した光軸と対象物の法線方向のなす角度が 90° に近づくと十分な強度の反射光が戻ってこなくなり、その点の距離が測れなくなる。母材面に対して面直な（ただし、図 22(b)で示す突き合わせパターンの場合には、 45° ）方向から塗布をおこなうことが基本姿勢であるが、この場合、反射光量が十分でない距離測定点を除くと、断面データではシムの部分に途切れが生じることになる。

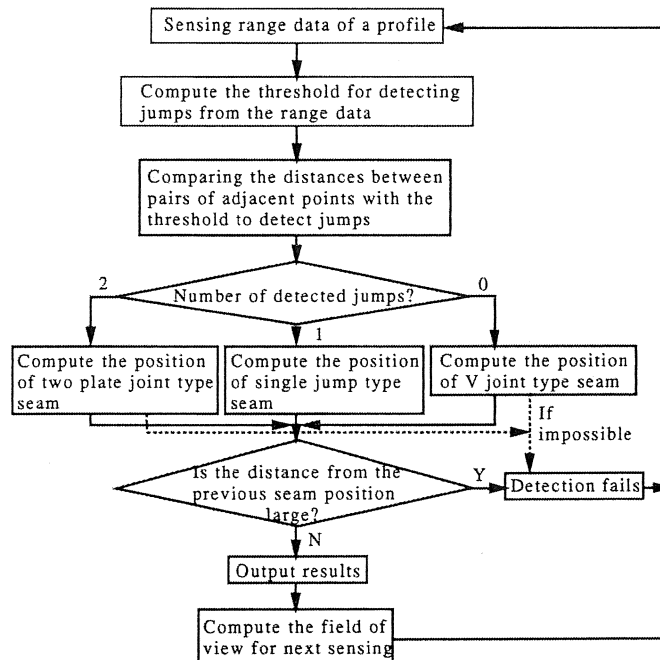


図 23 作業目標点検出アルゴリズムのフロー

また図 20 に示されているような先読み距離 d でガン揺動を制御するためには，ロボットの線速度を v とした場合に，観測したシム上の作業目標点通過時点まで $t = d/v$ の時間しか許されない．想定するシステムでは $d = 32\text{mm}$ であり，例えば， $v = 400\text{mm/s}$ でロボットを制御すると，センシングから作業目標点検出，ガン揺動まで 80ms でおこなわねばならない．ガンの動作性能を考えると，作業目標点出力までに 30ms 以下の処理時間しか許されない．レンジセンサは 16ms 周期で断面データを走査観測するが，センサコントローラ内部の DSP（TI 社製 TMS320C30）で作業目標点を 8ms 以下で算出できた場合には， 24ms 遅れでその観測結果を出力することができる．すなわち，作業目標点検出に 8ms しか許されないため，高速性を満足する簡便な処理アルゴリズムが要求される．

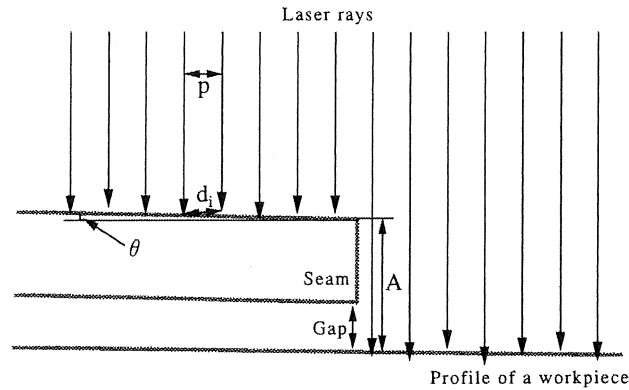


図 24 平行に投射されるレーザー光によるシム断面近傍の観測

3.4 作業目標点検出アルゴリズム

シーリングガンが向くべき作業目標点は、前節で述べたように、シム断面をセンシングした場合の断面データの途切れとして観測される特徴の位置から算出できる。そのアルゴリズムのフローを図 23 に示す。アルゴリズムの特色となる点は以下のとおりである。

- 特徴点を利用した適応的途切れ検出
- 検出した途切れの数による適応的作業目標点位置算出
- 近傍障害に引き付けられない方策としての前時点の作業目標位置との比較と視野制御

以下、フローの順に従い各処理の詳細を説明する。

3.4.1 途切れ位置の決定と途切れ検出

レンジセンサで観測されたシム近傍の断面データは (x_i, z_i) という座標点列で表現されている。ここで $i(=0, \dots, n)$ はレーザーの走査順に番号付けされたインデックスである。断面データ中の途切れは、

$$d \equiv \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} > d_{th} \quad (25)$$

として定義できる．ここで， d_{th} は途切れ検出閾値である．この閾値は対象とするシム断面の形状，センサのばらつき精度などにより適応的に決める必要がある．そこでまず対象とするシムの近傍の母材面は平面とし，各断面データの座標点を計測するレーザ光は平行に照射されると仮定する（図 24 参照）．その場合に平均 0 の等方性の正規分布に従う雑音が計測データに重畳しているとする，シムを含まない平面の断面データの各隣接座標点ペアの間隔 d_i は，

$$d_i = p/\cos\theta + \delta$$

と表される．ここで， θ は平面と x 軸方向がなす角度であり， $\delta \sim N(0, \sigma^2)$ である．したがって，断面データの点数の 1%程度の途切れ数を上限として検出するには，正規分布の確率密度分布より次式の k を 2.3 程度にして d_{th} を決定できる．

$$d_{th} = p/\cos\theta + k\sigma \quad (26)$$

実際には対象物の母材面は平面とは限らない（ただし，レンジセンサの視野範囲である $\pm 10\text{mm}$ 程度では近似的に仮定できる）し，レンジセンサのレーザ光も厳密には平行に照射されていない（ただし，隣り合うビームのなす角度は $8/256\text{deg}$ であり，並行と見なせる）．そこで，式(26)の $p/\cos\theta$ および σ の統計推定量として， d_i の平均 $\hat{\mu}$ および標準偏差 $\hat{\sigma}$ を次式により求めて代用する．

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_i d_i}{n}$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i (d_i - \hat{\mu})^2}{n-1}}$$

また，断面データに重畳するのは電氣的な雑音だけではないので，正規分布の仮定も現実的には厳しすぎる．しかしながら，観測した座標点列の間隔 $p/\cos\theta$ （使用したレンジセンサでは母材面に対する観測角度を高々 45deg としても 0.14mm 程度）に比して途切れの幅 A （ 0.6mm 以上）が十分に大きいとみなせる

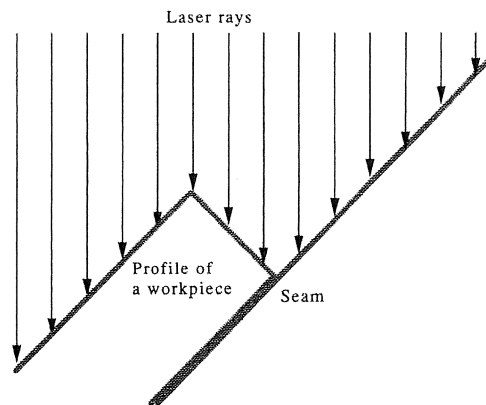


図 25 部材端面を観測した場合のシム検出

ため、 k を3に比べて十分に大きい数（例えば7）にすることにより、安定して途切れを検出できる。

3.4.2 途切れからの作業目標点検出

図 19 に示した典型的なシム断面を考えると、作業目標点、すなわちシーリング材を塗布する中心点は、3枚合わせを除き途切れの midpoint と考えることができる。3枚合わせにおいては、2つの近接し並行する2枚合わせ同時に塗布することを想定すると、2つの途切れが検出されたときに、それぞれの途切れの midpoint のそのまた midpoint を作業目標点とすることができる。

基本的にはシーリングガンの姿勢はシムを含む母材面の法線方向から塗布することになっているが、実際には狭あい部などでの作業により姿勢がとれない場合があり、その場合は図 25 に示した状況下での観測によりシム部の途切れが検出できないときがある。そこで、途切れが1つも検出できない場合には、断面データ内での屈曲点検出をおこない、観測方向から見て凹の直角に最も近い屈曲点を作業目標点とする。処理の簡便性から、注目している座標点 i からその b 点前、および後の点 $i-b$, $i+b$ にベクトル v_{i-b} , v_{i+b} を張り、それがなす角度

$$\varphi_i = \cos^{-1} \frac{v_{i-b} \cdot v_{i+b}}{|v_{i-b}| |v_{i+b}|}$$

を屈曲度として屈曲点を探す。

まとめると作業目標点の検出は以下のステップで進められる。

- i. 途切れ閾値 d_{th} と隣接座標点ペア間距離 d_i を $i = 2/n$ から順に視野の縁に向かって比較していき，式(25)の条件を満たす途切れを探す。途切れを2つ見付けるか，最縁点までの比較が終わったら次ステップへ進む。
- ii. 途切れが1つのみ見付かった場合は，その中点を作業目標点として出力して，処理を終了する。
- iii. 途切れが2つ見付かった場合は，各途切れの中点のそのまた中点作業目標点として出力して，処理を終了する。
- iv. 途切れが見付からない場合は，屈曲点検出処理を全断面データに対しておこない，最も凹の直角に近い屈曲点を作業目標点として出力して，処理を終了する。

3.4.3 誤検出目標点の除去

作業目標点近傍においては，シムの分岐が存在し，しかも近傍にシムと誤判断しやすい障害としてバリやスポット溶接打痕等も多く存在する。前節までに述べた方法により基本的には作業目標点を検出することができるが，作業目標点検出を高信頼度にするため，次節に述べる視野制御と合わせ，以下のような条件により誤検出目標点と疑われる出力を抑制している。

- 近傍の障害に途切れを検出した場合に，3枚合わせと誤る可能性がある。そこで，二つの途切れの中点間距離が閾値 f_{th1} より大きい場合は，前節で説明した iii. のステップで出力をおこなわない。これはシムが分岐していくときにも，この条件による抑制がおこなわれる。
- センサの観測データに雑音が重畳し，屈曲点として誤った点を作業目標点としてしまう場合がある。そこで前節のステッ

