

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	主曲率ベクトルによるレンジデータの曲面表現とその位置姿勢推定への応用
Title(English)	
著者(和文)	吉見隆
Author(English)	Takashi Yoshimi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第8546号, 授与年月日:2011年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:佐藤 誠
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第8546号, Conferred date:2011/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

主曲率ベクトルによる
レンジデータの曲面表現と
その位置姿勢推定への応用

東京工業大学総合理工学研究科物理情報システム専攻

09D53509

吉見 隆

目次

あらまし	4
第1章 序論	5
1.1 本研究の背景および位置づけ	5
1.2 本論文の構成	8
第2章 レンジデータの取得	11
2.1 はじめに	11
2.2 複数光源によるレンジファインダシステム	13
2.2.1 はじめに	13
2.2.2 光学系	16
2.2.3 前処理回路	18
2.2.3.1 処理の概要	18
2.2.3.2 回路構成の工夫	20
2.2.3.3 リアルタイムソート回路	22
2.2.4 符号化格子法に関する考察	23
2.2.5 システムの動作とパフォーマンス	25
2.2.5.1 システムの並列動作	25
2.2.5.2 キャリブレーションとその結果	27
2.2.6 精度についての考察	28
2.2.7 おわりに	29
2.3 ステレオビジョンとヒューマノイドロボットの姿勢センサを用いた 地形計測	30
2.3.1 はじめに	30
2.3.2 HRP-2の機構	31
2.3.3 視覚システム	32

2.3.4	変換行列	33
2.3.5	実験	35
2.3.6	おわりに	38
2.4	三眼ステレオを用いたつやのある物体の計測	38
2.4.1	はじめに	38
2.4.2	光沢のある物体計測時の問題	39
2.4.3	提案手法	40
2.4.4	実験	41
2.4.5	応用	42
2.4.6	おわりに	44
2.5	まとめ	45
第 3 章	3次元曲面における主曲率ベクトル	46
3.1	はじめに	46
3.2	主曲率ベクトルの計算アルゴリズム	46
3.2.1	主曲率ベクトル	46
3.2.2	ISL 法	47
3.2.3	鞍型曲面のための拡張	49
3.3	実験	51
3.4	考察	52
3.5	まとめ	53
第 4 章	主曲率ベクトルを利用したレンジデータの曲面表現	56
4.1	はじめに	56
4.2	主曲率ベクトルによる主曲率および曲面の型の計算	56
4.3	多値境界線画像	58
4.4	マージ処理過程	59
4.5	セグメンテーション実験	60
4.6	曲率線ネットの形成	62
4.6.1	曲率線ネットのデータ構造	62
4.6.2	ネットの 1 次近似	64
4.6.3	リラクゼーション	66

4.7	曲率線ネット構築実験	67
4.8	考察	69
4.9	まとめ	71
第 5 章	主曲率ベクトル分布による管状曲面の位置姿勢推定	73
5.1	はじめに	73
5.2	中心軸平面と主曲率ベクトルの基本理論	74
5.2.1	主曲率フレームの不定性	74
5.2.2	管状曲面の主曲率分布	74
5.2.3	エルボーにおける主曲率ベクトル	76
5.3	位置姿勢推定アルゴリズム	78
5.3.1	主曲率ベクトルの計算	79
5.3.2	W 軸の推定	79
5.3.3	U 軸と V 軸の推定	80
5.3.4	姿勢の曖昧性の判定	81
5.3.5	平行移動ベクトルの推定	83
5.4	位置姿勢推定実験	83
5.4.1	実験 1 : 安定姿勢における単体位置姿勢推定	85
5.4.1.1	倒れ状態位置姿勢推定結果	85
5.4.1.2	立ち状態位置姿勢推定結果	86
5.4.1.3	W 軸推定精度評価	86
5.4.1.4	UV 平面内回転角精度評価	88
5.4.2	実験 2 : 一般姿勢における単体位置姿勢推定	91
5.4.3	実験 3 : 山積みエルボーの位置姿勢推定	94
5.5	まとめ	95
第 6 章	結論	98
	謝辞	101
	参考文献	102
	研究論文リスト	109

あらまし

三次元シーンを計測し、環境に存在する物体の形状や位置姿勢を理解する技術は、自律的なロボットのためのセンサ技術として非常に重要である。多くの場合、環境を計測したデータはレンジデータという三次元点群の形で取得されるが、それは精密で高精度であるほどサイズが大きく、扱いが困難であった。個々の点には三次元情報はあるが、その座標値は視点（観測系）に依存している。視点に依存しない情報を用いた構造化を行うことでレンジデータの利用効率は飛躍的に高まることが期待できる。

多面体であればエッジの情報を抽出することが可能だが、曲面においては十分に機能しない。これは、多角形においては各面の輪郭線が規定されれば面内の点には内挿可能だが曲面ではそれができないことと、曲面のみで構成されている面の場合にどんなに複雑な形状でもエッジが存在しない場合があるためである。

主曲率ベクトルは視点に依存しない曲面上の特徴量として古くから知られているが、実データに対しては計算が困難であった。これは従来の微分や二次曲面あてはめを使ったアルゴリズムがノイズに対して脆弱であったためであった。

本研究では、まず、レンジデータを取得する際に速度・視野・反射特性に対するロバスト性を向上させる計測手法について述べる。次に、主曲率ベクトルをロバストに計算するアルゴリズムを提案し、その検証を行う。さらに、提案手法の有用性を示すために、その応用として主曲率ベクトル・主曲率・曲率線を利用した曲面の構造化と、主曲率ベクトル分布を用いた管状物体の位置姿勢推定の検証を行った。

第1章 序論

1.1 本研究の背景および位置づけ

社会のさまざまな領域において、自動化あるいは半自動化された機械のために環境や対象物体に関する情報を取得する技術が必要とされている。取得する情報が広域であるような場合、使われるセンサは産業用ロボットのマニピュレーションのための視覚センサに代表されるように画像を利用した視覚センサであることが多い。これは人間においても行動のための多くの情報が視覚に依存していることから驚くにあたらない。光を使ったセンシングは、指向性・即時性・高速性・到達性などの点で他のメディア（超音波や機械式触針）より多くの場合にまさっている。上記のマニピュレーション用の視覚以外にもさまざまな局面においてコンピュータビジョンは利用されている。例えば、画像による検査装置、監視システム、移動用ロボットのための障害物検知、ITS、個人認証システムなどがある。

これらの多くの技術では二次元の画像を用いているが、三次元の環境マップや三次元物体の位置姿勢推定が必要な場合、それでは不十分な場合も多い。そのような場合には、三次元のデータ取得および解析技術が必要になる。

ステレオ画像のエッジ画像を作成し、その対応点の三次元復元を行うセグメントベーストステレオ法 [1, 2, 3] においてはワイアフレーム状の計測結果が得られるが、それ以外の多くのセンサにおいてはレンジデータあるいは距離画像と呼ばれる三次元座標値をもった点群が得られる¹。こういったセンサには、レーザレンジファインダ [4, 5, 6, 7, 8, 9]，空間コード化法 [10, 11]，位相シフト法 [12]，ステレオ相関法 [2, 13, 3, 14]，TOF(Time-of-Flight) 法 [15, 16, 17, 18, 19] などがある。これらの計測法には、速度、精度、解像度、ロバストネス、機器の簡便さなどの点で一長一短ある。

レンジデータは稠密な計測点の集まりであり、物体の形状を精密に表示するこ

¹最近になってポイントクラウドという呼び名も増えた

とができる。STLのような簡単なデータ構造を持てば隠面消去も可能である。しかし、データ点の三次元座標値しかもたないので、形状に関する情報は乏しい。たとえば対象物体の位置姿勢推定を行おうとする場合、データベースにある対象物体の形状と計測されたデータを照合する必要があるが、三次元座標のみのデータでは大変に困難である。

また、レンジデータの稠密であるという利点は同時にデータのサイズが大きくなるという欠点となり、データの取扱いが困難な原因になる。

したがって、レンジデータをさまざまな応用に利用可能にするためには、コンパクトで形状・位置・姿勢を反映した曲面表現が必要となる。さらに、こういった曲面表現においては、同時に視点に対して依存性がないことが重要である。さもないと、三次元情報を利用する際にいちいち計測時の物体の姿勢などを考慮しなければならなくなる。また、レンジデータの計測時において自分自身や他の物体による遮蔽が予想されるため、局所的な部分データから計算可能であることも重要である。

こういった曲面表現は、CAD や VR/AR などのように表示用にレンジデータを用いる場合には特に必要ない。こういった表現が必要になるのは、ナビゲーションのための障害物検知やマニピュレーションのための物体の位置姿勢に関する情報などのように、自律あるいは半自律のロボットシステムにおいて三次元点データ以上の大局的な情報が必要になる場合である。

多面体やパラメトリックに表現された面に対する多くの研究がなされてきた [20, 21, 22]。こういった研究は、本質的にレンジデータから既知の関数のパラメータを推定する問題であった。しかしながら、現実世界の多くの物体は自由曲面によって構成されており、こういったアプローチでは表現が困難である。

曲面全体を一つのパラメトリックな表現で表そうとする試みもある。表現方法として提案されている方法には、超 2 次関数 [21, 23, 24] やメタボール [25, 26] などがある。しかしながら、これらの方法では表現できる形状が限られたり、データから記述を作成するために大変な計算が必要であったり、データ点と曲面の距離が明示的に得られないなどの点で問題を抱えている。

他の多くの研究では、曲面をパッチに部分曲面に分解して表現している。B-スプライン関数 [27, 28] やブレンディング関数 [28, 29]、NURBS 関数などが分解された部分曲面をスムーズに連結する関数として用いられる。この際、曲面全体の

表現を視点非依存性にするために、曲面の分解方法もまた視点に依存しないものである必要がある。

主曲率ベクトルは上記の視点への非依存性や局所性を満たす幾何学的特徴量として知られている [30]。そのため、主曲率ベクトルを計算する手法は多く提案されているが [31]、この特徴量は同時に既存の計算方法においてはノイズに対して脆弱であることが知られているため [32]、実在する物体から計測によって得られたレンジデータに対しては妥当な結果を得ることが難しかった。したがって、曲率を用いてレンジデータのセグメンテーションを行っている研究 [28, 33, 34, 35, 36] では通常あらかじめスムージングを行ったデータに対して計算が行われてきた。

本研究では、以上の背景をもとに、従来は計算が困難であったノイズを含むレンジデータから主曲率ベクトルを計算するロバストなアルゴリズムを提案する。

それに先立ち、筆者が開発してきたさまざまなレンジデータの計測システムを紹介する。これらはレンジデータ計測システムの速度・視野・鏡面反射に対するロバストネスの向上を目指したものである。

その後、提案した手法で計算された主曲率ベクトルをベースとした視点に依存しない曲面の分割表現について述べる。ロバストに計算された主曲率ベクトルを用いて安定して計算可能となる主曲率および主曲率の符号から導かれる曲面の型の連続性をもとに曲面のセグメンテーションを行う。さらに、分割された曲面をさらに構造化するための曲率線によるネットの構築方法についても提案し、実際のレンジデータにおいて提案手法を検証する。

また、もう一つの実証として、主曲率ベクトルの分布を利用した曲面物体の位置姿勢推定方法を提案する。物体の位置姿勢推定は特にロボットがマニピュレーション作業を行う際に重要となる技術である。

位置姿勢推定の手法は、対象物のもつ特徴のカテゴリによってさまざまな異なる方法がとられる。多面体などの物体の位置姿勢推定においては、輝度画像におけるエッジを強い特徴とすることができる [37, 38]。曲面で構成された対象物に対して輪郭線を用いる方法は一般には多面体より困難である。Kotake らは、曲面を含む物体の輪郭線に対して直線近似したアパーチャモデルを適用して位置姿勢推定を行った [39]。他のアプローチではレンジデータを対象とした手法があり、Maruyama らは、回転体に限定した曲面の位置姿勢推定を行った [40]。

これらの不変特徴量を使う研究の多くは、局所的なプロファイルを照合するこ

とにより位置姿勢推定を行うが、曲面全体にローカルな特徴が乏しい曲面に対しては適用が難しい。これは遮蔽輪郭線を用いる方法であっても同様である。

物体全体の微分特徴の分布から姿勢を推定する手法は、池内らによって提案された [41]。この際に使われた微分特徴は法線ベクトルの分布であった。

本研究では、以上の方法では位置姿勢推定が困難な工業製品に多くある管状曲面を対象にした位置姿勢推定方法の提案を行う。この対象物は遮蔽輪郭の形状が姿勢のわずかな変化によって大きく変動し、輪郭線を用いたステレオ対応は困難である。また、局所的な特徴にも乏しく、点単位での対応付けによる従来法においても適用が難しい。

管状曲面をもつ配管群に対する研究には、喜多 [42] らによって提案された輪郭線を使った位置姿勢推定（この場合には自己位置推定）があるが、このときには個々の管状曲面は単純であるが複数の曲面が構造を持っていた。

本研究で提案する手法は、レンジデータから計算した主曲率ベクトルの分布を用いる方法である。レンジデータとして用いるデータの取得方法には特に制限はない。池内らの手法に似ているが、大きく異なるのは平面上に中心軸がある管状曲面の主曲率ベクトルが同一の平面上に存在することを利用した点である。まず対象曲面の中心軸平面の法線ベクトルを推定することで、位置姿勢の自由度 6 個のうち 2 個を固定し、残りの平面内の姿勢の自由度 (1) と平行移動ベクトルの自由度 (3) を推定する。90 度に屈曲する円筒（エルボー）はこういった曲面の特殊例であり、本稿で検証するアルゴリズムはエルボーに特化したものとなっている。しかし、同様の中心軸平面を持つ管状曲面に応用が可能である。

なお、提案手法は ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム [43, 44] のための初期位置姿勢を与えることを目標にしている。

本研究のように主曲率ベクトルを位置姿勢推定に利用した研究は多くなく、田中らの顔認識の研究 [45] があるが、田中らは顔という均質でない複雑な曲面を対象としていた。

1.2 本論文の構成

第 2 章で「レンジデータの取得」では、過去に筆者がおこなってきたレンジデータ計測システムの開発に関する研究成果を紹介する。まず複数光源を用いたレー

ザレンジファインダについて述べる．複数のレーザ像の同定をレーザを符号化して投影し撮影画像をデジタル回路で処理して復号化することで高速に計測を行う．次に，移動ロボットが必要とする視野の広いレンジデータの計測を行うため，複数の視点でステレオ相関法によって計測したレンジデータを重ね合わせるシステムについて述べる．最後に，ステレオ相関法において計測の障害となる鏡面反射による高輝度部分を低減するために三眼ステレオカメラを用いる手法について述べる．

第3章「3次元曲面の主曲率ベクトル」では，最初に，二本の主曲率ベクトルと法線ベクトルがなす直交フレームが曲面上の各点の姿勢を特定でき，この視点に依存しない属性が対象物体の3次元空間内の回転や平行移動に影響されない曲面の形状表現にとって貴重な特性であることを示す．次に，物体形状の实在の物体の曲面のレンジデータにおいてロバストに計算が可能となる ISL 法を提案する．この方法は，レンジデータ上の各点に対して法線同士の角度が一定以内の領域を抽出し，その外周点の主軸を主曲率ベクトルとするものである．その後，提案手法を従来法の二次曲面あてはめ法と比較したシミュレーション実験を行って評価を行う．その結果，ランダムなノイズを与えた楕円体のデータに対して従来法ではわずかなノイズが乗っても結果が大きく狂うが，提案手法では安定した結果を出すことを示す．この実験結果をもとに，提案手法を用いれば実データに対して信頼性のある主曲率ベクトルを計算可能であると結論づける．

第4章「主曲率ベクトルを利用したレンジデータの曲面表現」では，主曲率ベクトルを利用して視点に依存しない曲面の分割方法について述べる．第一の段階では曲面上の主曲率ベクトル，曲面の型の不連続性を用いて曲面を分割する．この処理は主曲率ベクトルのロバスト性に大きく依存しているため，第2章で提案した ISL 法による主曲率ベクトルの安定性が不可欠である．曲面の分割は複数の属性の不連続性によって成されるため，微小領域のマージには隣接する領域との境界線の信頼性判定を行うことで，より信頼性の高い境界を残してマージする．第二の段階では，分離した領域をさらに細かい領域に分割するために曲率線を用いた格子によるネットを構成する．曲率線は主曲率ベクトルを接線とする曲線であるので，視点非依存性があり，曲率最大方向と最小方向の主曲率ベクトルが直交することから，交点が直角になる四辺形のネットで曲面を分割できる．このネットを構成するためのノード構造体および構築アルゴリズムを示す．構築アルゴリ

ズムにおいては初期ネット最初のノードから隣接するノードを展開する初期ネット構築を行った後、リラクゼーションによりノード位置を微調整することでノード間のリンクが主曲率ベクトルに近くなるように移動する．実際に計測されたレンジデータに対してこの二つのアルゴリズムによる処理を行い、視点に依存しない曲面の分割ができることを示す．

第5章「主曲率ベクトル分布による管状曲面の位置姿勢推定」では、管状曲面における主曲率ベクトルの分布の特性を利用し、位置姿勢推定を行う手法を提案する．中心軸が平面上にある管状曲面においては、最大曲率方向の主曲率ベクトル分布が中心軸の存在する平面上にあることを利用し、未知の位置姿勢にある管状物体のレンジデータから主曲率ベクトル分布を取り出し、中心軸平面の法線方向を推定する．その後、中心軸平面内の回転角を、平面内の主曲率ベクトル分布から推定する．この時点で姿勢がすべて推定できたので、管状曲面の位置を推定することは容易になる．この章では管状曲面の一つである配管エルボーを対象に具体的な位置姿勢推定アルゴリズムを提案し、それを実験によって確認する．第2章において提案された手法による主曲率ベクトル計算のアルゴリズムが用いられており、凹凸がある鋳物のエルボーの実データに対してロバストな結果が得られている．

第6章「結論」では、各章における議論をまとめ、今後の研究の方向性について述べる．

第2章 レンジデータの取得

2.1 はじめに

対象物体のレンジデータを計測する方法にはいくつかの手法が存在する．大きく分けて，三角測量の原理で幾何学的に距離を計測する方法とそれ以外の方法が存在する．前者はさらに光などを対象物に投影する能動的な手法と投影を行わない受動的な方法に分けられる．

能動的な三角測量法も投影する光のパターンによってさまざまな方法がある [5, 10, 6]．

多く用いられているのは線状光（スリット光¹）を投影してカメラで観測する方法であり，光切断法とも呼ばれる [4, 5, 6, 7, 8, 9]．市販されているレーザーレンジファインダの多くがこの方式である．一回の撮影では線状光を照射された部分のみが計測可能であるため，二次元的なひろがりのある物体表面の形状の計測を行う場合には，光源あるいは対象物を回転したり平行移動することにより線状光の向きと交差する方向にスキャンを行い，表面全体の点群を得る必要がある．従って，計測には時間がかかるという欠点があるが，高輝度な線を抽出するための画像処理は簡単で確実性が高いため，信頼できる精度の高いレンジデータを得ることができる．

また，空間コード化法 [10, 11] では，ストライプ状の光を数パターン投影し，空間内に放射状の符号化をすることで複数の撮影された画像から距離を計算する．

これ以外にも，二次元的なパターンを投影する方法もある．この場合には撮影した画像中から投影する光のパターンと対象物表面の輝度パターンを照合するための画像処理技術が必要になる．二次元線状光のようなスキャンが不要になるために高速な撮影が可能であり，動く対象も計測可能である．ただし，画像処理の過程で投影するパターンと画像との対応問題を解かなければならない [46]．

¹半導体レーザーが一般化する以前は，高輝度の光源の前方にスリットのある遮蔽板をおいて線状光を投影していたことによる．

能動的に光を照射する方法は環境光に影響を受ける。工場や実験室などの閉鎖された環境であれば照射する光を完全に制御することは可能だが、屋外に代表される遮光できない環境では制御されない環境光による影響を無視できない。特に日光は高い照度を持つために天候の変化や正反射光によるハイライトは大きな問題になる。また、反射率が極端に低い色（黒）においては観測される反射光が弱くなるために誤差が発生する。

三角測量の原理に基づく受動的な計測方法は、複数のカメラの画像を用いて三次元復元を行うステレオビジョンである。レンジデータを得るためには画像中の各点に対する対応を密にとる必要があるため、セグメントベースのステレオ法ではなくステレオ相関法 [2, 13, 3, 14] を用いることになる。すなわち、基準カメラ画像内の小近傍領域に対して輝度パターンが最も類似した参照カメラ画像内の対応点を探索する方法である。この方法における撮影時間は短く、動画像を対象にすることもできる。

しかし、誤対応が少ない正確な計測結果を出すプログラムは複雑なものとなり、画像処理に時間がかかる。例えば輝度パターンのウィンドウ内にテクスチャの強弱があるとテクスチャの強い部分に対応してしまいやすい。このため、距離に段差があるような部分で誤対応によるはみ出しが起きる。また、テクスチャの強弱がなくてもオクルージョンによって対応点が遮蔽されてしまえば誤対応の原因になる。

この手法においては、能動的な三角測量の場合にある強い外光の影響はないため、屋外などの環境における計測に適しているが、逆に光量が不足していると精度が出ない。また、鏡面反射があると同一点が複数のカメラで同じ輝度で撮影されるという前提が崩れるために誤差が生じる。

以上の三角測量に基づく計測方法においては、対象点までの距離が大きいとき奥行き方向の精度が極端に落ちるという性質がある。これは、二つの観測点から対象点を見込む直線が並行に近くなるためである。これを防ぐためには観測点間の距離を大きくする以外にないが、そのような光学的な配置をすると、観測装置が大きくなるとともに装置の剛性を保証することが難しくなる。また、二つの観測点が離れていると遮蔽によって二つの観測点から同時に観測できない領域が増加する。

三角測量によらない方法には、TOF 法を用いるものがある [15, 16, 17, 18, 19].

この方法は、照射した光の物体表面までの到達時間を計測することで距離を変換する方法である。計測時間は短く、三角測量において発生する遠距離における精度の低下は発生しないが、特殊な計測器が必要となり、最新のもの [19] でも画像の解像度は低い。

本章ではいままでに筆者が行ってきたレンジデータ計測に関する研究をまとめて紹介する。

まず 2.2 では、複数のレーザー線状光を用いた高速高精度のレンジファインダの開発について述べる。上で述べたように、通常のレーザレンジファインダにおいては一本の線状光を投影するため計測時間が長くなるが、複数投影することにより高速化をはかる。単に投影系に複数の光源を用いるだけでなく、画像中に現れる複数のレーザー光像を特定しなければならない。この処理を前処理回路によって行い、前処理回路と PC においてフレーム単位でパイプライン処理を行うことで遅延なく実現している。

2.3 においては、ヒューマノイドロボットに搭載されたステレオカメラを用いてステレオ相関法によって計測された複数の視点のレンジデータをヒューマノイドロボットの関節情報を用いて統合する研究について述べる。ナビゲーションのためのレンジデータはマニピュレーションとは異なり広範囲のデータが必要である。単に広角のレンズを用いて撮影すると、画素あたりの立体角が大きくなり、計測精度が低下するが、それを回避するために複数のレンジデータを重ね合わせることで詳細かつ広範囲な地形マップを作成する。

2.4 においては、光沢のある対象物の三次元計測を行う手法を紹介する。この手法においては、三台のカメラを用いて三対のステレオ相関法処理をおこない、その結果を統合する。その際、ノイズの原因となるハイライトを除去するためにレンジデータの各点がもっている輝度情報を利用してハイライトが存在しない点から復元した三次元点を選択して統合することで、ノイズの少ない結果を得ている。

2.2 複数光源によるレンジファインダシステム

2.2.1 はじめに

筆者の所属している研究グループでは、以前より線状光を投影するレンジファインダの研究を行ってきた [4]。この種の手法は計測点を高密度にしやすい反面、

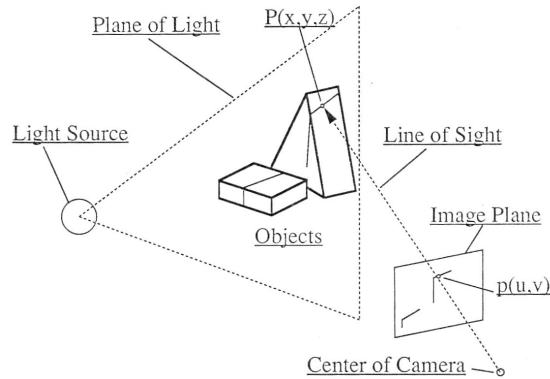


図 2.1: 線状光投影法

計測の基礎となるデータ入力に時間がかかる点、および参照光を投影するための特別なハードウェアが必要となる点に問題があるが、本節で紹介するシステムではデータ入力密度を重視し、従来の欠点を克服するアプローチをとることとした。

通常のテレビカメラを撮像機器として使用した光投影法の場合、一フレームの画像から入力される測定点は固有時間 ($1/30[\text{sec}]$) 内に参照光によって照射される対象物体の一部分である。従って、一フレームあたりに照射される部分の対象物体全体に対する割合が大きくなるに伴い、一フレーム時間内に観測できる測定点の数が増え、測定全体に必要なフレーム数が減り、結果的に測定時間を短縮できる。すなわち、点状光を照射した場合よりも線状光を照射した場合、さらに線状光を複数にして照射した方が測定時間が短くなる。しかし、その一方、画像中に現れる輝点を照射している参照光の投影方向を同定することが難しくなり、そのために特別な工夫が必要となる。この制約を特別なカメラを用いることで克服し、高速に三次元情報を入力する装置も発表されている [6] が、精密で複雑な電子回路の技術が要求されるため、高密度のデータ入力は容易でないと考えられる。

本システムでは図 2.1 に示す線状光投影法を基本原理にしている。線状光平面によって照射された点 $P(x, y, z)$ がカメラ画像面上で観測された時、その点の三次元座標は、その点が画像面上に現れる画素 $p(u, v)$ とカメラのレンズ中心を結ぶ直線及び線状光平面との交点として計算により求められる。

同時に投影する線状光が一本だけならば線状光平面の方程式は既知であるが、高密度の測定を行なう際には線状光の走査回数が多くなり、測定時間が長くなってしまいうという問題がある。この問題を解決するためには、同時に複数本の線状光を投影すればよいが、その際に画像面上に複数の線状光による輝点が生じてしま

う．それぞれの輝点で光源が特定できなければ三次元情報は得られないので，ひとつの投影位置において複数の投影パターンによる画像を入力し，同一画素に対して輝点が生じるパターンの番号の組合せから線状光を同定するなどの方法がとられる．この方法は符号化格子法と呼ばれ，バイナリコードで符号化すると最も測定時間が短縮でき， $2^M - 1$ 本の線状光に対して $M/(2^M - 1)$ 倍にできる [47]．

また，測定的高速化を図るときに重要な点にデータの圧縮の問題がある．観測される画像信号は冗長でありデータ量が大きいので，これを全て保存して処理を行なうことはデータ転送の面でも記憶容量の面でも望ましくない．三次元座標を計算するのに必要な情報は画像面中に現れる輝点の二次元座標であるので，これをビデオレートで高速に検出する前処理回路があることが望ましい．

本節では，複数の線状光を対象物体に投影し，高速高精度に物体表面の点の三次元座標を入力するシステムについて述べる．図 2.2 にこのシステムの構成図を示す．このシステムは複数の半導体レーザを光源として持つ線状光投影光学系，入力画像をビデオレートで処理する前処理回路，ハードウェアの実時間制御と符号化格子の復号を行なうパーソナルコンピュータ及び三次元座標の演算を高速に処理して表示するワークステーションから構成されている．

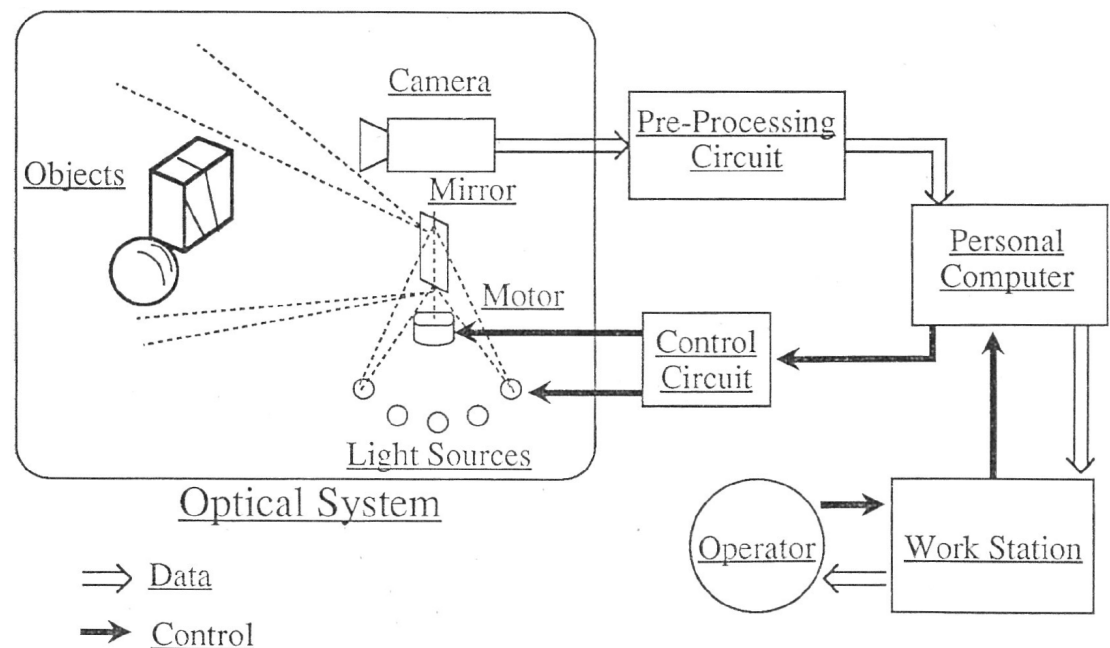


図 2.2: システム構成図

2.2.2 で複数線状光を物体に投影する光学系，2.2.3 で画像を実時間処理する前

処理回路, 2.2.4 で符号化格子法に関する考察, 2.2.5 でシステムの動作とパフォーマンスについて, 2.2.6 で精度についての考察を述べる.

2.2.2 光学系

光学系は線状光を投影する光源と投影された線状光を水平面内に走査する回転鏡から構成される. 図 2.3 にその配置を示す. 光源は 15 個あり, 各々の光源は走査面に垂直の方向に広がるレーザビームを出射する. 光源は回転鏡の軸を中心とする半径 20[cm] の円周上に等間隔に並んでいる. 光源から出射する光は回転軸を含む平面に近似でき, 隣合う平面同士のなす角度は $3.21[\text{deg.}]$ である.

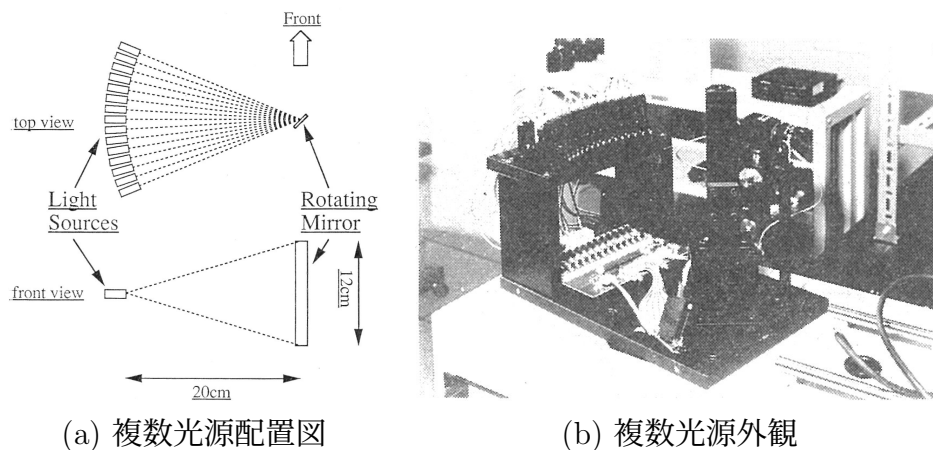


図 2.3: 複数線状光光源

光源部分の拡大図を図 2.4 に示す. 光源は半導体レーザとシリンドリカルレンズによって構成される. 半導体レーザは波長 $780[\text{nm}]$, 出力 $5[\text{mW}]$ のものを使用している. また, シリンドリカルレンズの焦点距離は $6[\text{mm}]$ である. 半導体レーザ単体から出射される光は出射端で長軸方向に $33[\text{deg.}]$, 短軸方向に $11[\text{deg.}]$ の長円形の広がりを持っている. 出射光の長軸方向を回転鏡の回転軸と平行にし, 短軸方向の広がりのみをシリンドリカルレンズによって収束させることで光線を平面状に整形する. このとき, レーザビームの近似式 [48] を用いて, 光源からの距離が $1[\text{m}]$ から $2[\text{m}]$ の範囲でビームの幅の最大値が最も小さくなるように設計している.

