



Title	画像処理による物体の運動と形状の3次元復元に関する研究
Author(s)	鎌田, 洋
Citation	大阪大学, 1998, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3155583
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

画像処理による物体の運動と形状の
3次元復元に関する研究

鎌田 洋

①

目次

画像処理による物体の運動と形状の

3次元復元に関する研究

1998年10月

鎌田 洋

目 次

あらかし	1
第 1 章 序論	2
1. 1 本研究の背景と目的	2
1. 2 本研究の課題と関連研究	2
1. 3 本研究の構成	3
第 2 章 高速Hough変換による物体画像の特徴抽出と特徴配列に基づく移動車の走行	5
2. 1 まえがき	5
2. 2 開発した方式	7
2. 2. 1 対象物の実時間抽出方式	7
2. 2. 2 対象物体列の高速認識方式	8
2. 2. 3 ハンドル量の決定方式	11
2. 2. 4 対象物体列の選択方式	18
2. 3 開発したシステム	19
2. 3. 1 画像処理ボード	21
2. 3. 1. 1 色抽出部	21
2. 3. 1. 2 論理フィルタ部	22
2. 3. 2 CPUボード	24
2. 4 実験	26
2. 4. 1 内容	26
2. 4. 2 結果	27
2. 5 高速Hough 変換方式と従来方式との比較考察	29
2. 5. 1 従来Hough 変換方式との比較	29
2. 5. 2 最小2乗法を用いる直線の推定方式との比較	30
2. 6 むすび	33
第 3 章 正射影撮像モデルを用いた物体の運動と形状の3次元復元方式	35

3. 1	まえがき	3 5
3. 2	問題の定式化	3 7
3. 3	復元できる条件	3 9
3. 4	統一的な復元解法	4 1
3. 5	平面上の移動物体の認識方式	4 3
3. 5. 1	一般の場合	4 3
3. 5. 2	物体の動きが一定の場合	4 4
3. 5. 3	物体に直角の縁がある場合	4 5
3. 6	実験	4 8
3. 7	むすび	5 0

第4章 中心射影撮像モデルを用いた物体の運動と形状の3次元復元方式

4. 1	まえがき	5 3
4. 2	従来の線型復元解法	5 4
4. 3	提案する線型復元解法の計算原理	5 5
4. 4	TVカメラの運動条件	5 6
4. 4. 1	座標系に従った運動条件	5 6
4. 4. 2	座標軸交換による運動条件の同一視	5 7
4. 4. 3	座標変換による運動条件の同一視	5 8
4. 5	運動条件ごとの線型復元解法	5 9
4. 6	従来の最小2乗復元解法	6 1
4. 7	提案する最小2乗復元解法	6 2
4. 8	TVカメラが固定され物体が動いている場合についての考察	6 3
4. 9	むすび	6 9

第5章 ビデオ画像入力からの対話型物体3次元復元システム

		7 0
5. 1	まえがき	7 0
5. 2	システム構成	7 2
5. 3	特徴点指示	7 3
5. 4	3次元再構成	7 4

5. 5	3次元物体復元	76
5. 6	実験	77
5. 7	むすび	82
第6章 結論		83
謝 辞		85
参考文献		86
付録		90
付録A	第3章における定理3. 3の証明	90
付録B	第4章の提案方式による個別運動条件における3次元復元の計算例	92
B. 1	運動条件(R1, h6)における3次元復元計算	92
B. 1. 1	線型復元解法	92
B. 1. 2	最小2乗復元解法	93
B. 2	運動条件(R2, h3)における3次元復元計算	93
B. 2. 1	線型復元解法	93
B. 2. 2	最小2乗復元解法	94
著者紹介		96

あらまし

本論文では、コンピュータビジョンの主要課題である、画像処理による外界の物体の運動と形状の3次元復元問題について、剛体である物体の2次元画像上での特徴を求める方式と、求めた特徴情報から得られる対応点情報を用いた3次元復元の方式とシステムについて論じた。

1章では、本研究の歴史的背景、意義、目的、具体的な研究課題、および関連研究との関係について概説した。

2章では、物体画像上の特徴線の抽出処理の高速化方式について論じた。物体画像の任意点から候補直線群を求める従来のHough変換を、物体画像の任意の2点から候補直線群を求めるように変更することで高速化した。さらに、移動車の無人走行による実験検証を示した。

3章では、正射影画像中の対応点情報を用いた物体の運動と形状の3次元復元方式について論じた。従来は、3画像間の対応点情報を2組の2画像間の対応点情報として方程式化し、観測外の情報を用いる復元解が一意である条件と、観測外の付加情報ごとの復元解の線型解法が示されていた。これに対し、本方式では、3画像間の対応点情報を行列として方程式化したことにより、観測情報のみを用いる復元解が一意的である条件と、復元解が一意的である場合に、観測情報のみを用い統一的に適用できる復元解の線型解法を明らかにした。

4章では、中心射影画像中の対応点情報を用いた物体の運動と形状の3次元復元方式について論じた。TVカメラの既知の運動条件を用いることにより、従来方式に比べて少ない対応点により3次元復元できる方式を示した。座標系に従ったTVカメラの運動条件153通りが既知である場合を対象とし、座標変換手法により17通りの運動条件の場合と等価であることを示した。次いで、TVカメラの平行移動ベクトルと回転行列の直積行列の、運動条件がない場合には線型独立である9個の未知要素を、運動条件を用いて最少個数の線型独立な別変数に線型展開することにより、17運動条件のうち13運動条件の場合において、従来方式よりも少ない対応点で復元できる線型復元解法、および最小2乗解法を示した。

5章では、3次元復元方式を応用した、実世界のビデオ映像からCGモデルを簡易に生成できる対話型物体3次元復元システムについて論じた。従来システムにおける画像特徴の自動抽出を、人間による特徴点指示に置き換えることにより、任意環境で捉えた実画像からの3次元物体の復元が可能になることを示した。

最後に6章において、本論文の成果と意義について論じた。

第1章 序論

1. 1 本研究の背景と目的

コンピュータビジョンの分野は、人工知能研究と関連して1960年代から研究されてきた[1.1]。コンピュータビジョンの研究目的は、計算機に視覚を持たせることであり、近年、ニーズが拡大しているマルチメディア技術の要素技術として大きく期待される。

コンピュータビジョンの研究分野の中でも、物体の2次元画像から3次元復元を行う処理は、ビジョンの中の最も高度な処理であるため、中心的な課題の一つとして、活発に研究されてきた。

一般の物体の2次元画像から3次元復元を行うには、複数枚の2次元画像が必要である。複数の時点で物体の2次元画像を捉える場合は、移動物体の3次元形状や動きの3次元復元問題となり、視覚制御システムなどの画像理解の応用システムをより高機能にするために重要である。

しかし、移動物体の3次元復元には、大規模な装置や長い処理時間を要したり、適用条件が限られたりするのが通常であるため、実際の産業分野には適用しにくいのが現状である。そこで、本研究では、実際の産業分野に適用しやすい3次元復元の方式とシステムを構築することを目的とした。

1. 2 本研究の課題と関連研究

コンピュータビジョンの1つの主要課題である、画像処理による外界の物体の運動と形状の3次元復元問題を研究した。特に、実際の産業分野に適用しやすい3次元復元の方式とシステムを構築することを課題とした。

物体のモデルには剛体モデルと非剛体モデル[1.2]がある。産業分野では、対象物体はほとんど剛体に限られるので、本研究では剛体モデルを用いた。

物体の3次元復元には、複数台のTVカメラを用いるステレオ視が有力候補であるが、装置規模が大きくなるため、より適用範囲の広い1台のTVカメラのみで捉えた複数の画像から、移動物体を復元する方式を研究課題にした。

時系列画像を用いる復元方式には、物体上の特徴点を画像面に対応づけて物体を復元する方式と、画像上での明暗のベクトル場であるオプティカルフローを用いる方式がある[1.3]。本論文では、計算量が少なく装置規模を小さくできる対応点による復元方式を研究課題にした。

産業分野へ応用する場合、物体画像から安定に抽出できる特徴点が極く僅かである場合も多いため、本論文では少ない特徴点を用いる復元方式を検討した。対応点情報とは、複数の画像間に対応づけられた物体上の特徴点座標という定義であるが、特に、用いる画像数と特徴点数が少ない3次元復元方式とシステムを追求した。

即ち、産業分野への応用のしやすさという観点から、剛体である物体の特徴点の2次

元画像上での、より少ない対応点情報を用いた3次元復元を研究した。

3次元復元の対象は、物体の運動と、物体上の特徴点の3次元情報として定義する形状である。実際には、物体上の特徴点に隠れが生じることがあるが、本論文では、より基本的な画像上で隠れが生じない特徴点のみの3次元復元問題を中心として研究した。

この3次元復元方式は、2次元画像上で物体の特徴点を求める処理と、特徴点を対応づける処理、対応づけられた特徴点から物体の運動と形状を3次元復元する処理に分かれる。

本論文では、画像処理の困難で本質的な課題である最初の、2次元画像上で物体の特徴点を求める処理を研究すると共に、3次元復元の本質的な課題である最後の、対応点情報から物体の運動と形状を3次元復元する処理について研究した。

2次元画像上での特徴点は、特徴線の交点として求めることができる。特徴線は、多数の画像点から求めることが必要であり、処理の高速化を本研究の課題とした。

画像の撮像モデルには、正射影モデルと中心射影モデルがある。正射影モデルは画角が小さい場合の近似撮像モデルであるが、4特徴点の対応で移動物体を復元可能である[1.4]。一方、中心射影モデルでは8特徴点の対応が必要である[1.5][1.6]が、画角によらず適用できる汎用性がある。

正射影の撮像モデルでの3次元復元の研究においては、最初に、特徴点の3時点間での対応で物体の動きと形状が同時に復元できるという原理[1.4]が提案され、非線型な復元解法[1.4][1.7]が示された。続いて、線型な復元解法の研究[1.8][1.10]が行われ、復元解が存在する場合の幾何学的な意味づけのほかに、付加条件ごとの複数のアルゴリズムによる線型解法が示された。

中心射影の撮像モデルでの3次元復元の研究においては、任意の剛体に対して2枚の画像の8対応点から3次元復元できる原理[1.10]が示された後、具体的な解析解法[1.11][1.12]が示され、特に線型解法[1.10]はさらに洗練された[1.13][1.15]。また、最小2乗法により条件式の誤差を吸収する解法[1.14]も示され洗練された[1.15]。

1. 3 本研究の構成

2章では、物体画像上の特徴線の抽出処理の高速化方式[1.16][1.17]について述べる。画像点のばらつきが大きい場合でも特徴線を抽出できることが重要であるため、方式の検証のための対象物体の題材としては、屋外における植物の列を用いた。特徴線の抽出には、一般にHough変換が用いられるが、多大な処理時間がかかる。そこで特徴線を追跡し、物体画像内に1本の特徴線のみ存在する画像処理の対象領域を設ける、という前提条件を用いて、Hough変換を高速化した。この高速Hough変換を屋外における悪環境の画像に適用し、有用性を実証した。具体的には、高速Hough変換を搭載した視覚制御システムを構築し、植物の列を捉えた画像を入力として、画像上の植物の列を表す線を高速Hough変換により抽出し、植物の列に沿って作業車を無人走行させる実験に成功した。

3章と4章では物体画像上の特徴点情報を用いた物体の運動と形状の3次元復元方式について述べる。

3章では画角が小さい場合の近似撮像モデルである正射影撮像モデルを用いた物体の

運動と形状の3次元復元方式[1.18][1.19]について述べる。従来から、3つの画像の間で対応づけた物体画像上の4つの特徴点の座標位置である対応情報から、物体の運動と形状を3次元復元する研究がされており、代表的には、Huang T.S. が考案した方式[1.9]がある。3章では、Huang T.S. が考案した方式に比較して、下記1)2)の2点で優位性がある新方式を提案する。

1) 原理的に3次元復元可能であることを、観測情報のみにより判定できる。

2) 原理的に復元可能な場合は付加情報なしで統一的に復元できる。

また、平面上の物体を同一平面方向に観測するという制約条件のもとで、制約条件がない一般方式よりも少ない3つの特徴点の対応情報で3次元復元できることを示す[1.19]。この制約条件は、物体の相対運動が観測者の視線で構成される平面内に限定される、ことと等価である。

4章では正射影撮像モデルよりも汎用性が高い中心射影撮像モデルを用いた物体の運動と形状の3次元復元方式[1.20]について述べる。3章の最後に述べた平面上の物体を同一平面方向に観測する場合のように、実応用では、観測者と物体の相対運動には、様々な制約条件がある場合が多い、と考えられる。これは、観測者と物体の両方が、重力という物理法則に常に制約されていたり、観測者や物体の運動が機械により生じる場合は、機械の機構上の条件により制約されるためである。4章では、観測者と物体の相対運動に関する制約条件を利用した物体の運動と形状の3次元復元方式について述べる。制約条件のカテゴリとしては、座標系に従った153条件を定義し、17条件に帰着させ、このうち13条件の場合で、従来方式よりも、少ない対応点で3次元復元できることを示す。さらに、必要以上の対応点数があった場合の最小2乗解法も示す。

5章では、3次元復元方式を応用した、対話型物体3次元復元システム[1.21]について述べる。画像処理による対応点抽出問題を、人間との対話処理と画像処理による特徴点位置補正により代替したシステムで、実世界のビデオ映像からCGモデルを簡易に生成できる効果があることを述べる。

最後に、6章において、本論文の成果と意義についてまとめる。

本論文の内容は、対象物体とTVカメラの運動という観点で、下記の等価な1.1)、1.2)、1.3)、2) の4つの場合に有効である。

1) 1台のTVカメラから、相対的に動いている対象物体を捉える場合

さらに、TVカメラと対象物体の動いているものの組み合わせについて、下記の3通りがある。

1.1) TVカメラのみ動いている場合

1.2) 対象物体のみ動いている場合

1.3) TVカメラと対象物体の両方が動いている場合

2) 複数のTVカメラから、同時に対象物体を捉える場合

1.1)、1.2)、1.3)、2) の4つの場合は等価であるため、各章は、記述に適した1.1)または1.2)で記述する。

第2章 高速Hough変換による物体画像の 特徴抽出と特徴配列に基づく移動車の走行

あらまし 対応点情報からの3次元復元方式に必要である物体画像の特徴点を含む、特徴抽出方式と、移動車の無人走行実験による検証について述べる。

特徴点は特徴線の交点として求めることができるため、画像領域内の特徴線の抽出を追求した。特徴線の抽出には、一般にHough変換が用いられるが、多大な処理時間がかかる。そこで物体画像内に1本の特徴線のみ存在する画像処理の対象領域を設ける、という前提条件を用いて、Hough変換を高速化した。

さらに、この高速Hough変換を屋外における悪環境の画像に適用し、有用性を実証した。具体的には、高速Hough変換を搭載した視覚制御システムを構築し、植物の列を捉えた画像を入力として、画像上の植物の列を表す線を高速Hough変換により抽出し、植物の列に沿って作業車を無人走行させる実験に成功した。

本システムは、動画像処理とファジィ推論を融合した移動車の無人走行システムであり、路上の対象物を高速に認識でき、しかもそれに沿って移動車を無人運転できる。まず画像処理部により雑音が混在する膨大な画像データから追従すべき対象物のみを取り出した後、改良型のハフ変換処理により移動車のハンドル制御に必要な位置と向きという情報に変換し、さらにファジィ制御部により移動車の運転ノウハウとすりあわせてハンドル量を決定する。画像処理部は、アナログ色抽出プロセッサと局所並列型パイプラインアーキテクチャの論理フィルタプロセッサのパイプライン処理により、1秒間に60画像をリアルタイム処理する。ファジィ推論では、移動車の運動情報も入力パラメータとしたファジールールベースを持つことにより、運動している移動車のハンドル量の決定を行えるようにした。本システムは、画像処理部のLSI化により車載できる小型システム(A4版×10cm)として実現できた。移動車に搭載した無人走行実験では、画像入力からハンドル出力まで平均100msecの高速処理と、対象物体列に沿って5cmの誤差内の追従が確認でき、本システムの実用性を実証できた。

2.1 まえがき

対応点情報からの3次元復元方式に必要である物体画像の特徴点を含む、特徴抽出方式と、移動車の無人走行実験による検証について述べる。

特徴点は特徴線の交点として求めることができるため、画像領域内の特徴線の抽出を追求した。特徴線の抽出には、一般にHough変換が用いられるが、多大な処理時間がかかる。そこで物体画像内に1本の特徴線のみ存在する画像処理の対象領域を設ける、という前提条件を用いて、Hough変換を高速化する方法について述べる。

また、この高速Hough変換の実証システムとして、植物の列を捉えた画像を入力とし

て、作業車を無人走行できる視覚制御システムについて述べる。

近年、移動車の無人運転の研究が米国[2.1]、西ドイツ[2.2]などを中心に盛んに行われている。世の中には自動車・各種作業車などの多品種かつ大量の移動車がさまざまな目的に使用されており、移動車の知能化による省力効果をねらった無人移動車の研究は大きな産業的意義がある。

このようなシステムは、次の2つの機能を満足する必要がある。

- ① 外界や移動車の状況を迅速に把握する。
- ② 上記のデータから移動車の車体条件を推論し制御する。

上記の機能を実現する手段を考案するには、人間自身の運転過程（図2.1）が良い参考となる。人間が移動車のハンドルを操作するには、路上の線や縁などを基準とする。まず、目で基準となる対象物を見つけ、それを脳で制御に必要な情報に変え、そして手で装置の操作を瞬時に行う。すなわち、目による画像処理、脳による情報加工、手による自動制御を即座に行う。



図2.1 人間の運転過程

Fig. 2.1 Human driving process.