プ iv.で、最終的に選択された屈曲点のなす角が 90° から閾値 a_{th} 以上離れている場合は出力をおこなわない。

- シムは連続的な曲線である場合が多く、ロボットも滑らかに倣いながら動作しているので、一時点前の観測による作業目標点と現時点の作業目標点のセンサ観測座標系における距離が極端に大きくなることはない。そこで、前節の i.~iv.で出力が得られた時、前時点との出力との距離と閾値 f_{th2} を比較し、閾値より大きい場合には出力をおこなわない。

なお、上記の条件に含まれるパラメータとして、同一観測時途切れ中点間距離閾値 f_{th1} 、屈曲点角度閾値 a_{th} 、連続観測による作業目標点間距離閾値 f_{th2} があるが、これらはシムの形状や作業であるシーリングの塗布幅などに依存するので、実際の作業対象における実験から決定されるものである。これらの値はそれぞれ $f_{th1} = 3.0\text{mm}$ 、 $a_{th} = 15\text{deg}$ 、 $f_{th2} = 5.0\text{mm}$ と定めた。

3.4.4 次観測の視野範囲の決定

前節での誤検出抑制条件でも仮定しているが、シムの測定断面に垂直な方向のシム形状には、近傍において連続性が保証できる。そこで、ある時点までに連続し安定して特徴点を検出できたとき、次の時点の特徴点の存在位置を断面内の特定の位置に限定することができる。これを以下のような断面データ観測の視野制御によって実現した。なお、この制御はレーザの走査方向 (x 座標) にのみ適用している。

まず、シム特徴点位置の連続検出成功回数なるパラメータ c を 0 にリセットする。また、同時に直前に算出された作業目標点の x 座標値を示す x_{pre} を 0 にリセットする。 x 方向の視野範囲 (x_s, x_e) を以下のように算出する。

$$x_s = x_{pre} - (r_{ini} - r_{min})\alpha^c - r_{min}$$

$$x_e = x_{pre} + (r_{ini} - r_{min})\alpha^c + r_{min}$$

ここで、 r_{ini} は初期視野範囲の半値であり、 α は視野縮小係数

表 4 3種のシム断面パターンのシム検出結果

Single plate type:					
Thickness	Detection rate	Mean position		Standard deviation	
A[mm]	[%]	x[mm]	z[mm]	σ_x [mm]	σ_z [mm]
0.6	100.0	0.031	-0.980	0.000	0.018
0.8	100.0	-0.063	-0.972	0.000	0.026
1.0	100.0	0.031	-0.990	0.000	0.022
2.0	100.0	0.031	-0.907	0.000	0.043
3.2	100.0	0.031	-0.896	0.000	0.015

Ogami type:					
Curvature radius	Detection rate	Mean position		Standard deviation	
R[mm]	[%]	x[mm]	z[mm]	σ_x [mm]	σ_z [mm]
3.0	100.0	-0.093	-0.942	0.004	0.025
5.0	100.0	0.031	-1.000	0.002	0.010
8.0	100.0	0.009	-0.941	0.041	0.112
10.0	100.0	-0.038	-0.837	0.061	0.215
15.0	100.0	0.212	-1.402	0.028	0.105

Tsuki type:					
Curvature radius	Detection rate	Mean position		Standard deviation	
R[mm]	[%]	x[mm]	z[mm]	σ_x [mm]	σ_z [mm]
3.0	100.0	0.056	-0.361	0.048	0.079
5.0	100.0	0.894	-0.056	0.030	0.049
8.0	100.0	0.156	-1.031	0.003	0.024
10.0	100.0	0.094	-0.971	0.000	0.015
15.0	100.0	0.938	-0.064	0.005	0.012

($0 < \alpha < 1$), r_{min} は最小視野範囲の半値である。これらの値は、設定すべきパラメータである。初期視野範囲 $2 \times r_{ini}$ はセンサの(最大)観測視野に合わせて決定され、最小視野範囲 $2 \times r_{min}$ は統計量から途切れ閾値を算出しているため、サンプル数として断面データの座標点数が十分とされる幅に定められる。また、視野縮小係数 α はシムの形状に依存するので、実際の作業対象における実験から決定されるべきパラメータである。これらの値はそれぞれ $r_{ini} = 12.5\text{mm}$, $r_{min} = 4.2\text{mm}$, $\alpha = 0.63$ と定め、次節の実験では、 k , f_{th1} , f_{th2} , a_{th} とともに対象ごとの調整はせず、固定値として使用した。

表 5 浮きのない 2 枚合わせに対する静的観測実験の結果

Rotation angle θ [deg]	Detection rate [%]	Mean position		Standard deviation	
		x[mm]	z[mm]	σ_x [mm]	σ_z [mm]
-30	100.0	-0.813	-1.098	0.000	0.014
-20	100.0	-0.057	-1.732	0.015	0.055
-10	100.0	-0.444	-2.116	0.020	0.041
0	100.0	-0.188	-2.142	0.000	0.017
10	100.0	1.250	-1.499	0.000	0.021
20	98.9	0.375	-1.565	0.000	0.023
30	99.8	-0.371	-1.627	0.035	0.020

3.5 実験結果とその考察

作業目標点検出アルゴリズムの性能を調べるため、大きく分けて以下の三つの実験をおこなった。

- 試料シムに対する静的観測実験
- 実ワーク（電着塗装済み車体）に対する動的観測実験
- 実ワークに対するシーリング実験

静的観測実験は、各種シムパターンに対する検出性能を検出率、精度（定点観測での標準偏差）および視野という観点で知るためにおこない、動的観測実験は実パターンに対する検出性能のみならず、視野制御の性能を明らかにするために実施した。さらにシーリング材の塗布実験により、実用システムとしての可能性を示すことができると考えた。

静的観測実験は、図 19 に示した 4 種のシム断面パターンのうち、3 枚合わせを除く 3 種について、板厚、曲率といったパラメータ変えて作ったテストピースと呼ぶ試料をセンサの視野の中心に置き、それぞれ 1000 回ずつ観測し、その結果を評価するものである。なお、テストピースは実際の対象と同じ塗装が施してある。表 4 にその結果を示す。これから、2 枚合わせ（single plate type）では実ワークで出現する 0.6mm 以上の板厚について検出可能であり、挿み合わせ（ogami type）突き

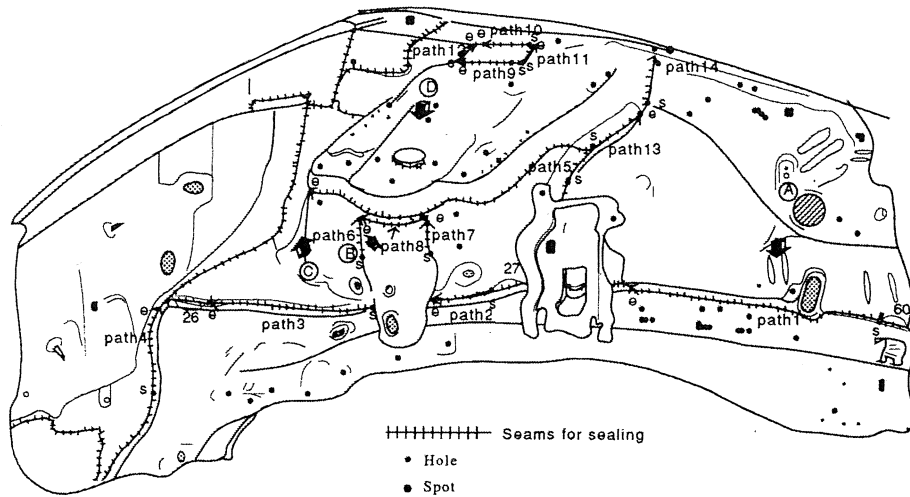


図 26 実ワークに対するシーリングパスの構成

合わせ (tsuki type) では曲率半径が 15mm といった曲りに対してまでシムの検出が可能であることが確認できた。

次に板厚 1.0mm の浮きのない 2 枚合わせについて、センサに対する角度を調整し、静的観測実験をおこなった (表 5)。角度が正の姿勢では上部の板の端部を観測することになり、面直から離れると図 25 で示した状況で屈曲点を検出することになる。屈曲点検出には計算量低減化のため、非常に単純な方法しか現状では用いていないため、検出能力が若干低下することが明らかとなった。

さらに板厚 1.0mm の浮きのない 2 枚合わせをセンサ視野中心に置き、センサを XY ステージにより走査・距離方向に 2.0mm 間隔の格子状で $\pm 10\text{mm}$ の範囲を動かし、その検出性能を調べた。すべての観測地点 (121 点) で 1000 回ずつ観測し、検出率は 100% であり、誤差 (3σ) も 0.5mm 以下であった。

次に図 26 に示した車体の一部 (エンジンルーム左側) について、ロボットに搭載したセンサによる観測実験をおこなった。このワークにはシーリングを施すべきシムが 14 パス存在する。

表 6 実ワークの観測実験における視野制御の効果

50[mm/s]:							
	Constant feiled of view				Controlled field of view		
	Sensed [scans]	Failed [scans]	Mis- detected [scans]	Detection rate [%]	Failed [scans]	Mis- detected [scans]	Detection rate [%]
1	713	18	25	94.0	0	0	100.0
2	713	21	25	93.5	0	0	100.0
3	713	18	25	94.0	0	0	100.0
4	713	18	25	94.0	0	0	100.0
5	713	22	24	93.5	0	0	100.0

300[mm/s]:							
	Constant feiled of view				Controlled field of view		
	Sensed [scans]	Failed [scans]	Mis- detected [scans]	Detection rate [%]	Failed [scans]	Mis- detected [scans]	Detection rate [%]
1	201	9	8	91.5	0	0	100.0
2	200	11	6	91.5	0	0	100.0
3	201	9	7	92.0	0	0	100.0
4	201	8	8	92.0	0	0	100.0
5	201	10	6	92.0	0	0	100.0