全ての光源が回転鏡の回転軸の方向を向いているため, 回転鏡の幅が狭くても構わない. しかし, 回転中心から光源までの距離の間に軸方向にビームが広がる

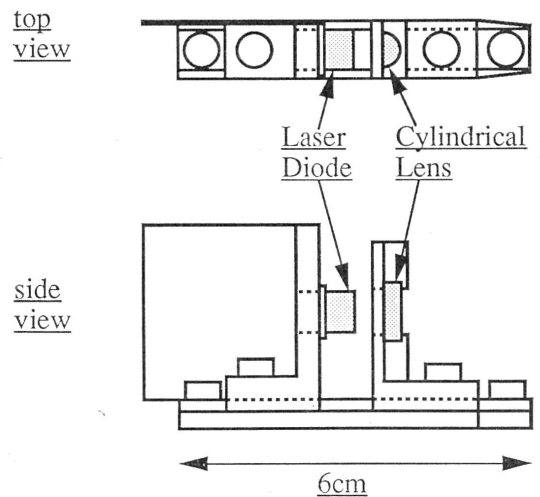


図 2.4: 光源拡大図

ため、十分な長さが必要である。そこで、幅が 2[cm]、長さ 12 [cm] の細長い鏡を使用した。鏡の幅が小さくなることで慣性モーメントが小さくなり、鏡の高速回転が可能となる。

鏡を回転させるモータには高速高精度の電流制御ガルバノモータを使用する。角度は 12[bit] の整数値で与え、これを D/A 変換して制御に必要な電流値とする。一回の走査角度は光源間の角度を走査回数で等分したものになる。光源間の角度は 3.21[deg.] なので、測定全体で 32 回走査する時には走査角は約 0.1[deg.] となる。この角度は十分に小さいので、ビデオ信号の垂直帰線期間中に回転鏡が安定して動くことができる。

以上のような光学系によって線状光を投影することは、以下に述べる投影系の精度及び速度の面での利点がある。

1. レーザ光を用いているので、測定距離範囲内でビーム幅を最適設計できる。ビーム幅を狭くできることにより、正確な位置での奥行き情報が得られ、雑音に対するコントラストを高くできる。
2. 遮光によらずレンズによって出射光から線状光を得ているため、光出力の損失がない。従って、高い輝度の画像が低出力のレーザから得られる。
3. 出射光が近赤外光で CCD カメラに十分な感度があるため、適当な赤外透過フィルタをカメラレンズにとりつけることで蛍光灯のあかりの下でも測定で

きる.

4. 各光源のオンオフのみで線状光投影パターンの変更が高速にできる.

また, 以下のような利点もある.

5. 回転鏡の回転角によって走査しているので, 測定点の密度の変更が容易である.
6. 半導体レーザは小型で低出力なので, 装置全体を小型化でき, 光源による発熱の問題がない.

なお, 半導体レーザの本数は機械的加工精度上の問題等から 15 としたが, 将来精密加工技術や光 IC 技術を用いることによってこの数を増加させることができた場合, より高速化することが期待できる.

2.2.3 前処理回路

2.2.3.1 処理の概要

高速なデータ入力を行なうためには, テレビカメラから入力された画像データをハードウェアで前処理してデータの圧縮を行なう必要がある. 測定点の三次元情報を計算するために必要な情報は画面内に現れる輝点の二次元情報のみであるから, カメラの画像信号を入力し, その中の輝点の二次元情報をビデオレートで出力する回路を設けた. 画像面上の二次元座標を (u, v) で表すと, カメラの水平走査線番号によって垂直方向の座標 v は一意に定まるので, 各水平走査線上における輝点によって生じる輝度の線状光像位置を検出して座標値 u とする.

線状光による輝度変化はレーザービームの輝度分布に従い, ガウス曲線の形をしていると考えられる. この中心を正確に求めるために, ここでは高輝度部分(以下ではこれを「線状光像」とよぶことにする)の重心を計算し, それを中心位置とする. 雑音がない状態でガウス曲線状の輝度分布が 5[pixel] の幅を持つ場合, 離散化された輝度信号から重心位置を復元すると 0.1[pixel] 以下の精度が得られることがシミュレーションによって確かめられた. 従って, 重心位置をガウス曲線の中心とする近似方法は, 回路にあまりコストをかけず, サブピクセルオーダーの

精度を出すことができる．この方法は，頂点付近の数画素の輝度から二次曲線を近似して中心を求める方法よりも高い周波数の雑音に強い．

重心の計算には次の式を用いる．

$$u_g = \frac{\Sigma(I \cdot u)}{\Sigma(I)} \quad (2.1)$$

ここでは， I は輝度，積和の範囲は線状光象の部分， u_g は重心位置である．

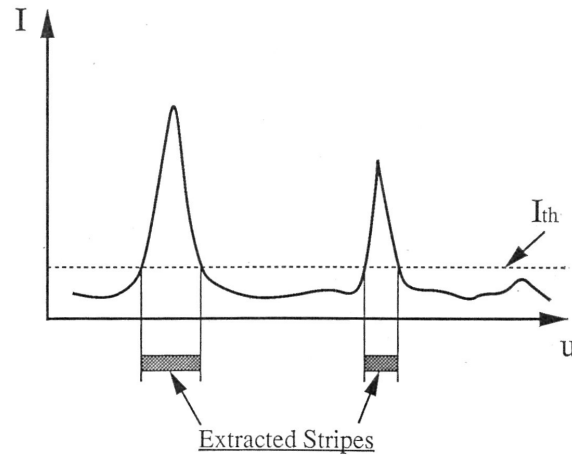


図 2.5: 線状光検出

一水平走査線上に複数の線状光像が存在するので，おのこの近傍を検出してその中で積和を行う．線状光像以外の部分の輝度信号にはレベルが低い雑音があるので，線状光像は，輝度の閾値を越える部分として求める (図 2.5)．閾値 I_{th} は次の式によって求める．

$$I_{th} = c \cdot \frac{\Sigma(I)}{u_{max}} \quad (2.2)$$

ここで，積和範囲は一水平走査線内， u_{max} は一水平走査線内の画素数， c は定係数である．線状光像の部分は画素数としては小さいので $c = 1$ とするとノイズレベルの平均より少し上の値となり，ノイズによる多数の線状光像候補が現れてしまう．これを避けるため，係数 c によって同値を十分大きな値にする (実際の値は 2) ．

この閾値は水平走査線毎に独立に求める．これにより，画面の上端や下端で線

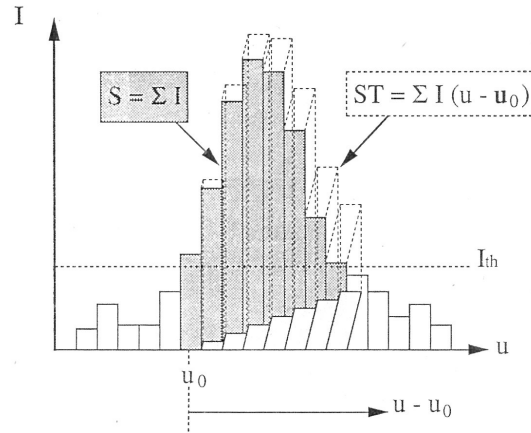


図 2.6: 線状光像パラメータ

状光像自体の輝度か下がる部分においても線状光像の輝度に比例した閾値で検出できる。

2.2.3.2 回路構成の工夫

実際の回路で上の処理を一水平走査線時間で行なうには回路構成上の二つの問題がある。第一点は、 u が大きい場合には、(2.1) 式の分子の積和演算が非常に大きくなり、余分な演算回路が必要となる点である。第二点は除算には時間がかかるため、観測された線状光像が近接している場合には、先に観測された線状光像の (2.1) 式の計算が終了する前に次の線状光像が入力され、データが失われるおそれがあるという点である。

第一の問題点を解決するために (2.1) 式を次のように変形する。

$$u_g = u_0 + \frac{\sum \{I \cdot (u - u_0)\}}{\sum (I)} \quad (2.3)$$

ここで、 u_0 は線状光像が閾値を越えた時点の u 座標の値である (図 2.6)。 $u - u_0$ の値は、輝度信号と閾値との比較結果に連動して始動するカウンタによって実現できる。このようにすると、線状光像の幅がある範囲内にあると仮定すれば分子の積和の最大値の上限が小さくなり、回路のレジスタやバスなどのビット数を減らすことができる。

第二の問題点を解決するために、(2.1) 式の処理過程を二段階に分ける。第一段

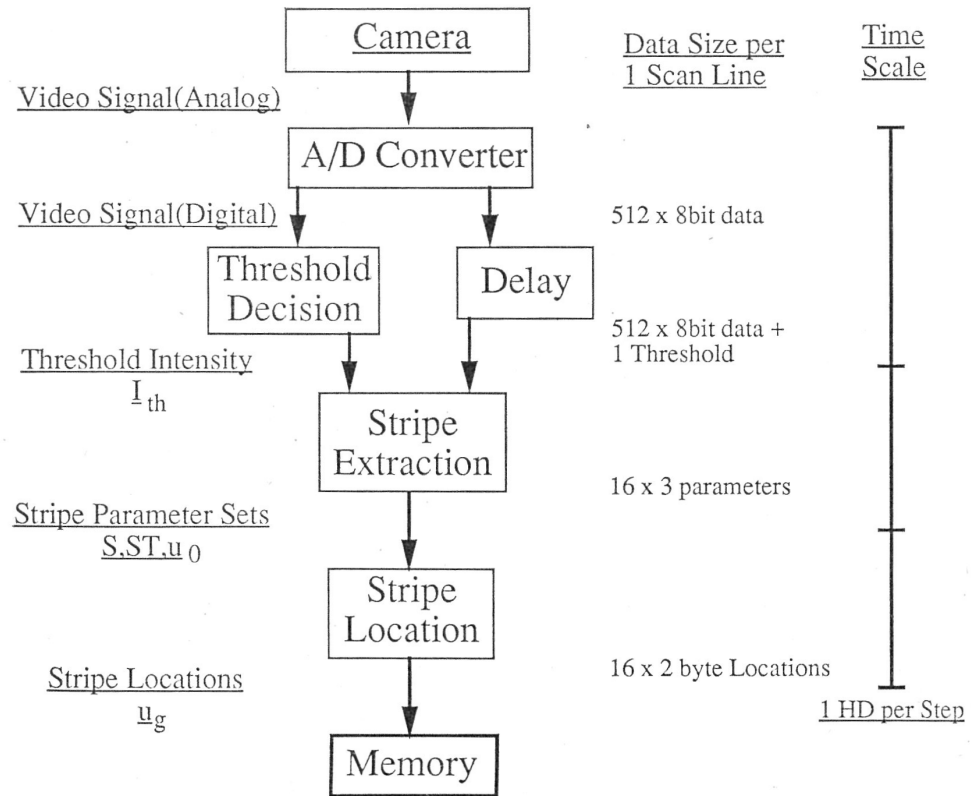


図 2.7: 前処理回路

階では輝度信号からパラメータ u_0 , $ST(= \Sigma I(u - u_0))$, $S(= \Sigma I)$ を求め、いったんレジスタに蓄える．一水平走査線分のデータに対して第一段階の処理を終了した後，次の水平走査線時間に行なわれる第二段階では蓄えられたレジスタ内のパラメータに対して (2.3) を計算する．このようにすると，各線状光像に対する除算は，その線状光像の水平走査線内の出現時刻に無関係なタイミングで実行でき，第二の問題点が回避できる．本システムにおけるパラメータ用のレジスタセットの総数は，光源の数が 15 個であることから，16 になっている．

前処理過程全体では水平走査線ごとに閾値を求める処理が加わるために，一走査線の輝度信号に対して処理を三段階にしてそれぞれの中間結果を次のステップにパイプライン状に送るようにしている (図 2.7)．このようにすることで各水平走査期間の輝度信号に現れる線状光像位置の情報が 2 水平走査期間だけ遅れて得られる．この遅れはビデオ信号の垂直ブランキング期間より十分に短いので，次のフレームの処理には影響しない．

最終的に得られるデータは一フレーム当たり 480 水平ライン $\times$ 16 個の u 座標値

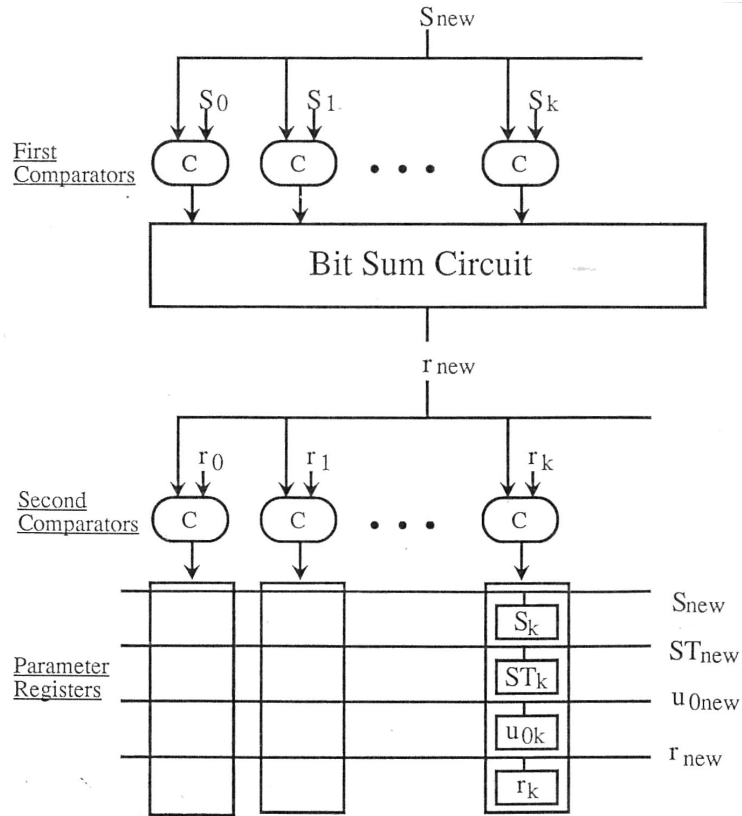


図 2.8: リアルタイムソート回路

である．座標値は整数部 9 [bit]，小数部 7[bit] の固定小数として得られる．

2.2.3.3 リアルタイムソート回路

閾値を設定して雑音によって生じる偽の線状光像を排除してもノイズの振幅が大きければ閾値を越える偽の線状光像が出現することが考えられる．一水平ライン上に出現し得る真の線状光象は高々15個であるが，偽の線状光像を含めてパラメータを保存すると，その数は一定しない．最終的に線状光像の座標 u を各水平ラインに対して有限個求めるためには，なるべく早い段階で検出された高輝度部分の判定を行なって信頼できるデータのみを残すよりにはする必要がある．

本システムでは，リアルタイムソート回路を線状光検出の直後におき，各線状光像のために計算されるパラメータ $S(= \Sigma I)$ を線状光像の信頼度を表す評価関数値とし，パラメータのレジスタへの保存時にその大きさによって取捨判定を行なうようにした．この回路は，すでに 16 組の線状光像のパラタータがレジスタ内に

保存されている状態で新たに線状光像が検出された場合に、

A: もし新しい線状光像の信頼度が保存されている線状光像の信頼度のいずれよりも小さければ新しいデータを捨てる

B: A 以外の場合に最も信頼度の低いパラメータセットの内容を新しい線状光像のパラメータセットで更新する

という操作をする。

リアルタイムソート回路の回路図を図 2.8 に示す。常に線状光像群中で信頼度の最も低い（最小の面積を持つ）線状光像を把握するためにそれぞれのパラメータセットは S_k の大きさの順に序数 r_k を割り当てられている。ただし、 $k(0 \cdots 15)$ はパラメータセットの番号であり、 r_k もまた 0 から 15 の互いに異なる値を持っている。新しい線状光像が検出されると、その線状光像の S の値 (S_{new}) は既存の S_k 全てと比較される。比較は並列に配置された 16 個の比較器で同時に行なわれる。比較の結果、16 個の 1[bit] データが得られる。この中の $\{S_{new} > S_k\}$ を満たすものの個数 r_{new} が新しい S_{new} と既存の S_k を含めた 17 個の中での S_{new} の序数となる。 r_{new} は比較器の出力からビットの中の 1 のみを数える論理回路によって遅延なく求められる。次に r_{new} の値と各 r_k の値を並列に配置された 16 個の比較器によって同時に行なう。比較結果に従い、各レジスタの内容に以下の操作を行なう。

$r_{new} < r_k < 15$ のとき r_k を 1 増加する。

$r_{new} < r_k = 15$ のとき ST_k, S_k, u_{0k}, r_k を $ST_{new}, S_{new}, u_{0new}, r_{new}$ で置き換える。

$r_{new} \geq r_k$ のとき 無操作。

これらの操作はパラメータレジスタごとに互いに独立して並列に実行される。

このようにして得られた最も信頼度の高い 16 個のデータが、水平走査期間終了後の水平帰線期間中に除算処理過程用レジスタにコピーされる。その後、 S_k レジスタはクリアされ、 r_k レジスタには 0 から 15 までの数値が格納される。

2.2.4 符号化格子法に関する考察

符号化格子法は、一フレーム内に存在する複数の光源による輝点を識別する方法である。一般的には光源ごとに識別可能なビット列を割り振り、そのコードに

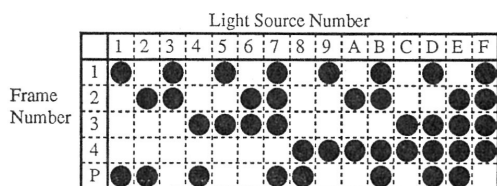


図 2.9: パリティビットつきバイナリ符号化

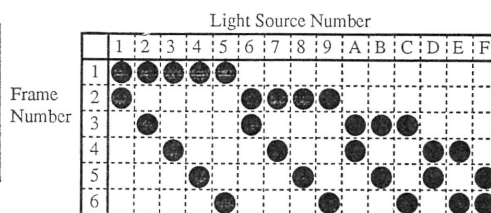


図 2.10: 組合せ符号化

従って各光源を点灯しビット長回数のフレームをとりこむ。各画素に対して輝点の出現フレームを並べたビット列がどれかの光源のビット列と一致すれば光源が特定できる。

最低一回の1が存在するビット長 M のビット列によって識別できる光源の数は $2^M - 1$ なので、このときに符号化の効率は最も良くなる。これによって複数の線状光のデータのフレーム数が $M/(2^M - 1)$ 倍に短縮できることが、複数光源を用いたレンジファインダの重要な利点である。

我々のレンジファインダにおいては光源の数が15なので、最低4フレームの画像をとりこむことでひとつのミラー位置における測定を完了できる。

実際には光学的な条件によって輝点の欠落が起こり、復号に失敗する場合が出てくる。それを防ぐためにはフレームの数を必要最小限の数よりも多くしてエラーを検出できるようにする。具体的には、フレーム数を5にしてパリティチェックを行なう(図2.9)。偶数パリティにした場合、15個の光源のうち10個は2フレームで点灯し、5個は4フレームで点灯する。こうすることによって、ある画素に対して光源が点灯しているフレーム内で一回欠落がおきても、そのデータをエラーとして排除でき、誤対応は起きない。

しかし、パリティを1[bit]つけた場合でも、2フレームにおいて欠落が起きる場合には本来4フレームで点灯する光源が2フレームのものに誤ることがある。実験では、約3万点のデータに対して約30個の誤対応があった。

レンジファインダにおける輝点の欠落による誤りの発生は、二進符号に対して非対称であると仮定できる。すなわち、1が0になることはあるが0が1になる確率は非常に小さい。こう仮定すれば、全ての光源のビット列に対してそこに含まれる1の数を等しくすることで欠落によって数が減った点のデータを常にエラーとして排除できる。このようにしてエラー訂正を行なう場合には、 M フレームの

画像入力で識別できる光源の数の最大は、 ${}_MC_{[M/2]}$ で表される．従って、フレーム数が 4, 5, 6 の場合にはそれぞれ $6 = {}_4C_2$, $10 = {}_5C_2$, $20 = {}_6C_3$ 個である (表 2.1). 我々のレンジファインダの光源数は 15 なので、フレーム数を 6 として $15 = {}_6C_2$ とするのが適当である．この場合、6 フレーム中 2 回点灯する全てのビット列のパターンを 15 個の光源に割り振ることで実現できる (図 2.10).

この結果、表 2.1 に示すように複数光源化によるメリットは減少するが、復号における誤りはなくすることができる．同じ光源の数に対しては、組合せ符号の方が二進符号のフレーム数よりもおよそ 2 フレームずつ多くかかる．光源の同定に用いる符号は純粹にソフトウェアによって制御可能なので、測定時に重視している目的（高速度、低誤差率）によって適用する符号を選べば良い．

M	$2^M - 1$		${}_MC_{[M/2]}$	
1	1	(100.00)	1	(100.00)
2	3	(66.67)	2	(100.00)
3	7	(42.86)	3	(100.00)
4	15	(26.67)	6	(66.67)
5	31	(16.13)	10	(50.00)
6	63	(9.52)	20	(30.00)
7	127	(5.51)	35	(20.00)
8	255	(3.14)	70	(11.43)
9	511	(0.69)	126	(7.14)

表 2.1: バイナリ符号化および組合せ符号化による計測回数削減率の比較

2.2.5 システムの動作とパフォーマンス

2.2.5.1 システムの並列動作

システム全体では以上述べた各要素が同期しながら処理を行なう (図 2.2).

光学系は前処理回路及びパソコン (PC-9801) を介してワークステーション (HP-9000/835) から制御される．制御情報はミラーの角度と光源の点灯情報で、前処理回路で発生する同期信号に従って実行される．

カメラから入力された画像信号はフレーム毎に前処理回路で輝点の二次元情報を検出される．パソコン上で数フレームの画像から復号が行なわれ、各光源ごと

の各水平ライン上の線状光像の u 座標値のテーブルが作られる． u 座標値のテーブルはワークステーションに送られ，実数演算によって三次元情報となる．前処理回路とパソコンの間はカメラの垂直同期信号に同期して切り替わる $16[\text{Kb}] \times 2$ のデュアルメモリによって行なう．パソコンとワークステーションの間は GP-IB で転送する．復号（実時間整数処理）と三次元化（実数演算）の処理をパソコンとワークステーションで分担してパイプラインを形成している．

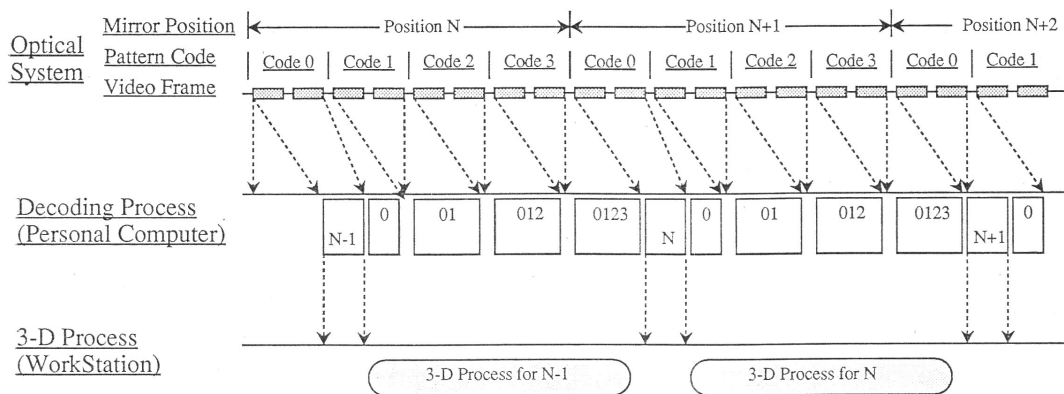


図 2.11: パイプライン処理

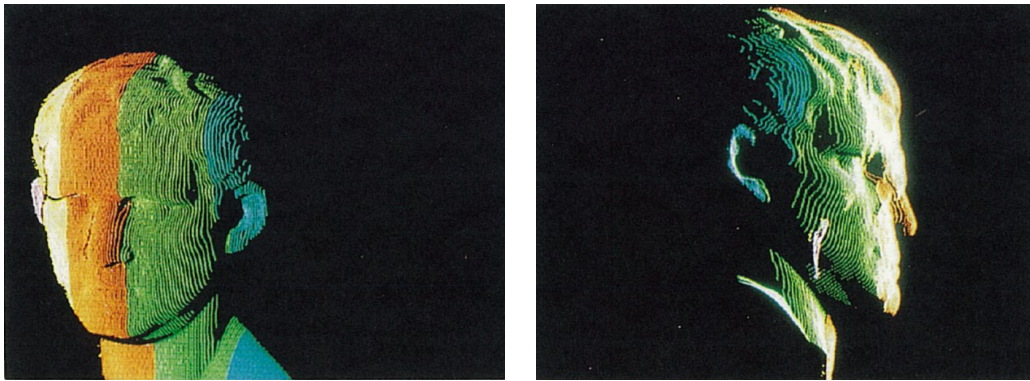
図 2.11 では，4[bit] バイナリコーディングの場合で各ブロックにおける処理手順のタイミングの理論上の動作を示した．これからわかるように，鏡をある位置 N に動かしてからその 3 次元データが最終的に得られるまでには 18 フレームタイム必要である．コーディングの方式が 5[bit]，6[bit] の場合にはそれぞれ 20 及び 22 フレームタイムである．ステップ数の最大値を N_{max} とすると，測定に必要な最小時間は $N_{max} \times 8 + 10$ フレームタイムとなる．この間に投影される線状光は $N_{max} \times 15$ なので，一線状光当たりの情報は，平均して約 0.5 フレームタイムで入力される．

一場面の入力に 2 フレームタイムかかるのは，画面内の全ての画素で露光時間を等しくするためである．光源の出力が十分に大きければフレーム間の暗期間だけ照明して一場面の入力が 1 フレームで可能であると予想される．

復号処理では一画面の入力があるごとに同一画素の線状光像の存在を確かめながらインクリメンタルにコードを復元していく．実際の装置では，画面上に現れる輝点が少ない場合と多い場合では作業にかかる時間が異なる．輝点の数が多い場合には復号作業が 2 フレームタイムで完了しないことがある．この場合には他のブロック（光学系及びワークステーション）がフレーム単位で作業を遅らせる．

また、復号処理が終った情報が GP-IB で転送される際も、パソコンの処理速度が十分でないため、実際の装置では 2 フレームタイムの転送時間が余分に必要になっている。

以上の実装上の制約により、理想的には 4[bit] コーディング 32 走査の場合では 8.9[sec] で測定が終了するが、標準的な事例では 11[sec] から 12[sec] が必要である。この遅れは、方式上の欠点ではなく、復号処理をハード化することで将来的に高速化が期待できる。



(a) 正面図

(b) 側面図

図 2.12: 計測結果 (Agrippa)

このシステムを使って入力した三次元点データの一例を図 2.12 に示す。この図は、高さ約 50[cm] の Agrippa の彫像を対象にして得られた 3 次元座標を表示した結果である。(a) は正面像、(b) は同じデータを横から見たものである。縞模様に見える線は細かい点の集まりであり、色の違いは別の光源で照射された線であることを表している。データの密度が高いために曲面形状の細部まで読み取れる。

2.2.5.2 キャリブレーションとその結果

本システムの高精度測定のための精度キャリブレーションを行なった。レンジファインダの測定範囲に 45[deg.] に傾けた正方形のパターンを描いた板を立て、前後に移動して三次元座標と画像上の線状光像の二次元座標の組を作り、変換に必要な光学系とカメラのパラメータを求めた。パラメータの数は光学系（ミラー 8 十入射光 15 × 3）とカメラ（10）で全部で 63 個ある。

その後、精度評価を行なった結果、距離 700[mm] で奥行き方向の絶対精度及び相対精度がそれぞれ 1.01[mm], 0.84[mm] であることが確認できた。また、20 個の参照点に対して行なった水平方向の画素精度の評価では、平均 0.366[pixel], 最大 0.761[pixel] の誤差という結果を得ている [49]。この値は、シミュレーションで予測した 0.1 [pixel] には及ばないが、重心を計算することによるサブピクセルオーダーの計算が有用であることを示している。

2.2.6 精度についての考察

線状光を投影し、カメラで線状光像を入力するシステムでは、線状光の投影方向をミラーを介して設定する際に生じる誤差、カメラ走査線の離散性（撮像面の v 軸方向）による誤差、および画像信号をサンプリングする際の離散性（撮像面の u 軸方向）による誤差によって、測定精度の限界が生じる。上記の三個の条件はそれぞれ測定点においては平行であるとみなせる二枚の平面によって空間を切りとる。そのため、測定精度の限界は三対の平行な平面によって形成される平行六面体で表される。光源とカメラが近接すると線状光によって生じる平面とカメラの u 軸方向の離散性による平面が平行に近付き、交わりの部分の平行六面体が奥行き方向に引き延ばされて精度が著しく落ちる。以上述べたのは光学系の幾何学的配置によって生じる不可避なものである。光源側の平面とカメラ側の平面の角度が 90[deg.] に近ければこの原因による誤差を最小にでき精度は高くなるが、線状光が照されていてもカメラから見えない点が多くなり、部分的なデータしかとれなくなる。本システムでは、代表的な測定地点で光源方向とカメラ方向とのなす角度が 60[deg.] になるように設定しているが、これについてはまだ検討の余地がある。また、上記の三つの誤差原因をおのおの小さくすることで三次元誤差も小さくすることができる。本システムでは、線状光側に高精度ガルバノモータを使用し、カメラに 480 走査線で一走査線あたり 400 画素の CCD カメラを用い、線状光位置をサブピクセルオーダーで検出することで各々の誤差原因を小さくするようにしている。将来、カメラの精度がより高精度になれば、システム全体の高精度化が期待できる。

光源にレーザを用いることにより、物体表面で幅が狭い線状光による輝線を生じることができる。そのおかげで、線状光によって照射される物体表面の面積が小さくなり、画像から線状光像の中心を抽出する際に、近傍の距離変化による誤差

を生じにくくなる。また、赤外光のみをカメラにつけたフィルタで透過させることで、蛍光灯などの低温光源からの背景雑音をほとんど除去できる。しかし、レーザ光の投影パターンには干渉によるスペックルノイズが生じやすく、それが顕著な場合、ビームの輝度分布はガウス曲線からかけ離れたものになる。これに対しては、時間方向にコヒーレンシがないレーザを用いたり、レーザ光源に直接機械的な振動を与えることによって防ぐことができる。本システムでは、前者の方法でスペックルノイズを低減している。しかし、後者の方法を併用することで精度が向上する可能性はある。

2.2.7 おわりに

三次元座標を高速高精度に入力するレンジファインダシステムについて述べた。

レーザ光を整形することによる線状光の投影、高精度ガルバノモータでの走査、赤外レーザ光と赤外感度のある CCD カメラ及び赤外透過フィルタによる可視光雑音の排除、線状光像の重心を計算するサブピクセルオーダの位置検出、リアルタイムソート回路による雑音除去、および光学パラメータの高精度キャリブレーションによって高精度の計測を実現した。

ミラーの回転による水平走査により、融通性の高い高密度なデータ入力が可能になった。

また、複数線状光源の採用、重心検出過程のハードウェアによるパイプライン処理、三次元座標計算過程を二次元位置検出および符号化格子の復号および三次元交点計算に分割して行なうパイプライン処理によって高速計測を実現した。

これらの結果、測定の一例として約 1[m] の距離において 11.5 万点（線状光 240 × 480 点/本）の三次元点座標が 7.5[sec] で 1.0[mm] 以下の精度で入力できるシステムができた。