①の目的には、テレビカメラにより入力される画像が情報として十分である。画像はデータ量が膨大であり、従来は画像処理には多大の時間を要することが問題であった。ところが近年、動画像をビデオ速度（インタレースカメラの場合、30画像/秒）で実時間処理できる技術が開発され、無人作業車の視覚部に採用できる可能性が出てきた。特に「FIVIS/VIP」[2.3][2.4]は構造可変型のパイプラインアーキテクチャにより、汎用性と高速性を両立させた。

②のような推論と制御においては、人間の運転ノウハウを計算手段として利用できることが望ましい。このようなあいまいなノウハウに基づき推論し制御する方法としては近年ファジー理論の応用が盛んである[2.5]。ファジー理論は、1965年にZadeh[2.6]が提案した人間の感覚のような不確かさを数学的に扱えるようにした理論である。ファジー理論に基づく推論方式では、人間の言葉で言い表されたあいまいなノウハウをルールに記述でき、制御に適用できる。従来の制御[2.7]では被制御プロセスを厳密に数式モデル化することが必要であるため、困難な場合が多い。これに対し、ファジー制御は、言語によるルールに基づくため、厳密な数式モデルを必要とせず、従来の制御では困難であった様々な制御が実現されてきた[2.5]。

本論文では、上記の動画像処理プロセッサとファジー推論を融合することにより、実用的な視覚制御システムを提案する。

移動車の最も基本的で重要な機能は、ガイドとなる線や一定間隔で置かれた物体など

に沿って進む機能である。そこで、今回はこの機能に的を絞り実用的な機能を考案した。本システムによれば、一定間隔で並んだ路上の対象物を高速度で認識でき、しかもこれによって対象物体の列にそって移動車を無人運転できる。実現にあたっては実用性を最重要視した。小型の作業車にも搭載できるためには、視覚制御システムは更に小型でなければならない。このため、システムの小型化に最大の努力を払った。また、一般の移動車の作業条件を考慮して路上の条件は問わないものとした。移動車が追従する物体は、一定間隔であるか連続した線であり一定の色をしているものと条件付けした。カラー動画像処理プロセッサとファジー推論を融合させることにより、自然物を含めた対象物に沿って移動車を無人運転できる超小型システムは本システムが初めてである。

本稿では、実現する上で生じた課題とそれを解決した技術、開発したシステム、実験結果について紹介する。

2. 2 開発した方式

2. 2. 1 対象物の実時間抽出方式

第1の課題は対象物の実時間抽出であった。路上には、対象物以外に水たまりや泥など多種類の雑音が混在しており、その中から対象物だけをどのようにして実時間で抽出するかである。

アスファルトの道路を走行する移動車の視覚部には、低価格性と処理の容易さにより白黒カメラが一般に使用される。しかし、一般の作業車が走行する道路では泥などによる反射があり、白黒カメラでは対象物体のみを抽出できない。そこで、カラーカメラを用いて対象物体を抽出することにした。

解決のため、路上の雑音の種類をカラー依存型と大きさ依存型に分類し、各型に応じた雑音除去方式を開発した。

カラー依存型では、対象物体は一定色であるとの条件に基づき、水たまりや泥などの他色のものを除去するようにした。特に、太陽光の水たまりにおける反射などの白色の部分は、カラー3原色RGBを同じ強度で含んでおり、対象物の色である指定色の強度の検出だけでは、白色の部分をも抽出することになってしまう。そこで、指定色の強度の明度に対する比率を用いた色抽出機能を盛り込んだ。具体的には、

$$\frac{\text{指定色の強度}}{\text{明度}}$$

の値があらかじめ設けたしきい値以上の部分を、指定色の部分として抽出するようにした。

大きさ依存型では、対象物体は一定以上の大きさであるとの条件に基づき、それ以外の微小部分を除去するようにした。例えば、対象物体の色が緑である場合は雑草が除かれる。具体的には、ある画素に対し、その画素と上下左右の画素が全て指定色であるときのみ、その画素を対象物を構成する点として抽出する機能を盛り込んだ(図2. 2)。

実際には、色抽出プロセッサと論理フィルタプロセッサを開発し、パイプライン接続することで対象物の実時間抽出を実現した(図2. 3)。

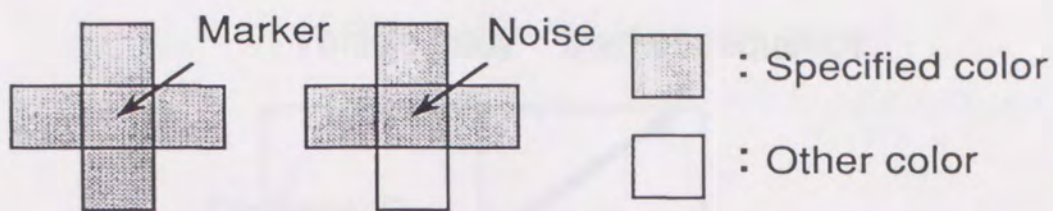


図 2. 2 サイズ条件
Fig. 2.2 Size checking.

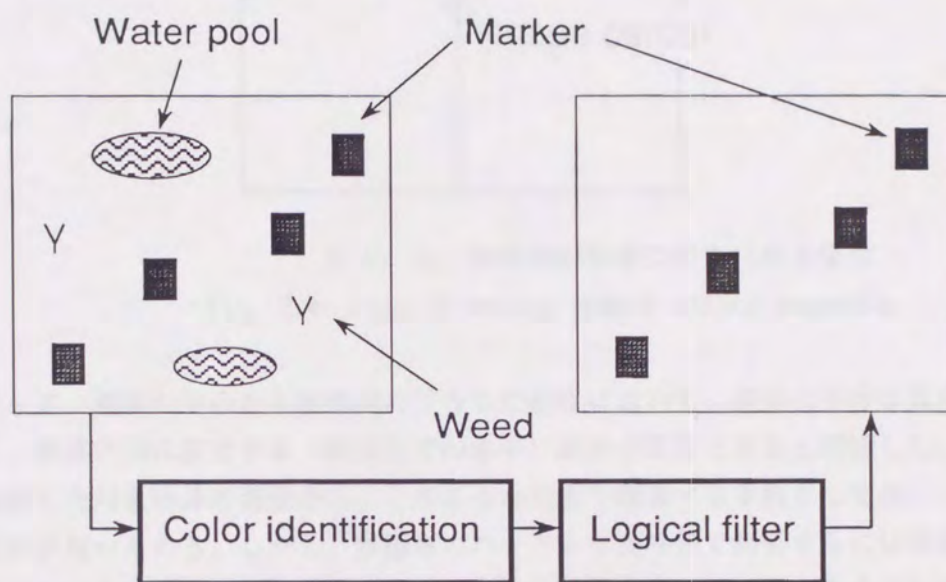


図 2. 3 対象物の実時間抽出
Fig. 2.3 Real-time marker identification.

2. 2. 2 対象物体列の高速認識方式

第2の課題は、抽出された対象物体を移動車のハンドル量に対応づけられる情報として、高速に認識することである。

これを解決すべく、人間の自動車の運転方法を参考とした。つまり、人間が自動車を運転するときも、何らかの対象物に沿うようにしていると考えた。人間は、対象物を1点や1個単位ではなく、対象物全体からその方向を意味する線を思い浮かべ、車の方向がその線に一致するようにハンドルを切る。このハンドルを切る尺度として、抽出された対象物体を次の①、②として認識することにした。

① 位置D：画面の中心から、物体列に下ろした垂線の水平成分

② 向きA：物体列が画面の中心線に対して成す角度

①で、一般には垂線の長さが考えられるが、これを位置Dとして採用するとハンドルが大きく振動しやすくなる。これは、物体列が車体の前方にある場合(図2. 4)に如実に表れる。

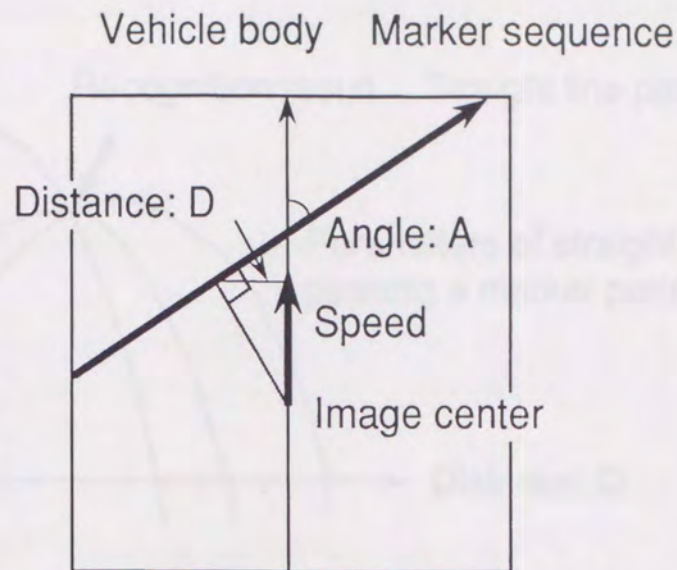


図 2. 4 物体列が車体の前方にある場合

Fig. 2.4 Case of moving toward marker sequence.

従って、画面の中心から物体列に下ろした垂線において、車体に平行な成分は重要でなく、車体方向に直交する（画面上での水平）成分が重要であると判断した。

抽出した対象物体の画像から、このような尺度を認識する手段としては、一般にはハフ変換が用いられる。しかし、移動車のハンドルを実時間で制御するには時間がかかり過ぎるという欠点がある。従来のハフ変換では、対象物体列の点の集合を直線として認識するには、次のような処理を実行しなければならないからである（図 2. 5）。

① 抽出された対象物の任意の 1 点を通る直線のパラメータ（ D , A ）をパラメータ空間 $D-A$ の曲線として求める。この処理により、対象物の任意の 1 点をパラメータ空間の曲線に対応づける。

② ①を対象物のすべての点について行う。この処理により、パラメータ空間 $D-A$ には、対象物の点の数だけの曲線が生成される。

③ パラメータ空間 $D-A$ において、曲線を点の集合とみなす。最も密度の濃い点の座標を、対象物体列を表す直線のパラメータと認識する。

ここで、①②の計算量が非常に多いことが分かる。

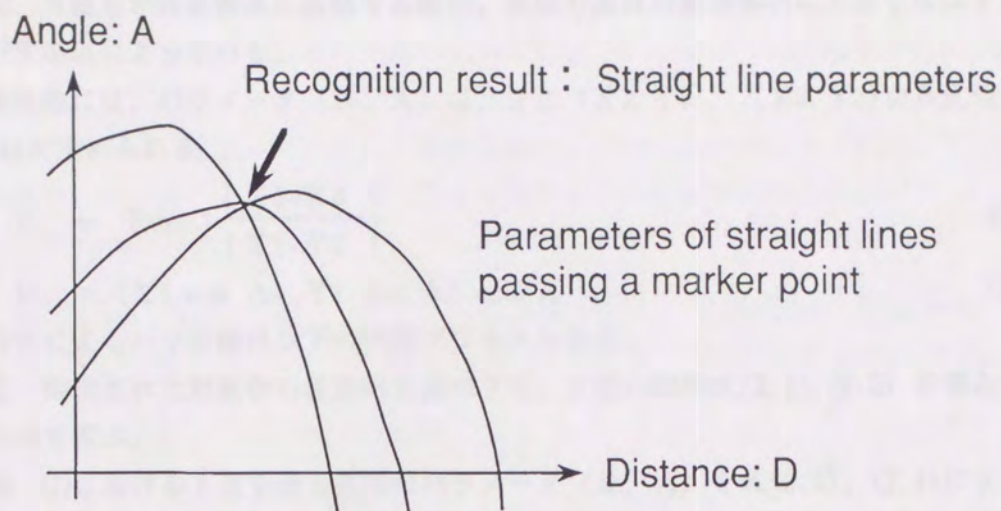


図 2. 5 従来のハフ変換

Fig. 2.5 Conventional Hough transform.

そこで、ハフ変換を下記の①、②の手段で高速化した（図 2. 6）。

① 抽出された対象物の任意の（1点ではなく）2点を結ぶ直線のパラメータを求める。

② 2点 $(X1, Y1)$, $(X2, Y2)$ の組み合わせを、次の2式で制限し、計算量を削減する。

$$|X1 - X2| < \text{定数1} \quad (2.1)$$

$$|Y1 - Y2| > \text{定数2} \quad (2.2)$$

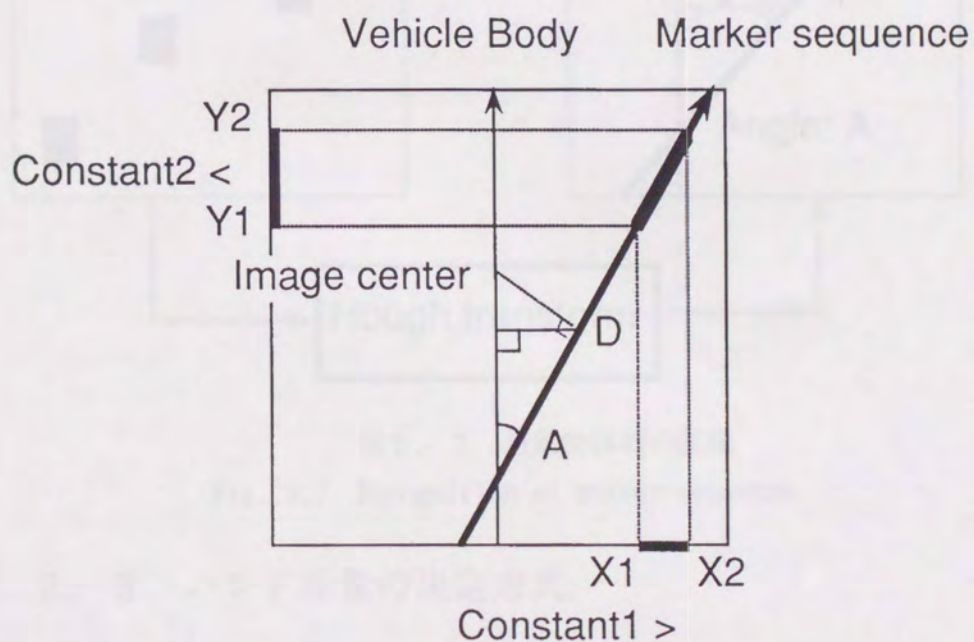


図 2. 6 ハフ変換の高速化方法

Fig. 2.6 Hough transform acceleration method.

②は、移動車が対象物体に追従する際に、車体方向は対象物体列に大きくはずれないという事実によっている。

具体的には、パラメータ (D, A) は、2点 (X1, Y1), (X2, Y2) から式(2.3)、(2.4)で求められる。

$$A = \tan^{-1} \frac{|X1 - X2|}{|Y1 - Y2|} \quad (2.3)$$

$$D = (X1 \cos A + Y1 \sin A) \cos A \quad (2.4)$$

本方式によるハフ変換は以下の処理プロセスとなる。

① 抽出された対象物の任意の2点のうち、上記の制限式(2.1), (2.2)を満たす組み合わせを選ぶ。

② ①における2点を通る直線のパラメータ (D, A) を式(2.3)、(2.4)によりパラメータ空間D-Aの1点として求める。

③ ①、②を式(2.1)、(2.2)を満たす対象物の任意の2点の組み合わせについて行う。この処理により、パラメータ空間D-Aには複数の点が生成される。

④ パラメータ空間D-Aにおいて、最も密度の濃い点の座標を、求める直線のパラメータと認識する。このように改良したハフ変換により、抽出された対象物体の画像から対象物体列を認識した(図2.7)。

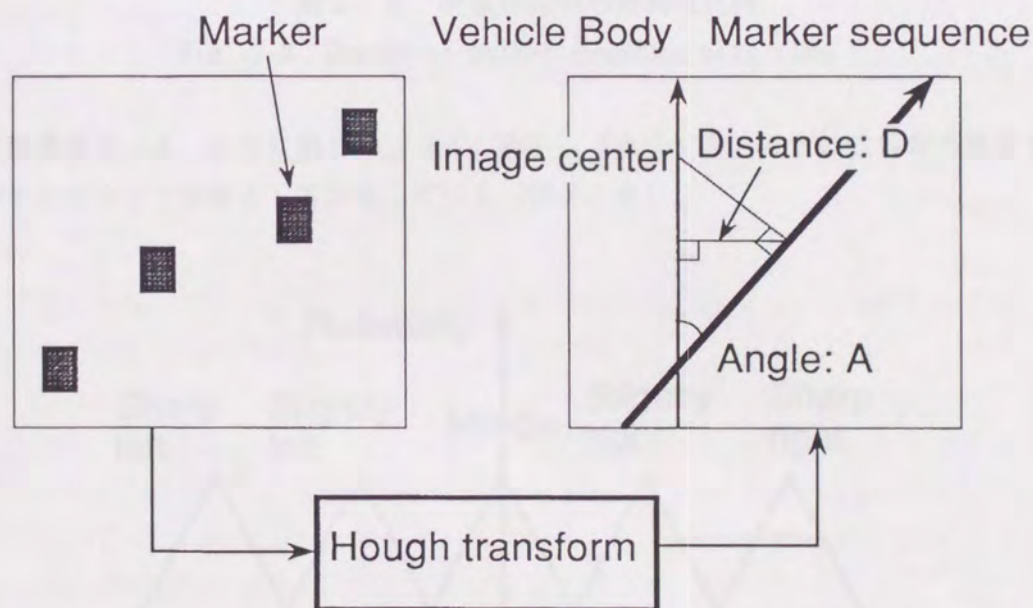


図2.7 対象物体列の認識

Fig. 2.7 Recognition of marker sequence.

2.2.3 ハンドル量の決定方式

第3の課題はハンドル量の決定であった。ハンドルの操作は人間の感覚的な運転ノウハウの集合であり、それをどのようにして物理的な操作量に置き換えるかである。

これを解決するため、人間の持つ運転ノウハウと対象物体列の認識情報をファジー推論により結合し、ハンドル量を決定した。

対象物体列の認識情報としては既に述べた位置：Dと向き：Aに位置の時間変化： ΔD を加えた。これは、車体の動きを考慮せずには、正確なハンドル量が求まらないためである。例えば、図2.8のように対象物体列が時間によって大きく変動していると、1時点の(D, A)だけでは、ハンドル量が求まらないことがわかる。

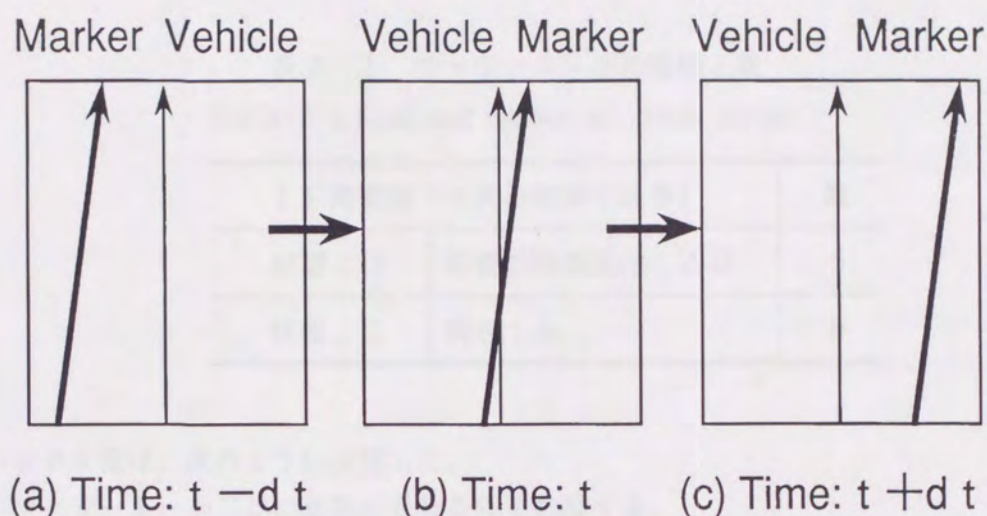


図2.8 対象物体列の時間変化例

Fig. 2.8 Change of marker sequence with time.

認識情報D、A、 ΔD に関して、「少し右」、「大きく左」などの5種類の感覚を山形のメンバシップ関数として表現している（図2.9）。

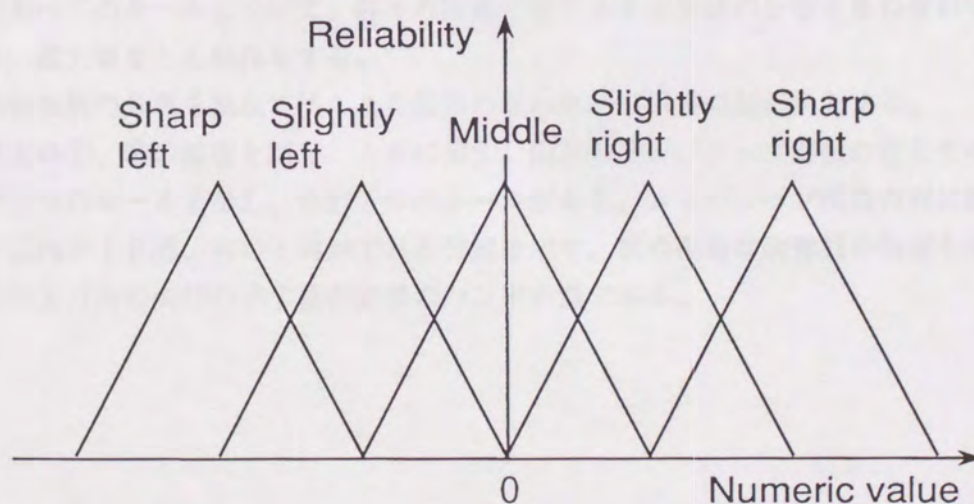


図2.9 メンバシップ関数の種類

Fig. 2.9 Membership function types.

そして、移動車の運転手からのヒアリングにより、人間の運転時におけるノウハウを抽出し、認識情報からハンドル量を求めるファジールールとして表現した。ファジールールは、I F-T H E N形式であり、

I F [(変数が～である) AND ...]
 → T H E N [ハンドル量が～である]

という形式である。ファジールールは、I F部の変数の種類により2種類から成り、合計18個である(表2.1)。

表2.1 ファジールールの種類と数
 Table 2.1 Kind and number of fuzzy rules.