表 6 はそのパスのうち、最長である第 5 パスについてロボットの動作速度を変えて観測実験をおこなった結果である。このシムの近傍には基準穴など誤検出を引き起こす障害が複数存在する。そこで、表 6 では視野制御の効果을明らかにするために、制御有無による検出結果も併記した。視野制御をおこなわない場合（表の左部分）、検出率は 90%前半である。ここでいう検出率は単にアルゴリズムが結果を出力した割合でなく、近傍障害などの誤検出をも差し引いた正答率である。これから視野制御により、作業結果に致命的な結果をもたらす作業目標点の誤検出を抑制できることがわかった。

表 7 は図 26 に示す 14 本のパスに対し作業目標点検出を 3 回実行した結果を示す（ロボットの動作指示速度は実作業に合わせ 400mm/s に設定）。第 4 パスを除き、実際の対象に対するシーリングに十分な検出率を保てることを確認した。実作業時に

表 7 実ワークに対する観測実験の結果

Path number	1st trial		2nd trial		3rd trial	
	Sensed	Detection rate	Sensed	Detection rate	Sensed	Detection rate
	[scans]	[%]	[scans]	[%]	[scans]	[%]
1	86	98.8	86	98.8	85	100.0
2	26	100.0	26	100.0	26	100.0
3	44	100.0	44	100.0	44	100.0
4	46	69.6	46	76.1	46	95.7
5	196	98.0	196	98.5	196	100.0
6	22	100.0	22	100.0	21	100.0
7	39	100.0	39	100.0	38	100.0
8	57	100.0	57	100.0	58	98.3
9	26	100.0	25	100.0	26	100.0
10	32	100.0	32	100.0	32	100.0
11	23	100.0	23	100.0	23	100.0
12	31	100.0	32	100.0	32	100.0
13	35	100.0	35	100.0	35	100.0
14	25	100.0	26	100.0	25	100.0

は、検出率が 100%でなくとも検出の失敗が連続しなければ、検出結果を時系列でフィルタリングしたり、もしくは直前の検出成功した位置でガンを固定するなどの運用によって作業品質を確保できる。なお、第 4 パスは狭あい部のため、観測に適切なロボットの姿勢をとることができず、屈曲点検出が頻出し検出率が低下した。

さらに図 26 の対象について、現在のシーリングで使用しているシーリング材塗布幅の約 30%の幅（約 10mm）でシーリング材を塗布する実験をおこなった。現行ラインで想定できるワーク位置ずれと形状個体差から生じる、合成されたシム位置ずれの最大幅は 10mm 程度である。それを再現するよう対象ワークをずらしても、削減したシーリング材の塗布幅で十分塗布を遂行でき、車体のシーリングのためのセンシング技術としては提案手法が有効であることを確認した。

3.6 あとがき

本章では，板状部材の成すシムに対するシーリングを材料効率の面で最適にロボットによって自動化するための新しいセンシング方式について述べた．その方式では，レーザレンジセンサによりシム近傍の断面データを逐次観測し，それから途切れという特徴を検出し，それをもとに作業目標点を算出する．システムとしては，ティーチングプレイバック型ロボットに1自由度の揺動機構を取り付け，作業目標点検出結果に揺動機構の先に付けたシーリングガンが実時間で做う方式を採用した．このセンシング方式の特長は以下に示すとおりである．

- シム形状のモデル化による多様なシム形状に対応，しかもほとんどのパラメータ設定の切替・調整不要
- シンプルであり，高速な作業に適応
- 近傍障害に作業目標点を誤検出しない高信頼性

なお，対象のシム形状の変化の影響はほとんど統計推定量からの途切れ閾値算出により吸収されるため，パラメータ設定の切替・調整なしで安定して作業目標点が検出できたものと考えられる．

この方式を用いた実車体に対するシーリング材塗布実験により，半分以上のシーリング材使用量を削減してもシーリングが可能であることを実証した．シムの位置ずれを直接観測し，その結果を作業に反映した方式としては，世界初の自動化実用例である．本章で提案した方法を適用したシステムについては，耐久性などの面で検討を重ね，1998年に一部の製造ラインに導入されている．

さらに本章で述べた板状部材端部の検出法はシーリングのみならず，溶接，把持などの各種作業のロボットによる自動化にも適用可能と思われるため，他分野への応用も視野に入れたい．

第 4 章

狭あい部での断面計測のための極細レンジセンサの構築

本章では，シーリング等の倣い作業に知能ロボットを適用する場合において，産業用ロボットの手先に搭載するレンジセンサに関する最適な形状設計の研究について述べる．

4.1 まえがき

生産のための知能ロボット実現のためには，対象物の位置姿勢を観測するセンサが必要である．昨今，CCD カメラを使用したマシンビジョン技術だけでなく，直接に 3 次元情報を測定するレンジセンサ（レンジファインダ）[4-1]の研究開発，実用化が進んでいる．従来はコスト面だけでなく，環境に対するロバスト性などの問題のため，生産現場に導入されにくかったレンジセンサであったが，技術の進展により，その導入が広がりそのような局面を迎えている[4-2][4-3]．

生産におけるロボットの作業パターンを類型化すると，そのなかの主要な作業パターンの一つとして，対象物形状を倣いながら作業を遂行するトラッキング（倣い）作業がある．たとえば，溶接や研磨，バリ取り，シーリングなどがこのトラッキング作業に属する．3 章ではレンジセンサを適用したセンサ先読み型トラッキングシステムの一例として，シーリング作業向けのシステム，特にそこに適用されたセンシング方式について述べた．センサ先読み型トラッキングロボットシステム[4-5][4-6][4-7]は図 27 に例を示すような，ロボットアームの先端に作業のためのツールとセンサを搭載した構成を採るが，その手先搭載部の大きさが狭あい部での作業，ないしは適用範囲を制限するという問題があった．センサの形態について考察してみると，この問題を解決するためには以下の要件を満たす必

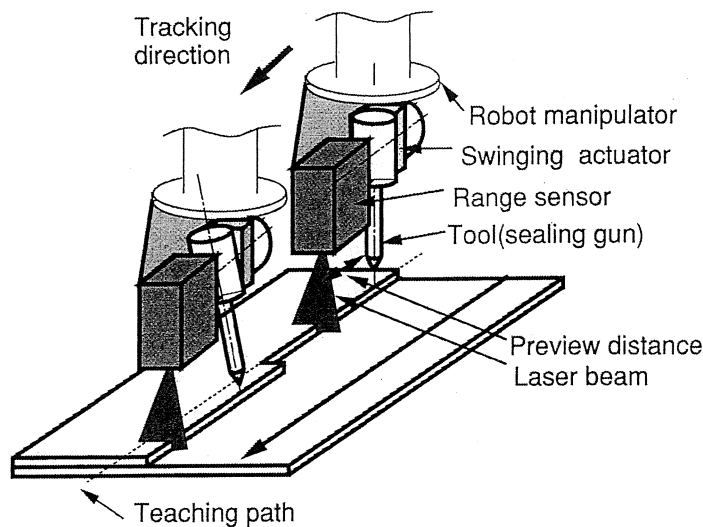


図 27 先読み型トラッキングロボットシステムの例（シーリング用）

要がある。

- トラッキング作業においては、溶接トーチやシーリングガン等のツールは一般的に棒状の形態のものが多い。したがって、センサもそれに沿う形、すなわち対物面の面積の小さいものであれば容積効率が良い。
- 先読み型トラッキングの場合、ツールとセンサ間の先読み距離がロボット先端に装着するモジュールの大きさに含まれる。先読み距離はロボットの作業速度とセンシング時間の積でほぼ決定されるので、センシング時間が小さいほど、すなわちセンシングが高速なほど先読み距離を小さくすることができる。

本章では、三角測量に則った走査型レンジセンサの小型化にかかわる要素解析について論じ、その考えに従った狭あい部でのトラッキング作業に適した細く（すなわち断面積が小さく）高速なレンジセンサを提案する。このセンサは特に小型化という面でレンジセンサを進展させたものであり、想定している応用分野であるトラッキング作業のみならず、狭あい部での3次

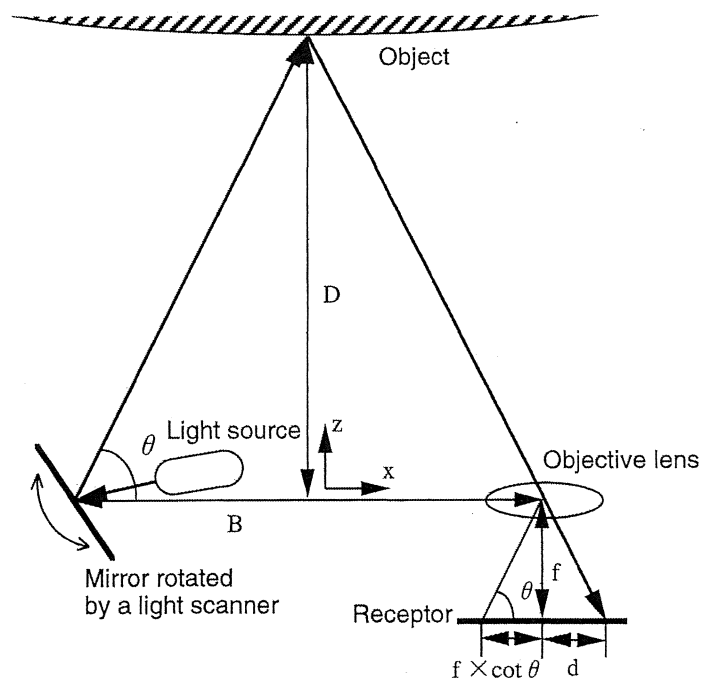


図 28 三角測量による距離の計測原理

元形状計測の有効である。

本章の構成は、以下のとおりである。まず 4.2 節で三角測量による走査型レンジセンサを小型化するために勘案すべき技術的要素について考察する。4.3 節では、その考えに基づく一つの解決策として、新たに提案する小型光偏向器を用いた極細レンジセンサの実現形態について述べ、さらに 4.4 節でその試作機を用いた実験結果を示すとともに、それから認められる有効性について検討する。4.5 節では、得られた知見をまとめるとともに、今後の課題を示す。