さらに、半導体レーザと CCD カメラを用いた光学系は小型軽量、低消費電力などのロボットへの応用に適した特徴を持っている。

今後は得られた三次元情報を物体形状の認識やモデルビルディングなどの研究に活用する予定である。また、現在はパーソナルコンピュータで行なっている符号化格子の復号をハードウェア化したり、光源のレーザの出力を上げてカメラの暗期間で光源を点灯することによるシステムの高速化や、スペックルノイズを低減することによる高精度化の可能性も検討している。

2.3 ステレオビジョンとヒューマノイドロボットの姿勢 センサを用いた地形計測

2.3.1 はじめに

二足歩行を行うヒューマノイドロボットが不整地を歩行する場合、適切な歩行ルートを決断するために地形の情報を必要とする。このような情報は地面の高さを計測することで得られる。歩行環境が静的である場合にはあらかじめ地図データとして歩行環境のデータを持つておくことができる。例えば、歩行面の変形がない場合（床など）や、対象物が動かない場合（木、家、壁など）などである。しかし、動的な環境、すなわち可変な歩行面（砂など）や移動可能な障害物（箱など）はロボットが移動する直前に計測されなければならない。

行動のために必要な情報はロボットの近辺に限られているため、ロボットに計測装置、すなわちナビゲーションのための視覚システムを搭載すること解決が可能である。

移動ロボットのための視覚システムについては多くの研究がある [50]。しかし、不整地に特化した研究は多くない。Krotkov らは RATLER (Robotic All-Terrain Lunar Explorer Rover) にステレオビジョンによる視覚システムを搭載した [13]。火星探査ローバーの Mars Pathfinder には障害物検出のためにレーザーレンジファインダが使われた [7]。

上記の研究はいずれも車輪型ロボットのための研究である。車輪型のロボットも走行コースを選択したり速度を制御するために地形の情報を必要とするが、多脚型ロボット（二足歩行ロボットを含む）は歩行の過程において地形の詳細な情報をより多く必要とする。なぜなら、多脚型のロボットは車輪型のロボットより移動に関してよりすぐれた DOF を持つがその代償として不安定であるためである。

本節では、独立行政法人産業技術総合研究所のヒューマノイドロボットプロジェクトにおいて開発された HRP-2 に用いられた視覚システムを紹介する。ロボットは工事現場のような屋外の環境で人間と協力して働くように設計されており、不整地の移動ルートを自ら決定する機能を必要とする。

ヒューマノイドロボットの視覚システムにおいては、複数視点の距離画像のレジストレーションが二つの理由で必要になる。第一の理由は、視覚システムはマニピュレーションにも用いられるので画像が縮小され精度が落ちるワイドレンズ

は使用できないことである。第二の理由は、視覚システムが満たすべき重量や電力の制約により、ズームレンズや輻輳制御機構などは持てないことである。これらの理由により、ビジョンシステムには視野の狭い単焦点の固定レンズが用いられるため、一回の計測で撮影可能な空間が限られてしまう。

距離画像のレジストレーションはロボットの関節角度を読む機械式のセンサーの出力から計算される変換行列を用いて行う。ロボットには全部で 30 個の関節があるが、そのうち 16 個の関節が行列に関係する。異なる姿勢で計測された距離画像はこれらの変換行列によって重ね合わされる。また、加速度センサーとジャイロセンサーの出力を用いてワールド座標系とロボット座標系の間の変換行列を計算する。

2.3.2 においてヒューマノイドロボットの機械的な構成について述べる。2.3.3 においてステレオ相関法を用いたビジョンシステムについて述べる。2.3.4 において座標系と変換行列について述べる。2.3.5 において不整地を対象にした実験結果を示し、その結果を解析する。

2.3.2 HRP-2 の機構

この小節では HRP-2 の機械的構成および関節の幾何学的な配置を計測するためのセンサーについて述べる。

図 2.13 にヒューマノイドロボット HRP-2 の外観を示す。ロボットはプロトタイプモデル HRP-2P[51] に基づいて設計されている。本体の高さは $1,539[mm]$ 、幅は $621[mm]$ 、奥行きは $355[mm]$ で重量は $58[kg]$ である。ロボットの最大歩行速度は $2.0[km/h]$ である。

HRP-2 は全部で 30 個の自由度を持ち、そのうち 2 個が頭部、2 個が腰部、14 個が腕、12 個が脚にある (図 2.14)。機械的なセンサーはそれぞれの関節の一つずつある 30 個のエンコーダー、三次元ジャイロセンサーおよび三次元加速度センサーである。

HRP-2 は移動と視覚のために 2 個の CPU を内蔵する。また、外部のコンピュータと通信するための無線 LAN システムを装備している。



図 2.13: ヒューマノイドロボット
外観

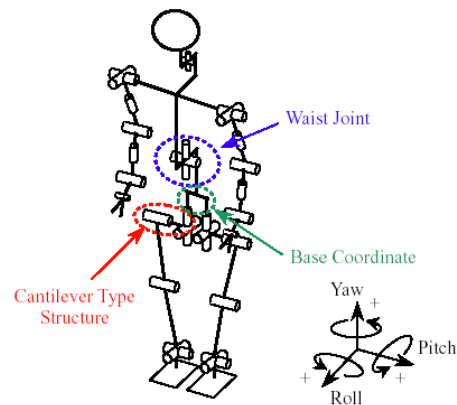


図 2.14: 関節構造

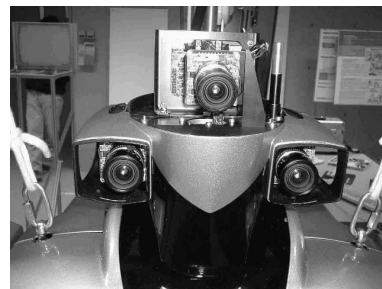


図 2.15: 三眼ステレオカメラシステム

2.3.3 視覚システム

HRP-2 は三次元計測と物体認識のための視覚システムを持っている。

図 2.15 に三眼ステレオカメラシステムを示す。左右のカメラの間隔は $140[mm]$ で中央のカメラはその中間の $70[mm]$ の高さに置かれている。各カメラの画角は水平方向が $31.8[deg.]$ で垂直方向が $24.5[deg.]$ である。カメラにはズーム機構や輻輳制御機構はないが、視野の明るさを調整できる電子式シャッターを持っている。

HRP-2 は視覚システム用とそれ以外の制御用の 2 個の CPU を内蔵している。視覚システム用の CPU は Pentium III $1.26[GHz]$ 、メモリ $256[MB]$ でキャプチャカードは Cybertek CT-3001RGB である。画像処理と三次元距離画像計算は高性能三次元視覚システム VVV[38]で行っている。三次元の地形計測はステレオ相関法により行い、物体認識はセグメントベースステレオによって行っている [52]。また、ステレオ相関法の計算には岡田らによる高速な計算技術 [53] を用いている。

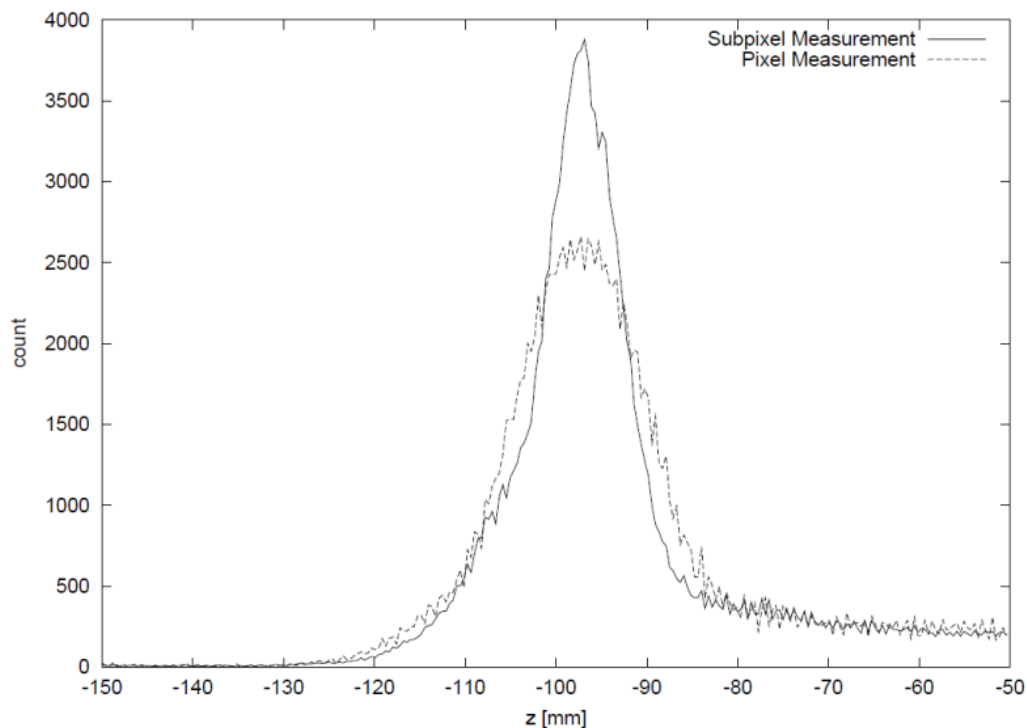


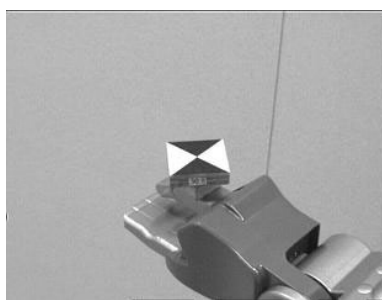
図 2.16: 誤差ヒストグラム（補間効果）

一回の計測によって測定可能な地表の範囲は，ロボットからの距離が $880[\text{mm}]$ から $1950[\text{mm}]$ で近い辺の長さが $750[\text{mm}]$ ，遠い辺の長さが $1050[\text{mm}]$ の台形である．

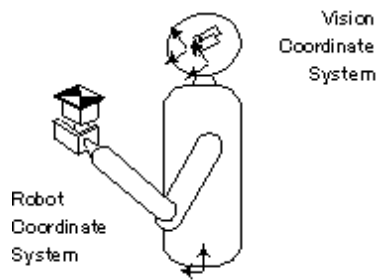
地表の高さを計測するときの誤差は離散誤差の段階で約 $20[\text{mm}]$ であるが，補間を行うことで $15[\text{mm}]$ に減少することができる．図 2.16 に平らな床を計測した場合の垂直方向の値 z のヒストグラムを示す．二つの曲線は補間をしたときとしないときのもので，補間の結果改善がされたことが明らかである．ロボットの足の座標系が床から $100[\text{mm}]$ 高いためにピークは $-100[\text{mm}]$ になっている．

2.3.4 変換行列

視覚システムで計測された距離画像は，視覚システムに対するキャリブレーションを行った視覚座標系における座標値を持っている．複数の視点の距離データを重ね合わせるためには，それらを地表に対して固定されたワールド座標系に変換



(a) 指先マーカー



(b) 視覚座標系とロボット座標系

図 2.17: キャリブレーション

する必要がある。

視覚システムはロボットの頭部にあり、2 自由度の頭部関節、2 自由度の腰部および 12 自由度の脚部で支えられている。すべての関節の角度は同時に計測でき、視覚座標系とワールド座標系のあいだの変換行列が計算される。

以下に視覚座標系とロボット座標系の間の変換行列のキャリブレーション方法を示す。

図 2.17 に示すように、ロボットの指先にマーカーを付け、ロボットのハンドを視覚システムの視野内で動かす。マーカーのそれぞれの位置において画像内のマーカーの中心が検出される。検出されたマーカー位置の視覚座標系における座標値と、ロボット座標系における指先の位置から二つの座標系の間の変換行列を計算する。

以下に二つの座標系の変換を示す。

$$\mathbf{X}_w = T_{vw} \mathbf{X}_v, \quad (2.4)$$

ただし、 $\mathbf{X}_v$ および $\mathbf{X}_w$ はそれぞれ視覚座標系およびワールド座標系における同次ベクトルであり、 T_{vw} は同次変換行列である。実際には、 T_{vw} は関係する関節による同次変換行列を T_i と表したとき、それらの積で表すことができる。

$$T_{vw} = \prod_i T_i \quad (2.5)$$

ワールド座標系として利用可能な二つの座標系がある。一つは腰座標系で、動態の中心に原点がある。この座標系の z 座標軸はジャイロセンサによって自動的

に垂直になる．もうひとつは足座標系でロボットの右足に原点がある．

T_{vr} を腰座標系と視覚座標系の変換行列， T_{vf} を足座標系と視覚座標系の変換行列とすると，脚部の関節が関与しないために T_{vr} のほうが T_{vf} よりも関節のエンコーダーによる誤差の影響が少ないとみなせる．一方， T_{vr} はジャイロセンサの誤差の影響を受ける．

2.3.5 実験

屋外の地面を模したいくつかの障害物のあるシーンを研究室内に設けた．図 2.18 に 3 つの姿勢で観測した左右のカメラの画像を示す．左右の視点はそれぞれ中央の視点から 20 度ずつ動かしたものである．これらの画像は，腰部のヨー軸を回転した結果である．他の関節は意図的には回転していないが，ロボットの自動バランス機能により動く可能性がある．

図 2.19 は，3 つのデータを重ね合わせたものである．白い部分は点データの分布，グレーの部分は重複部分を示す．左右のデータと中央のデータはそれぞれ約 1/3 ほどが重複していることがわかる．

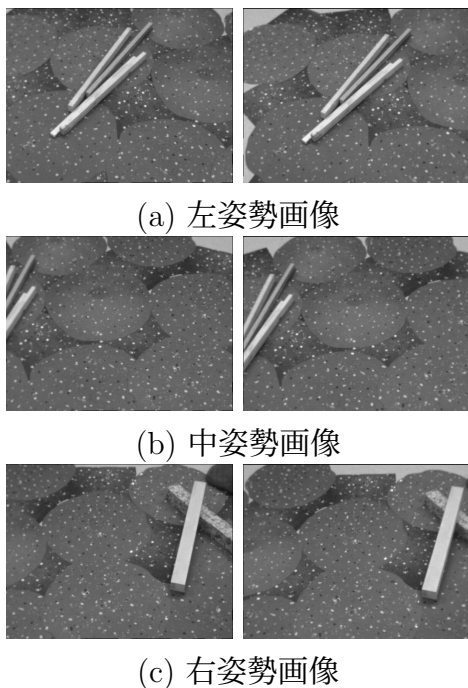


図 2.18: 複数視点画像

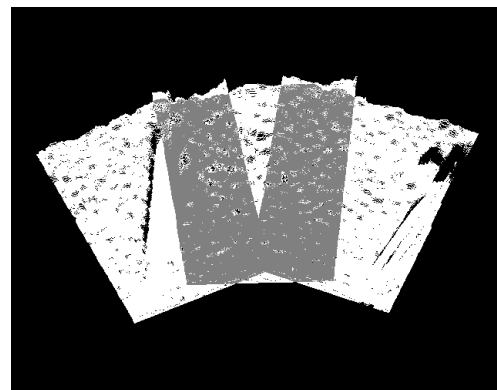
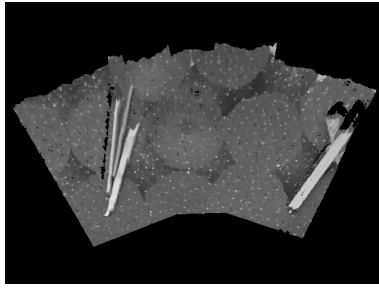
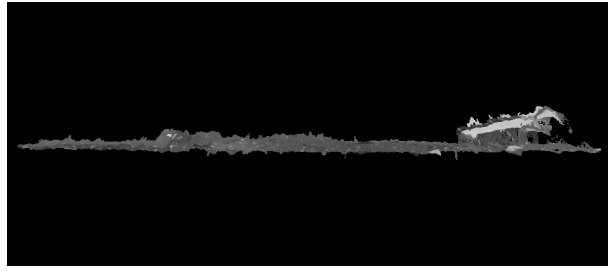


図 2.19: 重複領域



(a) 上面図



(b) 前面図

図 2.20: 重ね合わせレンジデータ

図 2.20 は、重ね合わせた距離データの上面図と前面図である。テクスチャ内に見える円形のパターンは実験用に作成した人工マウンドで、直径は $200[mm]$ である。中央に置かれたマウンドは最も高く、中心の高さは $20[mm]$ である。他のマウンドは背が低く高さが $5[mm]$ である。左右のカメラの視野に積み重なった木材が置かれており、左側の木材の山は高さ $60[mm]$ 、右のものは高さ $150[mm]$ である。

図 2.21 に図 2.19 に示した重複部分における誤差のヒストグラムを示している。ここには、(1) 左視点と中央視点のデータの差と (2) 右視点と中央視点の差分を横軸を z 軸の誤差としたヒストグラムを示している。それぞれの視点の座標変換にはロボット座標系として腰座標系と足座標系を用いた場合の場合について計算した結果を別々に示している。

ロボット座標系を変えた効果はとても小さく、曲線はほとんど重なっている。左側に頂点のある曲線はデータ (1) のものでその頂点の位置は $-6.6[mm]$ にあり、右側に頂点のある曲線はデータ (2) のものでその頂点の位置は $-5.1[mm]$ にある。ほとんどの誤差は $-15[mm]$ と $5[mm]$ の間にある。ここで出現する誤差には、距離データのエラー (図 2.16) と変換の誤差が含まれているが、後者は小さく無視できる。頂点のゼロからの偏位は腰部のヨー軸のキャリブレーション誤差によるものと考えられる。

本節で行われた実験においては、ロボットは水平な床に直立しており、足座標系の z 軸は鉛直になると考えられる。実際の屋外においてはこういった仮定は成り立たないので、足座標系の軸方向は信頼できない。一方、腰座標系では回転は信頼が置けるが、地表からの距離は正確ではないので高さの計算は不正確になると考えられる。これらの二つの座標系をうまく組み合わせることで屋外の環境においてもロバストな変換行列が計算できると期待する。

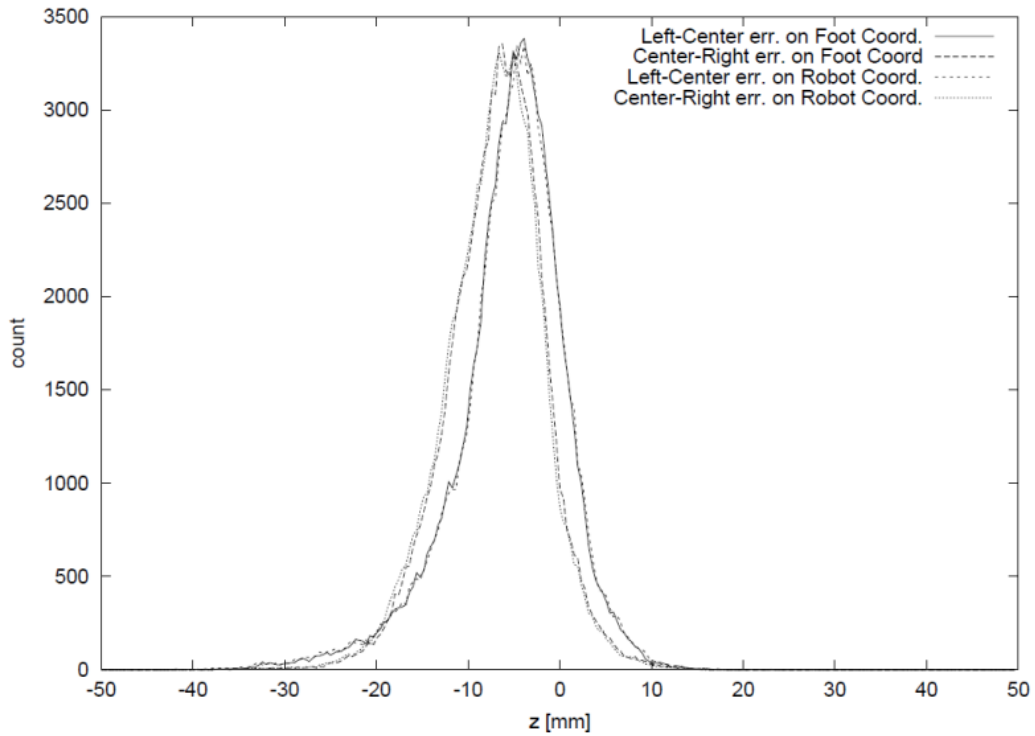


図 2.21: 誤差ヒストグラム

予備的な実験として、距離画像を使ってロボットが通過するための通路を見出す実験を行った。図 2.22 に $z = z_G + 10[\text{mm}]$ のスライスされた距離画像を示す。ただし、 z_G は図 2.16 から得られた高さゼロの値である。距離画像の値が $z_G + 10[\text{mm}]$ より小さい点は白で塗りつぶされている。この画像から、中央のマウンドと右側の木材の間に通行可能な平坦なスペースがあることが判定できる。

もう一つの重ね合わされたデータの処理の結果を図 2.23 に示す。この図では、各点の法線ベクトルと z 軸との角度を可視化している。角度は 4 段階で表され、明るい方から暗い方に $10[\text{deg.}]$ 未満、 $20[\text{deg.}]$ 未満、 $30[\text{deg.}]$ 未満、それ以外を表している。距離画像は補間により誤差が改善されているが、完全にはステップ状の誤差は消えていない。そのため、法線の画像には誤差の影響によるノイズが多く見られる。それでも画像の右には空白域が見える。

距離の計算誤差はズームおよび輻輳機構によって改善することができる。そうした装置を用いれば法線の差分画像もルート決定に利用可能な程度に改善できる可能性がある。

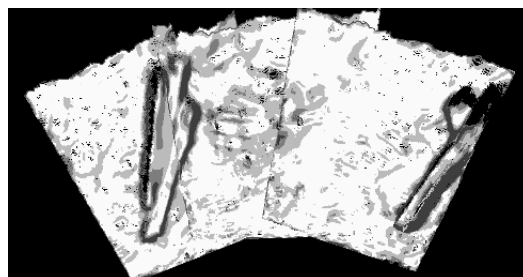
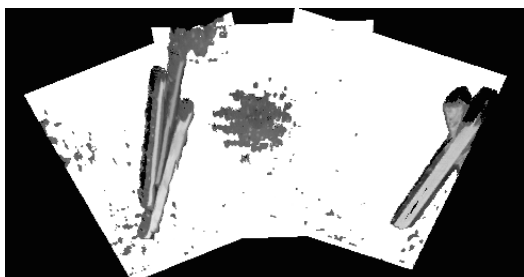


図 2.22: 高さ閾値による移動可能領域 図 2.23: 法線閾値による移動可能領域

2.3.6 おわりに

本節では、複数の距離画像を重ね合わせることでヒューマノイドロボット HRP2 が地形情報を得る手法について紹介した。最初にロボットの構造と距離画像を計測するための視覚システムについて説明した。次に、視覚とワールド座標系の間の座標変換について述べた。最後に、実験によって座標変換による誤差は距離画像計算の誤差に比較すると小さいことを示した。そして予備的な実験としてルート決定のための距離画像解析結果を示し、この重ね合わされた距離画像が有望であることを示した。

今後は、本手法をより多くのシーンにおいて実験して画像処理のロバストネスを向上し、実際に本手法で検出されたルートをロボットに歩かせることを目指している。

2.4 三眼ステレオを用いたつやのある物体の計測

2.4.1 はじめに

ステレオ相関法は、三次元レンジデータを計測するためのよく知られた方法である。基本的に、局所的な輝度パターンを比較して対応点を探索し、対応づけられた点に対して三角測量の原理により距離を計算する。この方法は別のカメラから観測された輝度パターンの同一性に大きく依存しているため、正反射のような輝度パターンの擾乱によって重大な影響を受けてしまう。

これを防ぐ一つの方法は、正反射による光の色が乱反射による色よりも光源の色の影響を受けやすいことを利用するものである [54, 55]. このような方法のためには、光源のスペクトラムが必要となり、また対象物は単色であるか異なる光源による多重露光が必要になる。

光沢のある表面の物体を偏光フィルタを用いて計測した方法も提案された [56, 57]. この場合には正反射光が偏光となることを利用している。偏波面が反射点における法線ベクトルに依存するため、通常は正反射を検出するためには偏波面を回転させるための機構が必要である。

本節では、正反射光の分離を必要としない方法を提案する。3 対のカメラによるレンジデータを用いて正反射による雑音を排除することにより正確なレンジデータを作成する。単純に、各カメラにおけるレンジデータに対する輝度を比較する。提案手法の重要な点は、本手法が特別な機構、偏光フィルタ、多重露光などを必要としない点である。

本節では、まず 2.4.2 において正反射によってステレオ相関法による計測において発生する問題点について述べる。次に、2.4.3 において提案手法について詳細に述べ、2.4.4 において実験結果を示す。最後に、2.4.5 において提案手法を利用した医薬品アンプルハンドリングロボットシステムについて紹介する。このロボットシステムでは、提案手法によりアンプルの光沢のあるラベルを計測し、アンプルの位置姿勢を計算している。

2.4.2 光沢のある物体計測時の問題

ステレオ相関法は、物体表面がランバーシアン面であり、輝度は観測方向に依存せず一定であるという仮定に基づいている。したがって、表面に光沢があり正反射によって光源あるいは周囲の物体の色が映り込む場合には誤差を生じる。特に光源の映り込みは高い輝度を持つために無視できないことが多い。

図 2.24 に正反射によって生じる問題点を示す。

点 Q_0 と Q_1 は三次元表面上の点 P_a を画像 I_0 および I_1 に投影した点であるとする。図 2.24 の場合では、光源の正反射像が画像 I_0 においては Q_0 に投影されている。一方、正反射像は画像 I_1 においては正しい対応点の Q_1 ではなく、物体表面の P_b に対応する画像内の $\hat{Q}_1$ に投影される。

すべてのカメラは同じキャリブレーションパターンによって校正されるため、すべての外部パラメータは同じ座標系で記述される。

図 2.25 には各レンジデータにおいて発生するノイズ点が白いスパイクで描かれている。

次に、すべてのレンジデータは、任意の平面 Π 上に投影される。

もし Π 上のある画素に複数のレンジデータからの点が投影された場合、そのうちのひとつだけを選択する。もし正反射による点が存在していた場合、その点は通常の拡散反射による点よりも高い輝度を持つと考えられる。したがって、輝度の高い点を排除することで正反射による誤った点を排除できる。ここで行われる輝度の比較は、相対的なものであるため、対象物の本来の輝度の強弱には影響されにくい。

具体的には以下のようにする。いま、 D_{01} 、 D_{12} および D_{20} をレンジデータ R_{01} 、 R_{12} および R_{20} から平面 Π の同じ画素に投影された点であるとする。かりに D_{01} の輝度が三個の点のうちで最大であるとする、 R_{01} の輝度情報は I_0 のものであることから、 I_0 が正反射である可能性が高い。したがって、 I_0 が貢献する D_{01} および D_{20} は正反射の影響を受けている可能性があるため、残った D_{12} を選択することにする。同様に、 D_{12} 、 D_{20} が最大輝度を持つ場合にはそれぞれ D_{20} および D_{01} を選択する。

2.4.4 実験

本手法を検証するため、以下の装置を使った実験を行った。

- カメラ: Point Grey Research, Flea VGA Monochrome
- レンズ: 25[mm]
- 対象: 医薬品アンプル (径 14[mm], 長さ 60[mm], ラベル長 29[mm])

図 2.26 に撮影した対象物の画像を示す。カメラは正三角形の頂点をなす用に配置し、それぞれの角度は 120 度回転している。また、投影平面 Π と投影中心 C_0 は、カメラ #0 の画像平面と投影中心と同一にしている。

図 2.27 にマージ結果を示す。この図では暗い方から明るい方に向かって R_{01} 、 R_{12} 、 R_{20} の選択結果を示す。

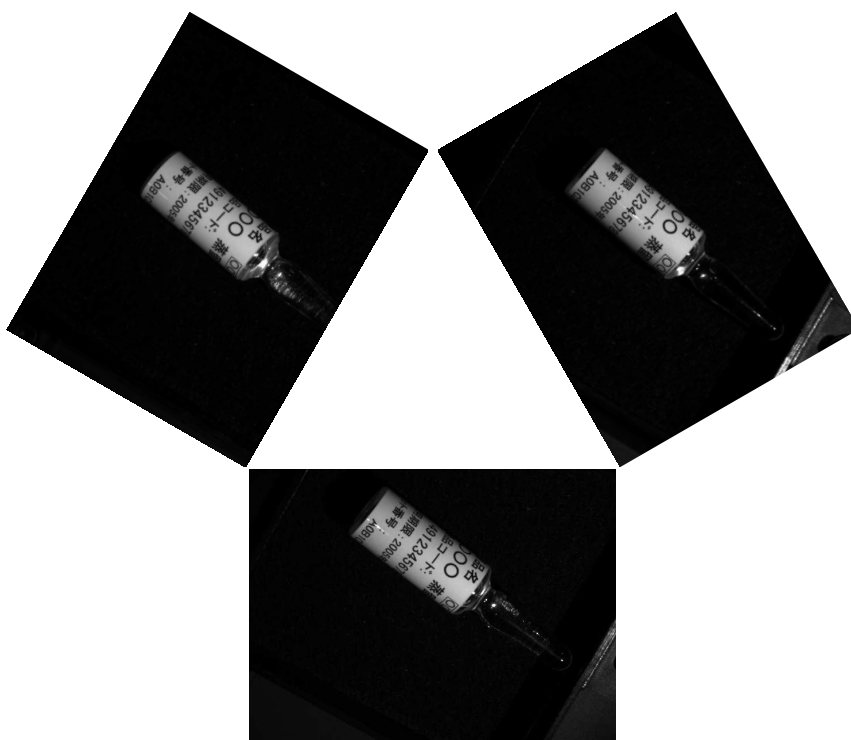


図 2.26: アンプル画像



図 2.27: マージ結果

明らかに，カメラ#1の画像はアンプル中央部に正反射によるハイライトを持っている．カメラ#2はアンプルの底部に別のハイライトを持つ．図2.27はこういったハイライトのある場所では他のデータが適切に選択されていることを示している．

2.4.5 応用

本提案手法を応用したロボットシステムとして，図2.28に示す医薬品アンプルハンドリングシステムを開発した．この装置は，三次元復元をするための三台の

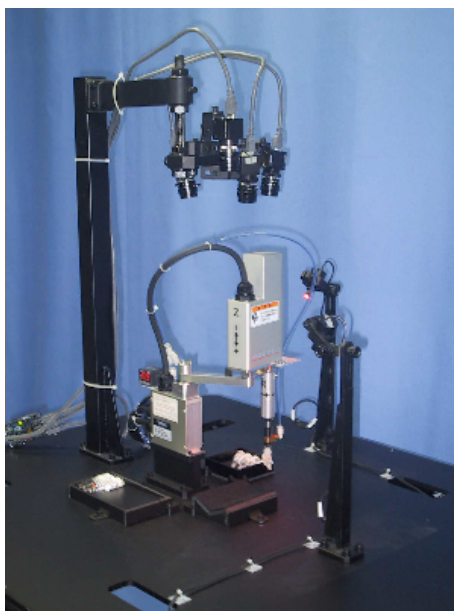


図 2.28: 医薬品アンプルハンドリングロボット

カメラ、アンプルの方向を判定する一台のカメラ、真空吸着ハンドを持ったロボット、赤外光のLEDと赤外光透過フィルタからなる。赤外光LEDと赤外光透過フィルタは計測時の外光の影響を低減するためのものである。

このシステムは不揃いに置かれたアンプルをならび直す目的で作られた。現在はそのような仕事は人間の薬剤師の仕事であるが長時間の単純作業であり、かつ誤りが医療事故につながるため精神的な負担も大きく、ロボットによる作業が期待されていた。こういったロボットシステムがこれまで実現しなかった大きな理由は、光沢のある表面を持つ対象の位置姿勢を推定することが難しかったためである。

図 2.29 と図 2.30 は本システムにおける観測画像とマージ結果である。

マージされたレンジデータを領域分割することで円柱部を抽出する。領域分割のアルゴリズムには、丸山ら [58] による手法を用いている。図 2.31 にマージしたレンジデータに円柱をあてはめた結果を示す。この図ではあてはめた円柱を黄色い点群で示している。

ラベルの領域に円柱をあてはめることで、ロボットはアンプルを正確に拾いあげ配置することができた。このロボットシステムは光沢のあるラベルをもつアンプルの 90%以上を認識することができる。