I F部変数 (A N D関係で結合)		数
位置: D	位置の時間変化: ΔD	9
位置: D	向き: A	9

ハンドル量は、次のように決定した。

① ファジールールごとに車体の進行条件を推論する。

(1) I F部の各変数のメンバシップ関数に物体列の情報を入力し、その関数値を各変数の信頼度とする。

(2) I F部の変数はA N D関係で結合されているので、(1)で求めた信頼度の最小値を求める。

(3) T H E N部のメンバシップ関数を(2)で求めた最小値で台形状に制約する。

② すべてのファジールールに関する推論結果を統合することでハンドルの回転角を算出する。

(1)すべてのルールについて、各々の推論結果である台形状の分布を重ね合わせる。つまり、最大値をとる操作をする。

(2)台形状の分布を重ねて得られた図形の重心をハンドルの回転角とする。

以上の①、②の原理を図2.10に示す。山形のメンバシップ関数の行とその上の説明が1つのルールを示し、合計2つのルールがある。メンバシップ関数の列に関しては、左の2列がI F部、右の1列がT H E N部を示す。縦の破線は物体列の情報を示し、一番右の上方向の矢印の示す値が結果のハンドル量である。

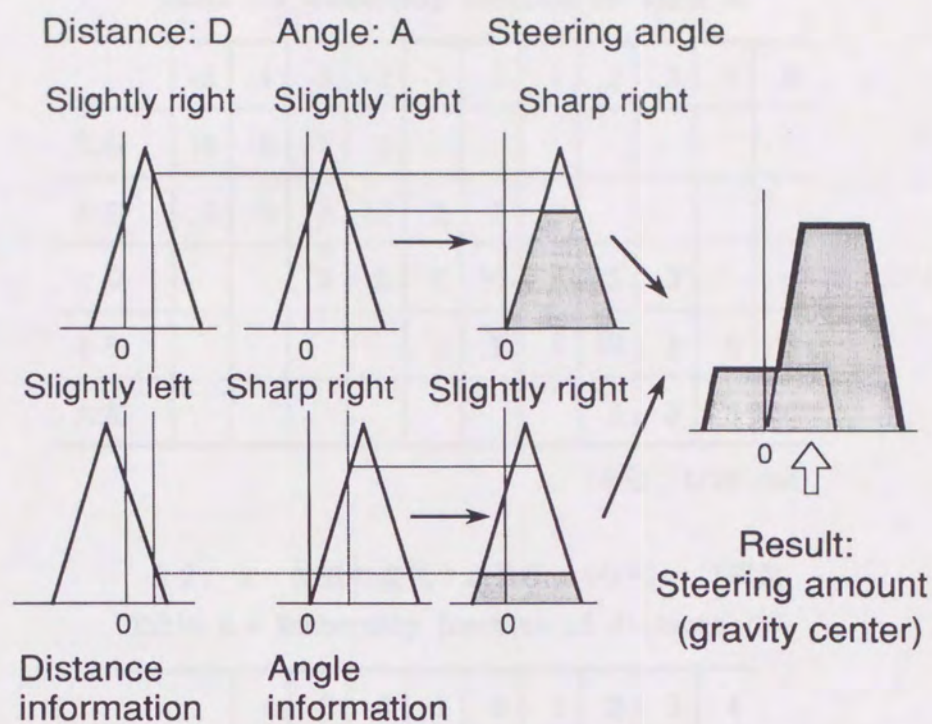


図 2. 10 ファジー推論の原理

Fig. 2.10 Principle of fuzzy inference process.

図 2. 9 に模式的に示したメンバシップ関数は、実際には計算速度を上げるため離散型を採用した。台集合[2.8]の要素数は 9 ～ 11、確信度の荷重は 4 ～ 5 段階とした。表 2. 2 ～ 表 2. 5 にメンバシップ関数の具体的な数値を示す。

表 2. 2 位置：D のメンバシップ関数

Table 2.2 Membership function of distance D.

	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
大右								3	5	8	10
小右					3	5	8	10	8	5	3
中央			3	5	8	10	8	5	3		
小左	3	5	8	10	8	5	3				
大左	10	8	5	3							

(単位：1/0.67 pixel)

表 2. 3 向き：A のメンバシップ関数

Table 2.3 Membership function of angle A.

	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
大右	10	8	5	3							
小右	3	5	8	10	8	5	3				
0			3	5	8	10	8	5	3		
小左					3	5	8	10	8	5	3
大左								3	5	8	10

(単位：1/20 rad)

表 2. 4 位置の変化：△D のメンバシップ関数

Table 2.4 Membership function of distance △D.

	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
大右							3	7	10
小右					3	7	10	7	3
無し			3	7	10	7	3		
小左	3	7	10	7	3				
大左	10	7	3						

(単位：20/0.67 pixel)

表 2. 5 ハンドル量のメンバシップ関数

Table 2.5 Membership function of steering angle.

	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
大右	10	7	3						
小右	3	7	10	7	3				
中央			3	7	10	7	3		
小左					3	7	10	7	3
大左							3	7	10

(単位：操向係数)

表2. 1に示したファジールールベースの具体的な内容を表2. 6と表2. 7に示す。これらのファジールールは、実験に使用した作業車の熟練運転者にヒアリングして得たものである。

ファジールールベース1のIF部の2つの変数の効果は加算的ではないが、相補的になっている。例えば、変数Dと変数 ΔD が共に「小さく左」の場合はハンドル量も「小さく左」であり、変数Dが「小さく左」かつ変数 ΔD が「大きく右」の場合はハンドル量は「小さく右」である。

これに対して、ファジールールベース2のIF部の2つの変数の効果は加算的ではあるが、相補的にはなっていない。例えば、変数Dと変数Aが共に「小さく左」の場合はハンドル量は「大きく左」であり、変数Dが「小さく左」かつ変数Aが「大きく右」の場合はハンドル量は「大きく右」である。

表 2. 6 ファジー推論ルールベース 1
Table 2.6 Fuzzy inference rule base 1.

No.	I F 部変数		THEN 部変数
	位置 : D	ΔD	ハンドル量
1-1	ずれなし	変化なし	中 央
1-2	小さく右	小さく左	中 央
1-3	小さく左	小さく右	中 央
1-4	小さく右	小さく右	小さく右
1-5	小さく左	小さく左	小さく左
1-6	小さく右	大きく左	小さく左
1-7	小さく左	大きく右	小さく右
1-8	大きく右	変化なし	大きく右
1-9	大きく左	変化なし	大きく左

マトリックス表現
Matrix expression

$\Delta D \backslash D$	大左	小左	中央	小右	大右
大左				小左	
小左		小左		中央	
無し	大左		中央		大右
小右		中央		小右	
大右		小右			

表 2. 7 ファジー推論ルールベース 2
Table 2.7 Fuzzy inference rule base 2.

No.	I F 部変数		THEN 部変数
	位置 : D	向き : A	ハンドル量
2-1	ずれなし	同方向	中 央
2-2	小さく右	同方向	小さく右
2-3	小さく左	同方向	小さく左
2-4	小さく右	小さく右	大きく右
2-5	小さく左	小さく左	大きく左
2-6	小さく右	大きく左	大きく左
2-7	小さく左	大きく右	大きく右
2-8	大きく右	同方向	大きく右
2-9	大きく左	同方向	大きく左

マトリックス表現
Matrix expression

A \ D					
	大左	小左	中央	小右	大右
大左				大左	
小左		大左			
中央	大左	小左	中央	小右	大右
小右				大右	
大右		大右			

2. 2. 4 対象物体列の選択方式

第 4 の課題は、対象物体列が複数あり、入力画面に他の対象物体列が入って来た時の正しい列の選択を如何にするかである。

実際、単に 1 列の対象物体列に追従して走行するだけでなく、複数の対象物体列がある場合が多い。例えば複線化された電車の線路のように対象物体列を設定する場合がこれに当たる。最初に、どの対象物体列に追従して走行するかを決めるのは人間であるが、追従の途中で画面に他の対象物体列が入って来るのは避けられない。

これを解決するため、直前の対象物体列のパラメータ (D, A) に応じて、画面にマスクをかけて他の対象物体列が入ってきても、本来追従すべき対象物体列のみを抽出できるようにした (図 2. 1 1)。

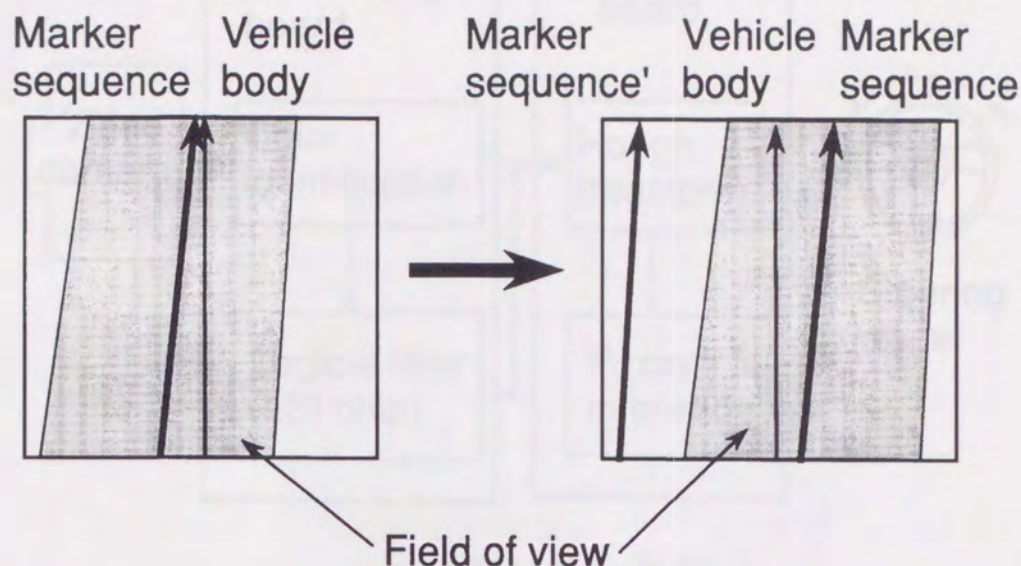


図 2. 1 1 対象物体列の選択

Fig. 2.11 Selection of target marker sequence.

2. 3 開発したシステム

開発した方式をもとに移動車の視覚制御システムを開発した。単なる実験用システムでなく、実用的なシステムの開発を目的とした。このためシステムは、下記の①、②を満足する必要があった。

- ① 実時間でハンドル制御できる高速処理
- ② 移動車に容易に搭載できる小型・軽量システム これらの条件を満たすため、本システムを画像処理ボードと CPU ボードの 2 枚のプリント板から構成した (図 2. 1 2)。画像処理ボードでは、色抽出と論理フィルタ機能を実行する。特に論理フィルタ機能は L S I 化した。CPU ボードでは、ハフ変換とファジー推論をファームウェアとして実行する。この結果、本システムを約 A 4 版×10cm と超小型化できた (図 2. 1 3)。以下、各部の詳細を述べる。

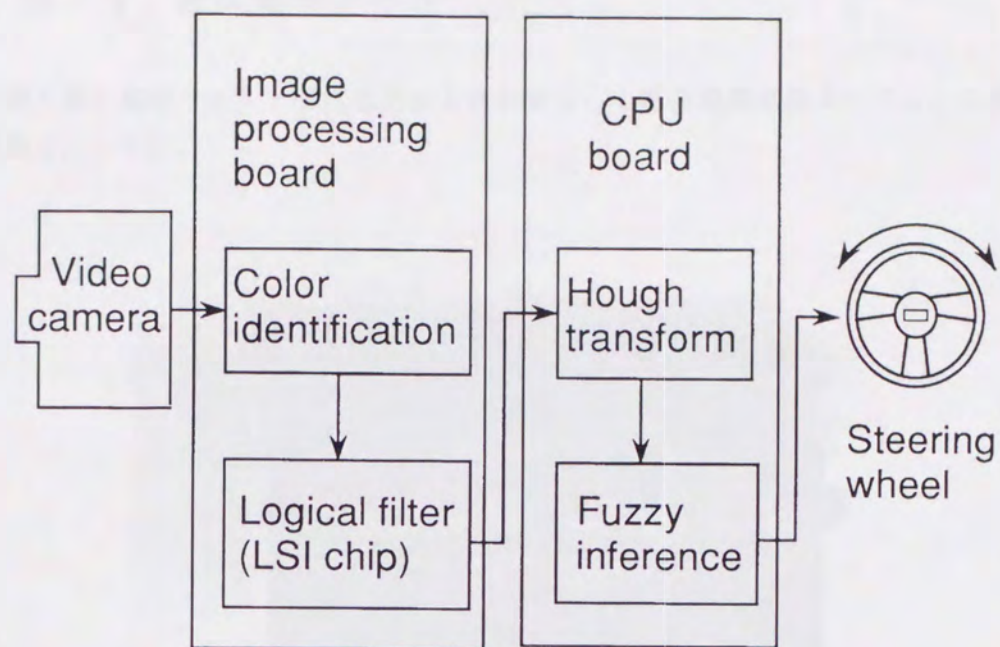


図 2. 1 2 システム構成
Fig. 2.12 System configuration.

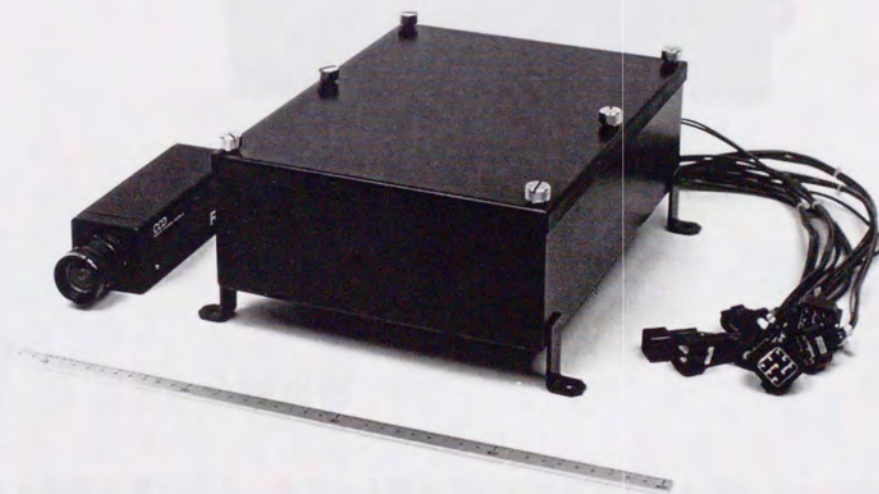


図 2. 1 3 装置外観
Fig. 2.13 Visual control system.

2. 3. 1 画像処理ボード

色抽出部と論理フィルタ部は電源部と合わせて、1枚の画像処理ボードとして実現した(図2. 14)。

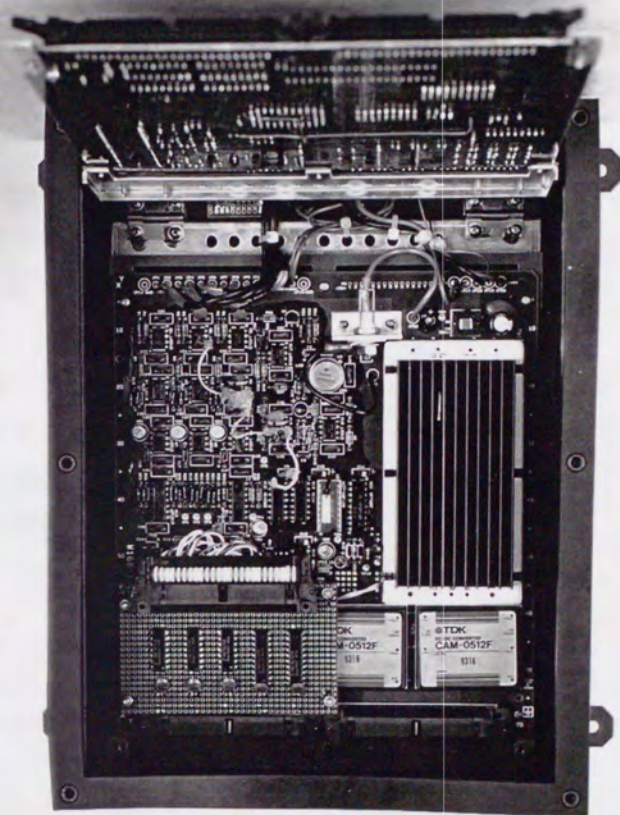


図2. 14 画像処理ボード
Fig. 2.14 Image processing board.

2. 3. 1. 1 色抽出部

デジタル回路を用いると、カラー3原色RGBの信号をそれぞれA-D変換する必要がある、これではシステム全体が大きくなる。

そこで、色抽出部をアナログ回路を用いて構築し、A-D変換部を1箇所とした(図2. 15)。任意の色をアナログ回路で抽出するのは困難であるので、抽出色はカラー3原色RGB(赤, 緑, 青)のうちの任意の1色とした。アナログ色抽出部において画面全体から指定色を抽出した後は、2値化している。

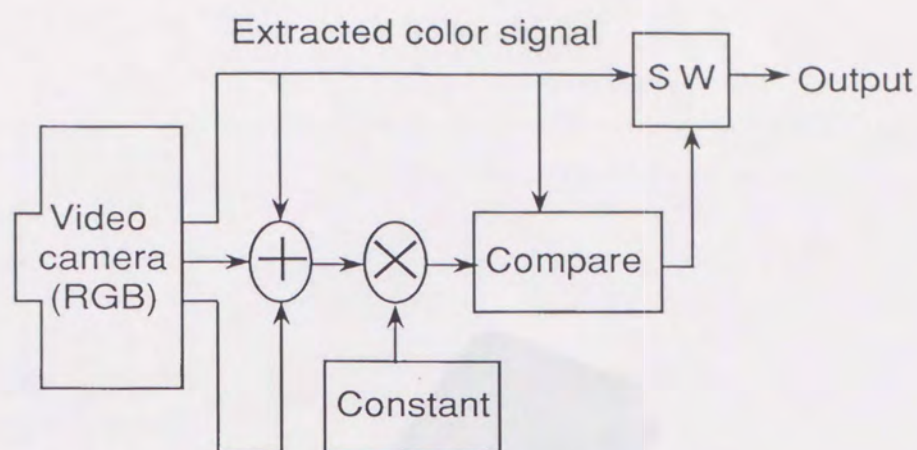


図 2. 15 アナログ色抽出部の構成

Fig. 2.15 Configuration of analog color identification section.

2. 3. 1. 2 論理フィルタ部

大きさ依存型の雑音は、論理フィルタ部で除去する。局所並列パイプラインアーキテクチャを採用した論理フィルタ部（図 2. 16）により、

- ① ビデオ速度による高速処理
- ② フレームメモリの不要化による小型化を実現した。

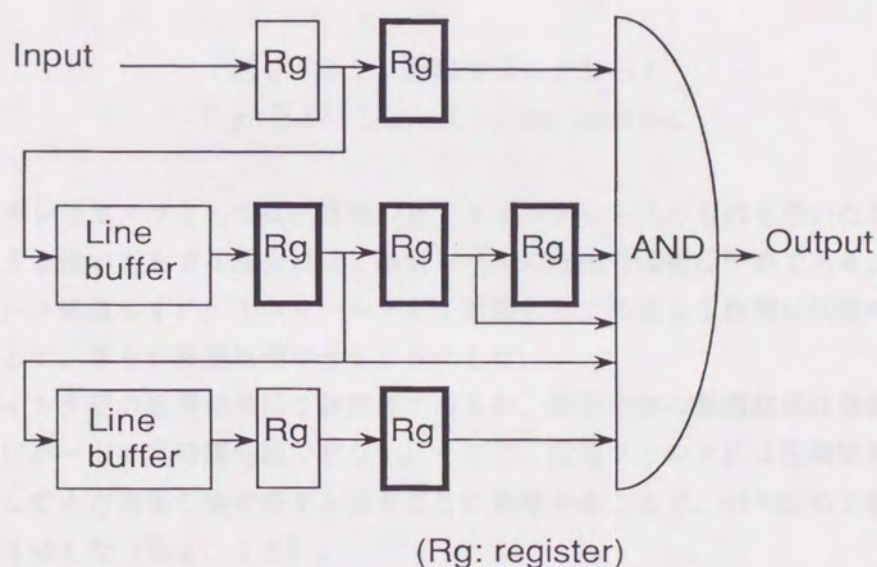


図 2. 16 論理フィルタ部の構成

Fig. 2.16 Configuration of logical filter section.