4.2 小型化のための技術的要素

直線状にレーザー光を走査し三角測量により断面データを計測するレンジセンサの計測原理を簡略化し、図 28 に示す。なお、投光側の光のみ走査するレンジセンサの測定方式を想定しており、受光側を同期したミラーで反射する方式は考えていな

い。この図より、レンジセンサの断面積の光走査方向の大きさ（一辺の長さ）は、受光器の大きさに起因する d 、基線長 B や光偏向器のミラーの大きさで決まることがわかる。受光器の部品などは限定されるため、一般に d などは制約されるから、主に灯光器と受光器間の距離である基線長 B がレンジセンサの光走査方向の大きさを決める要素となる。

なお、三角測量では測定対象物表面で乱反射した光を受光器上の位置 d で受けた場合、以下の式で距離 D が決定される。

$$D = \frac{Bf}{f \cot \theta + d}$$

ここで f は対物レンズの焦点距離であり、ある光学系のもとでは定数である。距離 D は、対象物上で乱反射した増の受光器上での結像位置 d から算出されるが、実際には d はある分解能のもとで（離散的に）しか測定できないと考えるのが妥当である。したがって、基線長を短くするためには高分解能の受光素子を採用する必要がある。

また、光を走査するために光偏向器を使うが、この大きさ（光偏向の軸長）がレンジセンサの断面積のもう一辺（光走査面の法線方向）の長さを決定する。すなわち、ミラーと駆動系をあわせた軸長がなるべく小さな光偏向器を採用することが必要となる。たとえば投光する向きを制御するために、ガルバノミラー、ないしは回転多面体ミラーがよく利用されるが、これは一般にミラーの下部にサーボ制御可能なモータを取り付けた構成となるため、軸長の大きな部品になってしまう。なおトラッキング作業においては、做すべき曲線状の縁などに対し垂直に光は走査されることが多いので、光偏向器の軸長はロボットの進行方向の大きさになる。進行方向に障害物が存在する場合、先読み距離とあわせてこの軸長が、どこまで作業を進行していけるかを決定する。したがって、トラッキング作業遂行の効率の観点からも、光偏向器の軸長の短縮は重要である。

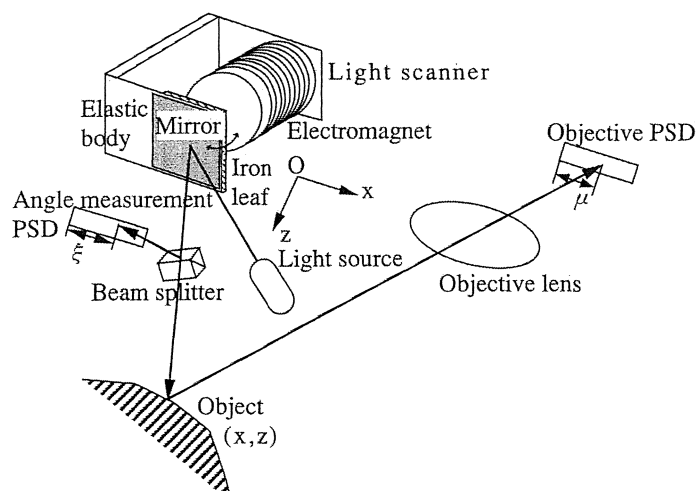


図 29 提案するレンジセンサの構成

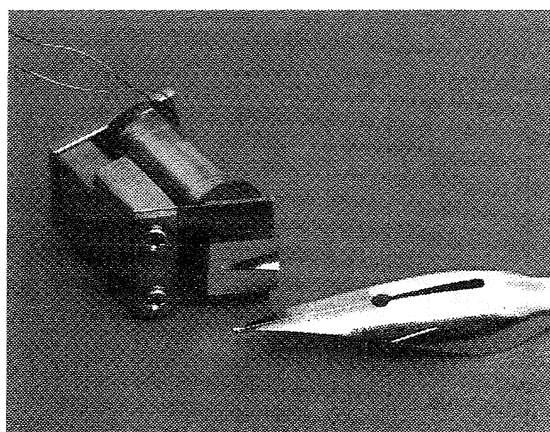


図 30 光偏向器

4.3 極細センサの一実現形態

4.3.1 ハードウェア

4.2 節での考察に従い、まず小型の光偏向器を考案した。その基本構造は図 29 の一部に示すように、コイルと弾性体、鉄片、ミラーからなるもので、コイルに電流を流すことにより弾性体に張り付けた鉄片がコイルに引き寄せられ、同じく弾性体に張り付けたミラーによりレーザ光が偏向する。その動作は基本的に交流用ブザーと同一であり、コイルに断続電流を流すことにより光を走査することができる。なお低消費電力化と振動

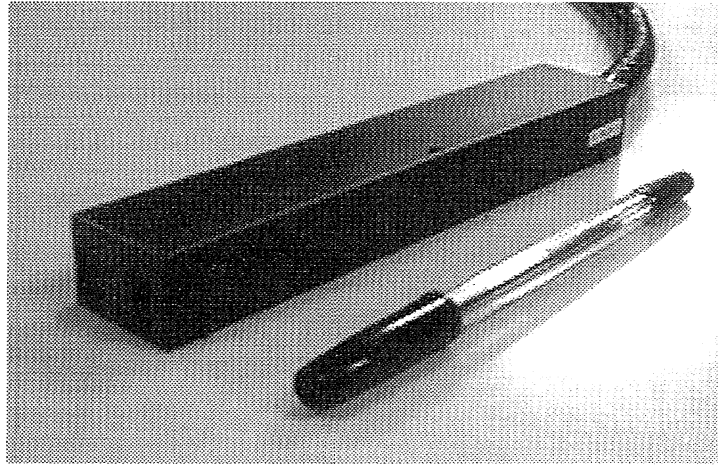


図 31 極細レンジセンサの試作機

の安定性を考慮し，弾性体の機械的な共振振動数を電流の駆動周波数に一致させ駆動させている．この方式はミラー駆動のために非常に簡単な構成を採っており，かつ駆動部が光の投光方向に対して後部にある構造のため，対物面，すなわちレンジセンサの断面については特に小面積の光投光器となる．図 30 に試作した光投光器を示す．この光投光器の大きさは外接直方体で，幅 11mm×高さ 10mm×奥行き 17mm である．

しかしながら，今回採用した方式は自由振動に基づくので，光の偏向角度を制御できない方式である．そこで光偏向器のミラーにより偏向した光をビームスプリッタにより走査方向に垂直な方向に一部，分光し，その光の進行方向に受光器を置いて光の偏向角度に対応する信号を逐次観測する必要がある．光偏向器の駆動電流の周波数は弾性体の共振周波数に適應させているが，共振周波数は温度により変動するので，この光偏向角度信号を参照してフィードバックをかけて，必要な光偏向角度を得られるような安定な駆動を実現する．

上記の偏向角度を観測する受光器以外に，対象物表面で反射してきた光の位置を観測する受光器も必要である．4.2 節における解析で基線長を短くするためには，分光器の分解能が問題

表 8 極細レンジセンサ試作機の仕様

Sensor head size	30(W) × 29(H) × 168(D)[mm]
Sensor head weight	approx.80[g]
Measurement period	4[ms]/256[pts]
Measurement range	±10(W) × ±10(D)[mm]
Working distance	75[mm]
Range resolution	0.01[mm]
Spacial resolution	approx.0.1[mm]
Laser beam projection	wavelength 680[nm], output 20[mW]
Data/signal transmission	digital transmission via optical fiber
Controler	IBM PC compatible (ISA bus board)

になるが，その点で現状ではおそらく最適であろう 1 次元の PSD を受光器に採用した．これは受光位置算出に必要な計算量も少ないので，高速性の点でも有利である．

試作機のセンサヘッドの様子を図 31 に，またその仕様を表 8 に示す．内部には光偏向器等の光学系（基線長 20mm）だけでなく，棒状に実装した電気回路を搭載している．データ転送等に使用する光ファイバのコネクタ形状の大きさを含め，長手方向は 168mm と長めになったが，断面は想定通り 20mm × 30mm と非常に小さくすることができた．なお，表 8 中に示した距離分解能（Range resolution）は，センサ出力の仕様としての分解能であり，実効分解能ではない．

4.3.2 キャリブレーション

採用した光偏向器は弾性体のたわみを利用しているので，光の走査をおこなう軸を厳密には決定できない．したがって，二つの受光器の受光位置 (ξ, μ) から距離断面 $(x, z) = (F(\xi, \mu), G(\xi, \mu))$ を算出する変換を決定するキャリブレーションにおいて，パラメータを組み込むべき返還式は少なくとも三次以上の高次式になる．そこで，返還式をあえて解析的に求めて，観測値からその変換式の係数などを決定するキャリブレーション手法を用いず，ルックアップテーブル（LUT）により変換する方法を適

用した。

しかしながら，採用した光偏向器の方式では，想定した方向に光を向ける制御はできない．すなわち，ある x の値に対応する PSD 上での受光位置を意図的に観測することはできない．そこで，まずセンサの光偏向器を利用して走査したレーザ光を用いず対象物平面上に外部レーザ光源からレーザ光をあて，それを既知の 3 次元座標の観測対象物として μ を算出し，

$$f(x, z) = \mu$$

なる関係式を求める．この関数の逆関数が存在するとして，

$$f^{-1}(z; \mu) = x \quad (27)$$

を求める．その後に既知の距離 z にある平面をセンサで観測して， $(z; \xi, \mu)$ の三つ組を求め，先の式 (27) を用いて， $(x = f^{-1}(z; \mu), z; \xi, \mu)$ の四つ組に変換する．