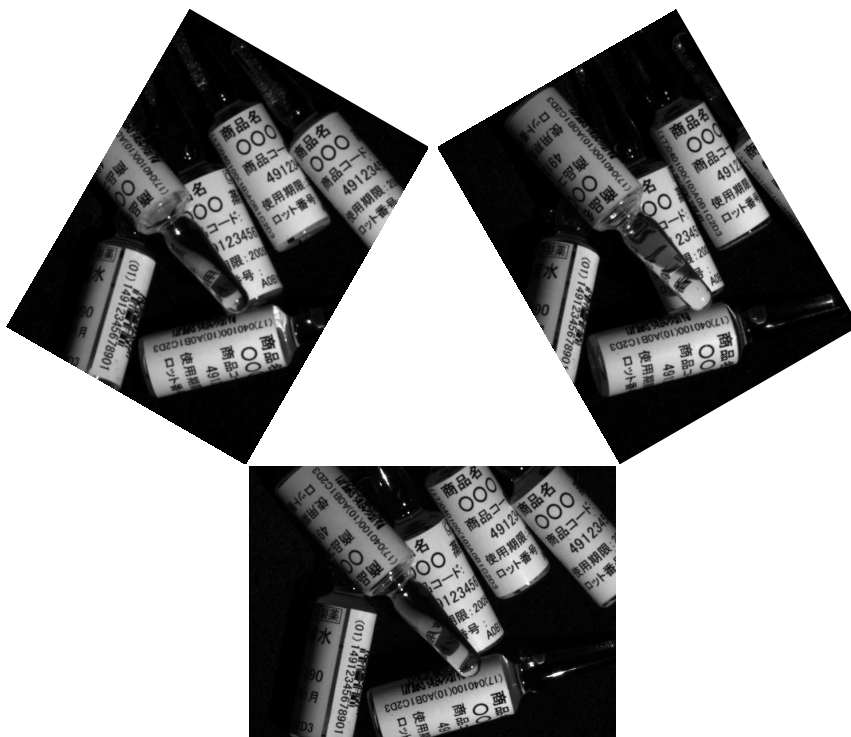


図 2.29: 山積みアンプル画像

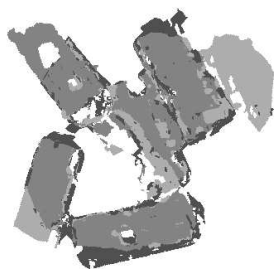


図 2.30: 山積みアンプルマージ結果

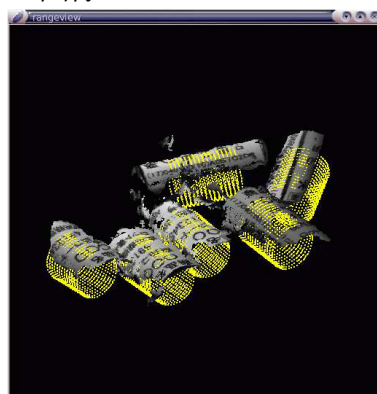


図 2.31: 山積みアンプル認識結果

2.4.6 おわりに

本節では、ステレオ相関法において、鏡面反射によって生じる雑音を除去する新しい手法について述べた。この方法は三台のカメラを用い、三組の異なる組合せのステレオカメラ対から通常のスレオ相関法によって計算されるレンジデータをマージするという極めてシンプルな方法である。データをマージする際には、鏡面反射光が拡散反射光に対して相対的に極めて輝度が高いという原理に基づい

ている．提案手法には偏光フィルタのような特別な装置や光源の色情報を必要とせずに鏡面反射の影響を排除できるという利点があった．提案手法の有効性は実験によって確かめられた．その後，提案手法を用いて試作された工業用途の医薬品アンプルハンドリングシステムについて紹介した．

今後は，本システムのアルゴリズムを高速かつロバストにすることによって現実の装置に役立てていく予定である．

2.5 まとめ

本章では，対象物体の三次元情報をレンジデータ形式で計測する手法について述べた．まず2.2では，複数のレーザー線状光を用いた高速高精度のレンジファインダの開発について述べた．光源を複数にすることで一度の撮影で計測可能な点は増加し計測時間は減少するが，光源の数を M にしても単純に $1/M$ 倍にはならず，符号化を考慮すると最大 $M/(2^M - 1)$ 倍になることを示した．また，雑音によるご対応を考慮すると，組合せ符号化の方が効率は落ちる ($M/M C_{[M/2]}$ 倍) が安全であることを示した．また，画像中から複数のレーザー線状光を抽出する処理を高速に行うために前処理回路を使い，前処理回路と PC で構成されるパイプライン構造で1フレーム=1/30秒で遅延なく処理できるシステムを実現した．

2.3においては，ヒューマノイドロボットに搭載されたステレオカメラを用いてステレオ相関法によって計測された複数の視点のレンジデータをヒューマノイドロボットの関節情報を用いて統合する研究について述べた．不整地の歩行のために複数の視点で観測したステレオカメラ画像から作成したレンジデータを関節角情報を用いてマージし，最終的に高さの閾値を与えることにより平坦で歩行可能な領域をみつけることが可能になることを示した．

2.4においては，光沢のある対象物をステレオ相関法を用いて三次元計測する際に問題となる鏡面反射による影響を除去する手法について述べた．この手法においては，三台のカメラを用いて三対のステレオ相関法処理をおこない，その結果を統合した．再投影した際，最も高い輝度を持つカメラ情報を鏡面反射によるものとみなし，残りの二つの画像によって復元された三次元情報を利用することで雑音のない三次元計測ができることを示した．また，その計測結果を用いて薬品アンプルの位置姿勢推定の実験も行い，よい結果を得た．

第3章 3次元曲面における主曲率ベクトル

3.1 はじめに

本章では、 C^2 連続性のある曲面を持つレンジデータに対して主曲率ベクトルを計算する安定した方法を提案する。最初に、主曲率ベクトルを計算する手法について説明し、次に実験結果を示し、最後に結果を解析する。

3.2 においては、提案手法の基本的な概念とアルゴリズムについて示す。3.3 においては、提案手法の検証を行うために誤差を加えた合成データに対して本手法を適用して主曲率ベクトルを計算した結果と、比較のために従来法で計算した結果を比較する。3.4 では、3.3 の結果をもとに本手法と従来手法の優劣について考察を行う。最後に、3.5 において本章のまとめを行う。

3.2 主曲率ベクトルの計算アルゴリズム

3.2.1 主曲率ベクトル

曲面上の一点における主曲率ベクトルとは、その点において主曲率が極大、極小となる接線ベクトルを意味し、二つの主曲率ベクトルは直交する性質を持つ。主曲率ベクトルは、例外を除いて曲面に存在し、二つの主曲率ベクトルとそれと直交する面の法線ベクトルは観測系に依存しない直交座標系を構成する。例外となる場合は、平面や球面などの全領域において主曲率値が接線方向によって変化しない曲面及び臍点（umbilical point）と呼ばれる局所的に主曲率値の極値が存在しない点である。

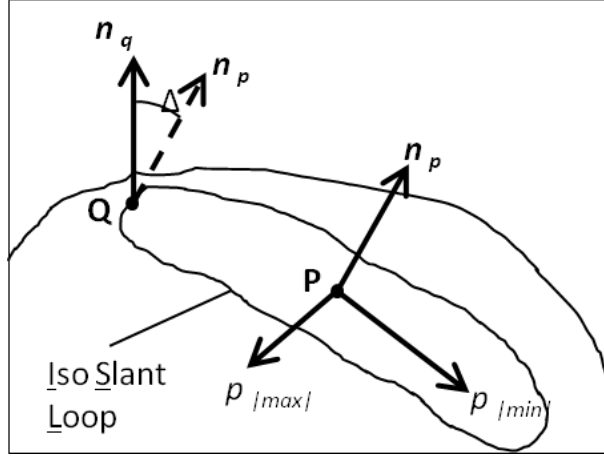


図 3.1: 等傾斜ループ (Iso-Slant Loop)

3.2.2 ISL 法

本節において提案する ISL 法では以下のようにこの主曲率ベクトルを計算する. なお, ISL とは, *Iso-Slant Loop* を意味し, 日本語では等傾斜ループと訳す.

図 3.1 に ISL の基本的な概念を示す. まず, スムーズな三次元曲面上の稠密な三次元点の距離データ点が二次元空間 (U, V) にマッピングされているものとする. 例えばレンジファインダなどで計測されたデータがこのような形態のレンジデータとなる.

各点における法線ベクトル $\mathbf{n}$ が計算されているものとする, 点 P に対する ISL 上の点 $\{Q\}$ は次のように定義される.

$${}^t\mathbf{n}_P\mathbf{n}_Q = c, (0 < c < 1) \quad (3.1)$$

ただし, $\mathbf{n}_P$ および $\mathbf{n}_Q$ は点 P および点 Q の正規化された法線ベクトルであり, c は定数である.

実際には, この条件を満たす点はレンジデータ上に存在しないため, ISL は式 3.2 を満たす点 $\{Q'\}$ の外周として再定義される.

$${}^t\mathbf{n}_P\mathbf{n}_{Q'} > c, (0 < c < 1) \quad (3.2)$$

一般的には上記の条件により定義される集合 $\{Q'\}$ は複数の閉曲線で囲われた領域の集まりになる. また, それぞれの領域内に孤立した $\{\bar{Q}'\}$ に属する点の領域が

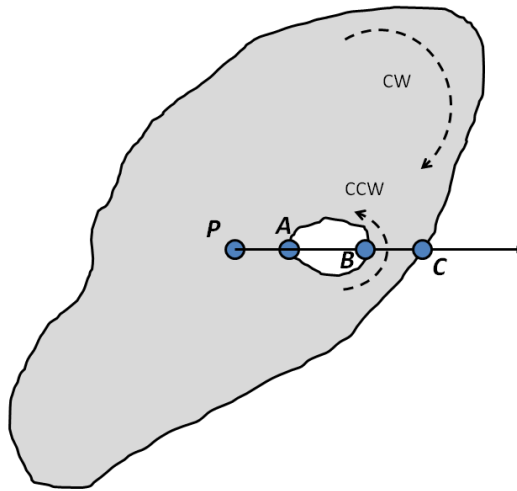


図 3.2: ISL 検出手順

存在する場合もある． ${}^t\mathbf{n}_P\mathbf{n}_P = 1$ が常に成り立つことから点 P 自身は必ず集合 $\{Q'\}$ に含まれるので，点 P が含まれる $\{Q'\}$ の領域が必ず一つ存在する．このような領域の境界線を点 P の ISL と定義する．

レンジデータ内の点 P に対する ISL を求める手順は以下のようなものである (図 3.2)．

1. 点 P から一方向に進み，式 (3.2) の条件をみたさなくなる境界点 A を見付ける
2. 点 A から式 (3.2) を満たす点と満たさない点の境界を追跡する．再び点 A に戻ってくるまで続ける．このループを ISL の候補とする．このとき，追跡は境界内が右側になるように進む．
3. ISL 候補上で右折の回数と左折の回数を調べ，もし右折の方が多ければこの閉曲線は時計回りであり，境界線は点 P の ISL と確定する．
4. もし左折の方が多ければ，この閉曲線は反時計回りであり，求める ISL ではなく領域 $\{Q'\}$ の中にある法線の角度が閾値を越える穴の境界線である．このとき，ISL 候補上で直線 PA の延長上で最も遠い点 B を開始点としてステップ 1 を繰り返す．

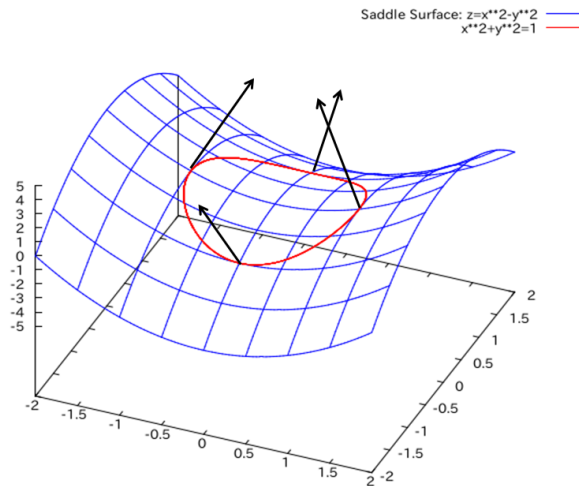


図 3.3: 鞍型曲面 $z = x^2 - y^2$

ISL の大きさは定数 c によって変化するが，一般にその形状は曲率の絶対値が最小となる方向に長く，最大となる方向に短くなる．

点 P 主曲率ベクトルを計算するときには，点 P における接平面に ISL 上の点を投影し，それらの点に対して固有ベクトルを計算することで主曲率ベクトルを求める．

3.2.3 鞍型曲面のための拡張

曲面のガウシアン曲率が正またはゼロの場合，すなわち凸面・凹面・凸錐面・凹錐面の場合には基本的な処理によって主曲率ベクトルを計算できるが，鞍型の場合には注意が必要となる．

図 3.3 に鞍型の曲面の例として， $z = x^2 - y^2$ を示す．原点における ISL を求めると，図 3.4 のような円形になる．実際には断面 $y = x$ 方向と $y = -x$ 方向の法曲率はゼロになるが，図に示すようにこの方向では法線の向きが ISL の接線方向をむき，中央の法線とねじれた関係にあるため，法線同士の内積を計算するとこの方向においても ISL の半径は等しくなり，その結果接平面に投影した ISL の像は円形になる．したがって，主曲率ベクトルはそのままでは計算できない．

上の例のように完全な円でなくても最大主曲率 ρ_{max} および最小主曲率 ρ_{min} の

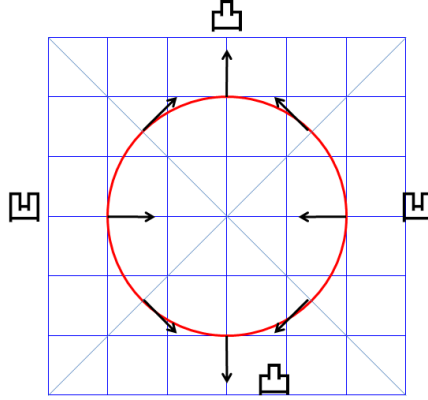


図 3.4: 鞍型曲面の ISL と法線

絶対値が非常に近ければ計算結果は不安定になる。

そこで、鞍型の局面においては、ISL 上の点から凸の部分の点および凹の部分の点を取り出し、どちらか片方のみを使って主曲率ベクトルを計算する。

すなわち、ISL の追跡時に ISL 上の点として登録される点において、次の変数 $sign$ を定義する。

$$sign = -(\mathbf{Q} - \mathbf{P})^T(\mathbf{n}_Q - \mathbf{n}_P). \quad (3.3)$$

ただし、 $\mathbf{P}$ および $\mathbf{Q}$ は対象点 P と ISL 上の点 Q の位置ベクトル、 $\mathbf{n}_P$ および $\mathbf{n}_Q$ は点 P および点 Q の法線ベクトルを示す。簡易的に $sign$ が正であればこの点は凹、負であれば凸であるとする。ISL 上の全点の中で $sign$ の符号が多い方の点を集め、それを使って主曲率ベクトルを計算する。

上記の方法で、ISL の形状が円に近い場合でも凹または凸の部分を使った主軸計算により主曲率ベクトルを安定に計算できる。また、鞍型ではなく ISL 上の全点の $sign$ の符号が正または負である場合においても単に ISL 上の全点が使用されるため、同じアルゴリズムが使用可能である。

3.3 実験

実験対象としたレンジデータは、カメラから 1.0[m] 離れた位置に置かれた径が 20[cm] $\times$ 10[cm] $\times$ 10[cm] におかれた楕円体の合成画像である。このモデルに 3 種類の標準偏差を持つランダムノイズ (0.0[mm], 0.5[mm] および 1.0[mm]) を与えた。画像のサイズは 256 $\times$ 256 である。曲面は回転体であるため、最大曲率に対応する曲率ベクトルは回転断面に含まれる方向となる。

このレンジデータに対して次の三種類の手法により主曲率ベクトルを計算した。

1. ISL: ISL に対して固有ベクトルを計算する。
2. QUADRIC: 点 P の近傍に対して二次曲面をあてはめる。
3. HYBRID: ISL の点に対して二次曲面を当てはめる。

なお、本章の実験においては、定数 c は点 P の近傍を通過する最大の ISL をあたえる値として動的に計算している。

実験により計算された主曲率ベクトルは曲面の形状から理論的に計算される主曲率ベクトル [30] と比較される。

図 3.5 に、三種類の雑音を与えられたレンジデータに対して三種類の手法で計算された主曲率ベクトルを示す。この図では曲率の絶対値が最大となる方向の主曲率ベクトルのみが表示されている。色は二次元の方向を示し、各図の左下に方向と色の対応を示す。正しい結果であれば、すべての点において右上（緑色）となる。 $\sigma = 0.0[mm]$ である上段の結果はどの手法でも計算結果は安定している。しかし、雑音が増すにつれ、HYBRID 方式と QUADRIC 方式では結果が不安定になるのに対し、明らかに ISL 方式のみが雑音に対してロバストである。

図 3.6 は、結果をより定量的に表している。このグラフは、それぞれの手法によりレンジデータから計算された各主曲率ベクトルと対応する真値との角度を求め、角度によりソートした結果を累積した結果である。横軸が角度 [rad]、縦軸が累積度数である。グラフは (a) が誤差 0.0[mm]、(b) が誤差 0.5[mm]、(c) が誤差 1.0[mm] をそれぞれ対象にした結果である。誤差 0.0[mm] の場合にはどの方式でも違いはほとんどないが、データに誤差があると HYBRID と QUADRIC においては誤差の影響を受けるのに対し、ISL の誤差は非常に小さいことがわかる。

3.4 考察

図 3.5 および図 3.6 の結果は、ISL の固有ベクトルを用いる方法が三個の方法のうちで最も雑音に対してロバストであることを示している。QUADRIC がもっとも悪く、HYBRID はその中間であった。図 3.6 からは、三種類の雑音レベルに対する曲線から ISL 方式はもっとも誤差の影響を受けにくいことがわかった。

従来の方式ともっとも大きな違いは、主曲率ベクトルを計算するときに使用する点の選択にある。従来方法では、通常、曲率あるいは主曲率ベクトルを計算する場合には、対象とする点の周囲に設けた固定サイズのウィンドウ内の点を使って計算される。しかし、提案した手法では、曲面の特性自体によって変形する ISL の主軸を用いる。HYBRID 法が QUADRIC 法よりも結果がよい結果をもたらしたことから固定ウィンドウよりも ISL の方が点の選択としては優れていることを示している。

従来法では、曲率あるいは主曲率ベクトルは法線ベクトルの微分として計算される。この計算においては、法線の微小変化を距離の微小変化で割るという小さい値同士の割算となるため、誤差の影響を受けやすい。一方、提案手法では、主曲率ベクトルのみを計算し、その過程で曲率の計算は必要としないため、計算において微分的な要素は存在しない。

従来法であってもウィンドウの大きさを大きくすればある程度ノイズの影響を回避可能であるが、使っている情報の局所性の問題や、二次曲面でないデータへの二次曲面のあてはめの誤差評価の問題が起きる。

式 3.2 における定数 c は雑音レベルあるいは曲面の曲率値によって変化する。レンジデータの雑音が多い場合には、 c を小さくすることで ISL を大きくする必要がある。そうしないと、誤差により ISL が分断されて正しい結果が得られない。一方、曲率の絶対値の最大値が小さく、平面に近い曲線の場合には c の値を大きくとり ISL の大きさを小さくする必要がある。そうしないと、ISL が大きくなってしまい、計算される主曲率ベクトルの局所性が保証されないためである。本章で使用するプログラムにおいては、注目点と ISL の最も近い点が離れすぎないように c を動的に変化させることで c がおおまかな曲率値を反映するようになっている。

特別な場合として、点 P のガウス曲率が 0 の場合、ISL が曲面の稜線にそって長く伸びる場合がある。このような場合には、ISL の形状は遠距離の形状に影響されてしまうため、ISL の長軸方向が曲率絶対値の最小方向と一致しなくなる。その

ような場合でも、ISL のうち近傍部分は信頼ができるため、たとえば点 P からみた ISL の最近点の接線ベクトルの平均値を曲率絶対値最小方向の主曲率ベクトルとみなすことが可能である。このようにして離れた曲面の形状の影響を軽減することが可能である。

3.5 まとめ

本章では、 C^2 連続性のある曲面を持つレンジデータに対して主曲率ベクトルのロバストな計算手法として 3.2 において ISL という新しい概念を提示し、ISL を用いて主曲率ベクトルを計算するための新しい手法を提案した。

3.3 においてこの手法は従来法よりも雑音に対してロバストであることをシミュレーション実験によって示した。提案手法と二次曲面あてはめおよび ISL 上の点列に対する二次曲面あてはめ実験を三通りの雑音を加えたデータに対して実験し、ISL 上の点に対して主軸を計算する提案手法が最も雑音に対してロバストであることを示した。

3.4 において、ISL に対して二次曲面をあてはめて計算した実験結果から本手法の利点の一つは ISL という点の選択方法にあることを示した。

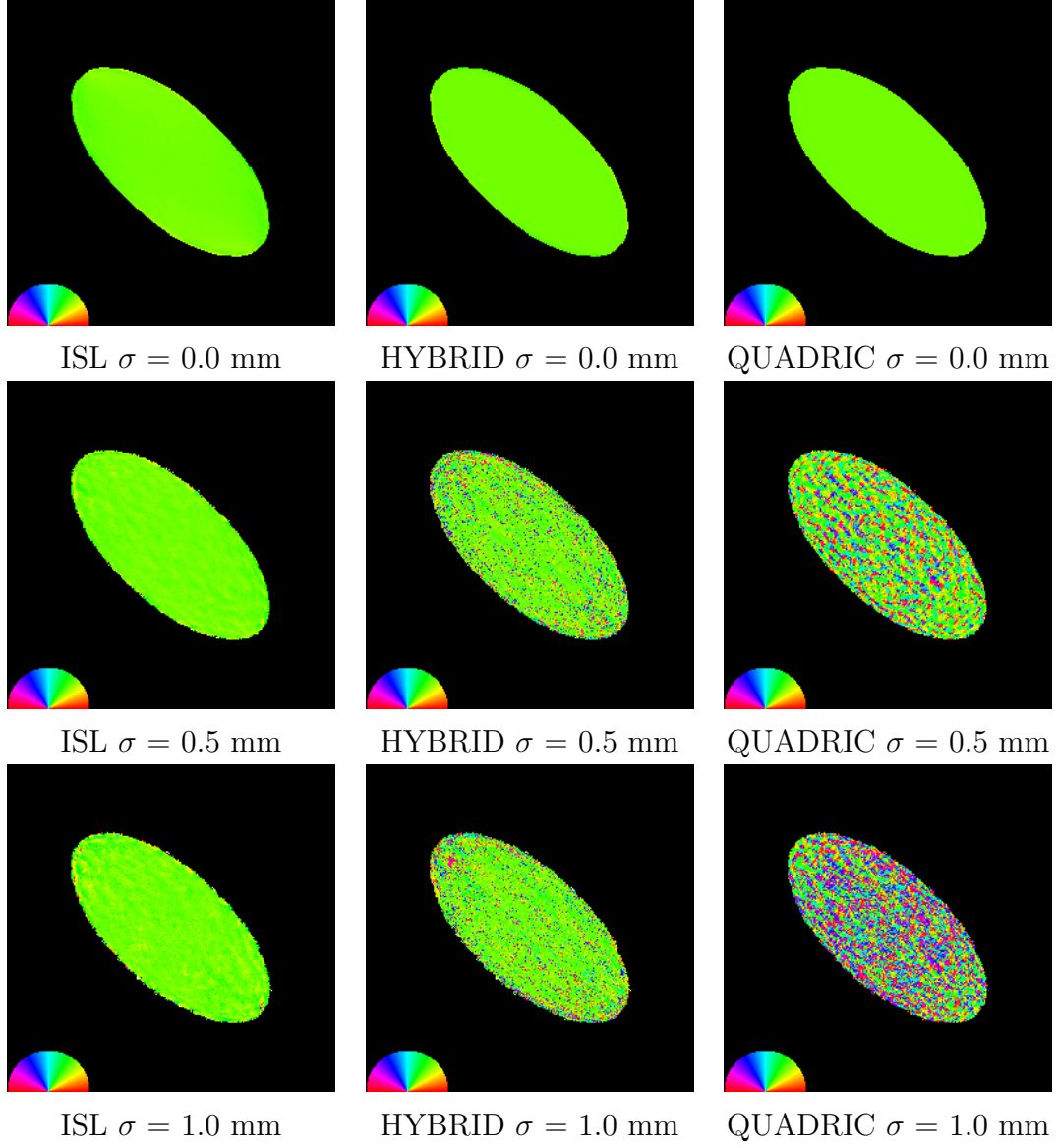
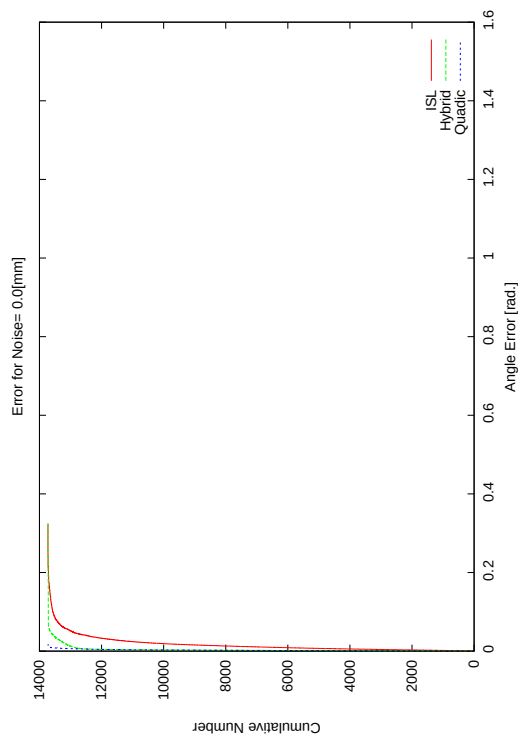
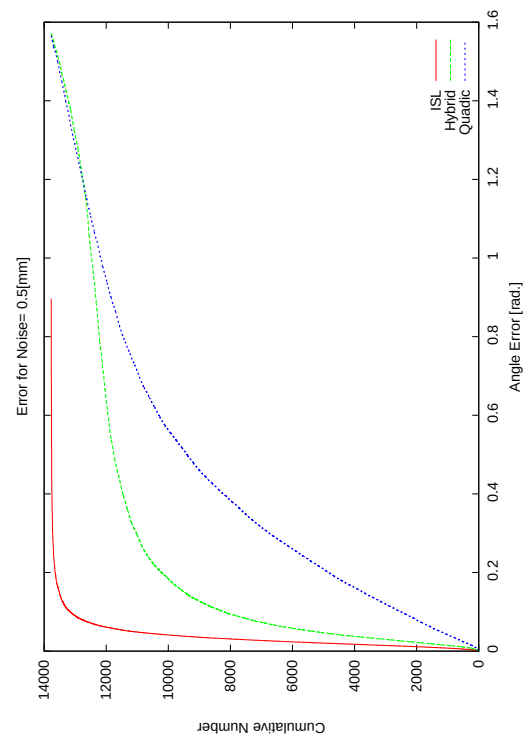


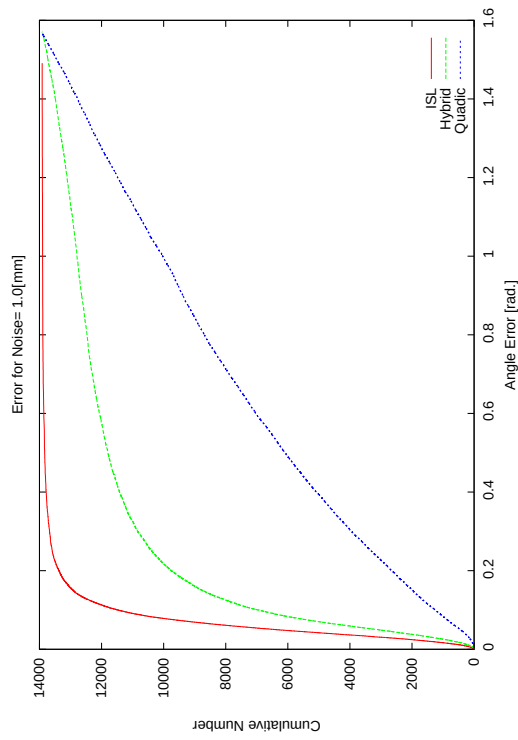
図 3.5: 主曲率ベクトルマップ



(a) $\sigma=0.0[\text{mm}]$



(b) $\sigma=0.5[\text{mm}]$



(c) $\sigma=1.0[\text{mm}]$

図 3.6: 角度による誤差累積度数

第4章 主曲率ベクトルを利用したレンジデータの曲面表現

4.1 はじめに

本章では，主曲率ベクトルを利用し，レンジデータを構造化するため曲面表現作成の提案を行う．

その第一のステップとして，主曲率ベクトルと曲面の型の不連続性を利用したセグメンテーションの方法について述べる．4.2 においては ISL を用いて主曲率ベクトルと曲率を計算する手法について述べる．4.3 においてはマージ処理において用いられる多値境界線画像について述べる．4.4 においてはマージ処理の手順について述べる．4.5 においては実験の結果が示される．

さらに，分割された滑らかで一様な曲面に対して曲率ベクトルを利用して曲面パッチを形成する方法について述べる．4.6 においては，主曲率ベクトルの視点非依存性を利用するため，曲率線による曲面パッチのための物理的特性に依存した格子点を形成する方法について述べる．その後，4.7 において実際のレンジデータに対して処理を行った実験結果を示し，4.8 において考察を加える．そして 4.9 においては本章をまとめる．

4.2 主曲率ベクトルによる主曲率および曲面の型の計算

ISL 法を用いて計算された主曲率ベクトルを使って，曲面の主曲率を計算する．図 4.1 にその計算方法を示す．あらかじめ計算された主曲率ベクトルと法線ベクトルによって張られる平面と曲面の交差する曲線に対し，円をあてはめることで曲率を計算する．曲率の符号はあてはめた円の中心が点 P からみて法線ベクトル n 方向にあるかどうかにより判定する．なお，本論文においては曲率値の符号として凸の場合に負の符号，凹の場合に正の符号を与えることとする．計算された曲

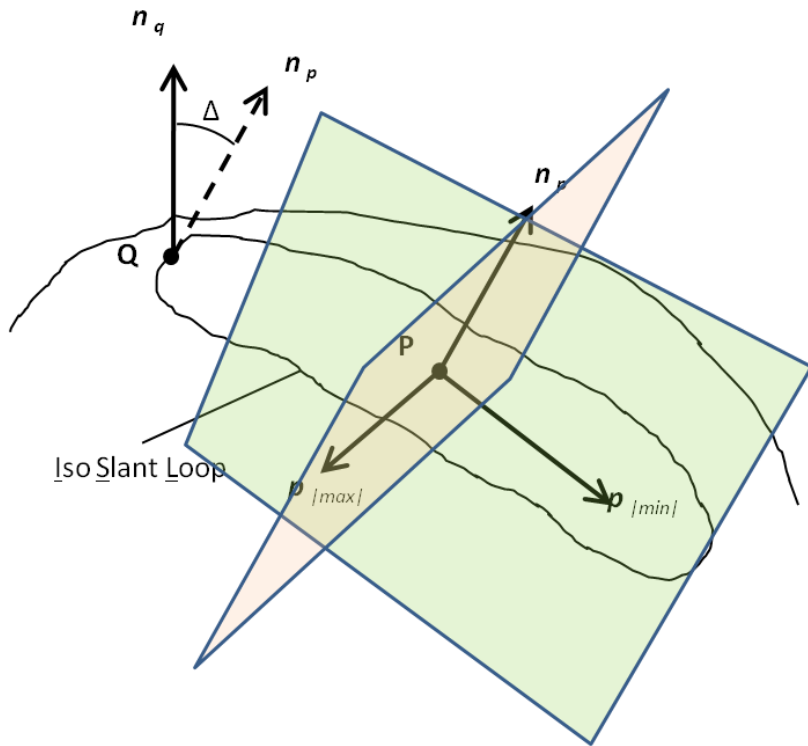


図 4.1: 主曲率計算

率のうち、符号も含め最大のものを最大主曲率 ρ_{max} とし、最小のものを最小主曲率 ρ_{min} とする。

次に、各点の曲面の型を最大および最小主曲率値を使って判定する。曲率の絶対値がゼロになることは実際のレンジデータから計算される曲率ではありえないので、曲率をゼロとみなす値 ρ_0 を与える。