しかし、これでもプリント板で実現すると A 4 版程度となり大きすぎるので、LSI 化を実施し、さらに小型化を実現した（図 2. 17）。

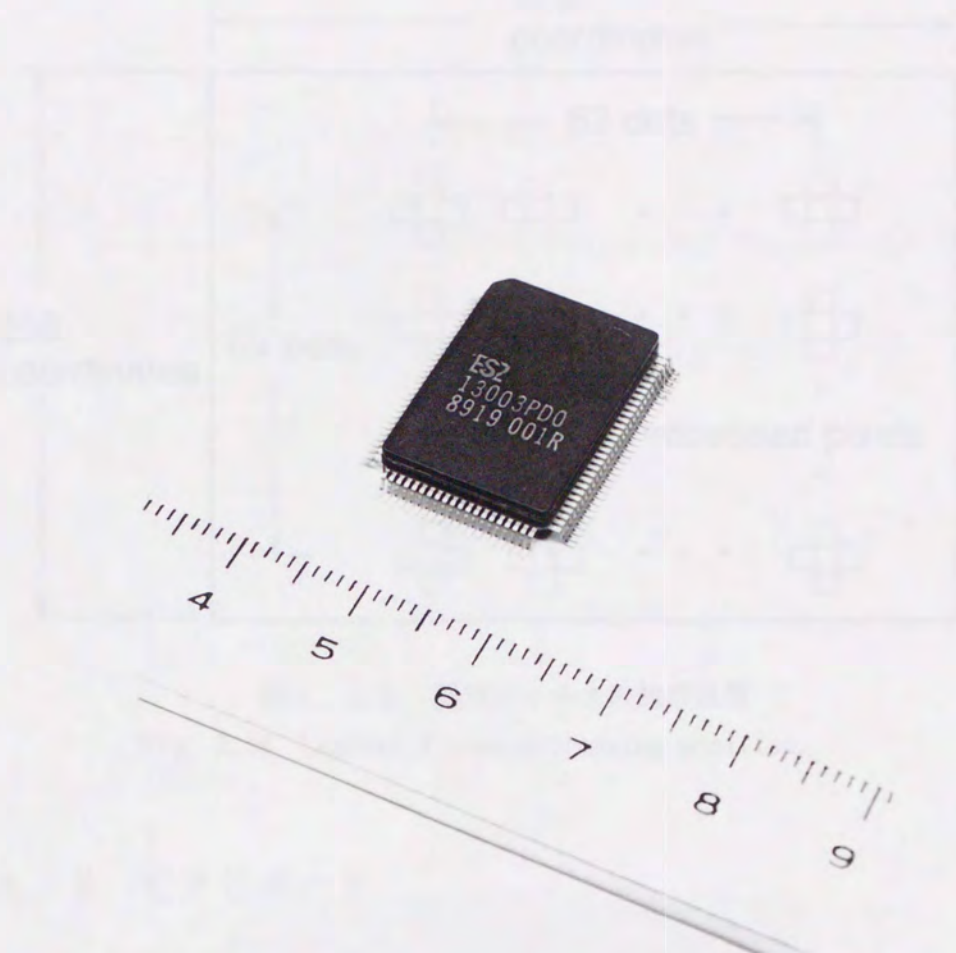


図 2. 17 論理フィルタ L S I

Fig. 2.17 Logical filter section.

さて、テレビカメラとしては、標準の2:1インタレースのものを用了が、本システムのような使い方をする場合には1画素レベルの細部の情報は不要である。そこで、インタレース処理せずに、1フィールドを1画面として処理し1秒間に60枚の画像を取り込むことで、さらに高速処理できるようにした。

論理フィルタ部の処理結果は2値画像であるが、画面全体の処理結果は情報量が多すぎ、CPUボードで実時間処理できない。そこで、論理フィルタには圧縮効果があることを利用して入力画像の横中央を4画素ごとに処理することで、63×63の2値画像に圧縮するようにした(図2. 18)。

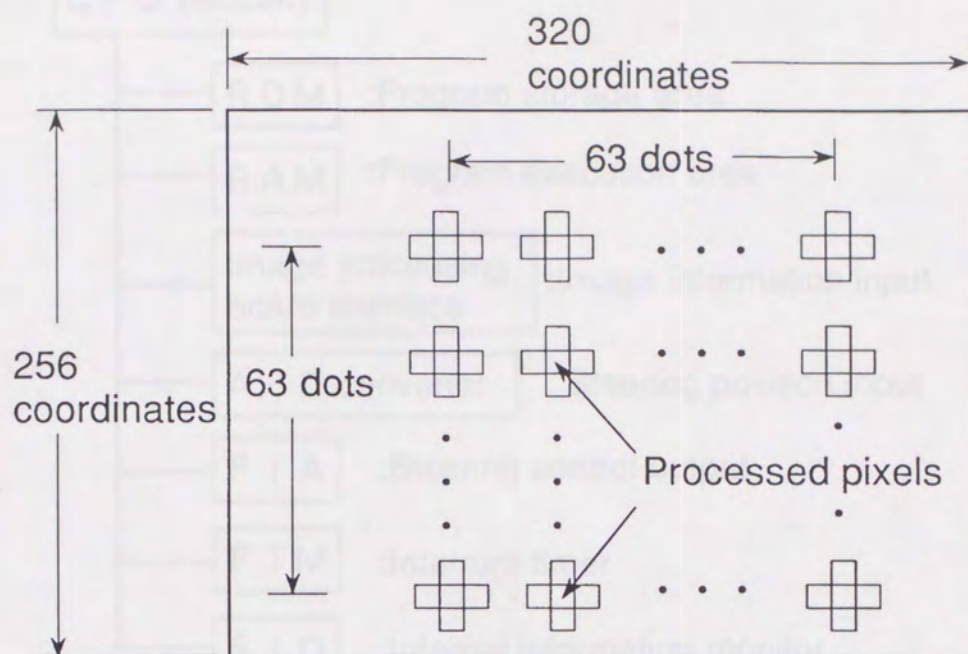


図 2. 18 論理フィルタの処理位置
Fig. 2.18 Logical filter processing position.

2. 3. 2 CPUボード

CPUボードは、制御用に専用化することにより小型化した。CPUにはi80286 (8 MHz) を用いた。構成を図 2. 19 に、外観を図 2. 20 に示す。

画像処理ボードインタフェースとしては、画面全体において対象物体の部分の割合が少ないことを利用し、指定色の部分の座標情報のみを送り、CPUボードで実時間処理できるようにした。

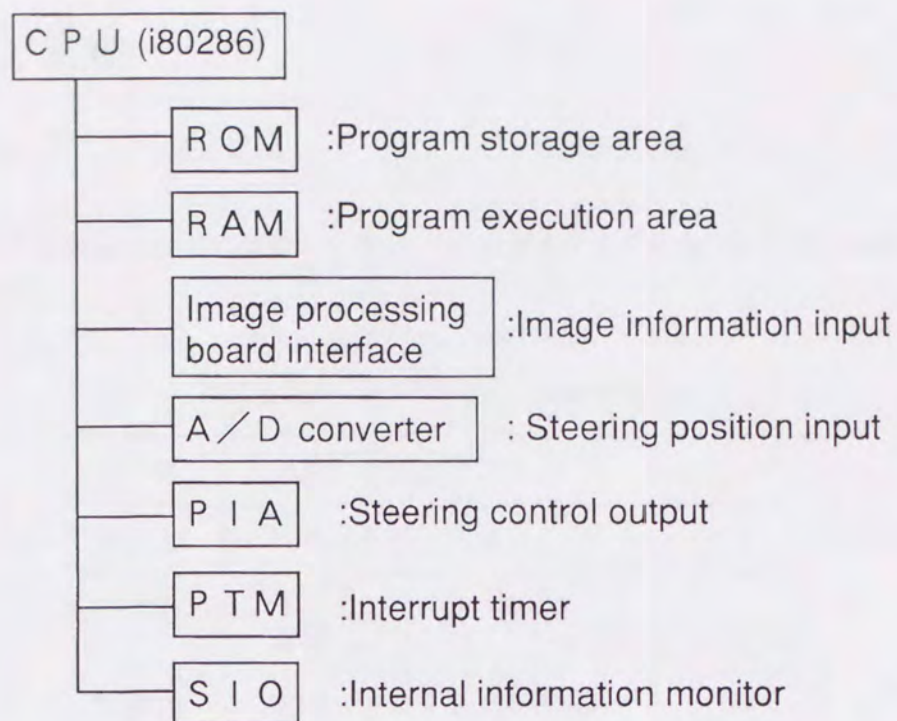


図 2. 1 9 C P Uボードの構成
Fig. 2.19 CPU board configuration.

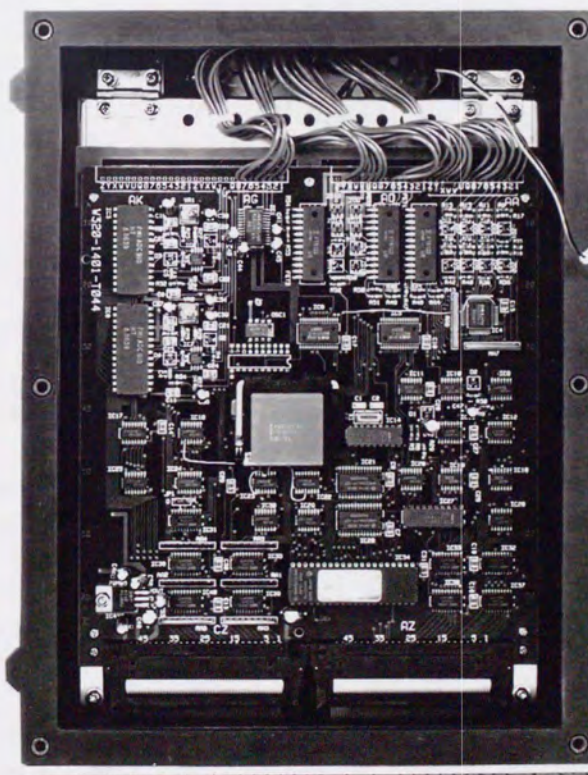


図 2. 2 0 C P Uボード
Fig.20 CPU board.

2. 4 実験

2. 4. 1 内容

開発した装置を移動車に搭載し、表 2. 8 のさまざまな条件で無人走行実験を行った。

表 2. 8 実験仕様

Table 2.8 Condition of experiment.

環 境	屋外、晴れ&曇り
路 上	アスファルト、泥土
対象物	センターライン（緑色） 植物（10 cm 高、2 cm 直径、20 cm 間隔）
物体列	直線、カーブ（3 m 半径）
車 速	2.5 km/ 時

カメラの搭載位置と視野領域を図 2. 21 に示す。

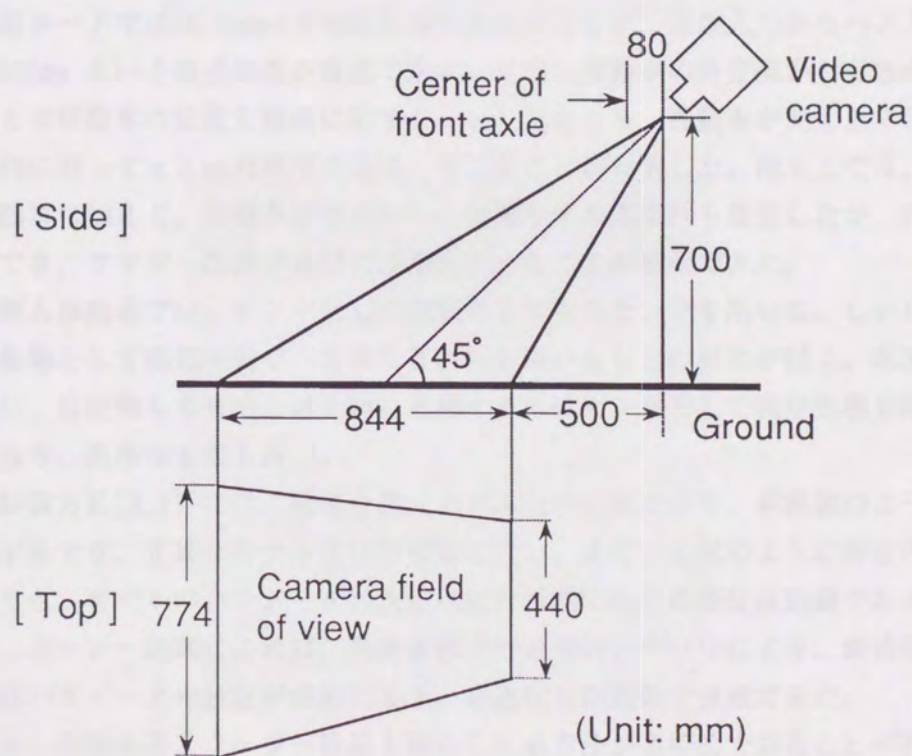


図 2. 21 カメラの搭載位置と視野領域

Fig. 2.21 Camera mounting position and field of vision.

使用した移動車は本来、泥土上を走行するものであり、泥土上では横揺れが大きく、熟練者以外は直線でさえも沿って運転できない。従って、直線に対する追従でも実験の意味がある。

屋外で無人走行実験を行ったのは、屋内よりも用途が広いと考えたためである。気象は雨以外は問わないものとした。路上は、搬送車を想定したアスファルトと、工事用や農林業の作業車を想定した泥土で行った。アスファルトの場合は、雨で濡れた状況でも行った。本システムはカラー3原色の任意色の抽出を行えるが、どの色でも同じであるので、今回は対象物体を緑色として実験を行った。センターラインだけでなく植物をも対象物としたのは、人工物のみならず自然物をも対象物として採用できることを確認するためである。物体列の並びは、直線とカーブに関して実験した。改良したハフ変換は直線近似を行うものだが、本実験では移動車の近辺の路面の画像を入力するため、急でないカーブに対しては、カーブの一部分ごとを入力画像とし、直線とみなすことにより、移動車をカーブに追従させることができると考えた。移動車の車速は、上記作業車の実際の運用条件に基づき、2.5km/時とした。

2. 4. 2 結果

図2. 22に画像処理結果の例を示す。入力画像は雨後の道路脇であり水たまりがある。移動車の追従する対象物は、そこに自然発生した植物である。処理結果の画像において、外枠は処理領域、内側の点是对象物に属する点、直線は改良型ハフ変換の結果を示す。改良型ハフ変換により、対象物体列としての妥当な直線が認識されている。

画像処理ボードでは16.7msecで対象物体を抽出できるが、画像入力からハンドル制御まで平均100ms という高速処理が確認できた。また、移動車の特定部から有色の液体を垂らすことで移動車の位置を路面に記すようにしたところ、移動車が泥土上でさえも、対象物体列に沿って±5cmの精度で追従していることが判明した。泥土上では、もともとある横揺れに加えて、移動車がわだちへと横滑りする悪条件も設定したが、対象物体列に追従でき、ファジー推論が良好に作用していることが確認できた。

従来の無人移動車では、センサとして磁気センサや光センサを用いる。しかし、追従すべき対象物として磁気材料や、特殊な反射材を用いるなどの制約が付く。本実験で用いたように、自然物をも含めた対象物に追従するにはセンサとして画像処理を用いるのが最適であり、汎用性も最も高い。

従来の制御方式[2.7]では、厳密な数式モデル化が必要であり、本実験のような状況では外乱が多すぎ、正確なモデル化は不可能に近い。また、上記のように特定のモデルを適用しても、モデルのパラメータの決定は試行錯誤であり最適化は困難である。これに対して、ファジー制御によれば、熟練運転手の言語的ノウハウにより、最適化の対象となる初期パラメータの設定が容易にでき、最適化も短期間で達成できた。

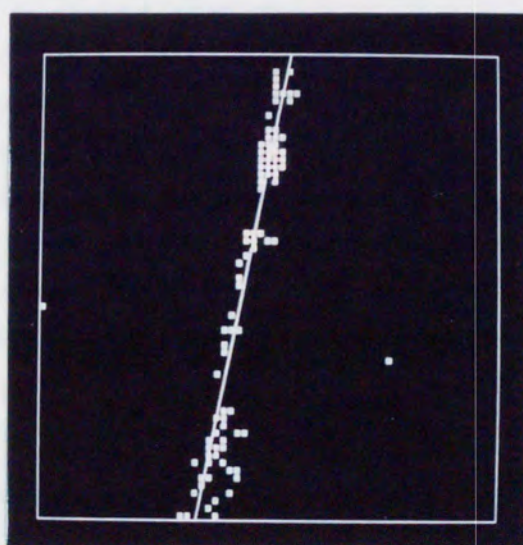
以上より、画像処理とファジー推論を融合した本方法が実用的であることが判明した。



(a) Input image



(b) Color identified image



(c) Result

図 2. 2 2 画像処理結果の例

Fig. 2.22 Example of results of image processing.