上記のように観測値から求める四つ組データは離散的なものであり，精度を満たす分解能で，ある既知の 3 次元（断面）座標 (x, z) に対する (ξ, μ) の値をすべて，すなわち LUT の全エントリーをあらかじめ観測により求めておくことはできない．そこで， F, G の関数それぞれを局所的な滑らかさの仮定のもとで以下のエネルギー $E(\mathbf{u})$ を最小化するように，内挿して滑らかな 3 次元曲面 \mathbf{u} として求め，LUT のエントリーを算出する．

$$E(\mathbf{u}) = (1 - \lambda)E_d(\mathbf{u}, \mathbf{d}) + \lambda E_p(\mathbf{u})$$

ここで， \mathbf{d} は観測された部分データであり， E_d はペナルティ汎関数と呼ばれデータの適合性の度合いを示し， E_p は安定化汎関数と呼ばれ \mathbf{u} の滑らかさを拘束する量である．たとえば，

$$E_d(\mathbf{u}, \mathbf{d}) = \frac{1}{2} \sum_i c_i [u(X_i, Y_i) - d_i]^2$$

$$E_p(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \iint [w_1(u_X^2 + u_Y^2) + w_2(u_{XX}^2 + 2u_{XY}^2 + u_{YY}^2)] dx dy \quad (28)$$

とすることで局所的に二次微分まで連続な曲面を求めることができる．ここで， i は観測されたデータに付与されたインデッ

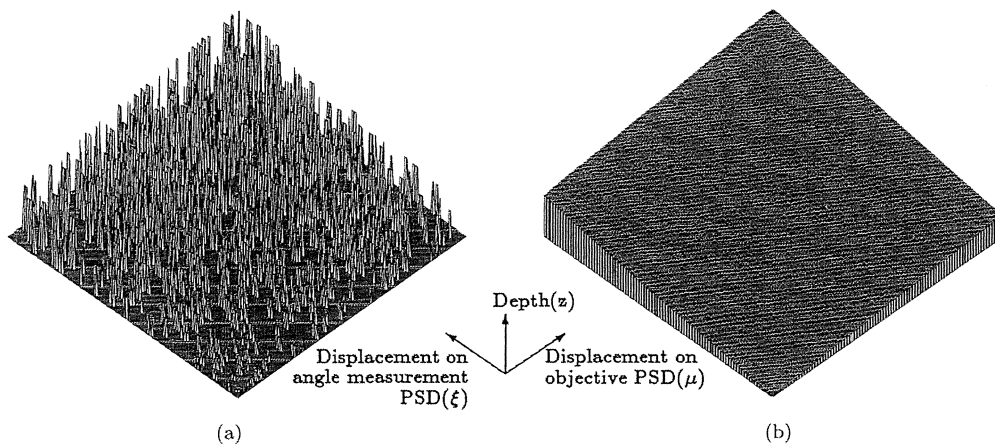


図 32 内挿により得られたキャリブレーション結果：(a)観測値および(b)LUT とする内挿結果

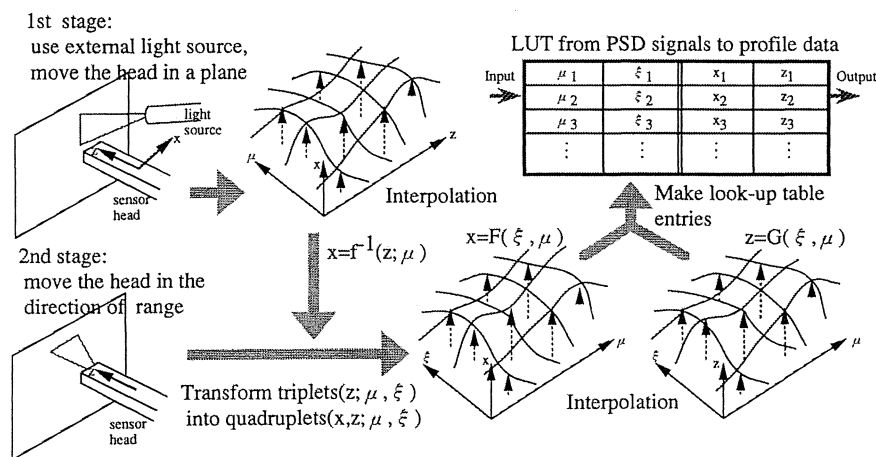


図 33 LUT を算出するキャリブレーション法の流れ

クス、 (X_i, Y_i) はそのデータを展開する2次元平面座標、 c_i はデータが存在するときに1、それ以外の場合は0の値をとる重みであり、 w_1, w_2 は滑らかさの特性を制御する重みである。上記の内挿の方法を正則化理論に基づくスプライン曲面の再構成という[4-8][2-10]。この内挿の入力値である測定値と内挿結果の一例を図32に示す。またLUTを算出するキャリブレーション全体の流れの概要を図33に示す。

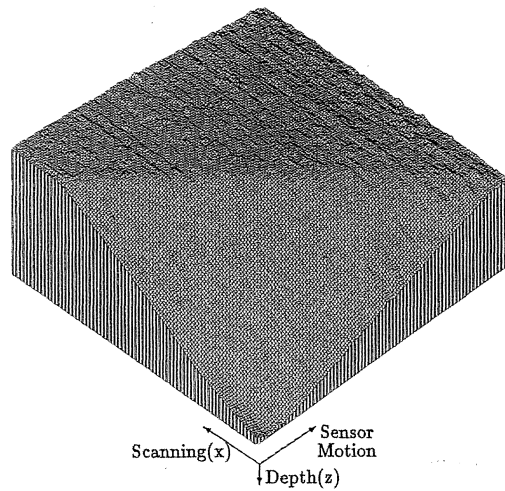


図 34 石膏像の稜エッジの観測結果

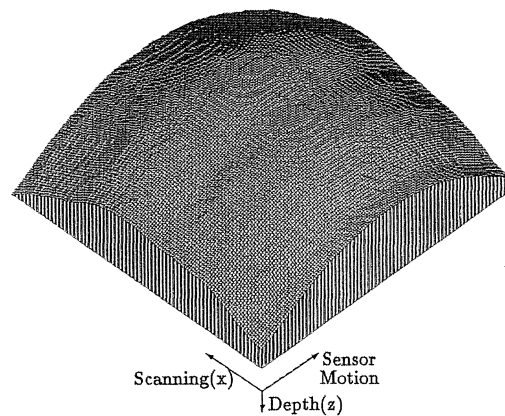


図 35 球面（ピンポン玉）の一部の観測結果

4.4 実験結果とその考察

4.4.1 精度評価

4.3 節で述べた極細レンジセンサの試作機について、そのセンサとしての性能を継続実験により評価した。まず、センサを光走査方向に垂直な方向に移動させつつ、石膏像の稜エッジ部分（約 15mm 角）を計測した結果を図 34 に示す。また、同様な視野で球（ピンポン玉）を計測した結果を図 35 に示す。各断面計測データは観測点が非等間隔に並ぶため、示した結果に

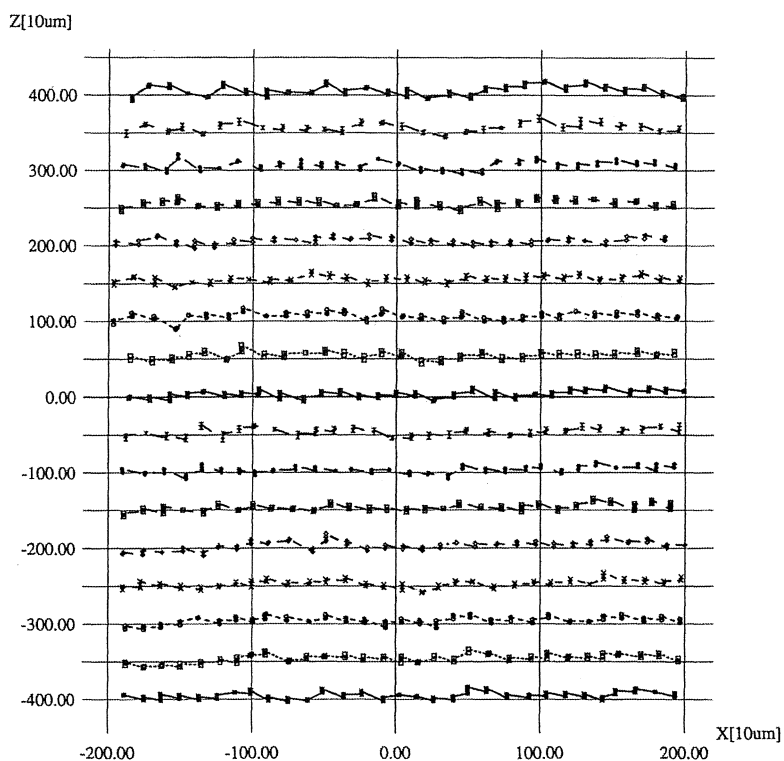


図 36 奥行き方向 0.5mm 間隔の平面の観測結果

は、4.3.2 で述べたのと同様の正規化に基づく内挿が施してある。それぞれの立体形状が正しく計測されており，レンジセンサとして機能しているのがわかる。若干，球の測定形状が乱れているのは，対象物がピンポン玉であり，表面で反射する光だけでなく内部に透過する光もセンサが受光したために，測定誤差が生じたからである。

まず距離に関する実効分解能を評価した。センサを XY ステージに載せ，対象物から離れる方向で一定間隔で移動させつつ断面を計測し，距離値変換前の信号の分離状況を目視により確認すると，奥行きについて 0.2mm の実効分解能が確認できた。

次に定量的に計測制度を評価した。この精度には，静止した対象物を観測したときに観測値がばらつく相対精度と，センサ座標系において正確な既知の位置に対象物を置いて観測した