これを用いて、表 4.1 のように曲面の型を分類する。すなわち、

凸面 (Convex)) $\rho_{min} < \rho_{max} < -\rho_0$

凸錐 (Convex Cone) $\rho_{min} < -\rho_0 < \rho_{max} < \rho_0$

鞍面 (Saddle) $\rho_{min} < -\rho_0 < \rho_0 < \rho_{max}$

平面 (Flat) $-\rho_0 < \rho_{min} < \rho_{max} < \rho_0$

凹錐 (Concave Cone) $-\rho_0 < \rho_{min} < \rho_0 < \rho_{max}$

凹面 (Concave) $\rho_0 < \rho_{min} < \rho_{max}$

となる．平均曲率の符号により鞍面を二つに分類する方法もあるが，ここでは同じものとした．

表 4.1: 曲面の型

		ρ_{max}		
		凸 −	0	凹 +
ρ_{min}	凸 −	凸面	凸錐	鞍面
	0	NA	平面	凹錐
	凹 −	NA	NA	凹面

4.3 多値境界線画像

レンジデータの各点に対して法線ベクトル，主曲率ベクトルおよび曲面の型が与えられた後，境界線画像を生成する．この画像はレンジデータと同じサイズで，各画素には距離，法線ベクトル，主曲率ベクトルおよび曲面の型の不連続性を示すビット列を持っている．距離の不連続性のビットは隣接点の間の距離が閾値を越えるときに立ち，法線ベクトルおよび主曲率ベクトルの不連続性ビットは隣接するベクトルの角度が閾値を越えるときに立つ．曲面の型のビットは異なる型の間で立つ．

不連続性には信頼性のレベルがあり，最も信頼性が高いものが距離であり，ついで法線ベクトル，主曲率ベクトル，最も低いものが曲面の型である．信頼性の低い特性ほど後の段階で計算されるものである．これは，あとのものほど他の特性の誤差などに依存するためである．

ひとつの画素に複数の不連続性ビットがある場合には，最も高い信頼性のもので評価することにする．

この境界線画像は 4.4 におけるマージ処理過程のための最初の初期画像になる．

4.4 マージ処理過程

境界線画像は大域的な曲面の性質を反映しない多くの小さい領域を持っている場合があるため、最初にそれらのマージして削除する。本章では、幅の狭い領域を局所的なノイズ領域とみなし、マージ対象とする。こういう以下では領域を「小領域」と呼ぶことにする。

以下に、4.3で作成した境界線画像のマージ手順を示す。

1. 前処理

短い孤立エッジを消去し、境界線を細線化する。

2. 領域リストの作成

境界線画像のラベリングを行い、領域リストを作成する。リストの各要素は領域のパラメータを持つ。領域の幅も計算され、リストは領域の幅によってソートされる。

3. テクスチャ領域のマージ

境界線画像には小さな領域同士が隣接している可能性がある。こういった領域群は、局所的にいくつかの特性が頻繁に変化するエリアであるとみなせる。このようなエリアの曲面の構造を解析するのは簡単ではなく、またあまり意味はない。したがって、ここでは、こういった領域の集合をテクスチャ領域と呼び、ひとつの領域として扱う。

具体的には、二つの小領域が隣接している場合、間にある境界線を削除し、マージされた領域に「テクスチャ」のマークをつける。

この処理が終了した段階で、境界線を共有する小領域同士は存在しなくなる。

4. 小領域のマージ

小領域のマージ処理は、最も小さい領域から始め、小領域がなくなるまで行う。

まず、それぞれの小領域 R_S に対し、隣接している領域のリスト $\{R_0, R_1, \dots\}$ を作成する。次に、各隣接領域 R_i と R_S の間の境界線上の点を調べ、各ピクセルについて不連続性のビットごとに出現回数を計数する。

図4.2に計数の例を示す。ここで、 R_S が対象の小領域であり、領域 $\{R_0, R_1, R_2\}$ に隣接している。表は三個の隣接領域に対して二つのレベルの不連続性ビッ

トの数を示している．二個より多い領域に隣接している境界点（分岐点）はカウントしない．この例では，濃い色の画素が高い信頼性を示している．

計数後，表から最も長い最も低い信頼性の点をもつ境界線を探す．この例では， R_S との境界線が最も長い領域は R_2 であるが，境界点の信頼性が高いため排除される．低い信頼性をもつ境界点を最も多く持つ R_0 がマージ先の領域として選択される．

最終的にマージ先の領域と小領域の間の境界線が除去され，対象小領域はマージ先に統合される．小領域一つについて隣接する一つの領域のみがマージされるため，他の領域のトポロジカルな関係は保存される．

5. 後処理

短い孤立線分を除去し，境界線を細線化する．

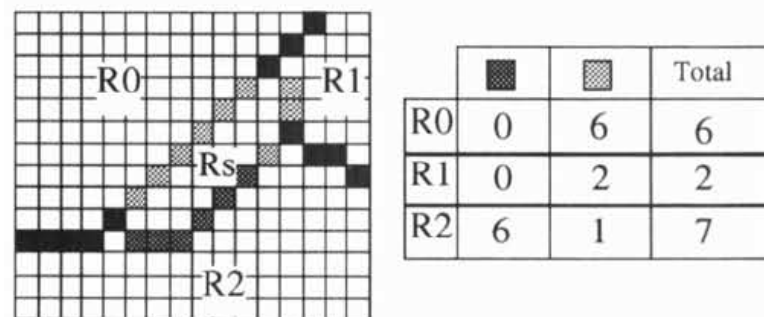


図 4.2: 小領域マージ例

4.5 セグメンテーション実験

この節では，実際のレンジデータに対してセグメンテーションを行った結果を示す．使うデータは円柱が貫いた円柱と，その下にある箱，そしてアジサイの造花である．円錐は約 20[cm] の高さがある．

データはレーザレンジファインダで計測したものである [59]．

図 4.3 は，データを不連続性によって分割した初期の境界線画像である．境界線の濃淡は異なる境界点の信頼性を示している．雑音による小領域がどれだけできるかは，レンジデータにおける実際の雑音の程度と，不連続性を判定するとき

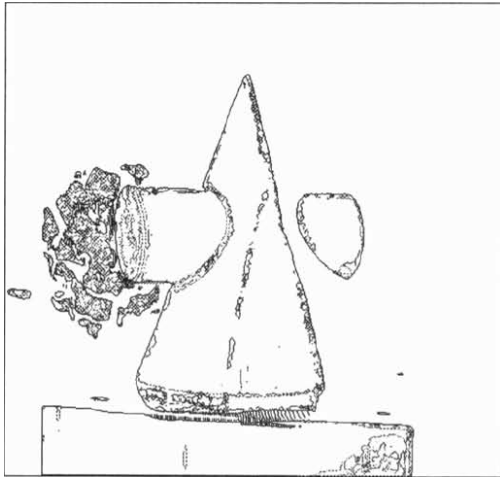


図 4.3: 境界線をつけたレンジデータ

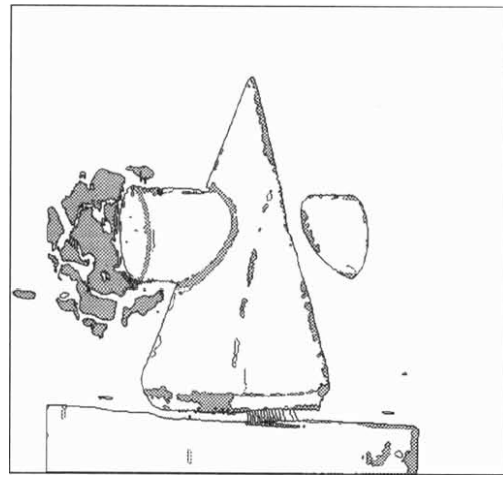


図 4.4: テクスチャ領域のマージ

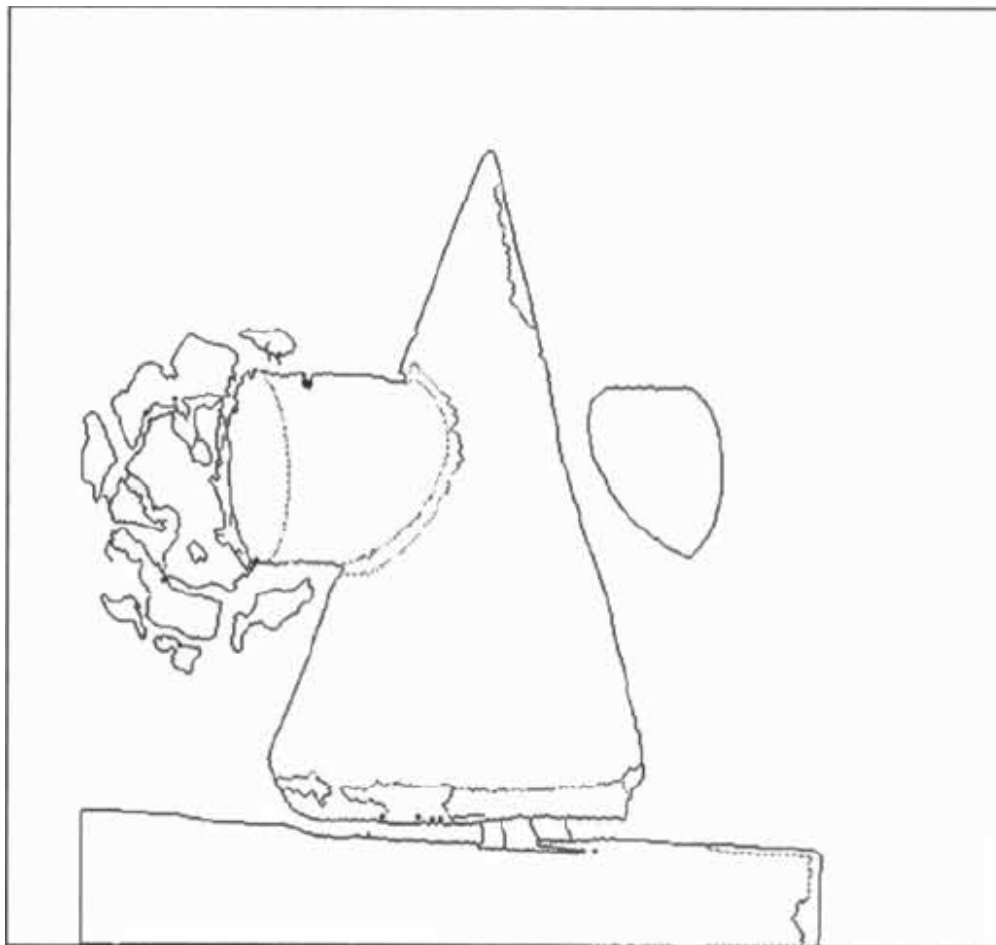


図 4.5: マージ結果

使用する閾値に依存する．この画像では閾値が境界線の候補をなるべく多く残すように選ばれているため，雑音が多いように見えている．

例えば，円錐部の中央にある細長い領域の境界線は曲面の型の不連続性を示す点によって構成されている．この領域の外側の領域は凸柱型であり，内部は平面である．この違いは，4.2において示した曲率がゼロであるかどうかを判定する閾値によるものである．この閾値が排除されるように閾値が変更されれば，円柱の端部や箱のような本来平面である領域がより乱雑になる．

図4.4はテクスチャ領域のマージ結果を示している．テクスチャ領域は灰色の領域で示している．円柱の端部のように，真の幾何学的不連続点のそばに主曲率ベクトルの不安定性による不連続点があるような場合には，細長い連続した領域が真のエッジに張りつくように発生する傾向がある．この連続した領域群はテクスチャ領域のマージにより一つの幅の狭い小領域となり，あとの処理でさらにマージされることになる．

図4.5は，小領域マージの結果を示している．ほとんどの雑音による小領域は除去され，残った大きな領域は曲面の形状を保存している．円柱部と円錐部の間にある細長い領域は保存されているが，これはこの領域の幅が使用した閾値（この実験では8画素）の幅よりわずかに大きかったためであった．この領域の型は凹鞍型であり，曲面の解釈としては正しいものになっている．この領域は曲面の型の不連続性により正しくセグメンテーションされていることがわかる．

4.6 曲率線ネットの形成

4.6.1 曲率線ネットのデータ構造

主曲率ベクトルは対象点近傍の幾何学的な特性しか表さない．そこで，曲面の大局的な構造を表すために，接線が常に主曲率ベクトルと一致するような曲線（曲率線）を導入する．任意の点において最大最小曲率に相当する主曲率ベクトルは互いに直交するので，曲率線はその点において直交する二本の曲線となる．最初に引いた曲率線を適度な間隔で分割し，更に格子状のネットワークを曲面上に生成する．格子の経線方向と緯線方向はそれぞれ最大曲率の主曲率ベクトルと最小曲率の主曲率ベクトルの方向と一致する．

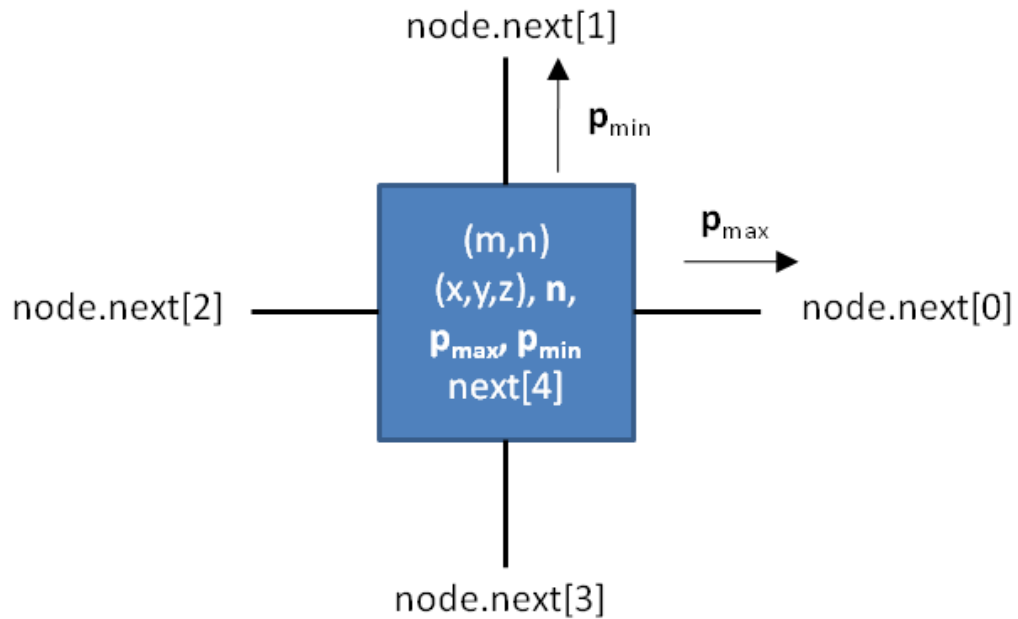


図 4.6: ノード構造体

このような格子状のネットを物体表面の3次元データにフィットさせることにより、3次元データの方向依存性のない四辺形パッチが得られる。

このネットは、ノードを表す構造体により構成される（図 4.6）。構造体のメンバのうち、主なものを下に示す。

- u, v : 二次元マップ上のアドレス
- m, n : 格子番号
- dot : 三次元データへのポインタ
- $norm$: 法線データへのポインタ
- $curv$: p_{max} データへのポインタ
- $cmax, cmin$: 方向をそろえた最大最小曲率ベクトル
- $next[4]$: 隣接ノードへのポインタおよび属性

このうち, dot , $norm$ および $curv$ はあらかじめ各画素に対して計算してあるものとする.

主曲率ベクトルの極性は物理的には意味がないが, ネットワークを構成する便宜上, 同じ曲率線上に存在するノートの主曲率ベクトルの向きはそろっていることにする. また, p_{max} , p_{min} および法線ベクトル n の間に常に

$$p_{max} \times p_{min} = n \quad (4.1)$$

の関係が成り立つように極性を与える. ただし, 法線ベクトル n はすべて物体の外方向を向いている.

m , n は格子番号であり, m は p_{max} の正方向, n は p_{min} の正方向を向いている. 1 次近似のネットを形成するときの開始ノードを $m=n=0$ とする.

next は隣のノードへの接続関係と, もし接続しているときにはそのノードへのポインタをもつ. 各要素はそれぞれ決まった方向の接続関係を表す. 四つの方向には図 4.6 のように 0~3 の番号が与えられている.

4.6.2 ネットの 1 次近似

上で述べたノートが格子上に並ぶように位置を決定する. そのために, 1 次近似としてラフな格子点の座標を以下のようなアルゴリズムによって求める.

- (1) 開始点 ($m=n=0$) を定める.
- (2) すべてのノートを調べ, 未探索のリンクを探す. このとき, 最小番号のノード (i_0) における最小番号の方向 (j_0) を返す.
- (3) ノード i_0 における (m_0, n_0) 座標から方向 j_0 に隣接する被探索ノードの座標 (m_1, n_1) を求める. このノードは未探索であるのでノードリストにはまだ存在しない.
- (4) すべてのノードから, (3) で求められたノードに隣接するノードを探す. このようなノードは最多で 4 個存在する.
- (5) (4) で求まるノードの接続形態によって以下のように新しいノードの候補を求める. 以下の処理は (U, V) の二次元空間で行う.

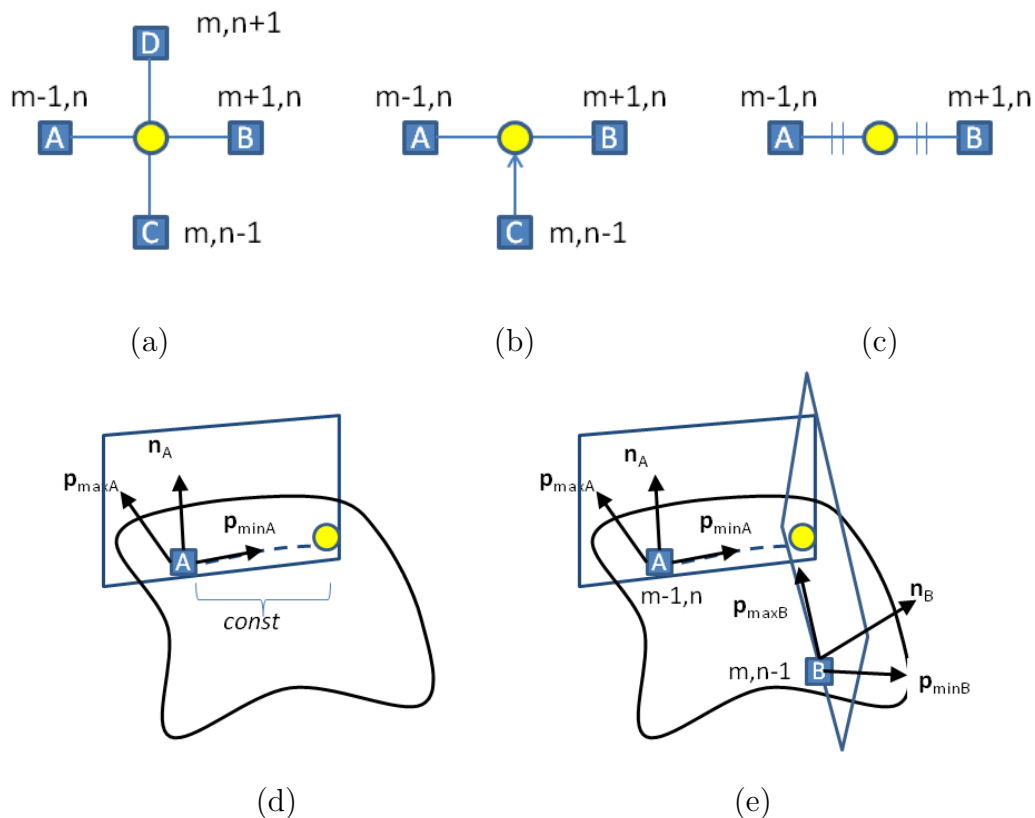


図 4.7: ノード候補の追加

- (5)-(1) ノード数4の場合：図 4.7(a) のように向かい合うノードを結ぶ線分の交点をノード候補とする。
- (5)-(2) ノード数3の場合：図 4.7(b) のように対向するノードの中点をノード候補とする。
- (5)-(3) ノード数2で対向する場合：図 4.7(c) のように対向するノードの中点をノード候補とする。
- (5)-(4) ノード数2で直交する場合：図 4.7(d) のように (4) で得られた隣接ノードを A, B とする。A における主曲率ベクトルおよび法線ベクトルがなす平面と曲面がなす交線に沿ってトラッキングして、B における同様な平面を横切る点をノード候補とする。
- (5)-(5) ノード数1の場合：図 4.7(e) のように隣接ノードを A とすると、A における主曲率ベクトルと法線ベクトルがなす平面に沿ってトラッキン

グし、一定の3次元距離だけ離れた点をノード候補とする。

(6) (4) で得られた隣接ノードと新ノード候補の間で接続条件を調べる。接続するための条件は、

(i) p_{min} 同士の角度差が一定以内

(ii) ノードを結ぶ線分上に不良点 (点データまたは法線データがない点) がない

の二つである。接続条件を満たした隣接ノードが一つ以上あれば新ノードを候補点に作り、隣接ノードに接続情報を記録する。

(7) (2)~(6) を未探索リンクがなくなるまで繰り返す。

4.6.3 リラクゼーション

4.6.2 で生成したネットはラフな近似であるので、各ノードの (u, v) 座標を移動してより正確なネットにする。

このリラクゼーションにおいては、次の3種類の力を各ノードに加え、変位を計算する。

(1) 隣接ノード間のリンクベクトルと主曲率ベクトルの角度差による力

(2) リンクの平均長さを適当に安定させる力

(3) ネットの曲面に対するオフセットを安定させる力

このうち、(2) および (3) はネットの1段がつぶれたりネット全体が曲面に対して平行移動するのを防ぐための力で、主曲率ベクトルによる拘束だけでは不足な部分を補うためのものである。ここでオフセットとは、ネット内に一つ定義された基準ノードが初期状態から移動する距離を意味する。以下では本質的な (1) のみについて述べる。

隣接ノードを結ぶリンクは二つのノードの三次元位置のみによって定まる。この二ノードは同じ曲率線上にあることが期待されるが、一般にリンクの方向は主曲率ベクトルと一致しない。図 4.8 にその例を示す。(a), (c) の状態ではそれぞれ片方のノードにおいて曲率ベクトルとリンクが一致しているが、二つのノードは

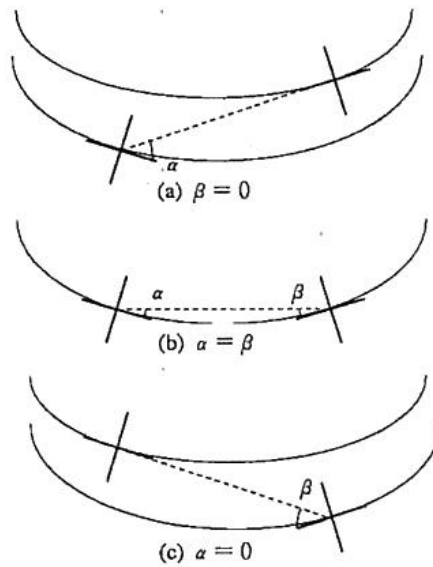


図 4.8: 曲率線とリンクの関係

同一曲率線上になく，(b) よりも望ましい状態ではない．そこで，すべてのノードにおいて (b) の状態に安定に収束する条件を考える．単純に曲率ベクトルとリンクの方向を小さくするように変位を与える方法 (単純変位法) だと，(a)，(b)，(c) の間で不安定になる．リンク両端のノードにおいて曲率ベクトルとリンクのなす角 α ， β が対称になるように変位を与える計算方法 (対称変位法) は安定性の点でより優れている．従って，ここでは後者の方法を採用している．具体的には， α と β の差を求め，それが小さくなるようにリンク AB と垂直方向の変位を A および B に与える．

このようにして計算される変位をすべてのノードに対して与える．更に，この操作を変位の総和が十分に小さくなるまで繰り返す．また，変位を与えた結果，隣接ノード間の状態が 3.2 で述べた接続条件を満たさなくなれば，接続情報を書き換えながら処理を続行する．この処理は次のようなアルゴリズムで表せる．

4.7 曲率線ネット構築実験

実際のレンジデータ (図 4.9) に対して実験を行った．これは，円錐を円柱が貫通した立体の三次元点である．画素数は 512×480 で，1 画素の間隔は約 1 [mm] である．このデータに対してスムージングを行ってすき間をなくし，次に各画素に

```

while (変位の総和が十分大きい){
  for 各リンク
    両端のノードへの変位を計算し，積算する
  for 各ノード
    変位に従って移動する
  for 各リンク
    接続条件を調べ，不適當なら切断する
}

```

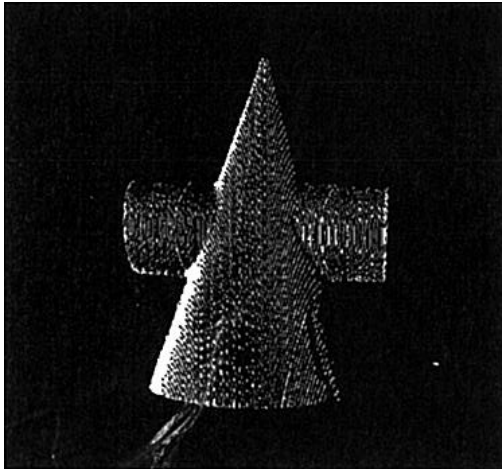


図 4.9: 三次元測定点

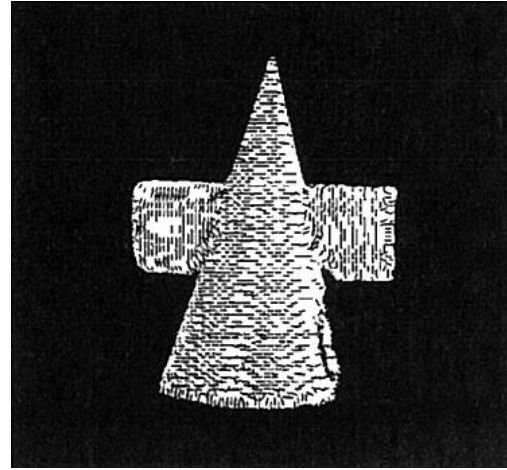


図 4.10: 最大絶対曲率値方向の主曲率ベクトル

対して法線を求めた．

図 4.10 は 3.2 に述べた方法で計算された最大絶対曲率値方向の主曲率ベクトル p_{max} である．円錐，円柱の母線と垂直な方向が得られている．

図 4.11(a) は円錐部のデータに対してネットの 1 次近似を求めたもの，図 4.11(b) はこのネットにリラクゼーションを行って収束した結果である．図で×印のあるノードが開始ノードを表す．この例では，リラクゼーションの結果，縦方向の段が 1 段減っている．これは，リンクの平均長さの拘束力により最下段のノードが曲面の外に掃き出された結果である．

図 4.12，図 4.13 は同様に両側の円筒部分に対して曲率線ネットを張った結果である．

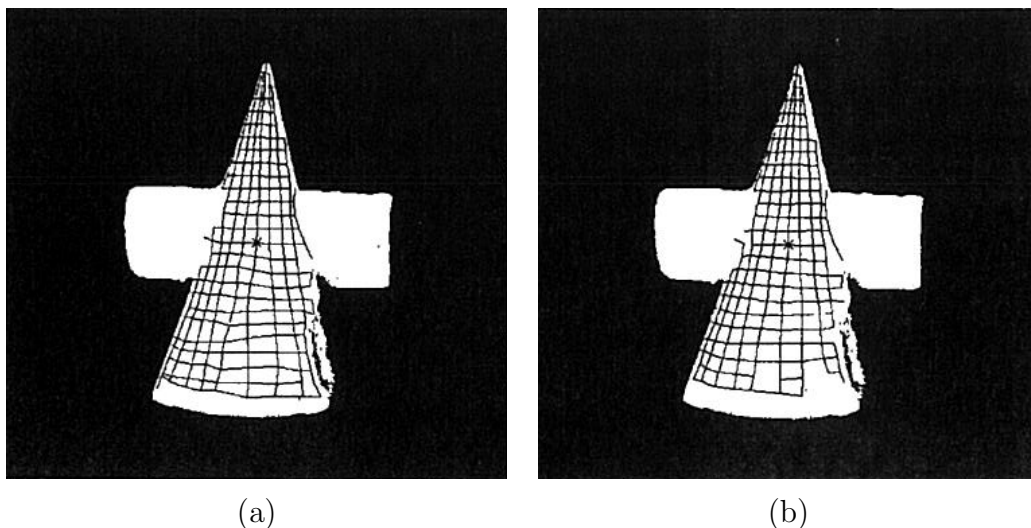


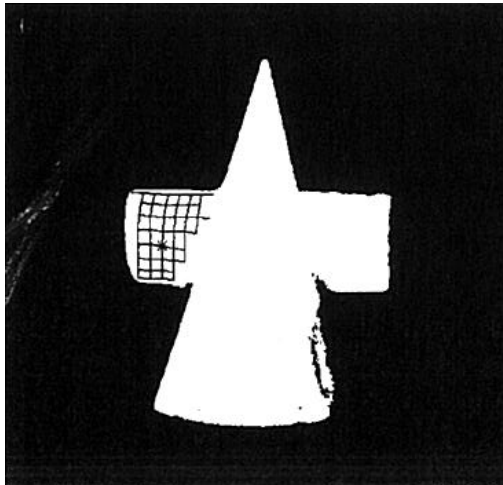
図 4.11: 円錐部曲率線ネット

4.8 考察

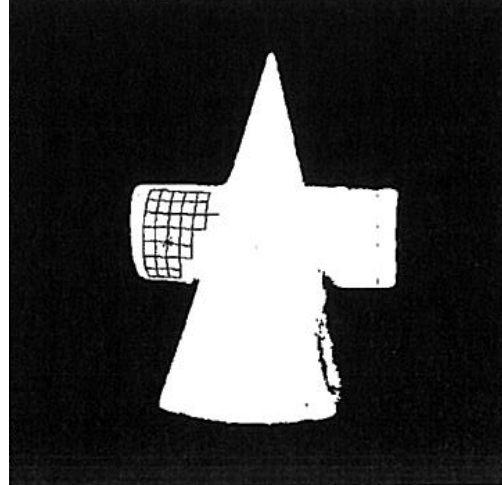
4.6では、1次近似ネットを形成する際に曲率ベクトルを利用している．ここで実験に使用した円錐や円柱ではこのような手間をかけずに例えば正方形の格子を使用しても同様の結果が得られると考えられる．しかし、一般に曲率線ネットはトポロジカルに同一にはならないのでそのような格子は限られた曲面にしか使用できない、例えば、だ円体の先端部分が見える場合やトーラスの場合はそうした例外である．前者では最大曲率線が特異点の周囲のループとなり、また後者では最小曲率線がループとなる．これらの対象に対しては、1次近似ネットを形成する際に同じ曲率線上のノードがループ状になっているかどうかのチェックを行わなければならない．ループになっていると判定されればその曲率線は両端がつながるような隣接情報をもつ必要がある．

図 4.11～4.13 ではリラクゼーションの結果、いくつかのリンクが切断されている．現在はいったん切断されたリンクを回復する処理を行っていないが、そのような機能を加えることで改善されると思われる．また、同様に変形の結果新しいノードを追加する必要がある場合も考えられる．

4.6. で述べたように、現在のプログラムはノード間距離が一定になるような拘束条件をネットに与えている．しかし、もう一つの考え方として、ノード間の法線変位が一定になるような拘束も考えられる．そのような拘束によってリラクゼー

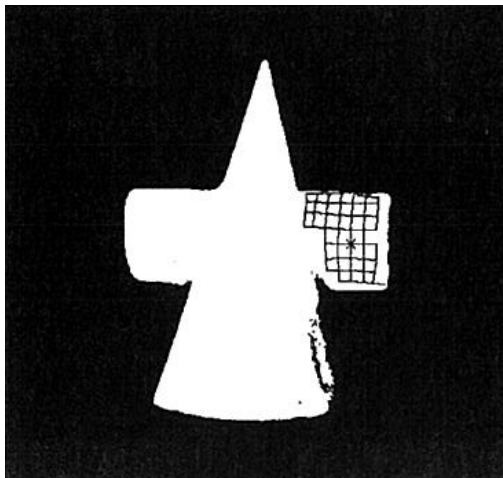


(a)