2. 5 高速Hough 変換方式と従来方式との比較考察

画像中の点集合から直線を抽出する課題において、2. 2. 2 節に記述した高速Hough 変換方式と従来方式を比較する。

本高速Hough 変換方式は、点集合の任意の2点を通る直線のパラメータをパラメータ空間に投票し、点集合が表す直線を抽出するものである。

比較すべき従来方式としては、従来のHough 変換方式、最小2乗法を用いる直線の推定方式、を取り上げて、順に比較する。

2. 5. 1 従来のHough 変換方式との比較

従来のHough 変換方式は、任意の1点を通る直線のパラメータをパラメータ空間に投票し、点集合が表す点集合から直線を抽出するものである。本高速Hough 変換方式は、従来のHough 変換方式と比較して、点数がある数以下の場合、本方式の方が計算量が少ない長所があることを以下に示す。

本方式と従来方式の計算量を比較する。直線パラメータのパラメータ空間への投票処理後の処理は同一であるため、投票する直線パラメータの計算量を比較する。

画像にX-Y直交座標系を設け、直線を抽出する点集合の点数をNとする。

直線は、一般に、角度 θ と位置 ρ のパラメータから表現され、位置 ρ は角度 θ と直線上の一点の座標(X,Y)から式(2.5)により計算できる。

$$\rho = \rho(\theta, (X, Y)) \quad (2.5)$$

従来方式では、点集合の任意の点(X,Y)ごとに、 θ の値ごとに ρ を式(2.5)で計算する。計算すべき θ の値の数を θ_n 個とすると、従来方式の投票パラメータ計算量は、下式で表現される。

$$\begin{aligned} & \text{従来方式による投票パラメータの計算量} \\ &= N \times \theta_n \times (\text{式(2.5)による}\rho\text{の計算量}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

本方式では、点集合の任意の2点(X1,Y1), (X2,Y2)の組み合わせ $N(N-1)/2$ 通りごとに、2点を通る直線の角度 θ を下式(2.7)で求めた後に、 ρ を式(2.5)で求める。

$$\theta = \theta((X1, Y1), (X2, Y2)) \quad (2.7)$$

従って、本方式の投票パラメータ計算量は、下式で表現される。

$$\begin{aligned} & \text{本方式による投票パラメータの計算量} \\ &= N(N-1)/2 \times (\text{式(2.5)による}\rho\text{の計算量} + \text{式(2.7)による}\theta\text{の計算量}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

以下に式(2.6)と式(2.8)の計算量を比較する。

従来のHough 変換方式では、直線のパラメータとして、原点から直線におろした垂線の長さである ρ 、垂線とX軸との成す角度である θ が一般によく使用される。そこで、本方式と従来方式の計算量をこのパラメータについて比較する。この場合の式(2.5)(2.7)は順に式(2.5)' (2.7)'で表現される。

$$\rho = X \cos \theta + Y \sin \theta \quad (2.5)'$$

$$\theta = \arctan \frac{X1-X2}{Y1-Y2} \quad (2.7)'$$

三角関数の値はテーブル検索で求めることにする。また、除算は逆数をテーブル検索で求めた後、乗算する処理を想定すると、乗算と計算量がほぼ等しい、と考えられる。乗除算の方が加減算やテーブル検索よりも計算量が圧倒的に多いため、式(2.5)' (2.7)' の計算量は乗除算の回数（順に2回、1回）にほぼ比例する、と考えられる。そこで、以下では、乗除算の計算量を単位として乗除算の回数で計算量を表すことにする。

式(2.6) (2.8)において、式(2.5) (2.7)の代わりに具体式(2.5)' (2.7)' を用いて下式を得る。

$$\text{従来方式による投票パラメータの計算量} = N \times \theta_n \times 2 \quad (2.9)$$

$$\text{本方式による投票パラメータの計算量} = N(N-1)/2 \times 3 \quad (2.10)$$

上記2式の差を計算すると下式になる。

$$\text{本方式による投票パラメータの計算量} - \text{従来方式による投票パラメータの計算量} \\ = 3/2 N \{ N - (4/3 \theta_n + 1) \}$$

従って、 $N_{th} = 4/3 \theta_n + 1$ とおくと、下記のように言える。

..... $N < N_{th}$ の場合；本方式の方が従来方式よりも、計算量が少ない。

..... $N > N_{th}$ の場合；本方式の方が従来方式よりも、計算量が多い。

θ の範囲は、 $0 \leq \theta < 180$ （単位；度）であり、求める θ の精度が小数点以下第 p 位ならば、 $\theta_n = 1800p$ であり、 $N_{th} = 2400p + 1$ である。

従って、求める θ の精度が小数点以下第1位の場合でも、直線を抽出する対象となる画像中の点が2400点以下ならば、本方式の方が従来方式よりも、計算量が少ない、と言えるので、本方式は実用上で従来方式よりも、計算量の点で優位性がある、と言える。

2. 5. 2 最小2乗法を用いる直線の推定方式との比較

最小2乗法を用いる直線の推定方式において、一般的な方法は、直線との距離の2乗和が最小になる直線のパラメータを求めるものである。この方法は、本方式に比較して、画像雑音の影響を受けやすい、という欠点がある。本方式は、直線のパラメータ空間での投票という従来のHough変換方式の手法を踏襲しているため、比較的、雑音の影響を受けにくい点で優位性がある。

最小2乗法を用いる直線の推定方式の応用型として、雑音の影響を考慮した、最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式が考えられる。この最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式は、代表的には、最小2乗法を用いる直線の推定を行った後、推定した直線から距離が大きい点から除いて、再び、最小2乗法を用いる直線の推定を行うことを、推定のもとになる点と推定した直線との距離の平均値が一定値以下になるまで、繰り返し行うものである。

本高速Hough変換方式と最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式の直線の抽出過程には、下記1) 2) の差異がある。

1) 本方式は複数の線分を同時に抽出するが、最小2乗法を用いる直線のロバスト推定

方式は線分を1本ずつ抽出する。

- 2) 本方式はパラメータ空間の投票結果に従い線分を一度に抽出するが、最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式は点集合から、線分を構成する点を徐々に絞る。

上記の差異1) 2) により、本方式は最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式に対して、順に、下記の1) 2) の質的な優位性がある、と考えられる。

- 1) 線分が交わった図形からの線分の抽出に関しては、本方式の方が最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式よりも適している、と考えられる。最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式では、線分を抽出した後、その線分を構成した点を除いた点集合から残りの線分を抽出するが、線分が交わっている場合、残りの線分を構成する点まで除いてしまい、残りの線分を抽出する精度が落ちる、と考えられる。本方式では、点集合の情報を一括して複数の線分の抽出に反映するため、このようなことは生じない。
- 2) 幾何的に対称な図形からの線分の抽出に関しては、本方式の方が最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式よりも適している、と考えられる。最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式では、最初の1本の線分を抽出する時に、平行な位置に同じ長さの線分があると中間の位置に線分を抽出してしまう。特に、平行で同じ長さの2本の線分が近接していると問題が生じやすくなる。本方式では、それぞれの線分に応じたパラメータをパラメータ空間で求めることができるため、このようなことは生じにくい。

さらに、計算量に関しては、対象となる点に含まれる雑音の比率が一定以上になると、本高速Hough 変換方式は、最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式と比較して、計算量が少ない長所があることを以下に示す。

最小2乗法の計算量、最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量、本方式と最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量の比較、の順に説明する。2.5. 1節と同様に、乗除算の計算量を単位として乗除算の回数で計算量を表すことにする。

(1) 最小2乗法の計算量

まず、最小2乗法の計算量を求める。

画像面上に N 個の点 P_i ($i=1, \dots, N$) が与えられたとし、その座標を (a_i, b_i) とする。点 P_i と直線 l の距離を $d(P_i, l)$ と表す。直線 l の方程式を次式で表わす。

$$X \cos \theta + Y \sin \theta = h, \quad h > 0$$

最小2乗法による直線の求め方[2.9] は、下式を最小にする直線 l を求めるものである。

$$\sum_{i=1}^N d(P_i, l)^2$$

直線 l の方程式についてのパラメータである θ と h は次式で計算できる。

$$\theta = (1/2) \arctan \left\{ \frac{2 \sum_{i=1}^N a_i' b_i'}{\left(\sum_{i=1}^N a_i'^2 - \sum_{i=1}^N b_i'^2 \right)} \right\} + (n \pi / 2)$$

$$h = \underline{a} \cos \theta + \underline{b} \sin \theta$$

ただし、

$$a_i' = a_i - \underline{a}, \quad b_i' = b_i - \underline{b}$$

$$\underline{a} = \left(\sum_{i=1}^N a_i \right) / N, \quad \underline{b} = \left(\sum_{i=1}^N b_i \right) / N$$

θ は下記の 3 条件で決定する。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N a_i' b_i' > 0 \text{ の場合 ; } \pi/2 < \theta < \pi, 3\pi/2 < \theta < 2\pi \\ \sum_{i=1}^N a_i' b_i' \leq 0 \text{ の場合 ; } 0 \leq \theta \leq \pi/2, \pi \leq \theta \leq 3\pi/2 \\ h \geq 0 \end{cases}$$

計算量を乗除算の回数で表すと、最小 2 乗法の計算量は下式(2.11)で得られる。

$$\begin{aligned} \text{最小 2 乗法の計算量} &= \theta \text{ の計算量} + h \text{ の計算量} \\ &= 3N + 5 \end{aligned} \quad (2.11)$$

ただし、定数(1/2) や 2 との乗算はシフト演算で高速に実行できるため、上記の計算量には、含めていない。

(2) 最小 2 乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量

最小 2 乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量を求める。

最小 2 乗法の繰り返し数を K 回とする。最小 2 乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量は、点数が N 点から $(N-k+1)$ 点まで、最小 2 乗法の計算、対象とした各点と近似直線の距離値の計算、対象とした各点と近似直線の距離値の平均値の計算、および最大の距離値を与える点の特定、の繰り返しである。

点 P_i と直線 l の距離 $d(P_i, l)$ の計算は下式で表され、計算量は 2 である。

$$d(P, l) = |a \cos \theta + b \sin \theta - h|$$

対象とした各点と近似直線の距離値の平均値の計算量は 1 である。また、最大の距離値を与える点の特定は、比較演算のみで可能なため、計算量に含めない。

従って、最小 2 乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量は、下式で表される。

最小 2 乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=N-k+1}^N \{ (3i + 5) + 2i + 1 \} \\ &= \sum_{i=N-k+1}^N (5i + 6) \\ &= (5/2)(2N-K+1)K + 6K \\ &= \{ (5/2)(2N-K) + (17/2) \} K \end{aligned}$$

K の N に対する比率として、 k ($0 \leq k \leq 1$) を定義する。 $K = k \times N$ であるから、下式(2.12)を得る。

$$\begin{aligned} \text{最小 2 乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量} \\ &= \{ (5/2)(2-k)N + (17/2) \} kN \end{aligned} \quad (2.12)$$

(3) 本方式と最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量の比較

本方式において、パラメータ投票後の処理には乗除算が含まれないため、本方式の計算量は、式(2.10)で与えられる。式(2.10), (2.12) から下式が得られる。

$$\begin{aligned} & \text{本方式による計算量} - \text{最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量} \\ &= (3/2) N(N-1) - \{ (5/2)(2-k)N + (17/2) \} kN \\ &= (N/2) \{ 3(N-1) - 5(2-k)kN - 17k \} \\ &= (N/2) \{ (5k^2 - 10k + 3)N - (17k + 3) \} \end{aligned} \quad (2.13)$$

上式の符号は、式(2.13)の $\{ \}$ 内の値により決まる。式(2.13)の $\{ \}$ 内の式において、 N に関する定数部分 $-(17k + 3)$ は下式のように負数である。

$$-20 \leq -(17k + 3) \leq -3$$

従って、 N に関する係数部分 $(5k^2 - 10k + 3)$ が、0以下ならば式(2.13)は負数になる。

k に関する2次方程式

$$5k^2 - 10k + 3 = 0$$

の解は、

$$k = 1 \pm (\sqrt{10})/5 \quad \approx 0.3675, 1.6325$$

であるから、 $k \geq 1 - (\sqrt{10})/5$ (≈ 0.3675) ならば、式(2.13) < 0 である。

従って、直線抽出の対象となる画像点に含まれる雑音の割合 k が $1 - (\sqrt{10})/5$ (≈ 0.3675) 以上の場合、本方式の計算量が、最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量よりも少ない、と言える。

上記の計算量の判定に用いた k の値の判定規準 $1 - (\sqrt{10})/5$ (≈ 0.3675) は、下記の (a) (b) の考察から、実用上の規準として充分である、ことが分かる。

(a) $k = 0.35$ の場合；下記の式が成立する。

$$\text{式(2.13)の} \{ \} \text{式} = 0.1125 N - 8.95$$

従って、 N が79点以下の場合にのみ、式(2.13)が負になり、本方式の計算量が、最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量よりも少ない。

(b) $k = 0.3$ の場合；下記の式が成立する。

$$\text{式(2.13)の} \{ \} \text{式} = 0.45 N - 8.1$$

従って、 N が17点以下の場合にのみ、式(2.13)が負になり、本方式の計算量が、最小2乗法を用いる直線のロバスト推定方式の計算量よりも少ない、と言える。

2.6 むすび

対応点情報からの3次元復元方式に必要である物体画像の特徴点を含む、特徴抽出方式として、高速Hough変換方式について述べた。ここで、本高速Hough変換方式の閾値を最適にする方向性について考察する。本高速Hough変換方式の閾値は、ボーティング空間の分割数と、線分抽出を判定するボーティング数である。ボーティング空間の分割については、点位置の真値からの誤差が大きいほど、粗くすることが効果的である、と考えられる。ボーティング数の閾値は、線分を構成する点数が多いほど、一般にノイズ点も多くなるため、閾値を大きくすることが効果的である、と考えられる。どちらにし

ても、点位置の真値からの誤差や、線分を構成する点数のオーダなどが予測できることが必要であるが、パラメータだけを一括して抽出しておき、ボーティングに関する上記の閾値を変化させて、最適な線分の抽出結果を得たボーティングの閾値を採用する、という手法を用いると先見的な予測値も不要で良い結果が得られやすい、と考えられる。

また、この高速Hough 変換の実証システムとして、カラー動画像処理プロセッサとファジー推論を融合させることにより、自然物も含めた路上の対象物に沿って移動車を無人走行できるシステムを述べた。

動画像処理プロセッサでは対象物の実時間抽出を行う。色抽出プロセッサと局所論理フィルタプロセッサのパイプライン接続の構成であり、1秒間に60枚の画像を処理する。抽出した画像は、改良型のハフ変換により、位置と向きというハンドル制御に必要な情報に加工される。ファジー推論部では、この対象物体列の認識情報と移動車の運転ノウハウをすりあわせることでハンドル量を決定する。

本システムは、アナログ画像処理とデジタル画像処理のハイブリッド方式の採用とLSI化により小型(A4版×10cm)軽量システムとして実現できた。移動車に搭載した無人走行実験では、画像入力からハンドル出力まで平均100msの高速処理と、対象物体列に沿って5cmの誤差内での追従が確認できた。この実用化を想定した実験においては非常に劣悪な環境を設定したにもかかわらず、実用的な性能を確認でき、本システムの実用性が実証できた。

本視覚制御システムの実用性は、動画像処理プロセッサとファジー推論を融合した効果であると考ええる。動画像処理により高速性が実現でき、ファジー推論により人間の運転ノウハウによるハンドル制御が実現できた。また、今回の無人走行実験は屋外で行ったが、屋内の蛍光灯のもとでも対象物体の抽出ができており、屋内でも無人走行できると考える。

但し、本方法においては、認識できる対象物の色がRGBの内の一色に限られることや、高速走行が困難である問題点がある。これらの解決のためには、さらに強力な画像処理をシステムに盛り込む必要がある。高速走行のためには、車体からさらに離れた路面の画像を入力し処理せねばならないからである。また、急な曲がりに追従が困難である問題点もある。この解決には、現状のハフ変換を折線や曲線に対応できるようにさらに改良する必要がある。

本章では、高速Hough 変換方式と、実証システムとして、路上の対象物に沿って無人走行できるシステムについて述べた。本システムは無人走行への適用では障害物回避への発展、一般の知能ロボットのビジョンシステムとしての応用など、広汎な産業応用に適用可能であると考ええる。

第3章 正射影撮像モデルを用いた

物体の運動と形状の3次元復元方式

あらまし 画角が小さい場合の近似撮像モデルである正射影撮像モデルを用いた物体の運動と形状の3次元復元方式について述べる。

従来から、3つの画像の間で対応づけた物体画像上の4つの特徴点の座標位置である対応情報から、物体の運動と形状を3次元復元する研究がされており、代表的には、Huang T.S. が考案した方式[3.10]がある。

本章では、Huang T.S. が考案した方式[3.10]に比較して、下記1)2)の2点で優位性がある新方式を提案する。

1)原理的に3次元復元可能であるかを、観測情報のみにより判定できる。

2)原理的に復元可能な場合は付加情報なしで統一的に復元できる。

具体的には、移動物体の特徴点を正射影面で捉え、正射影面における特徴点座標の時系列的な対応づけと、移動物体が剛体である仮定を用いて、従来より解の存在が示されている4特徴点の3時点間の対応のもとで、移動物体の運動と3次元形状を同時に復元する新方式を提案する。本方式の特長は、観測情報のみを用いて原理的に復元解が一意的であることを判定する条件と、復元解が一意的である場合に統一的に適用できる復元解の線型解法である。本方式によれば、行列のランク計算により復元可能性を判定した後、逆行列計算などの線型演算により統一的かつ高速に復元解を求めることができる。本理論は、正射影対応点による移動物体復元の線型復元理論における従来の問題を解決して、理論面でひと区切りをつけるものである。

さらに、平面上の物体を同一平面方向に観測するという制約条件のもとで、制約条件がない一般方式よりも少ない3つの特徴点の対応情報で3次元復元できることを示す。この制約条件は、物体の相対運動が観測者の視線で構成される平面内に限定される、ことと等価である。

計算機で生成したシミュレーションデータを用いることにより、本方式の妥当性を検証すると共に、対応点を得た後はパソコンのCPU処理でも平均復元時間が5ミリ秒未満と実時間処理できることを実証した。また、移動物体の実画像を入力することにより、本方式の有効性を確認できた。

3. 1 まえがき

画角が小さい場合の近似撮像モデルである正射影撮像モデルを用いた物体の運動と形状の3次元復元方式について述べる。

移動物体の復元はコンピュータビジョンの中心的な課題の一つであり、2次元の画像から移動物体の3次元形状や動きの復元方式が盛んに研究されてきた。移動物体の3次元復元方式は、視覚制御システム[3.1]などの画像理解の応用システムをより高機能に

するために重要である。しかし、移動物体の復元には、大規模な装置や長い処理時間を要するのが通常であるため、産業分野に応用しにくいのが現状である。そこで、実現場に応用しやすい移動物体の復元方式を目指して研究を行った。

物体のモデルには剛体モデルと非剛体モデル[3.2]がある。産業分野では、対象物体はほとんど剛体に限られるので、本研究では剛体モデルを用いた。

物体の3次元復元には、複数台のTVカメラを用いるステレオ視が有力候補であるが、異なる位置から捉えた物体の画像を対応づけにくく、装置規模も大きくなり、実際には適用しにくい。そこで、人間が2次元平面であるTVの画面から3次元世界を復元するように、1台のTVカメラのみで捉えた時系列画像から、移動物体を復元する方式を検討した。

時系列画像を用いる復元方式には、物体上の特徴点を画像面に対応づけて物体を復元する方式と、画像上での明暗のベクトル場であるオプティカルフローを用いる方式がある[3.3]。本論文では、計算量が少なく装置規模を小さくできる対応点による復元方式を検討した。

産業分野へ応用する場合、物体画像から安定に抽出できる特徴点が極く僅かである場合も多いため、本論文では少ない特徴点を用いる復元方式を検討した。

画像面のモデルには、正射影と中心射影がある。正射影モデルでは4特徴点の対応で移動物体を復元可能である[3.4]が、中心射影モデルでは8特徴点の対応が必要である[3.5][3.6]。そこで対応点の数が少なく適用しやすい正射影モデルを用いて、方式を検討した。

即ち、産業分野への応用のしやすさという観点から、剛体である物体の特徴点の正射影面での対応づけを用いて移動物体を復元する方式を検討した。この方式は、時系列画像上で物体の特徴点に対応づける処理[3.7]と、対応づけられた特徴点から移動物体を復元する処理に分かれるが、本稿では後者について検討した。この研究分野では最初に、特徴点の3時点間での対応で物体の動きと形状が同時に復元できるという原理[3.4]が提案され、非線型な復元解法[3.4][3.8]が示された。続いて、線型な復元解法の研究[3.9][3.10]が行われ、復元解が存在する場合の幾何学的な意味づけのほかに、付加条件ごとの複数のアルゴリズムによる線型解法が示された。

本稿では3次元移動物体の4特徴点を3時点に対応づけた状況のもとで、正射影面における観測情報のみにより復元解が一意であることを判定する条件を明らかにするとともに、この判定条件のもとに統一的に解ける線型解法を提案する。

さらに、平面上の物体を同一平面方向に観測するという制約条件のもとで、制約条件がない一般方式よりも少ない3つの特徴点の対応情報で3次元復元できることを示す。この制約条件は、物体の相対運動が観測者の視線で構成される平面内に限定される、ことと等価である。

3. 2 問題の定式化

正射影面による3次元移動物体の観測状況を図3. 1に示す。正射影面に X Y 直交座標をとり、正射影面に垂直な座標軸を Z 軸としている。 u , v , w の3時点で移動物体上の4つの特徴点を観測しており、補助的に、特徴点に印を付け、特徴点を結んだ線分を太線で表示している。正射影面上で対応づけられた特徴点も同様に表示している。

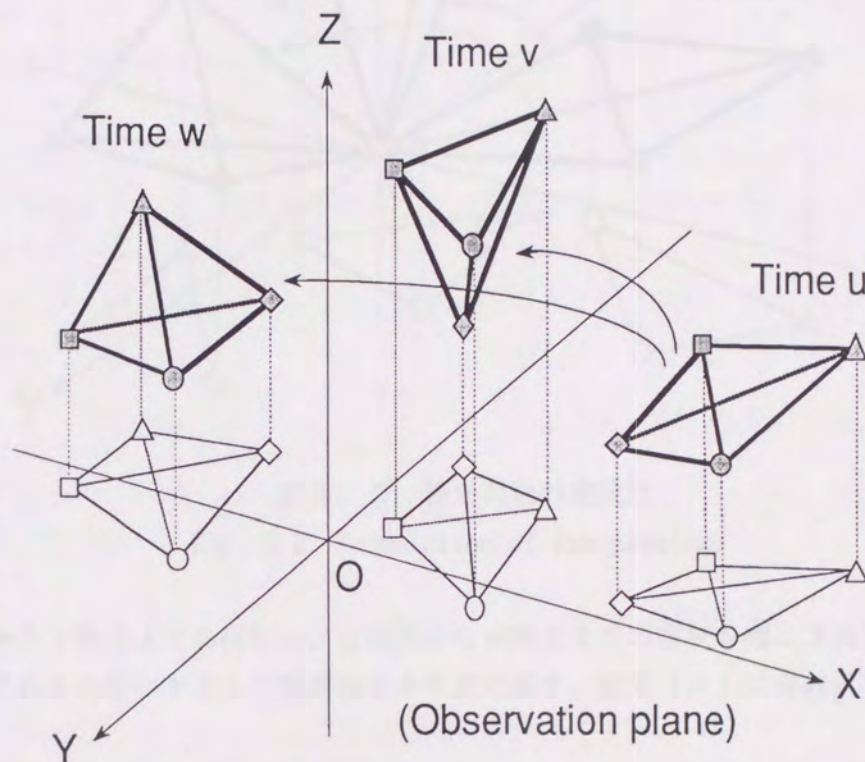


図3. 1 3次元移動物体の観測

Fig. 3.1 Observing a three dimensional moving object.