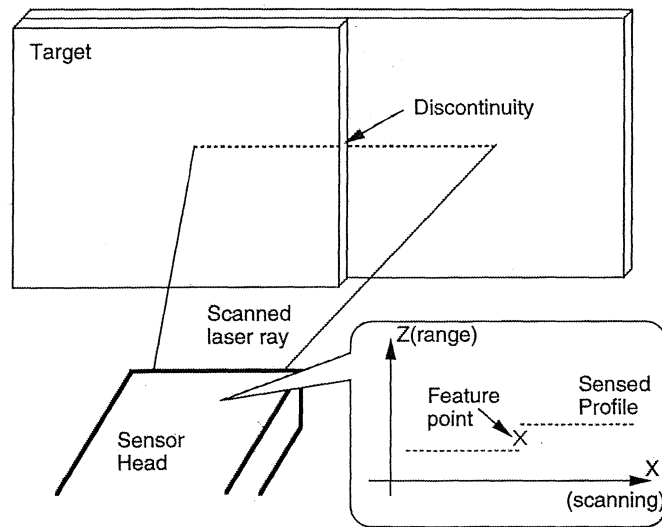


図 37 走査方向の精度測定のための不連続点検出

ときに，その既知の位置と観測値との差として観測される絶対精度がある．前者は電気回路に生じる電氣的雑音など各種雑音に起因するものであり，静態観測における標準偏差として定量化される．後者はキャリブレーション方式の能力，ないしはキャリブレーションに使用する観測データを取得する際に外部で観測した（既知として扱う）位置の値の違いに起因し，静態観測における平均誤差として定量化される．なお最大誤差は，両者を総合した最悪の誤差である．

キャリブレーションのプロセスで既知の位置にある正対した平面の断面を計測する．0.5mm 間隔でセンサを距離方向に移動しつつ平面を計測した例を図 36 に示す．キャリブレーションの結果として算出した LUT により変換したその距離値と真の距離値の誤差を調べたところ，平均誤差は 0.18mm，最大で 1.56mm であった．これにメディアンフィルタ（カーネルの大きさは走査方向に 9 観測点）を施したところ，平均誤差は 0.08mm，最大では 0.43mm であった．この場合の平均誤差はセンサ座標系で正確な位置として扱った観測データに関するも

のであるので、キャリブレーションの方式限界，たとえば内挿時に仮定した局所的に滑らかなモデルと現実の不一致等に起因するものである。

走査方向の精度も評価するには，平面でなく，断面データ中に不連続な特徴点を観測しなければならない。そこで図 37 のような対象物をセンサ座標系で既知の位置に置き，その段差を含む断面を計測し，3 章で提案した特徴点検出法により特徴点の座標を算出する観測実験をおこなった。同一の位置（ほぼ視野の中心）に置かれた対象物を 1000 回観測した結果，走査方向（ x 軸）については，平均誤差 0.03mm，最大誤差 0.22mm，標準偏差 0.06mm，距離方向（ z 軸）については，平均誤差 0.07mm，最大誤差 0.89mm，標準偏差 0.15mm であった。

4.4.2 今後の課題

この試作機において残されている技術的課題は以下のとおりである。

- 対物受光器として PSD を使用しているが，その検出位置は反射光の強さに依存する場合があります，色などの表面性状が違う対象物の計測距離が異なる場合があります。また，PSD の受光量のダイナミックレンジは小さく，反射光が強い場合には観測値は信頼できない。さらに応答特性が悪いため，断面形状における不連続点の形状が鈍る傾向がある。
- 偏向器の性質上，断面を構成する距離点列は走査方向に等間隔に計測されない。したがって，トラッキング作業などにおいて做すべき特徴点を断面から検出する際に，距離点列の等間隔性を仮定しているアルゴリズムはそのままでは使用できない。

なお，前者は PSD の本質的性質に起因するものなので，当面はこの状況を回避する応用を想定すべきであると考えている。

4.5 あとがき

本章では，狭あい部のトラッキング作業において対象物断面を計測する三角測量型の走査型レンジセンサの小型化について考察し，

- 光偏向器の小型化，特に偏向のための軸長の短縮
- 基線長の短縮，それに伴う高分解能の受光器の採用の必要性を見出した．また，その考えに従ったレンジセンサを提案した．そのキーとなる技術は，
- コイルと弾性体で構成されるブザー様の小型光偏向器
- 光学系の幾何学的な解析モデルに基づかないルックアップテーブル作成のためのキャリブレーション法

である．さらに，試作機による実験により，その計測機能を実証した．

現状でもトラッキング作業以外の計測においても，レンジセンサのサイズにより適用分野が制限されている場合が多々あると予想される．今後は，極細レンジセンサの潜在的な応用分野をも明らかにしていくとともに，残っている技術的課題，主に受光系に起因する課題の解決を試みたい．

第 5 章 結言

本章では，知能ロボットに必要な技術的要素について考察するとともに，情報システムとしての知能ロボットの研究の方向性について述べ，本論文を結ぶ．

5.1 知能ロボットに必要な要素

本論文では，距離画像，もしくは距離データを用いたロボットの制御に用いる情報の取得方法について，具体的には，火星探査用 6 脚ロボットの足取りプランニング用地形地図作成方法，ならびに工業用ロボットによるシーリング工程の自動化のためのトラッキングビジョンシステムに関わる作業目標点検出方法，およびそれに最適なレンジセンサの構成方法について述べた．

1990 年から 1998 年にかけて研究を進めてきたことを本論文では述べた．したがって，すでにコンピュータの性能や通信速度などの面では技術的に隔世の感は否めない．しかしながら，本質的なアルゴリズムや構成法といった点では，現在も課題となるであろうことの解決策となっている．

緒論で述べたように，ロボットが人間の作業等を代替する場合に，自律的に行動するためには環境の 3 次元情報が必要である．もちろん，カメラにより撮影された画像，ないしは映像よりステレオビジョンなどを用いて，ロボットの作業対象，ないしは環境の 3 次元情報を得ることもできるが，精度，ないしは計算量などもあわせたコストの面で，距離情報を直接得るレンジファインダ等の活用のほうが有利である．特に工業用ロボットの知能化のためのロボットビジョンに関しては，特徴点検出や計測のためのアルゴリズムやレンジセンサ，さらにロボットの制御方法もあわせて，システムとしての最適性を追求するこ

とが成功の鍵であると言える。

システムとしての最適性とは，人間の頭脳に当たる計算能力，その結果を制御信号としてアクチュエータに伝送する通信能力だけでなく，外界だけでなく自分の状態も的確にとらえるセンシング能力，さらにはアクチュエータの運動能力，強度といったものを総合で考える必要がある。さらに言えば，外界（環境）の新たな状況に適応して所望の目的に向けて行動をおこなっていく能力，またアクチュエータの運動能力の限界を知り，それに合わせた制御を変革していく能力など，自律的に学習していくことができる必要がある。

5.2 情報システムとしての知能ロボット

知能ロボットをシステムとして考えた場合に，その活用シーンは大きく3つに分類できる。ひとつめは本論文の第3章，第4章で述べたような，人間が本来行うべき作業の効率化，省力化に向けた用途である。環境のセンシング機能を備えフィードバック制御などで動作する産業用ロボットは，この分類に属する。ルンバなどの掃除ロボットもこの分類に属する。主に人間が不得意とする単調で大きな変化のない，従って行動に関して大きな判断による変化を伴わない作業を代替するロボットで解決されるような用途であると言える。

ふたつめは本論文の第2章で述べた惑星探査のような，本来人間には過酷な作業，ないしは過酷な環境下での作業を代替する用途である。惑星探査以外にも，火事や雪崩などの環境下での災害救助や，原子炉内の探査・復旧などをおこなうもので，その作業は多く遠隔操作とロボットの自律性の協調によってなされる場合が多い。医療現場での微細なオペレーションのためのロボット（内視鏡手術も含め）はこの分類に含めてよいものと思われる。

最後の分類は，人間を情報提供などで支え，コミュニケーション

ョンや判断を促し、ときには癒すような「相棒」としての用途である。これは身体性を伴うインタラクティブな情報端末とみなすこともできる。神田ら[5-1]は人間型対話ロボット Robovie を小学校に二か月にわたり持ち込み、小学生とのコミュニケーション形成について調べ、一部ではあるが小学生が長期的に相互作用を続け、友好的な関係を形成したことを確認した。高齢者の介護シーンへの人間型や動物型ロボットの導入も進んできている。富士ソフトの提供する人間型ロボット PALRO[5-2]は高齢者施設におけるレクリエーションの進行役などを務めるが、それにより楽しく続けられることが介護予防に結びつくことが検証されている。このように人間とのかかわり、共生などについては、ATR 知能ロボティクス研究所を中心にさまざまなシーンで研究されている[5-3]が、ロボットを身体性をもつ情報端末として活用し、人間の生活を豊かにしていく視点は今後の大きな情報処理の方向性の一つであると言える。

さて経営というシーンではどうであろうか。経営におけるリーダーシップに大事なものとして、GE 元会長のジャック・ウェルチは 4E という考えを示した[5-4]。4E とは、Energy：自分自身がエネルギーにあふれている（仕事を成し遂げる情熱）、Energize：周囲を元気づける（人を刺激して行動させる）、Edge：鋭い判断をする力（競争心が強く、困難な決断を自己責任のもと、下すことができる）、Execute：実行力がある（結果に結びつける実現力）の頭文字を取ったものである。特に Edge は経営のリーダーシップに必要なものであり、経営における判断をおこなう場合、経営者は過酷な判断を下さねばならない場合が多い。その際に、リスクを生じうる状況等に関する情報の提供を適切におこなうとともに、判断をサポートし、ときには促す・励ます機能をもつロボットが存在すれば、まさに良い経営者の「相棒」となるであろう。ただし、最終的な判断は人間であり、それにより起こりうることに責任をとれる経営者がおこなわ

なければならぬことは言うまでもない。

5.3 今後の方向性

経営判断という場面で、経営者の「相棒」たる情報端末としての知能ロボットの可能性を述べたが、実はサイバー世界においてはビジネスインテリジェンス[5-5]という形で技術の研究開発が進んでいる。おそらく適切なコーパス（教師データ）を形成し、ディープラーニングを武器に多様なデータの中で学習していくことをおこなえば、人間の能力を超えるものになるかもしれない。ただし、知能として人間を超えるシンギュラリティ（技術的特異点）[5-6]という局面に到達するためには、戦略レベルの学習による獲得、その戦略もとの適度な意外性の発想の獲得、新しい状況に際しての過去の状況とのアナロジの適用、コンプライアンス・良心など善悪の認識などが必要な機能となるが、これらについては、その技術的実現性は現在のところ、見えていない。