(b)

図 4.12: 円柱部その 1($u=160$)



(a)



(b)

図 4.13: 円柱部その 1($u=362$)

ションを行うと、実験で使用したような円錐や円柱では最小曲率線の母線のみが残る。また、通常の曲面においても最大曲率線の数減り、それぞれのパッチは最小曲率方向に伸びた形になる。どちらの方法が適しているかは今後の研究課題である。

本研究において提案した手法を用いて主曲率ベクトルを求める計算にはループを探索する操作があり、固定サイズのウィンドウ内のデータのみを使用したアルゴリズムよりも計算時間がかかる可能性がある。現在、約6万点のデータに対して実行するとワークステーション上で数分かかる。しかし、それぞれの主曲率ベ

クトルを求める過程は独立しているため、処理は容易に並列化が可能である。

4.9 まとめ

本章では、主曲率ベクトルを利用した、レンジデータを構造化するための曲面表現の提案を行った。

その第一のステップとして、レンジデータを分割するための手法が提案された。本手法では、スムーズに連続しているが異なる特性をもった二つの曲面を分割することができる。本手法では主曲率ベクトルの計算手段として ISL 法を用いている。このロバストに主曲率ベクトルを計算できる手法により、実測した雑音を含むレンジデータから従来法（二次曲面近似）によっては計算が困難な最大と最小曲率を計算することができた。

セグメンテーションの初期に作成された境界線画像は各画素がどういう理由で境界点になったかの情報を持っており、その情報が境界線のうちの境界線がもっとも重要でなく消去可能かを決定するのに役立っている。

提案手法は実測したレンジデータに対して実験され、良い結果を得た。

第二のステップとして、最大最小曲率線を用いて滑らかな均一の曲面の形状を表現する手法について述べた。まず主曲率ベクトルを精度良く求めるために等傾斜ループを用いる方法について述べた。この方法は、実験によりその有効性が確かめられた。次に、得られた主曲率ベクトルから格子状のパッチを形成するためにノード構造体を定義し、1次近似ネットを形成する方法について述べた。更に、1次近似ネットをリラクゼーションにより滑らかに整合性が保たれるように変形する方法について述べた。最後にこれらの方法を実際の三次元データに対して実験した。その結果、曲面の形状を反映したネットが形成されることが示された。

本研究におけるアルゴリズムはまだ開発途上にあり、(1) リラクゼーションの際にネットを構成するノードやリンクを増加するアルゴリズム、(2) 曲率線がループを形成するときの処理、(3) 曲率線距離拘束の検証、が課題として残されている。また、その後は、(4) パッチを滑らかに接続する内挿表現の検討、(5) 曲面同士の照合における曲率線ネットワークの参照アルゴリズム、(6) 複数の曲面や平面で構成される物体の照合、などの研究を進めていく予定である。

将来の目標としては、本手法を使ってレンジデータから自動的に形状モデルを

構成するプログラムを作成することを目指している。そして作られたモデルは物体認識システムのデータベースとして利用する予定である。

第5章 主曲率ベクトル分布による管状曲面の位置姿勢推定

5.1 はじめに

本章では、3において提案された主曲率ベクトルの統計的な情報を利用した管状曲面の位置姿勢推定方法を提案する．対象とする曲面は，局所的な特徴がほとんどないが，主曲率ベクトルに着目すると幾何学的な分布をもった曲面であり，それを利用した位置姿勢推定が可能である．

5.2では，提案手法の基本原理を述べる．ここでは，軸が平面上にある管状曲面の主曲率ベクトルが同一平面上にあることを述べ，逆に未知の姿勢にある管状曲面の主曲率ベクトル分布により軸の存在する平面の法線を決定できることを述べる．5.3では，エルボーを対象にした具体的なアルゴリズムについて述べる．主曲率ベクトルを計算する際には，吉見らが提案したロバストな計算法 [60] を用いている．また，この節では，対称図形であるエルボーにおいて生じる方向の不定性の回避方法についても述べる．中心軸平面の法線推定および中心軸平面内の回転角推定においてそれぞれ二通りのアルゴリズムを提案する．5.4では，実際の距離画像による実験結果を示している．まず，さまざまな角度をもった立ち状態と倒れ状態の位置姿勢推定結果を示し，その精度を前節で提案した各手法について評価する．その後，より一般的な姿勢の対象物に対しても実験を行い，端面が観測方向を向いていない場合については安定した結果を出すことを示す．また，山積み状態のエルボーに対する推定結果も示す．その後，実験結果の考察を行う．5.5では，本章の内容を総括する．

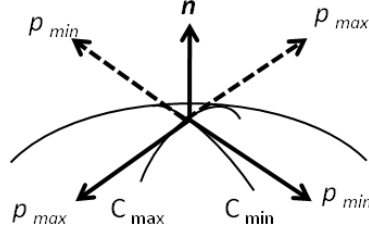


図 5.1: 主曲率フレームの不定性

5.2 中心軸平面と主曲率ベクトルの基本理論

5.2.1 主曲率フレームの不定性

曲面における主曲率ベクトルの方向の符号は意味を持たないが、3.2 で述べた主曲率ベクトルの直交性から二つの主曲率ベクトルと法線ベクトルが次の式を満たすものという拘束条件を与えることができる。

$$\mathbf{n} = \mathbf{p}_{max} \times \mathbf{p}_{min}, \quad (5.1)$$

ここで、 $\mathbf{n}$, $\mathbf{p}_{max}$, $\mathbf{p}_{min}$ はそれぞれ法線ベクトル，最大主曲率に対応する主曲率ベクトル，最小主曲率に対応する主曲率ベクトルとする．この式で，法線を曲面の外側を向く方向に固定した場合でも， $\{\mathbf{n}, \mathbf{p}_{max}, \mathbf{p}_{min}\}$ が存在すれば，同時に $\{\mathbf{n}, -\mathbf{p}_{max}, -\mathbf{p}_{min}\}$ は上の関係式を満たしてしまう．そのため，曲面上の同じ点に二つの主曲率フレームが存在可能という不定性がある（図 5.1 参照）．なお，本稿では，凸形状を負の曲率，凹形状を正の曲率で表す．また，法線ベクトル及び主曲率ベクトルはすべて単位ベクトルである．

5.2.2 管状曲面の主曲率分布

管状曲面として，径 r が一定でかつ断面の中心軸が平面上にある曲面を考える．以下では，この平面を中心軸平面と呼ぶ．この曲面は，中心軸が直線となる部分と曲線となる部分で，円柱とトーラスに分解することができる（図 5.2）．ただし，中心軸平面内における中心軸の曲率半径の最小値が r より大きいものとする．

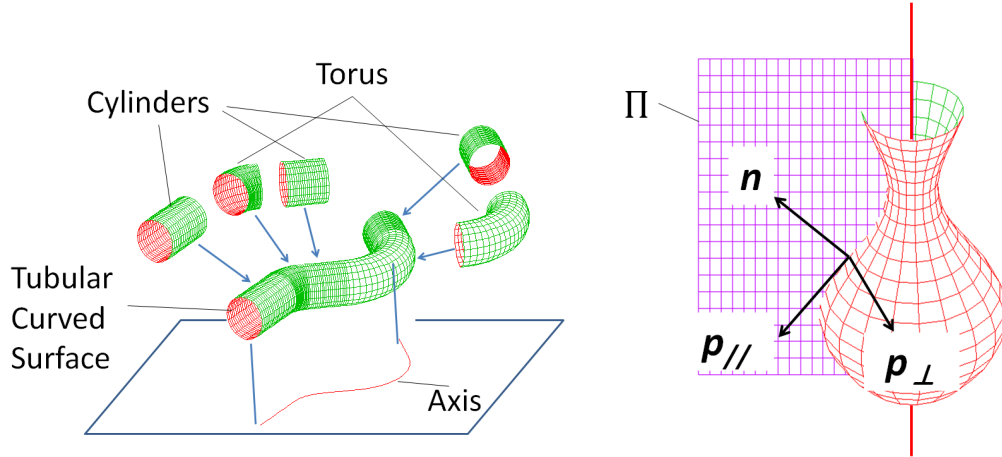


図 5.2: 管状曲面のトーラス・円筒への分解 図 5.3: 回転体の主曲率ベクトル

図 5.3 に示すように，一般に回転体においては，どの点においても回転軸を含む平面 Π について面对称であるので，回転軸を含む平面と曲面の交線方向において曲率の極値を持つことは明らかである．したがって，主曲率ベクトルの片方はこの平面 Π 上にある接線ベクトル $p_{//}$ であり，もう片方はこれと直交する方向，すなわち平面 Π の法線ベクトル $p_{\perp}$ となる．

円柱においては，曲率が極大になる方向は曲率が 0 である母線方向であり，極小となる方向は凸の曲率が負である周方向であることは明らかである．

トーラスは次の式で表すことができる．

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta(R + r\cos\phi) \\ \sin\theta(R + r\cos\phi) \\ r\sin\phi \end{pmatrix}, \quad (5.2)$$

ただし， R は管の中心軸の半径， r は管の半径， θ および ϕ は方位角である．トーラスの中心に穴があるための条件として， $r < R$ とする．このとき，トーラスの中心軸は UV 平面上に存在する．

図形が W 軸について回転対称であるので， $\theta = 0$ としても一般性は失われない．このとき，回転軸 W 軸を含む UW 平面上の接線が主曲率ベクトルのひとつ p_{θ} であり，その曲率は $\rho_{\theta} = -1/r$ となることは明らかである．

これと直交する軸方向の曲率は，最大であるトーラスの内側 ($\phi = \pi$) におい



図 5.4: いろいろなエルボー

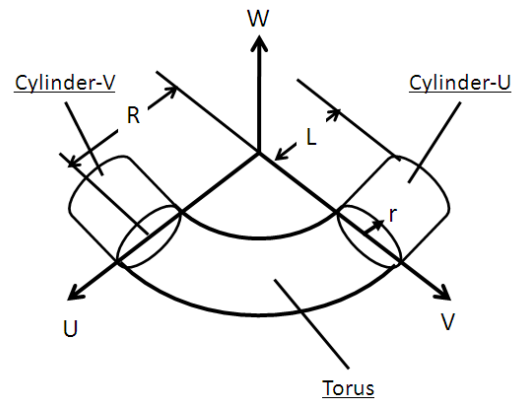


図 5.5: エルボーモデル

て $\rho_{\phi max} = 1/(R - r)$ であり，最小であるトーラスの外側 ($\phi = 0$) において $\rho_{\phi min} = -1/(R + r)$ である．したがって，すべての ϕ において $\rho_{\theta} < \rho_{\phi}$ であり，最大曲率の主曲率ベクトル $\mathbf{p}_{max}$ は $\mathbf{p}_{\theta}$ に一致し， UV 平面上にある．

以上から，中心軸が UV 平面上にある管状曲面の最大曲率方向の主曲率ベクトル $\mathbf{p}_{max}$ は UV 平面上にある $\mathbf{p}_{\theta}$ であることが示された．逆に，未知の姿勢にある管状曲面の $\mathbf{p}_{max}$ を単位球上に投影すれば平面が決定し，そこから中心軸平面の法線 W 軸が推定できる．

5.2.3 エルボーにおける主曲率ベクトル

配管エルボー（以下エルボーと呼ぶ）とは，図 5.4 に示す配管の方向を変化させるための継ぎ手であり，大部分が上で述べた管状曲面となっている．通常，接続部には外側あるいは内側にねじが切ってあったり襟がついていたりすることがあるが，面積は小さい．折れ曲がる角度は 90 度や 45 度のものなどがある．以下では，多くの形状を持ちうる中心軸平面を持つ管状曲面のうち，90 度に屈曲するエルボーに限定して主曲率ベクトルの振舞を調べる．屈曲する角度が 90 度以外のエルボーについては，5.3.3 小節において UV 平面内のセクターの角度を 90 度以外の値にすることで同ジアルゴリズムを利用することができる．

ここで，エルボーのモデルを二個の円筒とトーラスで表現し（図 5.5），それぞれの曲面を次のように記述する．なお，以下の記述ではモデル座標系は UVW とする．

- トーラス:

$$\begin{pmatrix} \cos\theta(R + r\cos\phi) \\ \sin\theta(R + r\cos\phi) \\ r\sin\phi \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 0 \leq \theta \leq \pi/2 \\ 0 \leq \phi < 2\pi \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

- 円筒-U:

$$\begin{pmatrix} u \\ R + r\cos\phi \\ r\sin\phi \end{pmatrix} \begin{bmatrix} -L \leq u \leq 0 \\ 0 \leq \phi < 2\pi \end{bmatrix}, \quad (5.4)$$

- 円筒-V:

$$\begin{pmatrix} R + r\cos\phi \\ v \\ r\sin\phi \end{pmatrix} \begin{bmatrix} -L \leq v \leq 0 \\ 0 \leq \phi < 2\pi \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

ただし、 R はトーラスの半径、 r は管の半径、 L は円筒部の長さ、 θ および ϕ は角度のパラメータである。

トーラス部の $\mathbf{p}_{max}$ は、5.2.2 小節で示したように UV 平面上にあり、上記の記述に従えば、以下の式で表される。

$$\begin{pmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta \\ 0 \end{pmatrix}, or \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (5.6)$$

一方、円筒-U および円筒-V においては、それぞれ U 軸および V 軸に平行なベクトルになる。

したがって、 UV 平面内における $\mathbf{p}_{max}$ の分布を調べると、図 5.6 に示すような UV 平面における第 II および第 IV 象限の 90 度の範囲になる。分布範囲が二箇所あるのは、主曲率ベクトルの不定性のためである。図 5.8 に実際のデータから計算された $\mathbf{p}_{max}$ の単位球上の分布を示す。この図では、点密度をニードルマップで表現している。

同様に、 UV 平面内における $\mathbf{p}_{max}$ と直交する法線ベクトル $\mathbf{n}$ の分布を調べると、

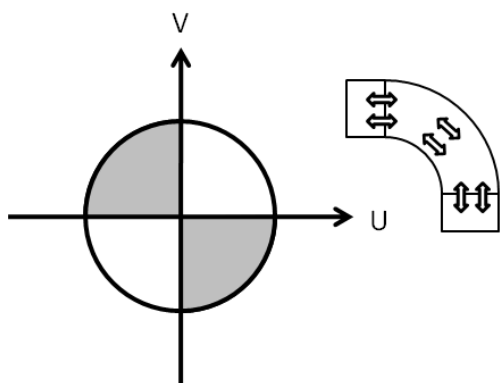


図 5.6: UV 平面内の p_{max} 分布

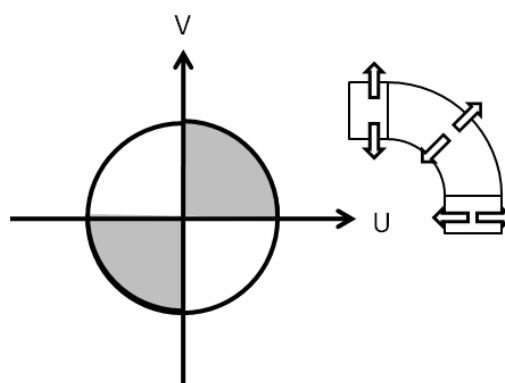


図 5.7: UV 平面内の n 分布

図 5.7 に示すような UV 平面における第 I および第 III 象限の範囲になる．この図における二箇所の分布はベクトル方向の不定性によるものではなく，ある断面上にある点の法線方向は UV 平面に投影すると 180 度反対の向きを向くものが存在するためである．

以上から，三次元の単位球上の p_{max} 分布からワールド座標系 XYZ における W 軸の方向を推定することができ，さらに， UV 平面内の p_{max} や n の分布から残る姿勢のパラメータである W 軸まわりの回転角を推定できることが示された．姿勢が推定されたのち，計算された姿勢パラメータによって座標変換を行い，平行移動成分を計算する．

5.3 位置姿勢推定アルゴリズム

エルボーの位置姿勢推定アルゴリズムは以下の手順である．

1. 距離画像の各点について法線ベクトル n および主曲率ベクトル p_{max} を計算する．
2. p_{max} の分布に平面をあてはめ， W 軸を推定する． W 軸からそれに直交する仮の UV 軸を決める．
3. $\pm p_{max}$ または n を UV 平面に投影し， W 軸まわりの角度についてヒストグラムを得る．このヒストグラムをもとに， W 軸まわりの回転角を推定する．

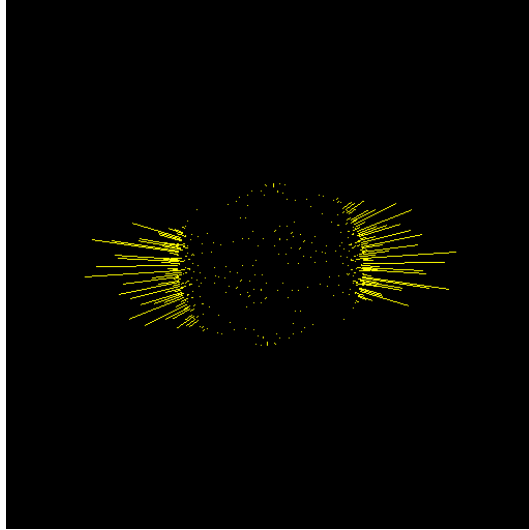


図 5.8: 単位球上の p_{max} 分布

4. 推定した姿勢をもとに，平行移動ベクトルを推定する．

以下の節において各ステップの詳細な説明を行う．

5.3.1 主曲率ベクトルの計算

曲面上の各点の主曲率ベクトルは，3.2 に述べた ISL 法によって計算される．なお，本章における実験では，定数 c の値として $0.985(= \cos(10deg.))$ を用いている．

5.3.2 W 軸の推定

主曲率ベクトル p_{max} の符号の不定性が計算に影響しないように， p_{max} と $-p_{max}$ の両方のベクトルを単位球に投影し，平面をフィットして W 軸を推定する．

本稿では， p_{max} のアウトレイヤを排除するため，次の二つの方法をもちいて W 軸の推定を行った．

平面マスク法 すべての p_{max} の集合に対して主軸を計算し，固有値が最小となる方向を W 軸方向のベクトルの初期値 w_0 とする． i 回目の w_i に対して微小角度 δ の近傍の 6 方向を $w_{i+1,j}$ ($j=0 \dots 5$) とし (図 5.9)，それぞれのベクトルを法線とする平面から距離 d_w 以内の範囲をマスクとし，そこに含まれ

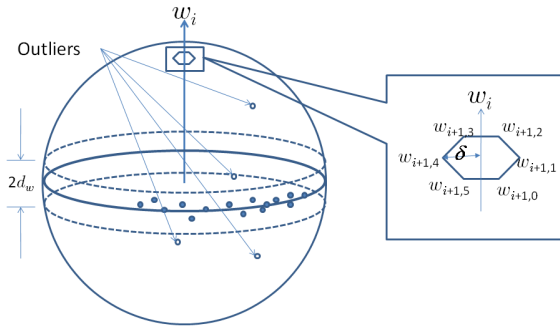


図 5.9: 平面近傍マスクによる w ベクトルの探索

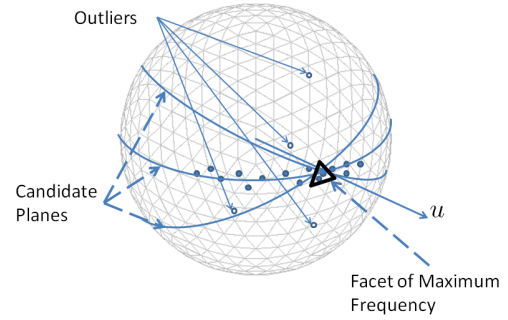


図 5.10: 測地ドーム上の p_{max} ヒストグラムによる w ベクトルの探索

る p_{max} の点数を $N_{i+1,j}$ とする. $N_{i+1,j}$ が最大となるときの $w_{i+1,j}$ を w_{i+1} とし, このときの $N_{i+1,j}$ を N_{i+1} とする. この探索を $N_{i+1,j} < N_i$ となるまで繰り返す, w_{i+1} を W 軸方向とする.

測地ドーム法 測地ドーム上に p_{max} の分布ヒストグラムをつくり, 最大分布を持つ facet の方向を u 軸とする. ただし, この u 軸は W 軸を計算するために仮に設定するものである. この u 軸を通る平面を u 軸まわりに回転する (図 5.10). 回転した平面と交差する facet 内の投票数を合計し, それが最大になるものを探索する. このときの投票数の最大値を与える平面の法線方向を W 軸方向とする.

上で述べたふたつの方法ではどちらも UV 平面候補近傍の主曲率ベクトルの点数を評価するが, 平面マスク法では候補平面の法線としてひとつ前のステップの法線の近傍を使い, 測地ドーム法では u 軸と直交する方向を網羅的に調べる点が大きく異なっている.

5.3.3 U 軸と V 軸の推定

まず, 5.3.2 小節において推定した W 軸に直交する仮の U 軸と V 軸を決める.

この UV 平面内で W 軸まわりの角度についてのヒストグラムを用意し, そこに p_{max} を投票する. 5.3.2 小節と同様, 符号の曖昧性を排除するために両方の符号のベクトルを投票する. 図 5.11 に典型的なヒストグラムを示す. 投票された主曲率ベクトルは対称な位置に二個の幅が 90 度のセクターを形成する. セクターの両端

にはエルボー両端の円柱部において一定の方向をもつ主曲率ベクトルの数が増えることによる分布のピークが存在する．図 5.6 に示したように，本稿で用いたモデルでは主曲率ベクトル分布がない方向にエルボーがあるので，片方のセクターの最大角度を U 軸，もう片方のセクターの最小角度を V 軸とすることで， U 軸と V 軸が図のように一意に推定できる．

一方，オクルージョンなどによりエルボーの全体が観測されない場合，セクターの角度が 90 度より小さくなる場合がある（図 5.12）．そのような場合， U 軸と V 軸のどちらが観測されているか確定しないため，両方のケースを想定して二つの UV 軸候補を用意し，最終的に両者のどちらが適しているかを平行移動ベクトルまで計算してから評価する．図の例では，セクターの境界 U_0 に対して V_0 ， V_1 に対して U_1 を軸として用いる．

さらに，もう一つのアルゴリズムとして， UV 平面内の法線方向分布を使った姿勢推定も行う．この方式は基本的には主曲率ベクトルの場合と同様のアルゴリズムであるが，図 5.6 および図 5.7 で示したように，分布方向から UV 軸方向を推定する際に 90 度回転する部分が異なってくる．

5.3.4 姿勢の曖昧性の判定

次に，姿勢の曖昧性の判定を行う．5.3.3 小節によって推定した UV 軸の方向には，曖昧性が残っているためである．

図 5.13 のように，ヒストグラムから U 軸および V 軸が決められたとき，この分布に対して二つの姿勢候補が存在する．すなわち，エルボーの端面が $-U$ 方向と $-V$ 方向にある場合と， $+U$ 方向と $+V$ 方向にある場合である．図形は対称形であるため，主曲率ベクトル分布のみからはどちらの状態であるかはわからない．

この判定を行うためには，セクターの端の方向に近い点の集合に対して，他の点がどちらの方向にあるかを判定する．すなわち，図の UV 平面図で A という記号がついた V 軸方向に近い主曲率ベクトルを持つ点は，それぞれの姿勢候補で A という記号がついた領域に対応する．したがって， A に属する点に対して他の点が $+U$ 方向にあれば上の姿勢， $-U$ 方向にあれば下の姿勢であることがわかる．

モデルは上の姿勢が正しいので，この判定によって下の姿勢にあることが明らかになれば， W 軸まわりに 180 度回転し， U 軸および V 軸を補正する．

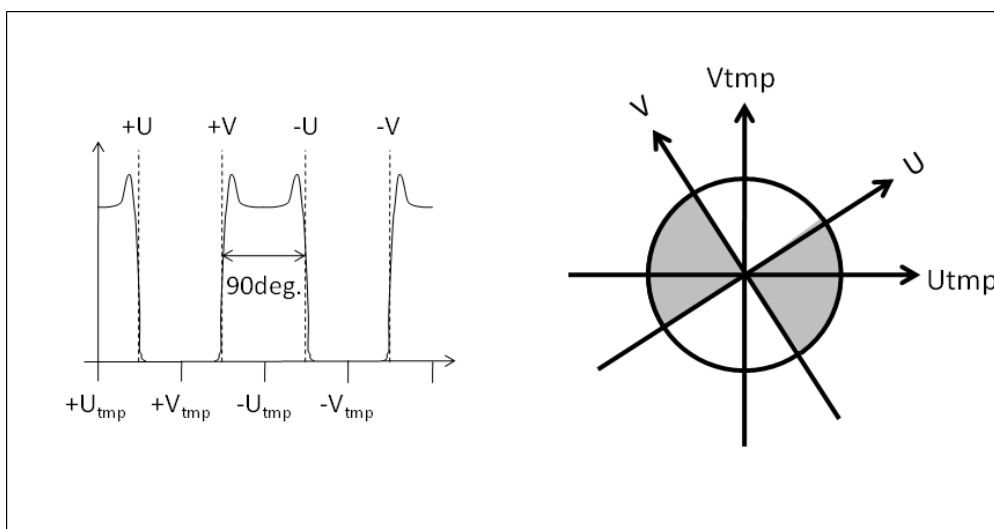


図 5.11: UV 平面内の p_{max} の角度のヒストグラムを用いた U および V 軸の調整 (セクターの角度が 90 度の場合)

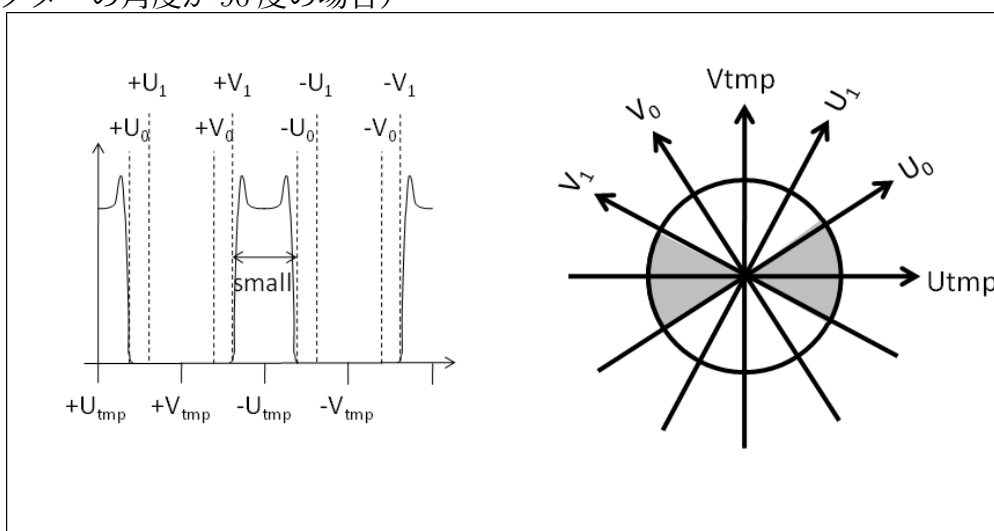


図 5.12: UV 平面内の p_{max} の角度のヒストグラムを用いた U および V 軸の調整 (セクターの角度が 90 度未満の場合)

なお、図 5.12 のように中心軸平面内の主曲率ベクトル分布セクターが 90 度に満たず、 UV 軸の候補が二組存在する場合には、分布の端が軸に一致すると仮定した方向を基準にする。

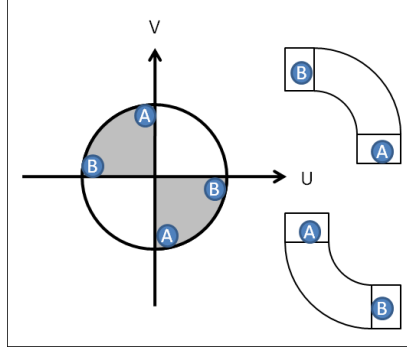


図 5.13: エルボーの姿勢の曖昧性

5.3.5 平行移動ベクトルの推定

ワールド座標系 XYZ に対するモデル座標系 UVW の回転角が推定されたあとで、平行移動ベクトルを計算する。

まず、観測データの U 方向の最小値、すなわち U_{min} を求める。このとき、 $U_{min} < u < U_{min} + L$ を満たす点は、エルボーの端部の円筒部であるとみなせるので、このデータに円筒をフィットすることで平行移動ベクトルを計算する。両端の円筒を使えばより正確になるが、 U 軸方向の移動量は端面において固定されるので、他の V および W 軸方向の移動量はひとつの円筒のあてはめで推定可能である。

なお、図 5.12 のようにセクターの幅が 90 度に満たず、 UV 軸の組の候補が二通り存在する場合には、セクターの端が軸方向として採用された側の軸を採用し、ひとつの円筒のあてはめによって平行移動ベクトルを計算する。すなわち、 U_0V_0W 座標系では U_0 軸方向の端部、 U_1V_1W 座標系では V_1 軸方向の端部を使用する。

5.4 位置姿勢推定実験

提案手法を実際のエルボーの距離画像を使って検証した。実験 1 では、安定姿勢である立ち状態と倒れ状態の一個のエルボーを対象とした。実験 2 では、より一般的な姿勢の一個のエルボーを対象とした。実験 3 では、山積みのエルボーを対象とした。

実験に使ったエルボーを図 5.14 に示す。エルボーの表面は鋳造の過程において作成される砂型によりランダムな凹凸がある面になっている。ISL 法 [60] によってこのようなざらついた表面でも主曲率ベクトルが計算可能である。すべての距離画

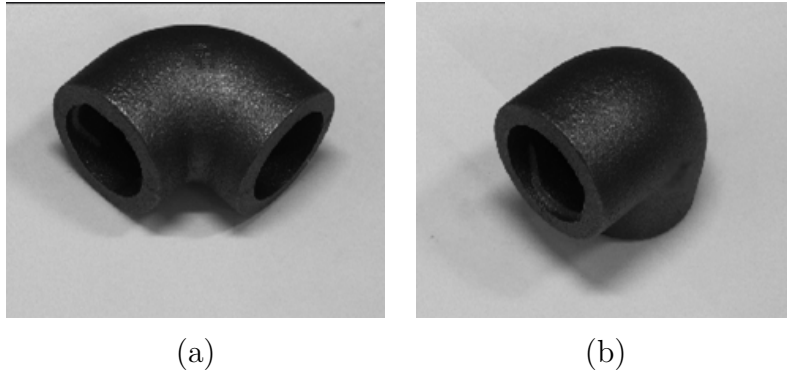


図 5.14: エルボー ((a) 倒れ状態, (b) 立ち状態)

像は正弦波位相シフト法 [12] によって計測し，奥行き方向の計測精度は約 $0.5[mm]$ である．

実験に用いたエルボーの寸法は，円筒部の長さ $L = 20.5[mm]$ ，トーラスの半径 $R = 25.5[mm]$ ，管の半径 $r = 25.0[mm]$ である（図 5.5 参照）．対象物の表面積は理論的に計算可能で， $1.2732 \times 10^4[mm^2]$ となる．

5.3.2 小節における W 軸の推定において，平面マスク法計算時のパラメータは，繰り返し処理時の角度偏位 δ は $1.0[deg.]$ とし，平面近傍マスクの高さ d_w は $\tan(10.0[deg.]) \simeq 0.176$ とした．また，測地ドーム法における測地ドームの facet 数は $20 \cdot 4^3 = 1280$ とし， U 軸確定後に 256 の平面について横断する facet 内の点数を計数後，点数が最大となった平面の近傍を角度を半分にして繰り返し計数する処理を 2 回行った．したがって，調査された平面間の最小角度は， $360/256/2^2 = 0.352[deg.]$ である．

また，5.3.3 小節における W 軸回りの回転角を推定する際に用いたヒストグラムの分割数は 256 とした．ヒストグラムの両端を検出する際に最大値の 0.05 倍を閾値としてそれ以下の値を持つセルはゼロとみなした．この判定基準はヒストグラムの対象が主曲率ベクトルの場合も法線ベクトルの場合にも共通であった．

なお，以下の実験結果において精度の評価の一つとしてモデルとデータの距離を用いているが，これは各データ点から STL で表現したモデルの三角パッチへの最も近い点を計算したものである．その際，アウトレイヤの影響を取り除くため，距離が $10.0[mm]$ 以上のものは統計処理から除外している．

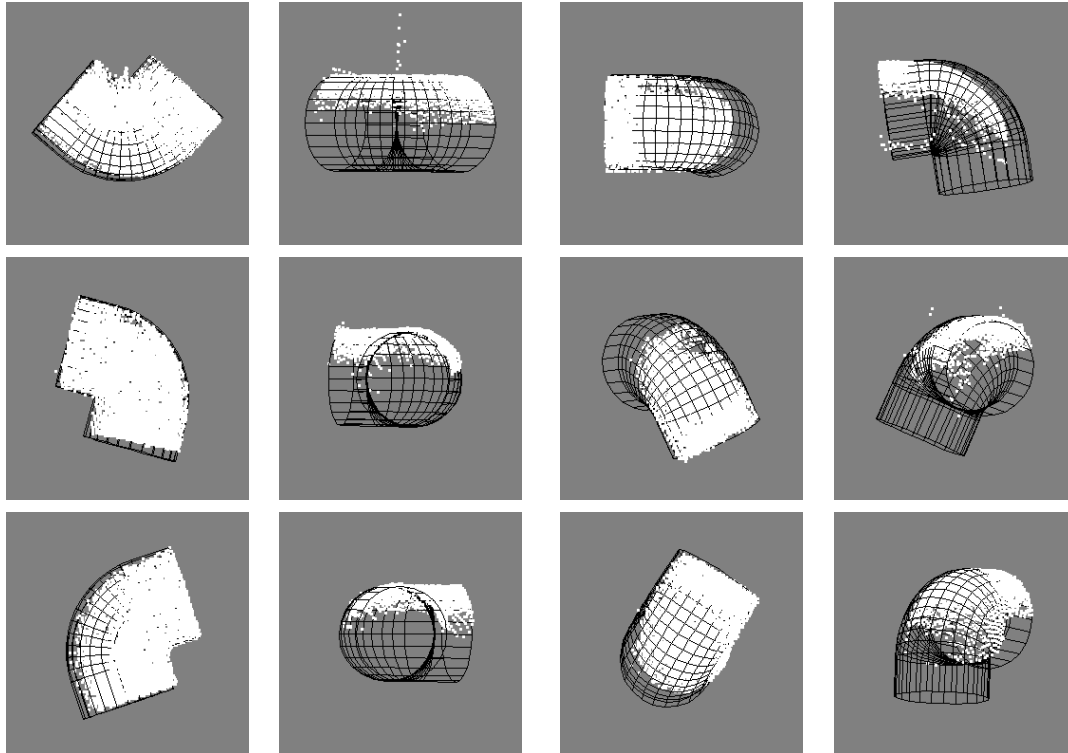


図 5.15: 倒れ状態のエルボーに対する位置姿勢推定の結果. 実験は 20 度ごとに行われ, 表示した画像は 120 度ごとの結果を示す. 左図が上面図 (XY), 右図が前面図 (XZ) である.