物体が Z 軸方向に平行移動しても、正射影面上での観測には変化がないので、物体の Z 軸方向の平行移動量や正射影面との距離は原理的に求まらない。また、 X , Y 軸方向の物体の平行移動は、正射影面上での平行移動と同じなので、直ちに求められる。

従って、移動物体の特徴点の一つを座標軸の原点に移動することにより、図3. 2のように原点を中心として回転する移動物体の復元問題に還元できる。

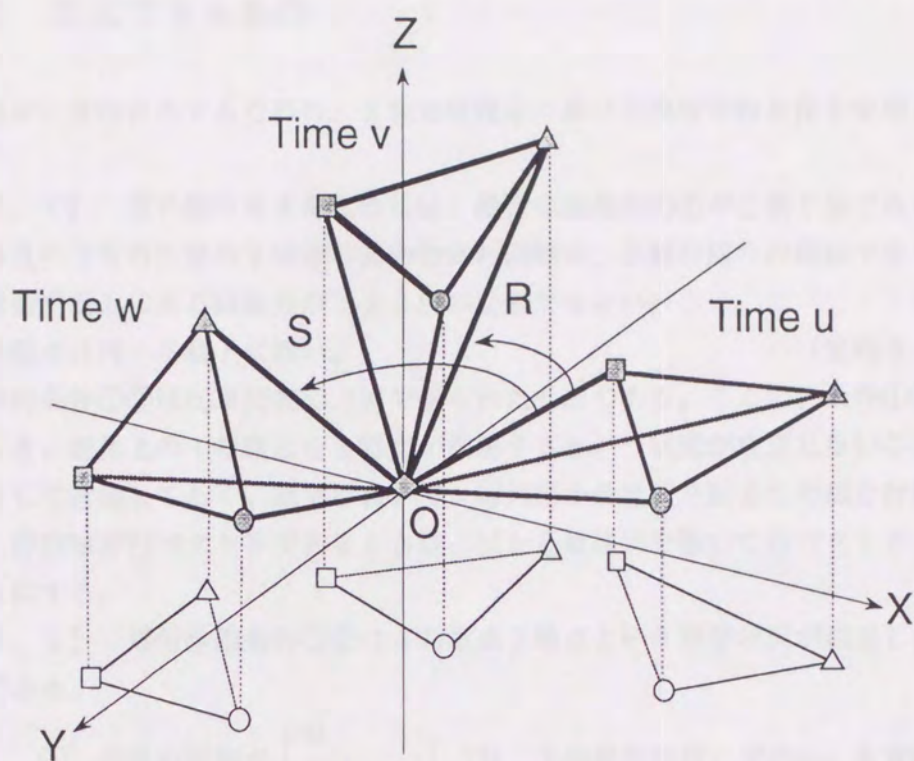


図 3. 2 復元問題の定式化
Fig. 3.2 Formulation of the problem.

u 時点から v 時点までの回転と、u 時点から w 時点までの回転を順に 3 次行列 R, S で表す。これらの行ベクトルと要素成分を下式で表す。記号「 $\equiv$ 」は定義式であることを示す。

$$R \equiv \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \equiv (r_{ij}) \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

$$S \equiv \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \equiv (s_{ij}) \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

原点以外の特徴点に番号 i ($i=1, 2, 3$) を付け、u, v, w 時点における特徴点 i ($i=1, 2, 3$) の 3 次元ベクトルを u_i , v_i , w_i で表す。

さらに、特徴点 i の XYZ 座標をベクトル記号に第 2 添字 j ($j=1, 2, 3$) を付けることによって表す。一般にベクトルに添字を付けることで成分値を表す。例えば、u 時点における特徴点 i の座標を u_{ij} と表す。

これらは方程式

$$v_i = R u_i, \quad w_i = S u_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (3.1)$$

の関係がある。3 次元移動物体の復元問題は、方程式 (3.1) から回転 R, S と特徴点の Z 座標 u_{i3} , v_{i3} , w_{i3} ($i=1, 2, 3$) を求める問題に帰着する。

3. 3 復元できる条件

復元解が一意的に求まるための、3次元座標系における幾何学的条件を定理3. 1に示す。

【定理3. 1】 復元解が求まるためには、幾何学的条件①②が必要十分である。

① 3時点のうちの任意の2時点の間の物体の回転は、Z軸の回りの回転でなく、回転軸が正射影平面上にある回転角が180度の回転でもない。

② 4特徴点は同一平面上に無い。 (定理3. 1終)

幾何学的条件①②は従来研究[3.10]で得られたものである。ここで、条件①②が成立しないとき、物体上の4特徴点を3時点が観測するという状況が成立しないことを命題3. 1として指摘しておく。以下において、行列Mの最後行を除去した部分行列をM'で表す。行列Mが行ベクトルであるときは、Mから最後列を除いた行ベクトルをM'で表すことにする。

【命題3. 1】 幾何学的条件①②は4特徴点3時点という観察状況が縮退しないために必要である。

(証明) ① 所定の回転が $\begin{bmatrix} U & \cdots \\ \cdots & \pm 1 \end{bmatrix}$ (U: 2次直交行列) でない、を意味する。

これが成立しない時は、観察時点が2以下の場合に縮退する。例えば、v時点からw時点までの回転 $S R^{-1}$ が上記の形の回転になったとする。

式 $w_i = S u_i$ に式 $S = \begin{bmatrix} U & \cdots \\ \cdots & \pm 1 \end{bmatrix} R$ を代入して変形すると、

$$w_i' = U \cdot v_i', \quad w_{i3} = \pm v_{i3} \quad \text{となる。}$$

従って方程式(3.1)は $v_i = R u_i$ ($i=1, 2, 3$) に縮退する。

② u_i ($i=1, 2, 3$) が線型独立、を意味する。これが成立しない時は、特徴点の数が3以下の場合に縮退する。例えば、 u_3 が u_1 と u_2 の線型結合で表されるが、方程式(3.1)は

$$v_i = R u_i, \quad w_i = S u_i \quad (i=1, 2) \quad (3.1)'$$

に縮退する。 (証明終)

条件①②は直観的に分かりやすいが、正射影面で直接に観測できないので、実際に一意的に復元できるかどうかの判定に用いることはできない。

本稿では新しく、正射影面での観測情報のみを用いた復元できるための判定条件を定理3. 2に示す。この判定条件を明らかにすることにより、次節に示す統一的な線型解法が得られた。

【定理3. 2】 幾何学的条件①②は、判定条件③と同値である。

③ 4行3列の行列 $\begin{bmatrix} u_1' & u_2' & u_3' \\ v_1' & v_2' & v_3' \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ w_1' & w_2' & w_3' \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} w_1' & w_2' & w_3' \\ u_1' & u_2' & u_3' \end{bmatrix}$ のランクが全て最大(3)である。 (定理3. 2終)

定理3. 2を証明するために、次の補題3. 1、補題3. 2を先に証明する。定理3. 2の証明では、直接には補題3. 2のみを用いるが、補題3. 2の証明に補題3. 1を

用いている。

【補題 3. 1】 回転行列の成分値は、その成分がある行と列を除いた部分から直接に計算できる。具体的には、3 次回転行列 $R = (r_{kl})_{k,l=1,2,3}$ において、

$r_{ij} = (-1)^{i+j} |R_{ij}|$ である。ただし、 R_{ij} は行列 R から i 行と j 行を除いて得る部分行列とする。

(証明) 行列の逆転公式⁽¹³⁾を R に適用すると下式を得る。

$$(R^{-1})_{ji} = (-1)^{i+j} |R_{ij}| / |R|$$

R は回転行列だから、 $R^{-1} = {}^t R$ 、 $|R| = 1$ であり、これらを上式に代入すると、

$$r_{ij} = (-1)^{i+j} |R_{ij}| \quad \text{を得る。} \quad (\text{証明終})$$

【補題 3. 2】 2 つの 3 次回転行列 R, S に対し、どちらかの行列に Z 軸の回りの回転や、 XY 平面上にある回転軸を中心とする 180 度回転を作用させることにより他方に等しくなる条件は、行列 $\begin{bmatrix} R' \\ S' \end{bmatrix}$ の行列のランクが最大 (3) でないことである。

(証明) $S = \begin{bmatrix} U & \\ & \pm 1 \end{bmatrix} R$ (U ; 直交行列) と表される条件が、上記の条件である

ことを示せばよい。このような 2 次直交行列 U があると、 $S' = UR'$ であり、行列 S' の行ベクトルは、行列 R' の行ベクトルの線型結合となる。従って、

行列 $\begin{bmatrix} R' \\ S' \end{bmatrix}$ のランクは最大 (3) でない。

逆にこの帰結を仮定すると、 R' のランクは 2 だから行列 U があり、 $S' = UR'$ と表せる。回転行列 R', S' の行ベクトルの正規直交性を用いると行列 U の行ベクトルの正規直交性が示せるので、 U は 2 次直交行列である。また、補題 3. 1 を用いた式 $s_{3j} = (-1)^{3+j} |S_{3j}|$ に $S_{3j} = UR_{3j}$ を代入すると、 $s_{3j} = \pm r_{3j}$ である。従って、

$$S = \begin{bmatrix} S' \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} UR' \\ \pm r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U & \\ & \pm 1 \end{bmatrix} R$$

である。

(証明終)

(定理 3. 2 の証明) 式(3.1)より、

$$\begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ w_1' & w_2' & w_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R' \\ S' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} w_1' & w_2' & w_3' \\ u_1' & u_2' & u_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (SR^{-1})' \\ (R^{-1})' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_1' & u_2' & u_3' \\ v_1' & v_2' & v_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S^{-1})' \\ (RS^{-1})' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \end{bmatrix}$$

だから、③は次の①' ②' と同値である。

①' 行列 $\begin{bmatrix} R' \\ S' \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} (SR^{-1})' \\ (R^{-1})' \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} (S^{-1})' \\ (RS^{-1})' \end{bmatrix}$

のランクが最大 (3) である。

②' 3 次元ベクトル u_i ($i=1,2,3$), v_i ($i=1,2,3$), w_i ($i=1,2,3$) がそれぞれ線型独立である。

補題3. 2 から、①' は下記の①'' と同値である。

①'' SR^{-1} , S , R が全て $\begin{bmatrix} U & \\ & \pm 1 \end{bmatrix}$ (U ; 2次直交行列) と表されない。

従って、①' は①と同値である。

また、②' は②と同値であるから、条件③は条件①および②と同値である。

(証明終)

判定条件③により、復元解が一意的に求められるか否かを、観測情報のみから判定することが可能になった。

3. 4 統一的な復元解法

原理上で復元解が一意であれば、復元解を統一的に線型演算で求められる解法を明らかにする。まず、準備として補題3. 3を示す。復元解を求める過程では、直接には補題3. 3の2)を用いる。補題3. 3の1)は2)の証明で用いる。

【補題3. 3】 判定条件③が成り立つとき、1) 2) が成立する。

1) p (1 または 2) に対して下記の④と⑤は同値である。

④ $\begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ w_{1p} & w_{2p} & w_{3p} \end{bmatrix}$ が正則であり、かつ行列 $\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ w_{1p} & w_{2p} & w_{3p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ w_{1p} & w_{2p} & w_{3p} \end{bmatrix}^{-1}$ の

1~2行、1~2列からなる部分行列が正則となる。

⑤ $\begin{bmatrix} R' \\ s_p \end{bmatrix}$; 正則、かつ $s_{p3} \neq 0$ である。

2) 必要に応じ XY 座標系を90度の整数倍以外に回転させれば、④を満たす p を選べる。

(証明) 1) 式(3.1) より、 $p = 1, 2$ に対して、

$$\begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ w_{1p} & w_{2p} & w_{3p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R' \\ s_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix} \quad \text{である。条件②より} \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix}$$

は正則だから $\begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ w_{1p} & w_{2p} & w_{3p} \end{bmatrix}$ と $\begin{bmatrix} R' \\ s_p \end{bmatrix}$ が正則であることは同値である。さらに、

これらが正則であるとき、下式(3.2)が成立する。

$$\begin{bmatrix} R' \\ s_p \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ w_{1p} & w_{2p} & w_{3p} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.2)$$

式(3.2)の両辺を、行列 $A \equiv (a_{ij})$ とおくと、行列の逆転公式[3.11]より、

$$s_{p3} = \frac{1}{|A|} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \quad \text{だから、} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \neq 0 \text{ と } s_{p3} \neq 0 \text{ は同値である。}$$

2) 必要ならば XY 座標系を回転することにより、条件⑤を満たす p を選べることを示せばよい。条件⑤を満たす p が無いとすると(5.1) ~ (5.3) の場合のいずれかである。

$$(5.1) \quad s_{13} = s_{23} = 0$$

$$(5.2) \quad \begin{bmatrix} R' \\ s_1 \end{bmatrix} \text{ および } \begin{bmatrix} R' \\ s_2 \end{bmatrix} \text{ が正則でない。}$$

$$(5.3) \quad s_{13}, s_{23} \text{ のうち一つだけが } 0 \text{ である。}$$

(5.1) (5.2) の場合では、

$$S, SR^{-1} = \begin{bmatrix} U & \\ & \pm 1 \end{bmatrix} \quad (U; 2\text{次直交行列})$$

となり条件①に反するので(5.3)の場合しかないことがわかる。XY座標系を90度の整数倍以外に回転させると s_{13}, s_{23} の両方を0でないようにできる。従って条件⑤を満たす p (1または2)が選べる。(証明終)

定理3. 3に復元解の統一的線型解法を示す。

【定理3. 3】 復元解の一意性の判定条件③が成り立つとき、下記の手順I~IVの線型演算で統一的に復元解を求めることができる。

I. 準備; 条件④を満たす p (1または2)を1つ選んで、

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} u_1' & u_2' & u_3' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ w_{1p} & w_{2p} & w_{3p} \end{bmatrix}^{-1}$$

を求める。 $a_{h3} \neq 0$ となる h (1または2)を選ぶ。定数 α_i ($i=1,2$)、およびベクトル β, γ を下式により、定義し計算する。

$$\alpha_i \equiv (1 + a_{i1}^2 + a_{i2}^2 - a_{i3}^2) / 2$$

$$\beta \equiv (a_{11}a_{23} - a_{21}a_{13}, a_{12}a_{23} - a_{22}a_{13})$$

$$\gamma \equiv (a_{23}, -a_{13}, 0)$$

II. 回転Rの計算; $\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$ を $\begin{bmatrix} r_{1i} \\ r_{2i} \end{bmatrix}$ ($i=1,2$)として次式で計算する。

$$\begin{cases} a_{i3} \neq 0 \text{ のとき、} \begin{bmatrix} a_i' \\ \beta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \gamma_i \end{bmatrix} \\ a_{i3} = 0 \text{ のとき、} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} / \gamma_i \end{cases}$$

式 $r_{13} = \pm (1 - r_{11}^2 - r_{12}^2)^{1/2}$ により r_{13} を計算し、 r_{23} を次式で計算する。

$$\begin{cases} r_{13} \neq 0 \text{ のとき、} -\beta_1 r_{13} / \beta_2 \\ r_{13} = 0 \text{ のとき、} \pm (1 - r_{21}^2 - r_{22}^2)^{1/2} \end{cases}$$

回転行列Rの残りの成分である r_{3i} ($i=1,2,3$)は、式 $r_{3i} = (-1)^{i+1} |R_{3i}|$ で求める。

III. 回転Sの計算; p 行目を次式で求める。

$$s_{pi} = (\delta_{hi} - a_{h1}r_{1i} - a_{h2}r_{2i}) / a_{h3} \quad (i=1,2,3)$$

但し、記号 δ_{hi} はクロネッカーのデルタで、 $h=i$ のときに1で、そうでない場合は0の値を取る。 a_3 を $\begin{bmatrix} R' \\ s_p \end{bmatrix}^{-1}$ の3行目として定義し計算する。 u_{i3} ($i=1,2,3$)を

式 $a_3 \begin{bmatrix} v_i' \\ w_{ip} \end{bmatrix}$ により求める。 $q \neq p$, $q=1,2$ なる q について、 s_q を

式 $s_q = \begin{bmatrix} w_{1q} & w_{2q} & w_{3q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix}^{-1}$ で求める。回転行列Sの残りの成分で

ある s_{3i} ($i=1,2,3$)は、式 $s_{3i} = (-1)^{i+1} |S_{3i}|$ で求める。

IV. 特徴点のZ座標の計算; u_{i3} ($i=1,2,3$)はIIIで求めた。 v_{i3}, w_{i3} は次式で求め

る。

$$v_{i3} = r_{i3} u_i, w_{i3} = s_{i3} u_i$$

(定理 3. 3 終)

証明は付録 A に示す。

定理 3. 3 では II において r_{i3} 等が 2 つの符号を持つことから 2 つの復元解が求まるが、これらの解には系 3. 3. 1 に示す幾何学的な関係がある。

【系 3. 3. 1】 定理 3. 3 で求めた 2 つの解は正射影面に関して互いに鏡映関係にある。すなわち、復元解の一組を、 $R, S, u_{i3}, v_{i3}, w_{i3}$ ($i=1, 2, 3$) とすると、他の一組の解は、

$$\begin{bmatrix} I \\ -1 \end{bmatrix} R \begin{bmatrix} I \\ -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} I \\ -1 \end{bmatrix} S \begin{bmatrix} I \\ -1 \end{bmatrix}, -u_{i3}, -v_{i3}, -w_{i3} \quad (i=1, 2, 3)$$

である。

(系 3. 3. 1 終)

観測座標点のみでは、2 つの解はどちらも正しい復元解である。しかし、3 次元形状と運動方向の組み合わせが限定されるので、他の手段により形状の凹凸か運動の方向が分かれば、唯一つの解を特定することができる。

3. 5 平面上の移動物体の認識方式

平面上の物体を同一平面方向に観測するという制約条件のもとで、制約条件がない一般方式よりも少ない 3 つの特徴点の対応情報で 3 次元復元できることを示す。この制約条件は、物体の相対運動が観測者の視線で構成される平面内に限定される、ことと等価である。

平面上の移動物体については、3 特徴点の対応による認識方式を提案する。厳密には移動物体の回転軸方向が一定で、回転軸と平行に正射影面を設けた状況で移動物体を認識できる線型解法を提案する。さらに、一定な動きの物体や建築物などの直角な縁がある物体については、さらに少ない特徴点や時点から認識できる線型解法を提案する。

3. 5 節における命題、補題、定理の証明は容易であるため、省略する。

3. 5. 1 一般の場合

正射影面の XY 座標軸は、 Y 軸が移動物体の回転軸方向に平行になるように取る。 Z 軸は正射影面と直交するように取る。3. 2 節に記したように、特徴点の一つを原点に移動することにより、 Y 軸の回りに回転する移動物体の認識問題に帰着できる。 Y 座標は正射影面から直接に求められる。移動物体を認識するために必要な特徴点と時点の数は方程式と未知数の数の関係から命題 3. 2 として得られる。

【命題 3. 2】 平面上の移動物体を認識するには 3 特徴点を 3 時点に対応づけることが必要十分である。

(命題 3. 2 終)