センシングの観点では、知能ロボットの前にいる人の認識、さらには、その人の心理状態を画像から推測し、状態に応じて適切に対応する必要がある。昨今の画像処理による顔認識の精度は急速に上がっており、正面顔、かつ無表情であれば認識率は非常に高く実用の域に達している[5-7]。しかし表情がある場合の顔認識は、まだ改善の余地がある。ましてや、判断などを促す機能を持つ情報端末としての知能ロボットとして心理状態（感情）の観測は重要であるが、それは顔には表情として現れるため、顔認識機能の精度面への障害となる。なお、常に「相棒」として使用される知能ロボットは、認識すべき人の数は限定的であり、したがって、最初の話しかけのシーンなどで音声も援用して人の認識をおこなう方が合理的かもしれない。

知能面、センシング面それぞれにおける課題は上記のとおりであるが、物理的な身体性を持ち実世界で行動する知能ロボ

ットについては、どうであろうか。本論文で述べたように、実世界の環境やロボット自身の物理的な特性のモデル化を人手により地道におこない、知能ロボットというシステムを構築することは現状でも必要である。その環境やロボットの物理特性を自律的にモデル化し、特徴量を選択しながら学習により変わっていくことができることが、実世界で行動する知能ロボットの今後の進化には必要なことであろう。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，愛知工業大学情報科学部 末永康仁教授には，懇切丁寧なご指導，ご鞭撻を賜り，また本論文の審査委員も務めていただきました．ここに謹んで感謝の意を表します．また愛知工業大学情報科学部 水野忠則教授，森本正志教授には，多大なる有益なご指導，ご助言をいただきました．あわせて心より感謝申し上げます．

本研究は日本電信電話株式会社ヒューマンインタフェース研究所，およびカーネギーメロン大学計算機科学科においておこなわれたものであり，本機会を与えてくださった高野陸男博士（元 NTT ヒューマンインタフェース研究所長），酒井高志様（元 NTT ヒューマンインタフェース研究所知能ロボット研究部長），さらにはカーネギーメロン大学ロボット研究所 金出武雄先生に厚く御礼申し上げます．

また本研究を進めるにあたり，常日頃からご指導いただいた木暮賢司博士（元 NTT ヒューマンインタフェース研究所知能ロボット研究部長），金子博博士（元 NTT ヒューマンインタフェース研究所知能ロボット研究部グループリーダー，元東邦大学教授），立石和義博士（元 NTT ヒューマンインタフェース研究所知能ロボット研究部グループリーダー），日本大学工学部機械工学科 柿崎隆夫教授（元 NTT ヒューマンインタフェース研究所知能ロボット研究部グループリーダー），東京都市大学メディア情報学部 奥平雅士教授（元 NTT ヒューマンインタフェース研究所知能ロボット研究部グループリーダー），また Griffin Technologies Inc.社長 エリック クロトコフ博士（元カーネギーメロン大学 Senior Research Scientist）には心から感謝いたします．特に金子博博士には，フラクタル幾何という非線形モデルのアイデアを教授され，その深淵を垣間見させていただきました．

これまで本論文執筆に向けて，常日頃から研究遂行に関しましてご助言いただき，また時には励まし続けていただきました小高和己博士（元 NTT ヒューマンインタフェース研究所メディア応用システム研究部グループリーダー，元筑波大学教授），東京電機大学情報環境学部 武川直樹教授（元 NTT コミュニケーション科学基礎研究所グループリーダー）に感謝いたします。

最後に日ごろよりあらゆる面で支えてくれる父 秀男をはじめ，家族に深く感謝いたします。

参考文献

[2-1]J.Bares, M.Hebert, T.Kanade, E.Krotkov, T.Mitchell, R.Simmons, and W.Whittaker, “Ambler: An Autonomous Rover for Planetary Exploration”, IEEE Computer, vol.22, no.6, pp.18-26, 1989

[2-2]I.Kweon, R.Hoffman, and E.Krotkov, “Experimental Characterization of the Perceptron Laser Rangefinder”, Technical Report, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, CMU-RI-TR-91-1, 1991

[2-3]M.Hebert, T.Kanade, and I.Kweon, “3-D Vision Techniques for Autonomous Vehicles”, Technical Report, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, CMU-RI-TR-88-12, 1988

[2-4]B.マンデルブロ, “フラクタル幾何学 (広中平祐監訳)”, 日経サイエンス社, 1985

[2-5]A.Pentland, “Fractal-Based Description of Natural Scenes”, IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.PAMI-6, no.6, pp.661-674, 1984

[2-6]横矢直和, “フラクタルによる三次元複雑形状の解析とその応用”, 信学技報, PRU86-23, 1986

[2-7]K.Arakawa and E.Krotkov, “Estimating Fractal Dimension from Range Images of Natural Terrain”, Technical Report, School of Computer Science, Carnegie Mellon University,

CMU-CS-91-156, 1991

[2-8]Y.Kurozumi and W.Davis, "Polygonal Approximation by the Minimax Method", Computer Graphics and Image Processing, vol.19, pp.248-264, 1982

[2-9]H-O.パイトゲン, D.ザウペ編, "フラクタル・イメージ(山口昌哉監訳)", シュプリンガー・フェアラーク東京, 1990

[2-10]坂上勝彦, 横矢直和, "弛緩法と正則化", 情報処理, vol.30, no.9, pp.1047-1057, 1989

[2-11]D.Terzopoulos, "Multiresolution Computation of Visual-Surface Representations", Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1984

[2-12]R.Szeliski, "Bayesian Modeling of Uncertainty in Low-Level Vision", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1989

[2-13]S.Geman and D.Geman, "Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images", IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.PAMI-6, no.6, pp.721-741, 1984

[2-14]K.Arakawa and E.Krotkov, "Fractal Surface Reconstruction with Uncertainty Estimation: Modeling Natural Terrain", Technical Report, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, CMU-CS-92-194, 1992

[3-1]国清巧, 相澤憲輔, 菅野清, "車体位置ずれ検知装置付シ

ーリングロボットシステム” , ロボット, no.77, pp.86-95, 1990

[3-2]稲葉清右衛門, 鳥居信利, “ロボットによる車体シーリングシステムの開発” , 機械振興, vol.24, no.12, pp.67-70, 1991

[3-3]S.Sawano, J.Ikeda et al., “ A sealing robot system with visual seam tracking” , International Conference on Advanced Robotics, pp.351-358, 1983

[3-4]張曉林, 沢野進, 富川英亮, 藤堂勇雄, “シーリングロボットのためのニューラルネットワークを用いた継目位置検出法” , 日本機械学会論文集 (C編), vol.59, no.563, pp.225-231, 1993

[3-5]石黒一也, “視覚センサによるロボットシステム” , ロボット, no.49, pp.82-67, 1985

[3-6]A.Ishii, T.Kaneko, and A.Katayama, “ A Laser Vision Sensor for an Arc-welding Robot” , 3rd France-Japan Congress and 1st Europe-Asia Congress on Mechatronics, pp.166-169, 1996

[4-1]井口征士, 佐藤宏介, “三次元画像計測” , 昭晃社, 1990

[4-2]M.Kondo, S.Tachiki, M.Ishida, and K.Higuchi, “ Autonomic Measure System for Body Fit on the Automobile Assembly Line” , IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.538-543, 1995

- [4-3]石井明, 金子透, 片山淳, 望月研二, “アーク溶接ロボット用視覚センサ”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.1, pp.96-101, 1998
- [4-4]三ツ矢英司, “実世界と相互作用をもつコンピュータシステム開発のためのプラットフォーム”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.34-37, 1996
- [4-5]奥平雅士, “倣い作業ロボットのセンシング”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.6, pp.838-839, 1997
- [4-6]岡田尚, 岩城敏, 水川真, 松尾哲, 金山和則, 奥平雅士, “高精度バリ研削のためのバリ付近形状計測方式とその評価”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.6, pp.901-910, 1997
- [4-7] 荒川賢一, 柿崎隆夫, 大名新治, “トラッキングロボットによるシーリング作業のための作業目標点高速検出法”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.3, pp.376-383, 1998
- [4-8]T.Boult, “Information-Based Complexity in Non-Linear Equations and Computer Vision”, Ph.D thesis, Fepartment of Computer Science, Columbia University, 1986
- [5-1]神田崇行, 佐藤留美, 才脇直樹, 石黒浩, “対話型ロボットによる小学校での長期相互作用の試み”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, vol.7, no.1, pp.27-37, 2005
- [5-2]<http://palro.jp/>
- [5-3]http://www.irc.atr.jp/research_project-2/hrs2010/

[5-4]ジェフリー・A・クレイムズ（著），株式会社ジェネックスパートナーズ，沢崎冬日（訳），“ジャック・ウェルチ リーダーシップ4つの条件”，ダイヤモンド社，2005

[5-5]北岡元（著），“ビジネス・インテリジェンスー未来を予想するシナリオ分析の技法”，東洋経済新報社，2009

[5-6]Vernor Vinge, “The Coming Technological Singularity: How to Survive in the Post-Human Era” ,
<https://www-rohan.sdsu.edu/faculty/vinge/misc/singularity.html>, 1993

[5-7]<http://engineer.typemag.jp/article/nec-face>

研究業績

学術論文

荒川賢一， エリック・クロトコフ：“フラクタル幾何を適用した自然地形のモデリング”，信学論 D-II, Vol.J76-D-II, No.12, pp.2564-2577, 1993 年 12 月

Kenichi ARAKAWA and Eric KROTKOV: "Modeling of Natural Terrain Based on Fractal Geometry", Systems and Computers in Japan, Vol.25, No.11, pp.99-113, 1994 (論文 1.の英訳, 参考扱い)