図 5.16: 立ち状態のエルボーに対する位置姿勢推定の結果. 実験は 20 度ごとに行われ, 表示した画像は 120 度ごとの結果を示す. 左図が上面図 (XY), 右図が前面図 (XZ) である.

5.4.1 実験 1：安定姿勢における単体位置姿勢推定

5.4.1.1 倒れ状態位置姿勢推定結果

回転テーブル上に置かれた倒れ状態のエルボーを真上から計測し, 20 度ずつ回転した距離画像について位置姿勢を推定した. その結果の一部を図 5.15 に示す. この図では, 距離データ (明るい点) にモデル (暗い線) を重ねている. 図の左側が上面図, 右側が前面図である. 図では三例のみであるが, すべての角度で安定して推定結果が得られている.

この図で示した結果は, W 軸の推定において 5.3.2 小節で提案した平面マスク法を用い, UV 軸の推定においては主曲率ベクトル分布を使用したものである.

他の提案手法の組合せ, すなわち W 軸推定における測地ドーム法および UV 軸推定における法線ベクトル分布の使用においても, 同様の推定結果が得られた.

推定結果のモデルに対して各データ点からの距離を計算したところ、平均距離は $0.534[mm]$ であり、標準偏差は $0.427[mm]$ であった。ICP アルゴリズムを適用した後では、平均距離は $0.252[mm]$ 標準偏差は $0.174[mm]$ であった。また、データの平均面積は $4.38 \times 10^3[mm^2]$ で、全体の 34.4% であった。

5.4.1.2 立ち状態位置姿勢推定結果

倒れ状態と同様に立ち状態で 20 度ずつ回転して距離画像を計測し、位置姿勢を推定した。この姿勢では、上部のみが観測されており、ひとつの円柱部とトラスの一部しか見えていない。図 5.16 にその結果を示す。

使用したアルゴリズムの組合せは倒れ状態と同様であり、また、他の組合せにおいても推定結果が得られた。

推定結果のモデルに対して各データ点からの距離を計算したところ、平均距離は $1.89[mm]$ であり、標準偏差は $1.48[mm]$ であった。ICP アルゴリズムを適用した後では、平均距離は $0.211[mm]$ 標準偏差は $0.151[mm]$ であった。また、データの平均面積は $3.28 \times 10^3[mm^2]$ で、全体の 25.8% であった。

この悪条件の観測姿勢でも、提案手法により ICP アルゴリズムを適用するのに十分な位置姿勢の推定ができたと考える。ICP アルゴリズム適応後において条件のよい倒れ姿勢の結果とほぼ同じ距離に近付いていることによるものである。

5.4.1.3 W 軸推定精度評価

提案手法の精度は、5.3.2 小節の W 軸の推定アルゴリズムと 5.3.3 小節における UV 軸の評価によって行った。

倒れ状態の W 軸の誤差評価結果を図 5.17 に示す。この図では、評価は変換行列によってワールド座標系に投影された W 軸（以下 W' と表記）とワールド座標系の Z 軸との角度を示している。平面マスク法、測地ドーム法ともにほぼ 2 度程度の誤差である。

同様に、立ち状態の W 軸の誤差評価結果を図 5.17 に示す。立ち状態の場合、 W' 軸は Z 軸のまわりに回転するため、 W' 軸の XY 平面内の角度を計算したものに直線をあてはめ、それぞれの角度からの誤差を表示したものである。これも、平面マスク法の方が若干良いが、大きな差は見られない。

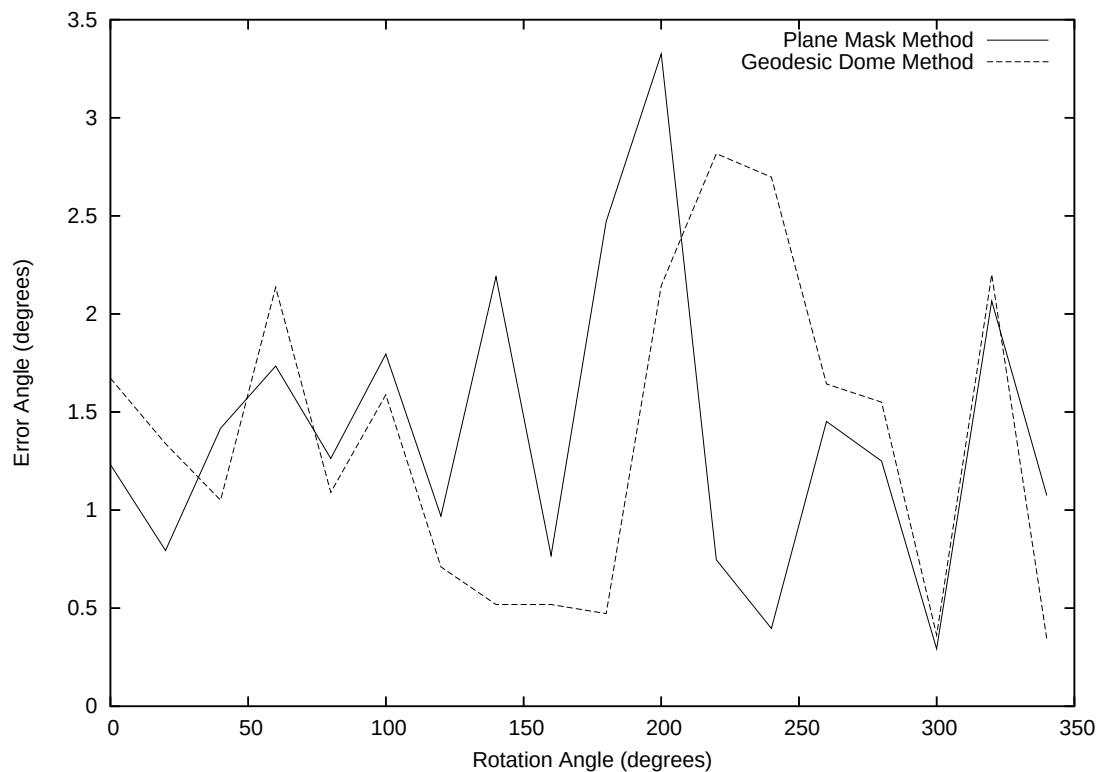


図 5.17: 倒れ状態 W 軸角度誤差

次に、 XYZ 座標系にあるデータ（回転角 0 度）の法線ベクトルを平面マスク法によって計算された行列を使って UVW 座標系に逆変換した結果を図 5.19 に示す。この図においては、 UV 平面内に投影した法線の角度を点の輝度で表している。同様に、測地ドーム法によって計算された行列を使った結果を図 5.20 に示す。

理想的には、図の左側においては 4 時-10 時方向の断面に法線がそろうために暗い色となり、右側においては 1 時-7 時方向の断面なので明るい色になる。しかし、尾根の部分では法線はほぼ W 軸と平行になるため、雑音の影響で色が不定になる。

図 5.19 においては、ほぼ上の予想通りの結果となっているが、図 5.20 においては、特に図の右側部分において誤差が大きくなっている。この傾向は、他のすべての角度のデータにおいても同様であった。

この結果から推論できるのは、測地ドーム法においては、仮の u 軸を最初に固定してしまうために誤差が非対称に表れてしまうことである。この u 軸は測地ドームのヒストグラムの最大値の方向として計算されるため、計算に貢献する点の数が少なくなる。実際のプログラムにおいては、計算精度をあげるために点数が最

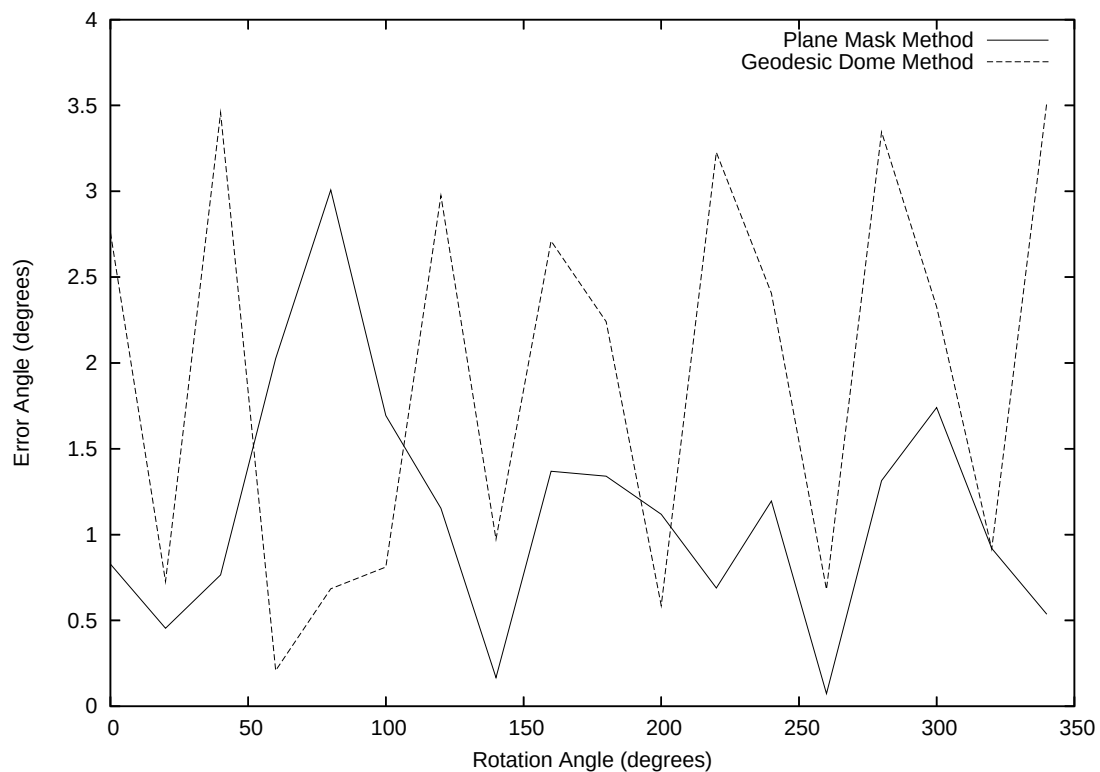


図 5.18: 立ち状態 W 軸角度誤差

大になる facet に含まれる点と近傍の facet の点の平均値を用いているが、それでも全体の点数に比較すると一部である。測地ドームの分割数を下げれば貢献する点の数は増加するが、一つの facet の局地性が失われてしまう可能性があり、望ましくない。

したがって、測地ドームのヒストグラムを用いた W 軸の推定方法にはシステムチックな誤差が混入する可能性があり、解決は難しく、現在のところ手法としては平面マスク法の方が適していると考えられる。

5.4.1.4 UV 平面内回転角精度評価

次に、 UV 平面内の主曲率ベクトル分布および法線ベクトル分布を用いた W 軸回りの回転角の推定を評価した。

図 5.21 に倒れ状態の角度誤差、図 5.22 に立ち状態の角度誤差を示す。これらの図では、 W 軸推定において平面マスク法を用い、 UV 平面内回転角推定において主曲率ベクトルおよび法線ベクトルを用いた結果を“Plane Mask Method-P”お

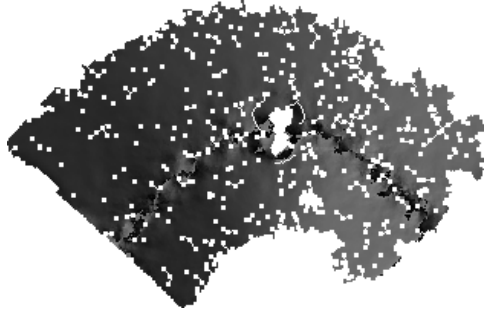


図 5.19: 平面マスク法による UVW 座標系への法線逆変換結果

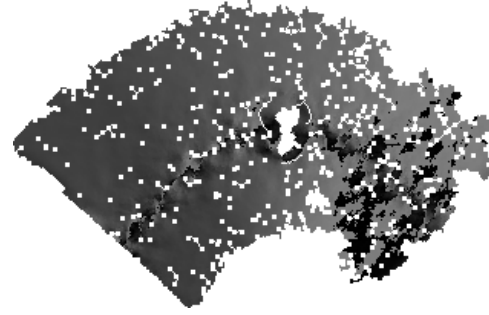


図 5.20: 測地ドーム法による UVW 座標系への法線逆変換結果

よび “Plane Mask Method-N” と表記している．測地ドーム法においても同様に，“Geodesic Dome Method-P” および “Geodesic Dome Method-N” と表記している．

まず明らかなのは，二つのグラフのスケールの違いである．倒れ状態の誤差がほぼ $5.0[deg]$ 以下なのに対して，立ち状態のグラフが $20.0[deg]$ 近くあることである．これは，倒れ状態においては両端が観測され，主曲率ベクトルあるいは法線ベクトルの分布角度が 90 度以上あるのに対し，立ち状態では 40 度程度の分布しかないためであると考えられる．

UV 平面内のヒストグラムの分割数が 256 であるため，端面における角度の精度は $360/256 = 1.39[deg]$ 程度が期待できるが，ほぼそれと同様の精度を達成しているのは倒れ状態の平面マスク法によるもののみである．

これは，主曲率ベクトルや法線ベクトルの誤差の誤差が大きい点がうまく排除できなかったためであると考えられる．特に面の傾きが大きいところで主曲率ベクトルや法線ベクトルの誤差が大きくなり，それがヒストグラムのセクターの端部をあいまいにしている．誤差がある程度あっても，両端が観測されていればもっとも点数が大きくなる 90 度の範囲を探すことで，倒れ状態においては誤差が小さくなっている．これに対して立ち状態においては，閾値のみが端面の位置を推定する要素であるため，不安定になってしまったと思われる．この誤差を小さくするためには，中心付近のデータのみをつかって UV 軸推定を行うといった対策で改善する可能性がある．

ただし，立ち姿勢の場合のように， p_{max} 方向に輪郭部が存在すると，その点を排除することで p_{max} の分布範囲が狭まり，中心軸平面の計算精度に悪影響が出る可能性がある．これを回避するひとつの方法は， p_{max} 方向の輪郭とその直交方向

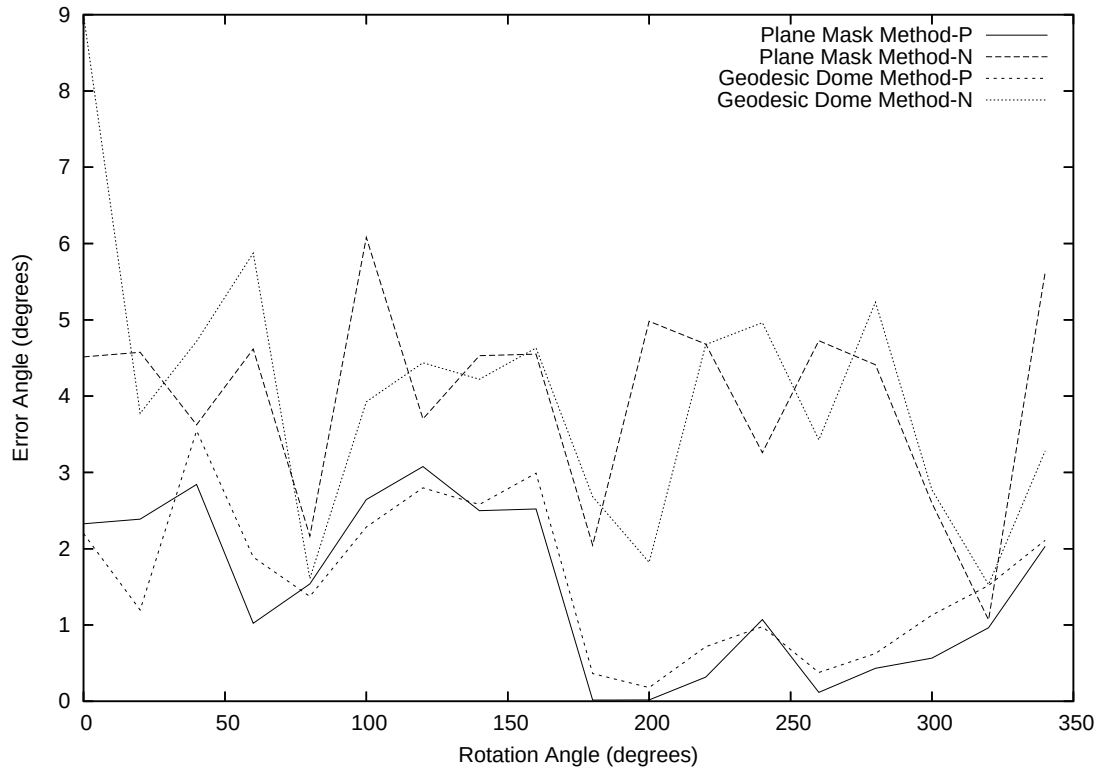


図 5.21: 倒れ状態 UV 平面内角度誤差

の輪郭を区別して直交方向の輪郭部の点を排除することが可能と思われる。

また、鋳物であるエルボーにおいては、形状に細かい凹凸があり、完全にスムーズな曲面とはいえないため、いちがいに法線の誤差が正しくないともいえない。よりロバストな評価を行うためには、対象の表面の凹凸に応じてスムージングするなどといった前処理を行うといった対策も考えられる。

図 5.23 は、図 5.22 の “Plane Mask Method-P” において最大の誤差 (23.19[deg.]) を持つ回転角 120 度のデータのレンジデータにモデルのデータに位置姿勢推定したモデルを重ねあわせたものである。(a) が提案手法による位置合わせの結果であり、(b) は (a) の結果をもとに ICP を 10 回行った結果である。この場合でも図からわかるように、初期推定結果は、ICP アルゴリズムのための初期近似位置姿勢として十分に近いものである。なお、ここで用いた ICP アルゴリズムは、Chen ら [44] の point-to-plane 法を採用している。

主曲率ベクトル分布と法線分布の誤差の差はどの結果でもわずかに主曲率ベクトルを用いた方法がよくなっている。これから、 UV 軸推定には主曲率ベクトルの

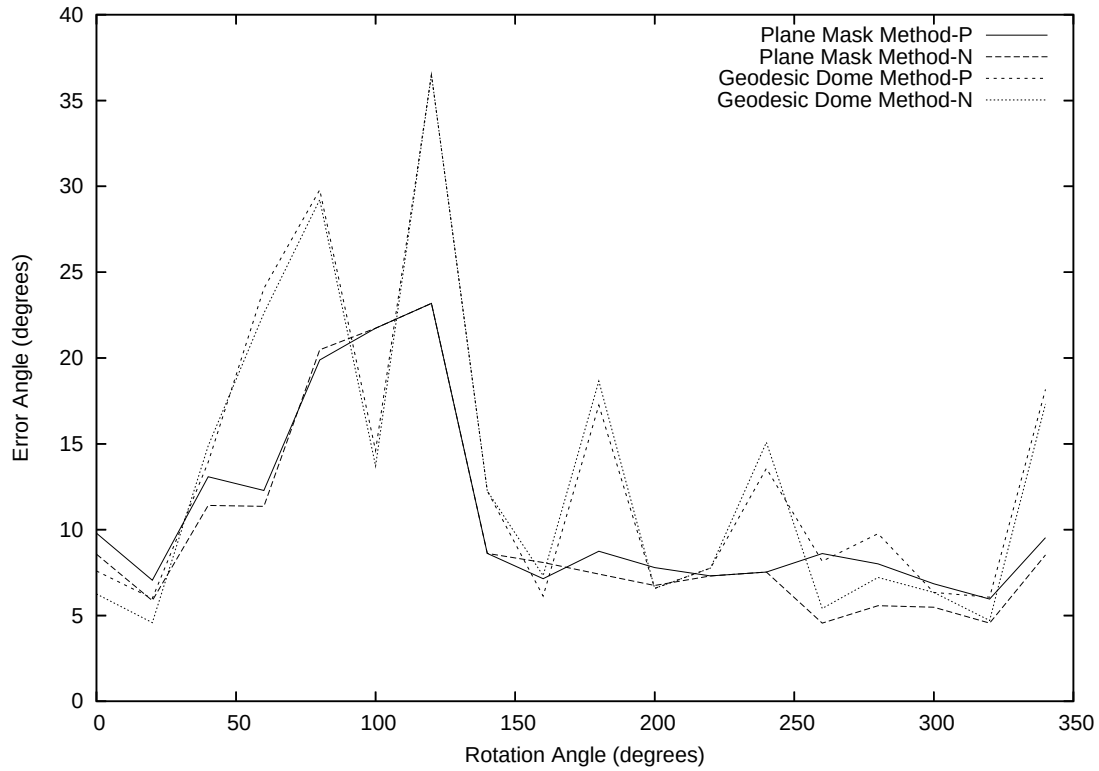


図 5.22: 立ち状態 UV 平面内角度誤差

分布を使う方法がよいことがわかる。

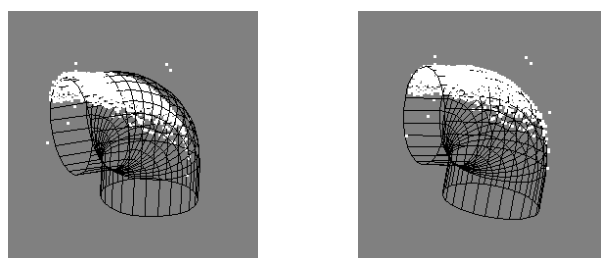
なお、実験 1 において、Intel Core 2 Duo 2.33[GHz] の PC を用いて、シングルスレッドで処理にかかった平均時間は、法線計算ベクトル計算が 3.70[sec]、主曲率ベクトル計算が 13.9[sec]、位置姿勢推定を行う処理が 0.122[sec] であった。

5.4.2 実験 2：一般姿勢における単体位置姿勢推定

次に、より一般的な姿勢における位置姿勢推定の検証を行った。

エルボーに回転軸を固定し、回転軸の Z 軸に対する角度 β を 0[deg.] から 180[deg.] まで 30[deg.] ごとに変え、それぞれの回転軸の角度において回転角 α を 30[deg.] ごとに変えて計測を行った。なお、観測方向は $+Z$ 方向である。姿勢の数は $7(\beta) \times 12(\alpha) = 84$ 通りとなる。図 5.24 が実験をおこなったエルボーの姿勢である。これらの姿勢は、 $\alpha = 0$ の場合の $\beta = 0 \dots 180$ の姿勢を示している。

これらの距離画像に対して、各点の法線および主曲率ベクトルを計算し、主曲



(a) 初期推定結果 (b) ICP (10回) 処理後

図 5.23: 立ち状態 120 度位置姿勢推定結果

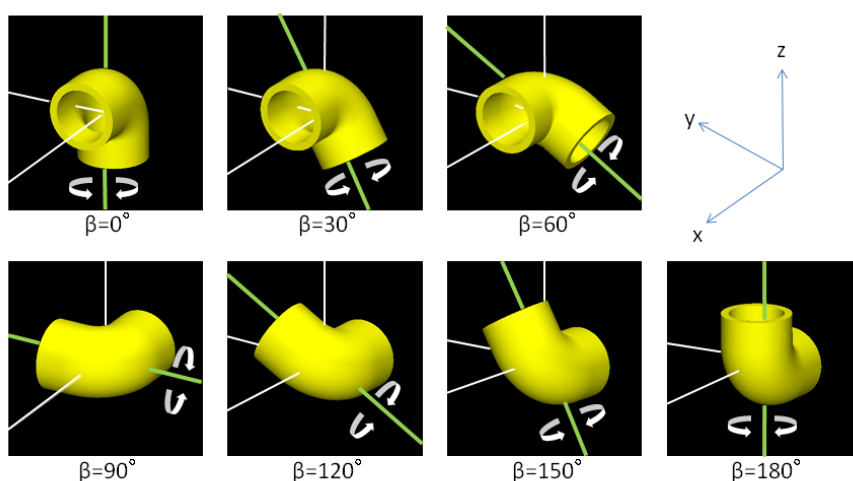


図 5.24: 一般姿勢実験

率の符号によって曲面の型をもとめた．次に，距離，法線ベクトル，主曲率ベクトル，曲面の型の不連続性をもとに画像を領域分割して最大の曲面領域を抽出した．その後，その領域の曲面に対して平面マスク法+主曲率ベクトル分布法によって位置姿勢を計算した．

図 5.25 にいくつかの結果を示した．この実験の結果，観測距離データにトーラス部分を持つすべての姿勢のデータについて位置姿勢推定に成功し，曲面のみのデータから位置姿勢を推定するという提案手法の有効性が一般姿勢においても確認された．

図 5.26 に失敗例を示す．この図は距離画像を領域分割した画像であり，位置姿勢推定に用いた領域を白で示している．失敗したものは，すべて自己遮蔽によって曲面部分の観測可能な部分が片方の円柱部分にほぼ限定されているケースであっ

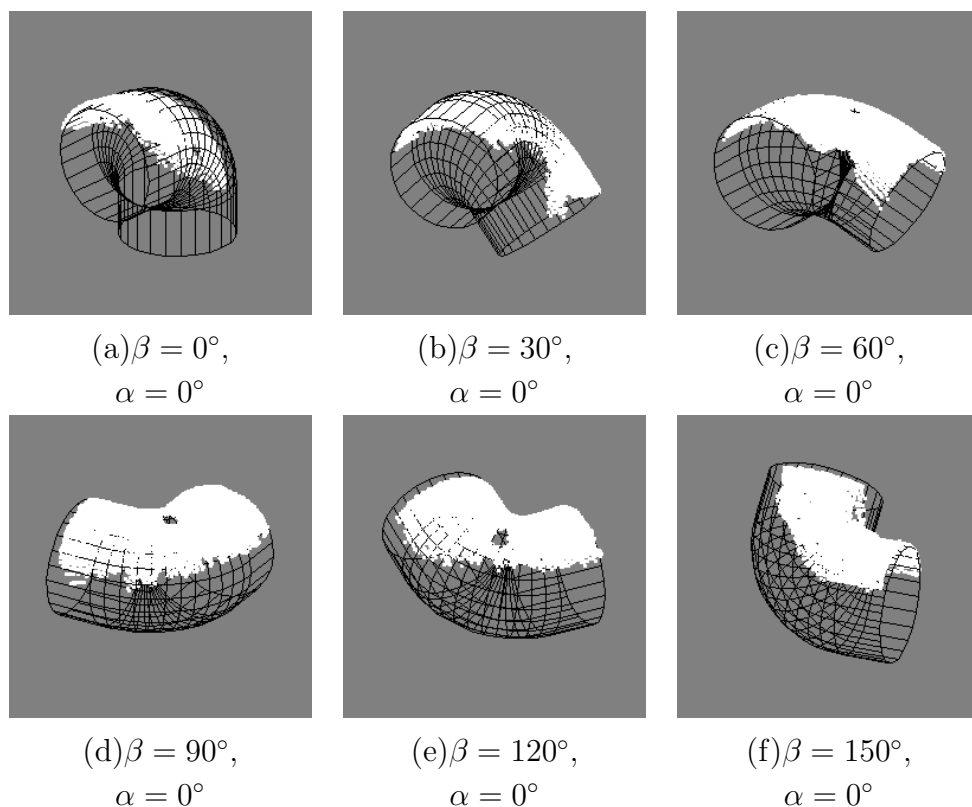


図 5.25: 一般姿勢実験例

た．特に $\beta = 180[\text{deg.}]$ の場合には常にひとつの端面が観測方向を向いており，すべての α について失敗した（図 5.26 (a)）．それ以外の場合でも曲面部分が自己遮蔽によってほとんど円柱部分しか観測できない場合（図 5.26 (b), (c)）には，失敗した．一方，端面がほぼ観測方向を向いているものであっても，位置姿勢推定に成功した例もあった（図 5.26 (e)）．この場合も同じような姿勢でありながら曲面部分の距離データにノイズが多かった場合（図 5.26 (d)）には失敗していた．

一方，これらのすべての失敗例においては，端面が正面に見えている状態であるため，端面の特徴である平面上の円形部分の検出と提案手法とを組み合わせることにより死角のない位置姿勢推定アルゴリズムが可能になると考える．

なお，成功例と失敗例でデータの表面積を調べると，成功例においては最小値 $1.62 \times 10^3 [\text{mm}^2]$ (12.7%)，最大値 $8.94 \times 10^3 [\text{mm}^2]$ (70.2%)，平均値 $5.61 \times 10^3 [\text{mm}^2]$ (44.1%)，失敗例においては最小値 $1.02 \times 10^3 [\text{mm}^2]$ (8.03%)，最大値 $1.97 \times 10^3 [\text{mm}^2]$ (15.5%)，平均値 $1.70 \times 10^3 [\text{mm}^2]$ (13.3%) であった．オクルージョンのために失敗例では一様に面積が小さいが，成功例の面積の最小値は失敗例の最

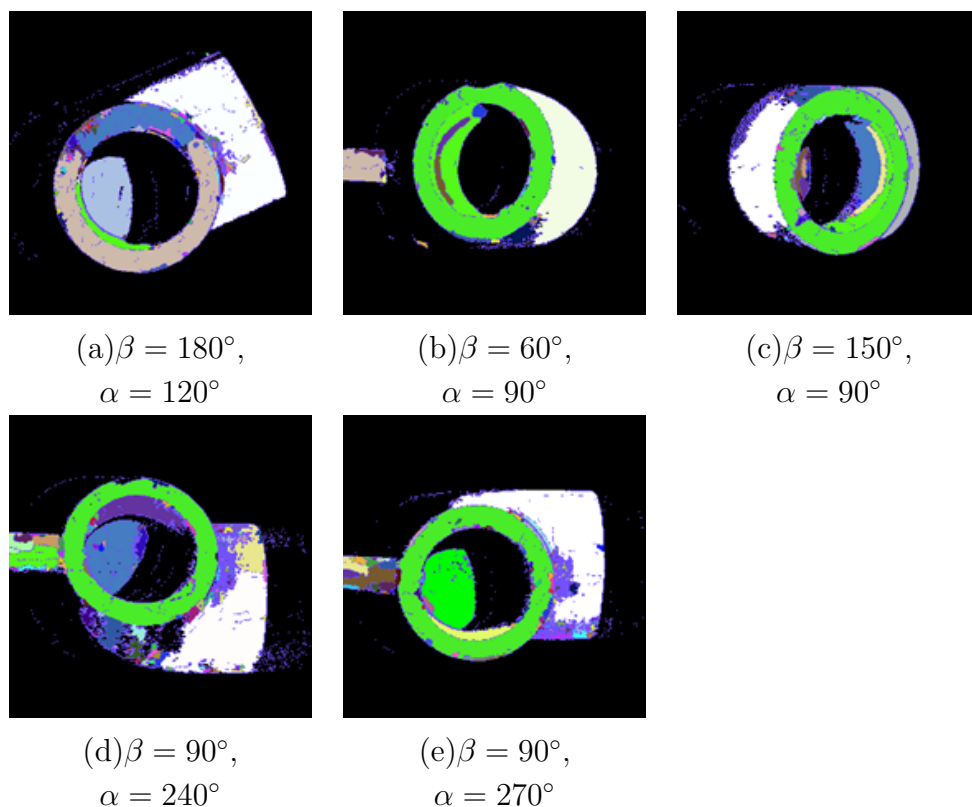


図 5.26: 一般姿勢失敗例

大値より小さく，面積自体は主要な要素ではないことがわかる．

5.4.3 実験3：山積みエルボーの位置姿勢推定

次に，山積みのエルボーのデータに対して提案手法を試した．図 5.27 が距離画像，図 5.28 が距離画像を領域分割したものである．画像中には 5 個の大きい曲面領域があり，これらの領域を手動で選び，提案手法によるアルゴリズムを実行した．山積みであるため，真値は不明であるが，立ち状態と倒れ状態以外の姿勢，および一部遮蔽により欠落した状態の参考のために行った．

図 5.29 に結果を示す．データと変換されたモデルを重ねると，5 個の領域のうち 4 個で良い結果を得ていた．唯一失敗したものは，面積は大きいものの円筒部が他のエルボーに隠されていた #2 のみであった．山積みの対象物をロボットでピッキングする際には上に乗った対象物から処理を行うため，このように極端に遮蔽された対象における失敗は大きな問題ではないと思われる．なお，このときの表面

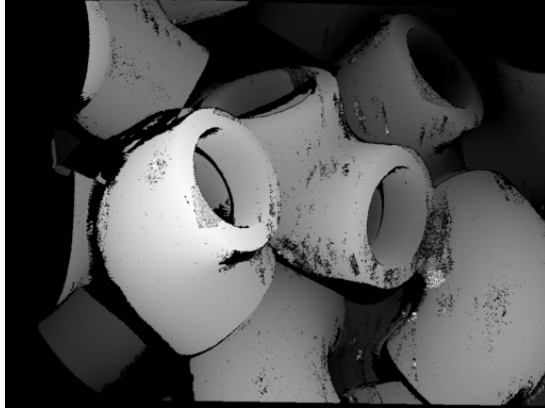


図 5.27: 山積みエルボの距離画像

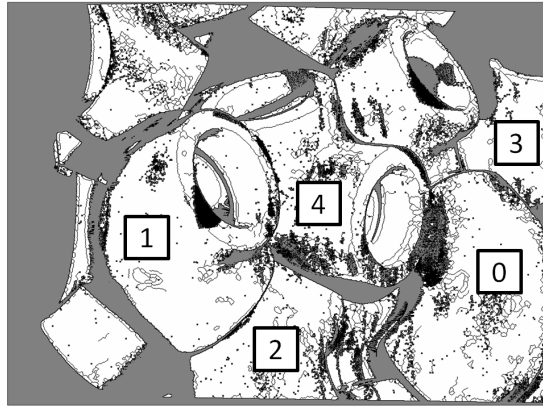


図 5.28: 領域分割された山積みエルボの距離画像

積は順に $4.58 \times 10^3 [mm^2]$ (35.9%), $4.61 \times 10^3 [mm^2]$ (36.2%), $2.68 \times 10^3 [mm^2]$ (21.1%), $1.68 \times 10^3 [mm^2]$ (13.2%), $1.73 \times 10^3 [mm^2]$ (13.6%) であった.