特に 2 個の特徴点を何個の時点に対応づけても、何個の特徴点を 2 時点に対応づけても、移動物体は認識できない。

正射影面で 3 特徴点を 3 時点に対応づけた状況での具体的な認識方式について以下に

述べる。3. 2節と同様に記号を定義する。条件式

$$v_i = R u_i, \quad w_i = S u_i \quad (i=1,2)$$

から回転R, Sと特徴点のZ座標 $u_{i3}, v_{i3}, w_{i3} (i=1,2)$ を求める問題に定式化できる。

認識解が求まるための幾何学的条件が定理3. 4として得られる。これを観測情報だけで表わした判定条件を定理3. 5に示す。

【定理3. 4】 認識解が求まるためには、幾何学的条件⑥⑦が必要十分である。

⑥ 3時点のうちの任意の2時点の間の物体の回転角は0度でも180度でもない。

⑦ 3特徴点は同一直線上に無い。 (定理3. 4終)

【定理3. 5】 幾何学的条件⑥⑦は、判定条件⑧と同値である。

$$\textcircled{8} \quad \text{行列} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{21} \\ v_{11} & v_{21} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} \\ w_{11} & w_{21} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} w_{11} & w_{21} \\ u_{11} & u_{21} \end{bmatrix}$$

が全て正則である。 (定理3. 5終)

認識解を求める具体的手順を定理3. 6に示す。定理3. 6で求めた2つの解は3次元移動物体の場合と同じく観測軸に関して互いに鏡映関係にある。

【定理3. 6】 判定条件⑧が成り立つとき、下記の手順で認識解が求まる。

I. 回転R, Sの計算: 次式の a_1 を計算する。

$$a_1 \equiv \begin{bmatrix} u_{11} & u_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} \\ w_{11} & w_{21} \end{bmatrix}^{-1}$$

Rの成分は r_{11}, r_{12} で決まる。これらを式

$$r_{11} = (1 + a_{11} - a_{12}^2) / (2 a_{11})$$

$$r_{12} = \pm (1 - r_{11}^2)^{1/2}$$

で求める。Sの成分 s_{11}, s_{12} は

$$s_{11} = (1 - a_{11} r_{11}) / a_{12}$$

$$s_{12} = -a_{11} r_{12} / a_{12}$$

で求める。

II. 特徴点のZ座標の計算: a_z を $\begin{bmatrix} r_1 \\ s_1 \end{bmatrix}^{-1}$ の

第2行として求める。 $u_{i2} (i=1,2)$ を式

$$u_{i2} = a_z \begin{bmatrix} v_{i1} \\ w_{i1} \end{bmatrix} \quad (i=1,2)$$

で求める。 $v_{i2}, w_{i2} (i=1,2)$ は式

$$v_{i2} = r_2 u_i, \quad w_{i2} = s_2 u_i$$

で求める。

(定理3. 6終)

3. 5. 2 物体の動きが一定の場合

短時間内では物体の動きは一定であると見なせることが多い。そこで、この節では動

きが一定である平面上の移動物体を2特徴点を3時点に対応づけることにより認識できる線型解法を提案する。物体の平行移動量は観測面から直接求めることができるので、厳密には回転速度が一定であれば本認識方式を適用できる。

1個の特徴点だけでは、画面に平行な移動量しか求まらない。動きが一定であるという状況を観察するためには、3時点において物体を観察することが必要である。従って2特徴点を3時点に対応づけることは最低必要である。逆に、2特徴点を3時点に対応づければ、移動物体を認識できることを以下に示す。v時点からw時点の回転をu時点からv時点の回転と等しくRとする。

3. 5. 1節と同様に記号を定義する。認識問題は、

$$v_1 = R u_1, w_1 = R^2 u_1$$

と定式化できる。Rの回転角を θ と表す。

認識解が求まるために、対応点が満たすべき幾何学的条件を定理3. 7に示す。

【定理3. 7】 認識解が求まるためには、幾何学的条件⑨⑩が必要十分である。

⑨ Rの回転角は0度でも180度でもない。

⑩ v時点において2特徴点の正射影観察が重ならない。 (定理3. 7終)

幾何学的条件⑨を観測情報だけで表わした判定条件を定理3. 8に示す。幾何学的条件⑩は判定条件でもある。

【定理3. 8】 幾何学的条件⑨は、判定条件⑪と同値である。

⑪ $u_{11} = \pm v_{11} = w_{11}$ でない。 (定理3. 8終)

正射影面に関して互いに鏡映関係にある2つの認識解が定理3. 9により求まる。

【定理3. 9】 判定条件⑩⑪が成り立つとき、下記の手順で認識解が求まる。

I. 回転Rの計算：成分 r_{11} , r_{12} を下式で計算する。

$$r_{11} = (u_{11} + w_{11}) / (2 v_{11})$$

$$r_{12} = \pm (1 - r_{11}^2)^{1/2}$$

II. 特徴点のZ座標の計算： u_{12} , v_{12} , w_{12} を下式で計算する。

$$u_{12} = (1 - 2 r_{11}^2, r_{11}) \begin{bmatrix} v_{11} \\ w_{11} \end{bmatrix} / r_{12}$$

$$v_{12} = r_{12} u_{11}, w_{12} = r_{12} v_{11}$$

(定理3. 9終)

3. 5. 3 物体に直角の縁がある場合

人間の作った建築物や室内の備品には、直角の縁があることが多い。従って、対象物に直角の縁があるという仮定は一般的である。この節では直角の縁がある平面上の移動物体を、3特徴点を2時点に対応づけることにより認識できる線型解法を示す。

直角の縁を観察するためには、特徴点の一つを直角の縁上に取り、他の2つの特徴点が直角点を挟む面上にあることが必要である。直角点をXZ座標の原点に移動して、原点の回りを回転する物体の認識問題に帰着させる。1時点の観察だけでは、認識解が無数に存在するので、物体の3特徴点を2時点に対応づけることは最低必要である。

逆に、3 特徴点を 2 時点に対応づければ、移動物体を認識できることを以下に示す。
 u 時点から v 時点までの回転 R の回転角を θ とする。特徴点 1 の原点からの距離を d_1 とし、特徴点 2 の原点からの距離を d_2 とする。また u_1 の X 軸からの角度を α とする。

特徴点 1 から特徴点 2 への角度に応じ、認識解には下記の 2 種類がある。

<1> 点 1 から点 2 への角度が 90 度である解

<2> 点 1 から点 2 への角度が -90 度である解

認識解<1> <2> は正射影面に関して互いに鏡映関係にあり認識解<1> から認識解<2> が求まるので、以下では認識解<1> を求める。

特徴点ベクトルが満たすべき方程式

$$v_i = R u_i \quad (i=1,2)$$

から、観測できる X 座標を用いた方程式

$$d_1 \cos \alpha = u_{11}, \quad -d_2 \sin \alpha = u_{21}$$

$$d_1 \cos(\alpha + \theta) = v_{11}, \quad -d_2 \sin(\alpha + \theta) = v_{21}$$

が得られる。認識解<1> を求めるためには、これらの方程式から d_1 , d_2 , α , θ を求めることが必要十分である。

認識解が求まるための、幾何学的条件を定理 3. 10 に示し、判定条件を定理 3. 11 に示す。

【定理 3. 10】 認識解が求まるためには、幾何学的条件⑫⑬が必要十分である。

⑫ 対象物の回転角は 0 度でも 180 度でもない。

⑬ 2 時点における特徴点 1, 2 はどちらも正射影軸に関して対称の位置に無い。

(定理 3. 10 終)

【定理 3. 11】 幾何学的条件⑫⑬は、判定条件⑭と同値である。

⑭ $|u_{11}| = |v_{11}|$, $|u_{21}| = |v_{21}|$ でない。

幾何学的条件⑬は判定条件⑮と同値でもある。

⑮ $u_{11}v_{21} + u_{21}v_{11} \neq 0$

(定理 3. 11 終)

認識解を求める具体的手順を定理 3. 12 に示す。

【定理 3. 12】 判定条件⑭が成り立つとき、下記の手順で認識解<1> が求まる。

I. 回転 R の計算: 成分 r_{11} , r_{12} を下式で計算する。

$$r_{11} = (u_{11}u_{21} + v_{11}v_{21}) / (u_{11}v_{21} + u_{21}v_{11})$$

$$r_{12} = \pm (1 - r_{11}^2)^{1/2}$$

II. 特徴点の Z 座標の計算: α , d_1 , d_2 が次のように決定される。

(a) $u_{11} \neq 0$, $u_{21} \neq 0$ のとき

$$\tan \alpha = (v_{11} - u_{11}r_{11}) / u_{11}r_{12} \quad (3.3)$$

$$d_1 = u_{11} / \cos \alpha, \quad d_2 = -u_{21} / \sin \alpha$$

(b) $u_{11} = 0$ のとき

$$\alpha = \begin{cases} u_{21} < 0 \text{ のとき, } & 90^\circ \\ u_{21} > 0 \text{ のとき, } & 270^\circ \end{cases}$$

$$d_1 = |v_{11} / r_{12}|, \quad d_2 = |u_{21}|$$

(c) $u_{21} = 0$ のとき

$$\alpha = \begin{cases} u_{11} > 0 \text{ のとき, } & 0^\circ \\ u_{11} < 0 \text{ のとき, } & 180^\circ \end{cases}$$

$$d_1 = |u_{11}|, \quad d_2 = |v_{21}/r_{12}|$$

(定理 3. 1 2 終)

(14) (15)における、回転Rの向きである r_{12} の符号と特徴点の位置関係である α は、命題 3. 3、命題 3. 4により観測座標の符号や大小関係から一意に定まる。

【命題 3. 3】 ベクトル u_i ($i=1,2$) において、 u_2 が u_1 を 90° 回転させたものであるとき、 u_1 のX軸からの回転角度 α は、X座標 u_{11} , u_{21} の符号と表 3. 1により 90° の範囲で定まる。従って式(3.3)により α が一意に定まる。

表 3. 1 特徴点の位置関係 α の範囲

α	0	...	90	...	180	...	270	...
u_{11}	+	+	0	-	-	-	0	+
u_{21}	0	-	-	-	0	+	+	+

(α の単位：度)

(命題 3. 3 終)

命題 3. 3はベクトル v_i ($i=1,2$) に適用することもでき、 v_{11} , v_{21} の符号により v_1 のX軸からの回転角度 β ($=\alpha+\theta$) も 90° の範囲で定まる。

命題 3. 3の結果を用いると、回転Rの成分 r_{12} の符号が命題 3. 4により決定できる。

【命題 3. 4】 回転Rの成分 r_{12} の符号を以下のように決定できる。まず命題 3. 3により式

$$(\pi/2) n \leq \alpha < (\pi/2) (n+1)$$

$$(\pi/2) m \leq \beta < (\pi/2) (m+1)$$

を満たす整数 n , m ($=0,1,2,3$) を求める。

(a) $n-m$ が奇数のとき：表 3. 2により r_{12} の符号を決定できる。

表 3. 2 回転Rの向きの決定(a)

$(n-m+1)/2$	r_{12}
奇数	+
偶数	-

(b) $n - m$ が偶数のとき：表3. 3により r_{12} の符号を決定できる。

表3. 3 回転Rの向きの決定(b)

n	m	条件	r_{12}
0	0	$u_{11} < v_{11}$	+
1	1	$u_{11} > v_{11}$	-
2	2	$u_{11} < v_{11}$	-
3	3	$u_{11} > v_{11}$	+
0	2	$ u_{11} < v_{11} $	-
2	0	$ u_{11} > v_{11} $	+
1	3	$ u_{11} < v_{11} $	+
3	1	$ u_{11} > v_{11} $	-

(条件で等号が成立すると $r_{12} = 0$)

(命題3. 4 終)

3. 6 実験

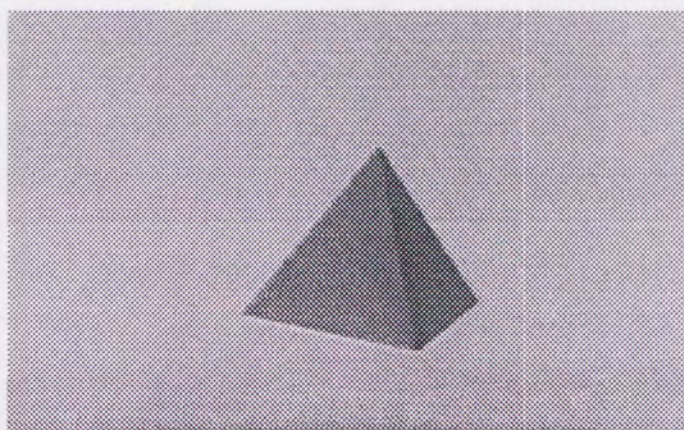
計算機で移動物体データを作成して対応点を入力とした実験を行い、本方式を検証した。またパソコンFMR-70(i80386, 25 MHz) 上でC言語を用いて、平均復元速度を測定したところ5 m秒未満と実時間処理できることを確認した(表3. 4)。

表3. 4 物体の動きと認識速度

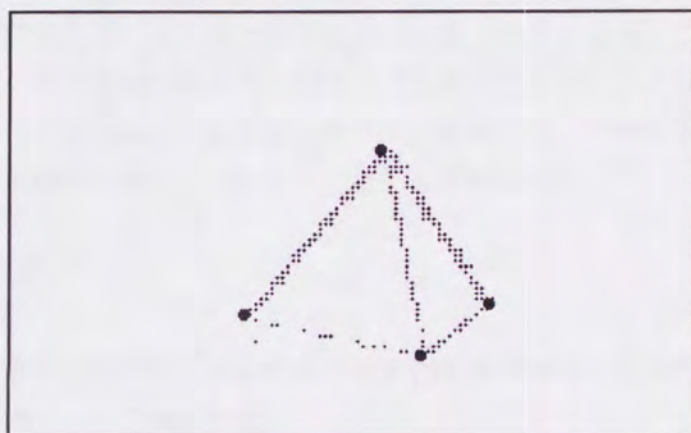
Table 3.4 Object motion and recognition speed.

物体の動き		特徴点数	時点数	認識速度(ms)
3次元		4	3	4.6
平 面 上	一般	3	3	0.27
	動き一定	2	3	0.12
	直角の縁	3	2	0.69

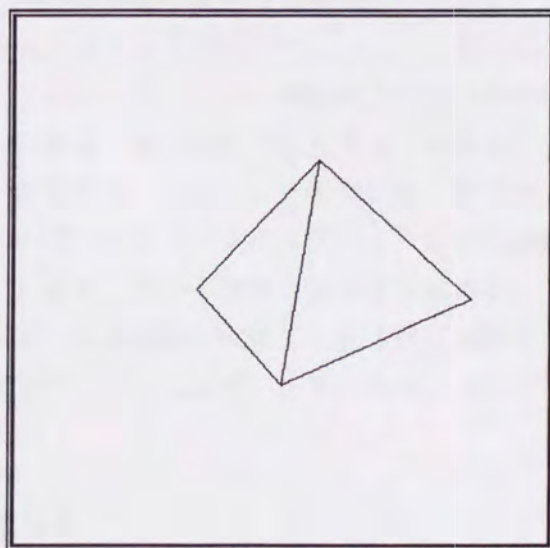
さらに、実画像を入力とした復元実験を行った。図3. 3に実験例を示す。対象物体は一辺が10 cmの正四面体であり、TVカメラからの距離は3 mとした。TVカメラは水平解像度が330本のものを採用した。対象物体を動かしつつ3画像を入力した。



(a) One of input images



(b) Processed image



(c) Recovery result

図 3. 3 復元実験の例

Fig. 3.3 Example of recovery experiments.

(a) は入力画像の一つである。(a) の入力画像からエッジ検出に基づき4つの特徴点を抽出したのが(b)である。この特徴点に基づき本方式により物体の動きと形を認識した結果を、入力画像とは別の角度からの見取り図として(c)に示した。

X軸まわりに17.5度と-9.0度、Y軸まわりに-40度と-35度の回転をそれぞれ順に正四面体に作用させた3枚の画像を入力した。TVカメラの中心射影撮像系を正射影で近似している点だけからは、正四面体の辺の長さは10%、辺の角度は10%、物体の回転角は15%の精度で求まる。この例では対応点検出の際の誤差が加わり、辺の長さは13%、辺の角度は11%、物体の回転角は19%の誤差で復元できた。

実験の撮像系が正射影に近くなるほど復元の誤差は小さくなり、逆に正射影から離れるほど誤差が大きくなる。復元解の一意性の判定においても同様である。撮像系が正射影から離れるにつれ、幾何学的条件と判定条件がずれ、判定条件で復元解が一意でない場合の近傍では誤った判定となることがある。また、誤った判定とならずとも、上記の近傍では復元解の計算過程で逆行列の計算などで誤差が大きくなる。この近傍内であるか否かの決定には、判定条件内の各行列において3次正方部分行列の行列式の最大値を求め、その最大値のうちの最小値を尺度にできる。応用上は、この尺度が予め設けた閾値未満の場合は復元解法を適用しないという方策で対処できる。

3. 7 むすび

画角が小さい場合の近似撮像モデルである正射影撮像モデルを用いた物体の運動と形状の3次元復元方式について提案した。

産業分野に応用しやすい復元方式の構築を目的として、実画像への適用のしやすさを基準とし、1台のTVカメラで捉えた移動物体の特徴点の正射影面での対応づけから移動物体の3次元の動きと形状を同時に復元する新方式を提案した。

正射影面における特徴点座標の時系列的な対応づけと、移動物体が剛体である仮定を用いて、従来より解の存在が示されている4特徴点の3時点間の対応のもとで新復元方式を考案した。本方式の特長は、観測情報のみを用いて原理的に復元解が一意的であることを判定する条件と、復元解が一意的である場合に統一的に適用できる復元解の線型解法である。本方式によれば、行列のランク計算により復元可能性を判定した後、逆行列計算などの線型演算により統一的かつ高速に復元解を求めることができる。

本理論は、正射影対応点による移動物体復元の線型復元理論における従来の問題を解決して、理論面でひと区切りをつけるものである。表3. 5に本方式と従来の線型解法との比較を示す。

表3. 5 従来の線型解法との比較

Table 3.5 Comparison with conventional methods.