Kenichi ARAKAWA and Eric KROTKOV: "Fractal Modeling of Natural Terrain: Analysis and Surface Reconstruction with Range Data", Graphical Models and Image Processing, Vol.58, No.5, pp.413-436, Sep.1996

荒川賢一， 柿崎隆夫， 大名新治：“トラッキングロボットによるシーリング作業のための作業目標点高速検出法”，日本ロボット学会誌, Vol.16, No.3, pp.376-383, 1998 年 4 月

Kenichi ARAKAWA, Takao KAKIZAKI and Shinji OMYO: "A Machine Vision Approach to Seam Sensing for High-Speed Robotic Sealing", IEICE Trans.Inf.&Syst., Vol.E83-D. No.7, pp.1353-1357, July 2000

荒川賢一， 吉田雅治：“狭あい部での断面計測のための極細レンジセンサ”，日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp.230-235, 2000 年 3 月

岡田至弘，荒川賢一，坂井利之：“個人の色感覚に適應する織物パターンの蓄積・対話検索システム”，信学論 D，Vol.J70-D，No.12，pp.2563-2574，1987年12月

遠藤公誉，田中弘一，荒川賢一，武川直樹：“予見制御による視覚軌道追従制御法”，日本ロボット学会誌，Vol.15，No.4，pp.565-572，1997年5月

Yoshimasa Yanagihara, Takao Kakizaki, Kenichi Arakawa, Yoshinori Isoda: "A multimodal teaching advisor for sensor-enhanced robotic system in manufacturing", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.14, No.5, pp.263-273, 1998

柿崎隆夫，柳原義正，荒川賢一，梅野光，望月研二，大名新治：“車体シーリングロボットのための高速倣い視覚センシングシステムの開発”，日本機械学会論文誌（C編），Vol.64，No.628，pp.207-214，1998年12月

柳原義正，柿崎隆夫，荒川賢一，磯田佳徳：“センサエンハンスロボットシステムにおけるマルチモーダル教示アドバイザーの提案（基本コンセプトとウェアラブルインタフェースの実現例）”，日本機械学会論文誌（C編），Vol.65，No.629，pp.138-145，1999年1月

磯田佳徳，荒川賢一，奥平雅士：“異種センサの統合による物体位置姿勢推定”，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.3，pp.374-380，2000年4月

阿久津隆史，荒川賢一，村瀬洋：“適應的画像選択による輪郭

からの物体形状計測”，信学論 D-II, Vol.J83-D-II, No.12, pp.2652-2662, 2000年12月

藤井憲作，島村潤，荒川賢一，有川知彦：“HCIのための赤外線カメラを用いた3次元追跡手法”，ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.5, No.2, pp.291-301, 2003年5月

藤井憲作，荒川賢一，有川知彦：“ひも状柔軟物体の三次元計測による入力インタフェース”，画像電子学会誌, Vol.32, No.4, pp.446-453, 2003年7月

藤井憲作，東正造，荒川賢一：“経路案内情報がナビゲーションに及ぼす影響”，信学論 A, Vol.J87-A, No.1, pp.40-49, 2004年1月

島村潤，藤井憲作，荒川賢一，有川知彦：“透視投影画像と平行投影画像を利用した3次元フロー推定”，信学論 D-II, Vol.J87-D-II, No.3, pp.860-871, 2004年3月

宮川勲，若林佳織，荒川賢一：“魚眼投影モデルに基づく画像系列からの平面運動と3次元形状の復元”，信学論 D-II, Vol.J87-D-II, No.5, pp.1120-1132, 2004年5月

Fujii Kensaku, Arakawa Kenichi: "Automatic Registration of Satellite Image to Map in Urban Area", Theory and applications of GIS, Vol.12, No.1, pp.15-22, July 2004

石川裕治，宮川勲，若林佳織，荒川賢一：“空撮映像の分割と統合による広域市街地空間モデルの自動構築”，情報処理学会論文誌, Vol.45, No.SIG13(CVIM10), pp.21-33, 2004年12月

宮川勲，石川裕治，若林佳織，荒川賢一：“車両運動投影モデルに基づく全方位画像系列からの市街地空間の3次元構造復元”，情報処理学会論文誌，Vol.45，No.SIG13(CVIM10)，pp.34-53，2004年12月

島村潤，荒川賢一：“プロジェクタを用いた動的実環境における観測位置依存映像提示”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.10，No.2，pp.145-154，2005年6月

石川裕治，若林佳織，有川知彦，荒川賢一：“エッジ点の段階的統合に基づくレーザレンジデータからの市街地モデル構築”，情報処理学会論文誌，Vol.46，No.1)，pp.2779-2794，2005年11月

Isao Miyagawa, Kenichi Arakawa: "Motion and Shape Recovery Based on Iterative Stabilization for Modest Deviation from Planar Surface", IEEE Trans.PAMI, Vol.28, No.7, pp.1176-1181, July 2006

安藤慎吾，草地良規，鈴木章，荒川賢一：“サポートベクトル回帰を用いた三次元物体の姿勢推定法”，信学論 D，Vol.J89-D，No.8，pp.1840-1847，2006年8月

島村潤，荒川賢一，新井啓之，安野貴之：“プロジェクタ・カメラシステムにおける射影変換行列と直線パターン検出に基づく複数平面の検出”，映像情報メディア学会誌，Vol.61，No.1，pp.76-84，2007年1月

草地良規，鈴木章，伊藤直己，荒川賢一，安野貴之：“景観画

像中の文字候補群による画像インデクシング及び検索技術”,
信学論 D, Vol.J90-D, No.9, pp.2562-2572, 2007年9月

Kyoko Sudo, Tatsuya Osawa, Kaoru Wakabayashi, Hideki Koike,
Kenichi Arakawa: "Estimating Anomaly of the Video Sequences
for Surveillance Using 1-Class SVM", IEICE Trans. Inf. & Syst.,
Vol. E91-D, No. 7, July 2008

安藤慎吾, 草地良規, 鈴木章, 荒川賢一, 安野貴之: "回帰手
法を用いた文字変形の推定・補正機能の導入による景観中文字
認識の高精度化", 画像電子学会誌, Vol. 38, No. 1, pp. 2-8, 2009
年1月

国際会議

Kenichi Arakawa, and Hiroshi Kaneko: "Object Recognition
Based on Hypothesis Generation and Verification
Strategy", Proc. of the 5th International Conference on Image
Analysis and Processing, pp. 389-393, September 1989

Kenichi Arakawa, and Eric Kritkov: "Fractal Surface
Reconstruction for Modeling Natural Terrain", Proc. of 1993
IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and
Pattern Recognition, pp. 314-319, June 1993

Kenichi Arakawa, and Eric Krotkov: "Estimating Fractal
Dimension of Natural Terrain from Irregularly Spaced Data",
Proc. of the 1993 IEE/RSJ International Conference on
Intelligent Robots and Systems, pp. 1364-1370, July 1993

Kenichi Arakawa, Takao Kakizaki, and Shinji Omyo:” A Method of Robust Seam Feature Detection from Profiles for Robotic Sealing” , Proc. of IAPR Workshop on Machine Vision Applications (IAPR MVA ' 98), pp.81-84、November 1998

研究会・シンポジウム

荒川賢一，岡田至弘，坂井利之:” 織物パターン蓄積・検索システムにおける領域属性記述法” ，電子通信学会技術報告，PRL85-89, pp.25-31, 1986年3月

荒川賢一，岡田至弘，坂井利之:” 織物パターン蓄積・検索システムにおける色名による検索” ，電子通信学会技術報告，PRL85-90, pp.33-40, 1986年3月

荒川賢一，尺長健，金子博:” 仮説検証モジュールの階層的構成によるシーン理解” ，情報処理学会研究報告，コンピュータビジョン研究会，Vol.56, No.3, pp.1-8, 1988年9月

荒川賢一，吉田雅治:” 狭あい部での計測を目指した極細レンジセンサ” ，第4回画像センシングシンポジウム講演論文集，pp.11-14, 1998年6月

荒川賢一，望月研二，片山淳，柿崎隆夫，大名新治:” シーリングロボットシステムのための作業目標点検出法” ，画像の認識・理解シンポジウム(MIRU' 98), Vol.II, pp.345-351, 1998年7月

全国大会

荒川賢一，岡田至弘，坂井利之：“濃淡画像を利用したカラー文書画像処理”，情報処理学会第30回（昭和60年前期）全国大会予稿集，pp.1287-1288，1985年3月

荒川賢一，尺長健，金子博：“仮説検証モジュールを用いたシーン理解に関する一考察”，電子情報通信学会全国大会(1989年)予稿集，Vol.7，pp.345-346，1989年3月

荒川賢一，望月研二，柿崎隆夫，大名新治：“シーリングロボット視覚センシングシステムにおけるシム特徴点検出法”，日本ロボット学会学術講演会予稿集，Vol.15，pp.263-264，1997年9月

荒川賢一，吉田雅治：“狭あい部トラッキング作業のための極細レンジファインダ”，日本ロボット学会学術講演会予稿集，Vol.15，pp.135-136，1997年9月

解説記事・その他

荒川賢一，池内克史：“知能ロボットの3次元視覚”，日本ロボット学会誌，Vol.9，No.1，pp.92-99，1991年2月

荒川賢一：“フラクタルで絵を描く・絵を見る”，電子情報通信学会誌，Vol.80，No.11，pp.1162-1166，1997年11月

著書、翻訳等

ロボットビジョンー機械は世界をどう視るか(原著書:Berthold Klaus Paul Horn: Robot Vision) , 共訳 (1 8 章翻訳) , 朝倉書店, 1993 年 2 月

カオス応用戦略, 共著(編者・合原一幸 徳永隆治, 5 章執筆), オーム社, 1993 年 10 月

複雑系の理論と応用, 共著(編者・中嶋正之, 2 章執筆), オーム社, 1998 年 11 月

表彰

第 20 回電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞, 2005 年 3 月