また, #1 や #4 の例のように, 端面が明瞭に観測できる姿勢においては, 端面に対して平面をあてはめ, その法線を U 軸の初期値とすることで, W 軸推定の測地ドーム法を採用できる可能性もある.

5.5 まとめ

本章では, 中心軸平面を持つ管状曲面の主曲率ベクトルを用いた位置姿勢推定手法を提案した.

まず, 5.2 では, 主曲率ベクトルと中心軸平面の関係の基本理論を示し, 最大曲率方向の主曲率ベクトル分布を用いることで中心軸平面の法線ベクトルを推定できることを示した. そして, 主曲率分布から中心軸平面のベクトルを計算するための具体的なアルゴリズムを示した. また, 5.3 では, もっとも単純な形状であるエルボを対象にして UV 軸を推定するためのアルゴリズムを示した. その後, 5.4 では, このアルゴリズムの有効性を検証するために, 三種類の実験によって実証した.

5.4.1 における実験 1 では, W 軸を推定するアルゴリズム二種類 (平面マスク法および測地ドーム法) と UV 軸を推定するアルゴリズム二種類 (主曲率ベクトル分布および法線ベクトル分布) の組合せで四種類のアルゴリズムによって実験を

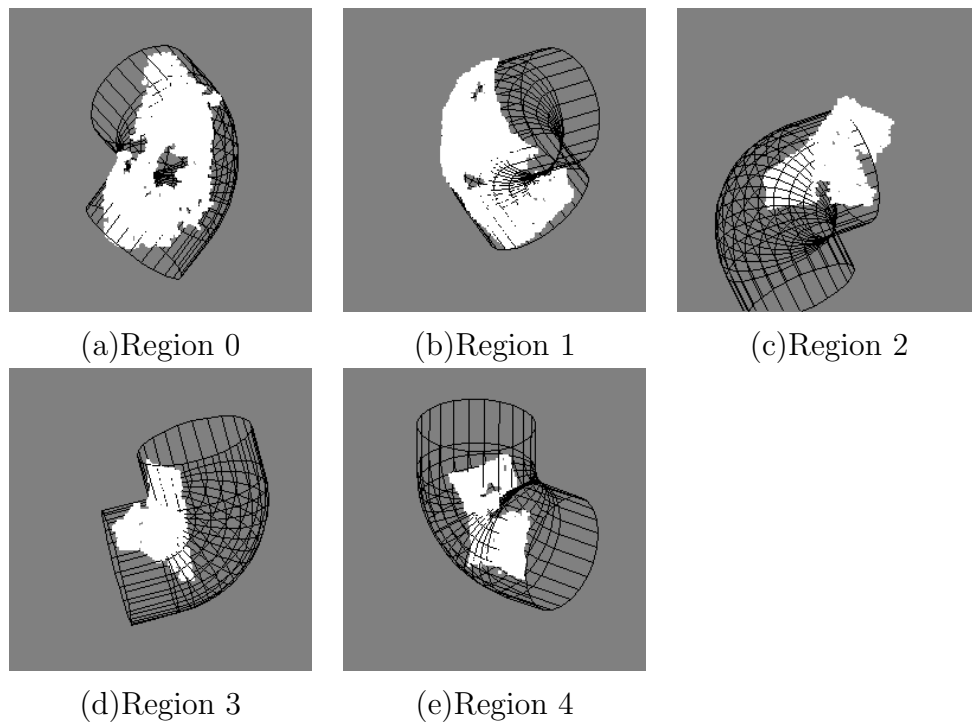


図 5.29: 山積みエルボーの位置姿勢推定結果

行った．ターンテーブル上に二種類の安定姿勢に置かれたエルボーを対象として実験を行った結果， W 軸を推定するアルゴリズムとしては平面マスク法がよりよい結果を与えること，および UV 軸を推定するアルゴリズムとしては二つのアルゴリズムで大きな違いはないものの主曲率ベクトル分布の方がわずかによい結果を与える結論を得た．

提案手法において精度に若干の誤差があるものの，提案手法による位置姿勢推定結果を ICP アルゴリズムの初期値とした結果，その誤差が $0.2[mm]$ 程度の値になったことで，ICP アルゴリズムによって近似するために十分な初期位置を与えることができることを示した．

5.4.2 における実験 2 では，合計 84 通りの一般姿勢におかれたエルボーを対象にした．第一の実験結果をふまえて平面マスク法と主曲率ベクトル分布を使うアルゴリズムを用いた．この実験の結果，曲面領域がトラス部まで含むすべての姿勢について位置姿勢推定が成功した．端面がほぼ観測方向を向き自己遮蔽によって曲面領域が片方の円筒のみになる場合には位置姿勢推定に失敗する場合があることが明らかになった．失敗が起きる姿勢が限定的であるため，端面の抽出・計測処理を補助的に行うことによりこの課題に対応可能であることを示唆した．

また，5.4.3における実験3では，一個の対象物だけがあるシーンだけではなく，山積み状態のシーンにおいても一定の成果を示した．

本章では単純で局所的特徴の乏しい曲面について主曲率を用いた位置姿勢推定を試みた．今後は，アルゴリズムの改良により精度を向上するとともに，より広い範囲の対象に提案手法を用いることを目指している．そのためには，単純な曲面と構造化された対象に対する手法を組合せた適応的なアプローチも必要になると思われる．

第6章 結論

本研究では、レンジデータを対象に視点に依存しない特徴量である主曲率ベクトルをロバストに計算する手法を提案し、二つの応用によってその有用性の検証を行った。

第2章では、いままでに筆者がおこなってきたレンジデータ計測システムの開発に関する研究成果を紹介した。まずレーザレンジファインダを高速にするために複数の光源を同時にスキャンするシステムについて紹介した。ミラーの回転軸を中心に扇状に配置された半導体レーザ光源により複数光源の高速スキャンを実現し、画像中から複数の線状光像を抽出する前処理回路を開発して高速なデータ取り込みを可能にした。次に、二足歩行ロボットの移動計画のために広範囲な地形情報を取得する手段としてステレオ相関法によって取得したレンジデータをロボット関節角を利用して座標変換する手法について述べた。最後に、ステレオ相関法において計測の障害となる鏡面反射の影響を低減するためにカメラを三台使ったシステムを提案した。三台のカメラの組合せにより得られた三セットのレンジデータから高輝度部分を避けるように選択することで鏡面反射の影響の少ないレンジデータを得ることができた。

第3章では、視点に依存しない属性を持つ主曲率ベクトルを実在のレンジデータの曲面においてロバストに計算が可能となる ISL 法を提案した。その後、提案手法を従来法の二次曲面あてはめ法と比較したシミュレーション実験を行って評価を行った。その結果、ランダムなノイズを与えた楕円体のデータに対して従来法ではわずかなノイズが乗っても結果が大きく狂うが、提案手法では安定した結果を出すことを示した。この実験結果をもとに、提案手法を用いれば実データに対して信頼性のある主曲率ベクトルを計算可能であると結論づけた。

第4章では、第3章で提案した手法で計算した主曲率ベクトルを利用して視点に依存しない曲面の構造化手法について述べた。構造化は二つの段階からなり、第一の段階では曲面上の複数の属性 (点の距離・法線ベクトル・主曲率ベクトルおよ

び曲面の型)の不連続性を用いて領域に分割した。第二の段階では分割された曲面をさらに曲率線によるネットで分割した。第一の段階における曲面の分割は複数の属性の不連続性によって成されるため、微小領域のマージには隣接する領域との境界線の信頼性判定を行うことで、より信頼性の高い境界を残してマージした。第二の段階の曲率線ネットの構成では、曲率線が主曲率ベクトルを接線とする曲線であるので、視点非依存性があり、曲率最大方向と最小方向の主曲率ベクトルが直交することから、交点が直角になる四辺形のネットで曲面を分割できることを示し、初期ネットの構築とリラクゼーションからなる構築アルゴリズムを示した。実際に計測されたレンジデータに対してこの二つのアルゴリズムによる処理を行い、視点に依存しない曲面の分割ができることを示した。

第5章「主曲率ベクトル分布による管状曲面の位置姿勢推定」では、管状曲面における主曲率ベクトルの分布の特性を利用し、位置姿勢推定を行う手法を提案した。最初に管状曲面における主曲率ベクトルと曲面の姿勢の関係を解析した。その後、その関係を利用し、未知の位置姿勢にある管状物体のレンジデータから主曲率ベクトル分布を取り出し、曲面の位置姿勢を推定するアルゴリズムを提案した。さらに、それを実験によって確認した。実験においては第3章において提案された手法による主曲率ベクトル計算のアルゴリズムが用い、凹凸がある鋳物のエルボーの実データに対してICPアルゴリズムの初期値として十分な精度を持つ位置姿勢変換行列を得ることができた。

以上の章で第3章で提案したISL法による主曲率ベクトルのロバスト性とその曲面表現や物体の位置姿勢推定への有用性を示すことができた。

レンジデータの解像度や精度はカメラの解像度の向上などによって増加する傾向がある。そのため、レンジデータは物体表面の形状の詳細な情報として優れている反面、必要以上に詳細な情報を持ち取扱いが困難な場面がしばしば存在する。一方でそれを許容するコンピュータの演算速度、メモリや記憶媒体の容量の増加も存在するが、CGによって表示するような単純な繰り返し処理ではなく位置姿勢推定のような分野ではモデルとデータの特徴量照合という処理においてデータの構造化によって膨大なサイズの生データを直接扱わずにすむことの重要性は増している。

今後は、本研究で得られた手法をさらに進展させ、形状表現および物体認識の手法を進化させていく予定である。形状表現においては、曲率線による曲面分割

の課題を解決し、臍点を含んだ曲面に自動的に曲率線ネットを構築する手法を開発する。また、主曲率分布を利用した位置姿勢推定においては、より一般的な曲面を持つ物体や領域情報を利用した位置姿勢推定方法との融合を計画している。

また、レンジデータ取得技術についても、まだ行うべき研究課題は多い。特にステレオ相関法においては、ヒトの処理能力にはまだまだ届かないレベルである。一つの理由は、ヒトの場合には単眼においてすでに高度な画像の認識能力があり画像中の物体の識別が可能であることが誤対応を排除するために役立っている。また、連続動画像の処理により一瞬のステレオ画像では解決できない矛盾も解決できる場合があると筆者は考えている。

こういったヒトの機能を完全に模倣する必要性は全くないが、機能的には同程度の完成度が特にロボットビジョンの分野では期待されている。今後、可能であればそういう期待に応えられる研究成果に貢献することを望んでいる。

謝辞

本研究は、著者が通商産業省工業技術院電子技術総合研究所（以下電総研）および改組した独立行政法人産業技術総合研究所（以下産総研）において行った研究をまとめたものである。旧電総研制御部長白井良明氏，同知能システム部長弓場敏嗣氏，高瀬國克氏，築根秀男氏，産総研知能システム研究部門長谷江和雄氏，平井成興氏，比留川博久氏には本研究の機会を与えていただいた。

本研究の執筆にあたり大島正毅（現株式会社アプライド・ビジョン・システムズ）氏，富田文明氏には貴重な助言をいただいた。また，植芝俊夫氏，河井良浩氏，角保志氏，高瀬竜一氏には有意義な議論を頂いた。電総研および産総研の研究生活において多くの方々に研究上の議論を通じて意見を頂いた。

National Research Council of Canada の Pierre Boulanger 氏（現 Alberta 大学）には ISL 法の初期において貴重な意見を頂いた。

三洋電機株式会社の高橋裕信氏（現株式会社アプライド・ビジョン・システムズ）と杉本和英氏（現沖縄工業高等専門学校）にも，共同研究を通じてレンジファインダの開発等の際に意見を頂いた。

日立金属株式会社 吉村剛治氏には管状曲面の位置姿勢推定手法の研究において研究機会の提供および協力を頂いた。

本研究をまとめるにあたり，東京工業大学 精密工学研究所 佐藤誠教授に御指導とご助言を賜わった。

以上，御指導，御協力を頂いた方々に対して深甚の謝意を表する。

参考文献

- [1] 河井良浩, 植芝俊夫, 石山豊, 角保志, 富田文明. "セグメントベーストステレオにおける連結性に基づく対応評価 (<特集>画像の認識・理解)". 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 8, pp. 3219–3229, 1999-08-15.
- [2] Nicholas Ayache and Francis Lustman. "Trinocular stereovision: recent results". In *Proceedings of the 10th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 2*, pp. 826–828, 1987.
- [3] H. Takahashi and F. Tomita. "Planarity constraint in stereo matching". In *Proc. of 9th International Conference on Pattern Recognition*, pp. 446–449, 1988.
- [4] 大島正毅. "3次元情報を用いる物体認識の研究". 電子技術総合研究所研究報告, pp. 1–54, July 1982.
- [5] Marc Rioux. "Laser range finder based on synchronized scanners". *Appl. Opt.*, Vol. 23, No. 21, pp. 3837–3844, Nov 1984.
- [6] L. Richard Carley, Andrew Gross, and Takeo Kanade. "Integrated sensor and range finding analog signal processor". *Proc. IEEE 1990 Custom Integrated Circuits Conference*, pp. 7.1.1–7.1.6, May 1990.
- [7] Larry Matthies, Tucker Balch, and Brian Wilcox. "Fast Optical Hazard Detection for Planetary Rovers using Multiple Spot Laser Triangulation". In *Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 859–866, Apr 1997.
- [8] 船富卓哉, 飯山将晃, 角所考, 美濃導彦. "光切断法による複数運動剛体の形状計測 (幾何解析と形状復元, <特集>画像の認識・理解論文)". 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, Vol. 90, No. 8, pp. 1858–1867, 2007-08-01.

- [9] ”測定原理–非接触 3 次元デジタイザ VIVID9i — コニカミノルタ”.
<http://www.konicaminolta.jp/instruments/products/3d/vivid9i/>.
- [10] K. Sato, H. Yamamoto, and S. Inokuchi. “Tuned range finder for the high precision 3D data”. In *Proc. Eighth International Conference on Pattern Recognition*, pp. 1168–1171, 1986.
- [11] 服部数幸, 佐藤幸男. ”レーザパターンシフトによる高分解能空間コード化法”.
 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol. 80, No. 6,
 pp. 1423–1431, 1997-06-25.
- [12] 三高良介, 濱田長生. 位相シフト法による高速高精度 3 次元計測技術 (特集 生産技術). 松下電工技報, No. 78, pp. 10–15, 2002-08.
- [13] R. Simmons, E. Krotkov, L. Chrisman, F. Cozman, R. Goodwin, M. Hebert, L. Katragadda, S. Koenig, G. Krishnaswamy, Y. Shinoda, W. Whittaker, and P. Klarer. ”Experience with rover navigation for lunar-like terrains”. *Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on*, Vol. 1, p. 441, 1995.
- [14] 二宮芳樹. 走行環境認識のためのステレオ視の一方法 (画像認識, コンピュータビジョン). 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, Vol. 91, No. 3, pp. 803–812, 2008-03-01.
- [15] D. Nitzan. “The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis”. *Proc. IEEE*, Vol. 65, pp. 206–220, 1977.
- [16] R. A. Lewis and A. R. Johnston. “A Scanning Laser Range Finder for a Robotic Vehicle”. *Proc. 5th IJCAI*, 1977, pp. 762–768, 1977.
- [17] R. A. Jarvis. “A LASER TIME-OF-FLIGHT RANGE SCANNER FOR ROBOTIC VISION”. *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, Vol. 5, No. 5, pp. 505–512, 1983.
- [18] Elena Stoykova, A. Aydin Alatan, P. Benzie, Nikolaos Grammalidis, Sotiris Malassiotis, Jörn Ostermann, S. Piekh, Ventseslav Sainov, Christian

- Theobalt, T. Thevar, and Xenophon Zabulis. "3-D Time-Varying Scene Capture Technologies - A Survey.". *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn.*, Vol. 17, No. 11, pp. 1568–1586, 2007.
- [19] "Mesa Imaging AG - SwissRanger SR4000 - miniature 3D time-of-flight range camera". <http://www.mesa-imaging.ch/TechOverView.php>.
- [20] Masaki Oshima and Yoshihiro Shirai. "A Model Based Vision for Scenes with Stacked Polyhedra Using 3D Data". In *Proc. '85 ICAR*, pp. 191–198, 1985.
- [21] Franc Solina, Ruzena Bajcsy, Arqd Ruzena Bajcsy, and Senior Member. "Recovery of Parametric Models from Range Images: The Case for Superquadrics with Global Deformations". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 12, pp. 131–147, 1990.
- [22] B. Parvin and G. G. Medioni. "Segmentation of Range Images into Planar Surfaces by Split and Merge". In *CVPR*, pp. 415–417, 1986.
- [23] A. D. Gross and T. E. Boulton. "Recovery of Superquadrics from Depth Information". In *Spatial Reasoning and Multi-Sensor Fusion*, pp. 128–137, 1987.
- [24] 堀越力, 笠原久嗣. "超2次関数による3次元形状インデクシング". 電子情報通信学会論文誌. D-2, 情報・システム. 2, パターン処理, Vol. 73, No. 10, pp. 1716–1724, 1990-10.
- [25] James F. Blinn. "A Generalization of Algebraic Surface Drawing.". *ACM Trans. Graph.*, Vol. 1, No. 3, pp. 235–256, 1982.
- [26] 町田聡. "メタボールを囲む背景と最新のスーパーメタボール". *PIXEL*, Vol. 114, pp. 49–55, 1992.
- [27] 阿部亨, 木村正行. "B-スプライン法による滑らかな物体のモデル化". 信学技報, 1987.
- [28] Paul J. Besl and Ramesh Jain. "Three-Dimensional Object Recognition.". *ACM Comput. Surv.*, Vol. 17, No. 1, pp. 75–145, 1985.

- [29] 大竹竜人, 牧野光則, 大石進一, 堀内和夫. "2変数ブレンディング関数を用いた自由形状曲面の生成". 信学技報, 1987.
- [30] A. W. Nutbourne and R. R. Martin. "*Differential Principal patch, in Differential Geometry Applied to Curve and Surface Design*". Ellis Horwood Limited, England, 1988.
- [31] A. M. McIvor and R. J. Valkenburg. "A comparison of local surface geometry estimation methods". *Machine Vision and Application*, Vol. 10, No. 1, pp. 17–26, May 1997.
- [32] T. Kasvand. "Surface Curvature in 3D Range Images". In *Proc. ICPR 1986*, Vol. 2, pp. 842–845, 1986.
- [33] Paul J. Besl and Ramesh C. Jain. "Invariant surface characteristics for 3D object recognition in range images". *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 33, No. 1, pp. 33–80, 1986.
- [34] Nabih N. Abdelmalek. "Algebraic error analysis for surface curvatures and segmentation of 3-D range images.". *Pattern Recognition*, Vol. 23, No. 8, pp. 807–817, 1990.
- [35] Paul J. Besl and Ramesh Jain. "Segmentation through Variable-Order Surface Fitting.". *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 10, No. 2, pp. 167–192, 1988.
- [36] T. J. Fan, G. Medioni, and R. Nevatia. "Segmented Descriptions of 3-D Surfaces". *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 527–538, 1987.
- [37] Y.Sumi, Y.Kawai, T.Yoshimi, and F. Tomita. "3D object recognition in cluttered environments by segment-based stereo vision". *Int. J. of Computer Vision*, Vol. 46, No. 1, pp. 5–23, 2002.
- [38] F. Tomita, T. Yoshimi, T. Ueshiba, Y. Kawai, Y. Sumi, T. Matsushita, N. Ichimura, K. Sugimoto, and Y. Ishiyama. "R & D of Versatile 3D Vi-

- sion System VVV". In *Proc. IEEE Int'l Conf. on SMC*, pp. 4510–4516, Oct. 1998.
- [39] D. Kotake, K. Satoh, S. Uchiyama, and H. Yamamoto. "A fast initialization method for edge-based registraion using an inclination constraint". In *Proc. ISMAR 2007*, pp. 239–248, 2007.
- [40] Kenichi Maruyama, Koji Oka, Ryuichi Takase, Yoshihiro Kawai, Takashi Yoshimi, Hironobu Takahashi, and Fumiaki Tomita. "3D Localization of Partially Burried Object in Unstructured Environment". In *Proc. ICPR 2008*, TuBCT8.42, 2008.
- [41] 池内克史. "拡張ガウス像に基づく被写体いがぐり表現像から観測方向決定のための一手法". 電子通信学会論文誌. D, Vol. 66, No. 5, pp. p463–470, May 1983.
- [42] 喜多泰代. "複雑環境中の遮蔽輪郭を利用した位置・姿勢検出". *MIRU2000*, pp. 43–48, 2000.
- [43] Paul J. Besl and Neil D. Mckay. "A Method for Registration of 3-D Shapes". *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, February 1992.
- [44] Yang Chen and Gérard Medioni. "Object modelling by registration of multiple range images". *Image Vision Comput.*, Vol. 10, No. 3, pp. 145–155, 1992.
- [45] 田中弘美, 岸野文郎. "3次元曲率を用いた顔の同定-顔の3次元形状特徴抽出-". 信学論, Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1595–1603, February 1993.
- [46] "PrimeSense, Reference Design". <http://www.primesense.com/?p=514>.
- [47] 上田照夫, 松木真. "時系列符号化格子法とその装置化". 信学論. D, Vol. 64, No. 8, pp. p780–787, 1981-08.
- [48] L. D. Dickson. "Characteristics of a Propagating Gaussian Beam". *Appl. Opt.*, Vol. 9, No. 8, pp. 1854–1861, Aug 1970.

- [49] 植芝俊夫, 吉見隆, 大島正毅. “光切断法に基づくレンジファインダのための高精度キャリブレーション法”. 信学報, PRU89-61, pp. 29–36, Oct 1989.
- [50] Guilherme N. DeSouza and Avinash C. Kak. ”Vision for Mobile Robot Navigation: A Survey”. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 24, No. 2, pp. 237–267, 2002.
- [51] F. Kaneko, K. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoyama, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota, and T. Isozumi. Design of Prototype Humanoid Robotics Platform for HRP. In *Proc. IEEE/RSJ Int’l Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 2431–2436, Oct. 2002.
- [52] Y. S. Sumi, Y. Kawai, T. Yoshimi, and F. Tomita. ”3D Object Recognition in Cluttered Environments by Segment-Based Stereo Vision”. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 46, No. 1, pp. 5–23, jan 2002.
- [53] 岡田慧, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允. ”PC による高速対応点探索に基づくロボット搭載可能な実時間視差画像・フロー生成法と実現”. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 896–901, 2000-09-15.
- [54] G. J. Klinker, S. A. Shafer, and T. Kanade. Using a color reflection model to separate highlights from object color. In *ICCV*, pp. 145–150, 1987.
- [55] Yoichi Sato, Mark D. Wheeler, and Katsushi Ikeuchi. Object shape and reflectance modeling from observation. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH ’97, pp. 379–387, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [56] L. B. Wolff. Using polarization to separate reflection components. In *CVPR*, pp. 363–369, 1989.
- [57] Shinji Umeyama and Guy Godin. Separation of diffuse and specular components of surface reflection by use of polarization and statistical analysis of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 26, pp. 639–647, 2004.

- [58] 丸山健一, 河井良浩, 吉見隆, 高橋裕信, 富田文明. 非整備環境からの回転体の発見と3次元位置計測. 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2005, pp. IS2-75, 2005.
- [59] 吉見隆, 植芝俊夫, 大島正毅. “複数光源によるレンジファインダシステム”. ロボット誌, Vol. 9, No. 7, pp. 803-812, 1991.
- [60] Takashi Yoshimi and Fumiaki Tomita. “Robust Curvature Vectors Calculation from Range Data Using ISL Method”. In *Proc. MVA 94*, pp. 506-509, 1994.

研究論文リスト

- 論文誌

1. 吉見 隆, 植芝 俊夫, 大島 正毅, “複数光源によるレンジファインダシステム,” ロボット誌, Vol. 9, No. 7, pp.803–812, 1991.
2. 吉見 隆, 富田 文明, “最大最小曲率線ネットによる曲面の表現,” 信学論. D-II, Vol. 77, No.1, pp. 61–68, 1994.
3. 吉見 隆, 石山 豊, 富田 文明, “円形度による領域幅の補正,” ロボット誌, Vol. 18, No. 8, pp. 1180–1183. Nov-00.
4. 吉見 隆, 高瀬 竜一, 河井 良浩, 吉村 剛治, 富田 文明, “主曲率ベクトル分布を用いた中心軸平面をもつ管状曲面物体の位置姿勢推定,” 信学論, Vol.J94-D, No.5, pp.893–907, 2011.
5. 吉見隆, 植芝俊夫, 大島正毅, “視覚認識のための高速3次元データ入力装置,” 電子技術総合研究所彙報, Vol. 55, No. 4, pp. 560–568, Apr-1991.

- 国際学会 (Full Paper 査読付き)

1. Takashi Yoshimi, Fumiaki Tomita, “Robust Curvature Vectors Calculation from Range Data Using ISL Method,” Proc. MVA 94, pp. 506–509, 1994.
2. Takashi Yoshimi, Yoshihiro Kawai, Fumiaki Tomita, “Range Data Segmentation with Principal Vectors and Surface Types,” Proc. MVA 96, pp.534–537, 1996.
3. Takashi Yoshimi, Yoshihiro Kawai, Yutaro Fukase, Hidekazu Araki, Fumiaki Tomita, “Measurement of Ground Surface Displacement using Stereo Vision and Mechanical Sensors on Humanoid Robots,” Proc.

IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems(MFI), pp. 125–130, 2003

4. Takashi Yoshimi, Yuji Hori, Hironobu Takahashi, Kenichi Maruyama, Fumiaki Tomita, “Glossy Object Measurement with Three Cameras Correlation Stereo,” Proc. IWAIT 2006, Jan-2006.
5. Takashi Yoshimi, Takaharu Yoshimura, Ryuichi Takase, Yoshihiro Kawai, Fumaki Tomita, “Multi-view Stereo Camera Calibration using Laser Targets for Measurement of Long Objects”, Proc. of International Workshop on Advanced Image Technology, Jan-2009.

● 口頭発表

1. 吉見 隆, 植芝 俊夫, 大島 正毅, “複数光源レンジファインダにおける光学系のキャリブレーション,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’92, vol. B, pp.505–508, 1992-06-18.
2. 吉見 隆, 富田 文明, “最大最小曲率線を用いた曲面の記述,” 1992 年電子情報通信学会秋季大会, vo. 6, pp.333, 1992-09-27.
3. 吉見 隆, 富田 文明, “最大最小曲率線ネットによる曲面の表現,” 情報処理学会研究報告コンピュータビジョン研究会報告, 93(40), pp. 9–16, 1993-05-20.
4. 吉見 隆, 富田 文明, “等傾斜曲線 (ISL) を用いたレンジデータのロバストな曲線ベクトル計算手法,” 1995 年電子情報通信学会総合大会論文集, 情報・システム (2), pp. 362, 1995-03-27.
5. 吉見 隆, 河井 良浩, 富田 文明, “主ベクトルと曲面の型によるレンジデータのセグメンテーション,” 全国大会講演論文集 第 53 回平成 8 年後期 (2), pp. 297–298, 1996-09-04.
6. 吉見 隆, 富田 文明, “境界追跡型ラベリングの円筒状画像への拡張,” 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解 102(554), pp. 103–108, 2003-01-09.
7. 吉見 隆, 高瀬 竜一, 河井 良浩, 富田 文明, “主曲率ベクトル分布を用いた管状曲面物体の位置姿勢推定,” 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU,

パターン認識・メディア理解 109(306), pp. 241–246, 2009-11-19.

以上.