	線型解法	判定条件	幾何条件
Zhuang X. [3.9]	一部の場 合のみ	なし	なし
Huang T.S. [3.10]	付加条件 ごとの解法	なし	完全
本解法	完全	完全	完全 (引用)

Zhuang[3.9]は、ある条件のもとに復元解の線型解法を示した。しかし、この他の合に解が一意であるかは示されず、完全な線型解法は未解決問題として公開された。

これに引き続いて、Huang[3.10]は、復元解が一意である幾何条件を明らかにすると共に、付加条件毎の線型解法を示した。しかし、幾何条件は観測情報のみでは記述されておらず、実際に観測された情報から復元解が一意であるかを判定することはできなかった。また、付加条件も、観測情報のみでは記述されておらず、観測された情報のみから復元解を求めることもできなかった。

これに対し、本方式ではHuang[3.10]により示された幾何条件を踏襲し、これを観測情報のみにより記述した数式を求め、観測された情報のみから復元解が一意であることを判定できる条件を明らかにした。さらに、この判定条件を基礎にすることにより、判定条件が成立する場合に、統一して適用できる線型解法を構築した。従来研究[3.9][3.10]では3観測情報を2組の2観測情報の組み合わせとして捉え、2観測情報毎からの方程式の組から復元解を求めている。これに対して、本方式では3つの観測情報が復元解にとっては対称であることに着眼して、3観測情報を対称に扱う数式変形を基本とすることにより、統一的な線型解法を構築することに成功した。

一方、因子分解方式[3.12]では、多数の特徴点を多くの時点で観測する前提条件で、記述されており、適用できる特徴点数や時点数の下限は示されていないが、4特徴点を3時点で観測した前提条件でも、適用可能と考えられる。

しかし、4特徴点を3時点で観測した条件における因子分解方式と本方式は問題のみが同一であり、方程式化から復元解の計算方法までの共通点は無く、異なる解法である。特に、復元解の計算方法では、下記の(1)(2)の点が大きく異なる。

- (1) 因子分解方式には特異値分解の処理があるが、本方式には該当する処理が無い。
- (2) 本方式には観測座標系の回転処理(補題3.3 2)があるが、因子分解方式には該当する処理が無い。

さらに、本方式には、復元解の一意性の判定条件に関する、下記(3)の特長がある。

- (3) 本方式には、観測情報のみによる復元解の一意性の判定条件(定理3.2)があるが、因子分解方式には復元解の一意性の判定条件は無い。

また、方程式化も、下記(4)のように異なる。

(4) 因子分解方式では、3次元座標系における原点を観測物体の重心に取り、静止する物体の回りをTVカメラが運動する状況で問題を記述している。そして、観測座標情報がカメラの姿勢情報と物体の形状情報の積である事実を方程式化している。これに対して、本方式では、静止するTVカメラの回りを物体が運動する状況で問題を記述し、正射影画像の性質を用いて、1特徴点が3次元座標系の原点、および観測座標系における原点に固定され座標原点の回りに回転する物体の3次元復元問題に帰着させている(3.2節)。そして、第1時点の物体の3次元座標から、3次元回転により第2時点および第3時点の物体の3次元座標が生成されるという事実を方程式化している(式(3.1))。

本方式の検証には、計算機で生成した実験用データを用いた。3次元特徴点座標データを正射影した2次元座標データから、本方式により3次元座標データを復元できることを確認することにより、本方式の妥当性を確認した。さらに、パソコンのCPU処理(i80386, 25 MHz)でも平均復元時間が5ミリ秒未満と実時間処理できることをも実証した。また、TVカメラにより移動物体の実画像を入力した復元実験も行い、実画像に対する適用の際の感触も得た。

本方式では、TVカメラの撮像系を正射影撮像系として近似している前提がある。このため、移動物体を認識するのに必要な特徴点が少なく、対応点を得るまでの画像処理量が少なくなり実時間処理と整合性が良い。一方、上述の近似による誤差が存在する。この誤差は、TVカメラから対象物を捉える画角が小さいほど、小さくなる。量子化誤差は対象物を捉える画素数が多いほど小さくなるので、総合的な誤差は対象物をズームアップした時に小さくなると言える。

従って、本復元方式は実時間処理が必要で多少の誤差を許容する応用に適している。例えば、視覚制御分野の多くの応用が該当する。視覚制御分野では、各時点ごとに視覚情報により各種機械を実時間制御することを繰り返す応用が数多くある。例えば自律走行車[3.1]がその例である。また、本復元方式では、観測面に鏡映関係にある2つの復元解が求まるが、視覚制御では対象物の運動方向や形状の凹凸が予め分かる場合が多く、そのような場合には復元解を唯一つに特定できることも、本復元方式が視覚制御に適する点である。

第4章 中心射影撮像モデルを用いた 物体の運動と形状の3次元復元方式

あらまし 正射影撮像モデルよりも汎用性が高い中心射影撮像モデルを用いた物体の運動と形状の3次元復元方式について述べる。

3章の最後に述べた平面上の物体を同一平面方向に観測する場合のように、実応用では、観測者と物体の相対運動には、様々な制約条件がある場合が多い、と考えられる。これは、観測者と物体の両方が、重力という物理法則に常に制約されていたり、観測者や物体の運動が機械により生じる場合は、機械の機構上の条件により制約されるためである。4章では、観測者と物体の相対運動に関する制約条件を利用した物体の運動と形状の3次元復元方式について述べる。

具体的には、2画像間のTVカメラの運動条件を用いて、剛体の形状とTVカメラの運動を3次元復元する原理、および座標系に従った運動条件に対する新復元方式を明らかにする。従来の一般解法では8対応点が必要であるが、提案する方式によればより少ない対応点で復元可能である。TVカメラの運動条件としては、回転成分は座標軸回りの回転の合成、平行移動成分は座標軸で張る空間内、という代表的な計153条件を対象とし、座標変換による同一視により17の運動条件に帰着させる。TVカメラの運動パラメータから合成される9未知変数を最少個数の別変数に線型展開する共通原理に基づき、17運動条件のうち13条件において必要な対応点数を減らせた。線型復元解法、および最小2乗法により条件式の誤差を吸収する最小2乗解法を明らかにする。提案する復元方式によれば、従来の汎用方式に比べて少ない対応点を用いて3次元復元できる。

4.1 まえがき

コンピュータビジョンの分野は、人工知能研究と関連して1960年代から研究されてきた[4.1]。その中でも、2次元画像から3次元復元を行う処理は、ビジョンの中の最も高度な処理の1つとして、活発に研究されてきた。

3次元復元研究において、複数の画像上の対応点からTVカメラの運動と剛体の形状を3次元復元する問題は基本的かつ重要である。中心射影の撮像モデルにおいて、任意の剛体に対して2枚の画像の8対応点から3次元復元できる原理[4.2]が示された後、具体的な解析解法[4.3][4.4]が示され、特に線型解法[4.2]はさらに洗練された[4.5][4.7]。また、最小2乗法により条件式の誤差を吸収する解法[4.6]も示され洗練された[4.7]。

本論文では、2画像間のTVカメラの運動条件を用いて、従来よりも少ない対応点をもとに、剛体の形状とTVカメラの運動を3次元復元する原理および座標系に従った運動条件に対する新復元方式を明らかにする。これは、実際の応用ではTVカメラの運動

に既知の制約条件があることが多いことに着眼したものである。

本論文では、個々の運動条件に依らない復元解法の共通原理を記した後、座標系に従った153通りの運動条件を17通りの運動条件に帰着させ、個々の運動条件毎に具体的な線型復元解法を明らかにする。また最小2乗法により条件式の誤差を吸収する解法も示す。

4. 2 従来の線型復元解法

従来の線型復元解法[4.7]の要点を記す。TVカメラのレンズの中心が座標原点に一致する3次元座標系を考える。観測時点ごとに座標系が考えられるが、第1の観測時点の座標系について、TVカメラのレンズの中心を固定して3次元回転行列Rだけ回転した後、TVカメラを3次元並進ベクトルhのみ平行移動したとする。このように、TVカメラの運動パラメータ(R, h)を定義する。

TV画像における特徴点をNベクトルで表す。第1の観測時点でNベクトルm、距離rの点が、第2の観測時点でNベクトルm'、距離r'の点に移動したとすると、下記の方程式が成立する。

$$\begin{aligned} r m &= r' R m' + h \\ (m, G m') &= 0 \end{aligned}$$

ただし、記号Gを式 $G = h \times R$ により定義した。Gを基本行列と呼ぶ。定数倍だけの自由度があるhを $|h| = 1$ と正規化する。下式と同値である。

$$|G| = \sqrt{2}$$

(R, h)とr, r'を①~④の手順で求める。ただし、ベクトル ω に対して $N[\omega]$ を正規化ベクトル $\omega / |\omega|$ と定義している。

①8個の対応点を m_a, m'_a ($a=1, \dots, 8$) とする。Gの要素に関する下記の8連立方程式からGを求める。

$$(m_a, G m'_a) = 0 \quad (a=1, \dots, 8) \quad (4.1)$$

② $G = (g_1 \ g_2 \ g_3)$ とおき、下式でhを求める。

$$\begin{aligned} h &= \pm N[g_2 \times g_3] = \pm N[g_3 \times g_1] \\ &= \pm N[g_1 \times g_2] \end{aligned} \quad (4.2)$$

③ $R = (r_1 \ r_2 \ r_3)$ を下式で求める。

$$\begin{cases} r_1 = g_1 \times h + g_2 \times g_3 \\ r_2 = g_2 \times h + g_3 \times g_1 \\ r_3 = g_3 \times h + g_1 \times g_2 \end{cases} \quad (4.3)$$

④ 距離r, r'を下式で求める。

$$\begin{cases} r = \frac{(h, m) - (m, R m') (h, R m')}{1 - (m, R m')^2} \\ r' = \frac{(m, R m') (h, m) - (h, R m')}{1 - (m, R m')^2} \end{cases} \quad (4.4)$$

4. 3 提案する線型復元解法の計算原理

運動条件を用いて G を求める提案する線型復元解法の計算原理を説明する。式 (4.1) において $G = (g_{ij})$, $m_{ij} = m_{ai}m_{aj}'$ ($i, j=1, 2, 3$) と定めて下式を得る。

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 m_{ij} g_{ij} = 0$$

G の要素 g_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) を $\underline{G}_k$ ($k=1, \dots, 9$)、係数 m_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) を $\underline{M}_k$ ($k=1, \dots, 9$) と表すと、下式になる。

$$\sum_{k=1}^9 \underline{M}_k \underline{G}_k = 0 \quad (4.5)$$

一般の場合は、 $\underline{G}_k$ ($k=1, \dots, 9$) は線型独立であるため、対応点数 8 個が必要である。しかし、運動条件がある場合は、 $\underline{G}_k$ ($k=1, \dots, 9$) は必ずしも線型独立でなく、線型従属ならば $\underline{G}_k$ ($k=1, \dots, 9$) を式 (4.6) のように 9 個よりも少ない線型独立な $\underline{g}_i$ ($i=1, \dots, p; p < 9$) に線型に展開できる。

$$\underline{G}_k = \sum_{i=1}^p a_{ki} \underline{g}_i \quad (a_{ki}: \text{定数}) \quad (4.6)$$

$\{\underline{g}_i\}$ のうち 1 つは定数であり得る。式 (4.6) を式 (4.5) に代入して下式を得る。

$$\sum_{i=1}^p \underline{m}_i \underline{g}_i = 0 \quad (4.7)$$

$$(\text{ただし、} \underline{m}_i = \sum_{k=1}^9 \underline{M}_k a_{ki} \quad (i=1, \dots, p))$$

$\{\underline{m}_i\}$ は定数だから、9 個の未知変数を持つ線型方程式 (4.5) は、 p または $p-1$ 個の未知変数を持つ線型方程式 (4.7) に帰着できる。定数項を含まない場合は $p-1$ 個の連立方程式を解いた後に $|G| = \sqrt{2}$ と正規化する。従って、必要な対応点数は $p-1$ 個に減ずることができる。

具体的に運動条件が与えられたとき、式 (4.6) を満たす最少の $\underline{g}_i$ ($i=1, \dots, p$) を求める一般的な方法を説明する。

$\underline{G}_k$ ($k=1, \dots, 9$) と $\underline{g}_i$ ($i=1, \dots, p$) を線型空間の要素とみなして、線型空間の理論 [4.8] を用いると下記の命題 4. 1、命題 4. 2 を示せる。

【命題 4. 1】 式 (4.6) を満たす $\{\underline{g}_i\}$ の最少個数 p は $\underline{G}_k$ ($k=1, \dots, 9$) の線型独立数である。このとき、 $\underline{g}_i$ ($i=1, \dots, p$) は $\underline{G}_k$ ($k=1, \dots, 9$) の線型結合である。

【命題 4. 2】 式 (4.6) において 9 行 p 列の定数行列 A を $\{a_{ki}\}$ ($k=1, \dots, 9; i=1, \dots, p$) と定義すると、

$$\begin{bmatrix} \underline{G}_1 \\ \vdots \\ \underline{G}_9 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \underline{g}_1 \\ \vdots \\ \underline{g}_p \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

であるが、 $\underline{g}_i$ ($i=1, \dots, p$) が線型独立で、 $\text{rank } A = p$ ならば、 $\underline{G}_k$ ($k=1, \dots, 9$) の線型独立数は p である。

命題 4. 1 により、最少の $\{\underline{g}_i\}$ の個数は $\{\underline{G}_k\}$ の線型独立な元の個数に等しい。

従って $|G_k|$ の線型独立な元の個数に等しい $|g_i|$ を求めればよい。 $|g_i|$ は $|G_k|$ の線型独立な極大集合として求めることもできる。 $|g_i|$ は $|G_k|$ の線型結合であるから、この範囲で探すこともできる。

命題4. 2から、 $|g_i|$ が線型独立であり、行列 $A = |a_{ki}|$ のランクが $|g_i|$ の個数に等しいことを示せば、 $|g_i|$ が最少個数である。

4. 4 TVカメラの運動条件

提案する線型復元解法の計算原理は、 G の要素の線型独立数を減らせる制約条件に対して有効である。 G の定義は $h \times R$ であるため、提案する計算原理が有効な制約条件はTVカメラの運動に関する条件である。

TVカメラの運動に関する条件は無数にあるが、本章では代表的な運動条件として、“座標系に従った運動条件”を定義する。“座標系に従った運動条件”は、153通りの運動条件であるが、本質的に等価の17通りの運動条件に帰着させる。

4. 4. 1 座標系に従った運動条件

3次元空間にXYZ座標系を取る。一般には、3次元回転行列 R は自由度3、平行移動ベクトル h は自由度2を持つ。考察対象とする運動条件においては、 R と h の自由度を連続的な自由度があるか、自由度がないものに独立に条件づけする。下記のように独立に条件づけたものを、“座標系に従った運動条件”と定義する。

R ：座標軸の回りの回転の合成または既知

h ：座標軸に関する移動の合成または既知

具体的には、 R の制約条件は下記の21通りとする。

- ・ 3次元回転（1通り）
- ・ X軸回転、Y軸回転、Z軸回転のうち異なる2つの合成（6通り）
- ・ X軸回転、Y軸回転、またはZ軸回転（3通り）
- ・ 上記の形式の既知回転（10通り）
- ・ 回転なし（1通り）

h の条件は下記の11通りとする。

- ・ 3次元空間移動（1通り）
- ・ 座標平面上の移動（3通り）
- ・ 上記の形式の既知移動（4通り）
- ・ 座標軸上の既知移動（3通り）

座標軸上の未知移動 h は、移動 h が $|h| = 1$ と制約されているため、1ないし-1の移動に限られ、離散的な自由度しかないため、考察外とした。

TVカメラの座標系に従った運動条件は、 R と h の条件の組み合わせ231通りから、制約なしの1通りと R と h が共に既知である77通りを除いた153通りの運動条件である。

4. 4. 2 座標軸交換による運動条件の同一視

運動条件のうち座標軸を入れ換えて一致する条件は本質的に等価である。座標系に従った運動条件において、等価な運動条件は1つを考えれば十分である。

まず、座標軸の方向を逆にして一致する h の制約条件は1つを考えれば十分である。移動ベクトル h は、 $|h|=1$ と制約されているため、1座標軸上の移動は ± 1 の移動である。この2つの h は座標軸の方向を逆にして一致するため、 $+1$ の移動のみを考えれば十分である。

座標系に従った運動条件は R と h の条件の組み合わせであるが、 R の条件の方が h の条件よりも複雑である。 R の2つの条件 R_i と R_j が等価のとき、 R_i と h の全ての条件の組み合わせと、 R_j と h の全ての条件の組み合わせは等価である。そこで、まず R の条件において座標軸交換により一致する条件を1つのみ考えることにすると、 R の条件は下記の7通りになる。

- ・ 3次元回転
- ・ X軸回転×Y軸回転
- ・ X軸回転
- ・ 上記の形式の既知回転（3通り）
- ・ 回転なし

次に、上記の R の7条件と h の全ての条件の組み合わせを考察して、等価な運動条件を1つのみ考えることにする。 R の制約条件 R_i が或る座標軸の交換で不変な対称性を持っているとき、 h の条件 h_j, h_k がその座標軸の交換で一致するならば、運動条件 (R_i, h_j) と (R_i, h_k) はその座標軸の交換で一致するため等価である。

表4. 1に示すように、 R の7条件のうち5条件が座標軸に関する対称性をもつ。表4. 1の座標軸の交換で一致するものを除いた h の条件は表4. 2の通りである。7通りの R の条件ごとに、その座標軸に関する対称性（表4. 1）に吸収されない h の条件（表4. 2）の組み合わせ数を列挙すると下記の合計53通りになる。

- ・ 3次元回転（未知、既知）…5通り
- ・ X軸回転×Y軸回転（未知、既知）…11通り
- ・ X軸回転（未知、既知）…8通り
- ・ 回転なし…11通り

表4. 1 R の7条件における座標軸対称性

Table 4.1 Symmetry of seven R conditions with respect to coordinate axes.

交換する座標軸	不変な R の条件
X, Y, Z軸	3次元回転（未知、既知） 回転なし
Y, Z軸	X軸回転（未知、既知）

表 4. 2 座標軸交換で一致しない h の条件

Table 4.2 Identified h conditions by exchange of coordinate axes.

交換する座標軸	一致しない h の条件
X, Y, Z 軸	3 次元空間移動 (未知、既知) X Y 平面上移動 (未知、既知) X 軸上移動 (既知) ; 5 条件
Y, Z 軸	第 1 行欄の 5 移動条件 Y Z 平面上移動 (未知、既知) Y 軸上移動 (既知) ; 8 条件

座標軸を交換しても一致しない運動条件は、上記の 5 3 通りから、制約なし 1 通りと既知の 1 8 通りを除いた 3 4 通りである。

4. 4. 3 座標変換による運動条件の同一視

3 4 通りの運動条件のうち座標系を変換して一致する運動条件は、等価であるから 1 つのみ考えれば十分である。

運動条件が座標系の変換により一致する場合を命題 4. 3 に示す。

【命題 4. 3】 U, V を既知の 3 次元回転行列とするとき座標変換により、運動条件 (R, h) は運動条件 (URV, Uh) に一致する。特に、 R が既知ならば、運動条件 (R, h) は、運動条件 (I, h) と等価である。 h が既知ならば、 $Wh = X$ 軸単位ベクトルとなる 3 次元回転行列 W を用いて、運動条件 (R, h) は、運動条件 $(WR, X$ 軸単位ベクトル) と等価である。

命題 4. 3 によれば、3 4 通りの運動条件のうち表 4. 3 の 1 7 運動条件を考えれば十分である。

表 4. 3 考察すべき 17 通りの運動条件

Table 4.3 Identified 17 TV camera motion conditions to be considered.

	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7
R1		○				○	
R2	○	○	○	○	○	○	○
R3	○	○	○		○	○	○
R4	○	○					

R1: 3次元回転、R2: X軸回転×Y軸回転

R3: X軸回転、R4: 回転なし

h1: 3次元空間移動、h2: X Y平面移動

h3: Y Z平面移動、h4: Z X平面移動

h5: X Y平面移動 (既知)、h6: X軸移動 (既知)

h7: Y軸移動 (既知)

Rが3次元回転の場合は、hが既知ならばhをX軸単位ベクトルとして考えれば十分である。

RがX軸回転×Y軸回転の場合は、hが既知の3次元空間移動、既知のZ X平面上移動の場合は、Uを適当なX軸回転にすることでhをX Y平面上移動として考えれば十分である。hが既知のY Z平面上移動、既知のZ軸上移動の場合は、Uを適当なX軸回転にすることでhをY軸上移動として考えれば十分である。

RがX軸回転の場合は、hが既知の3次元空間移動の場合は、Uを適当なX軸回転にすることでhをX Y平面上移動として考えれば十分である。hが既知のY Z平面上移動の場合は、Uを適当なX軸回転にすることでhをY軸上移動として考えれば十分である。

Rが既知の場合は、RをIとして考えれば十分である。さらに必要ならば座標軸を交換することにより、hの制約条件は、3次元空間移動もしくはX Y平面上の未知移動として考えれば十分である。

座標軸に従った153通りの運動条件は表4. 3の17通りの運動条件のいずれかと等価であることを示せた。

4. 5 運動条件ごとの線型復元解法

17通りの運動条件ごとに、3節の計算原理を適用して、Gの成分を線型展開する最少個数の元を求めると表4. 4になる。ただし、Gのij成分を g_{ij} 、Rのij成分を r_{ij} 、hのi成分を h_i と表した。

表 4. 4 G の成分を線型展開する最少個数の元
Table 4.4 Least elements expanding G elements linearly.

運動条件	G の成分を線型展開する最少個数の元
R1, h2	G の 9 個の元
R1, h6	$g_{21}, g_{22}, g_{23}, g_{31}, g_{32}, g_{33}$
R2, h1	G の 9 個の元
R2, h2	G の 9 個の元
R2, h3	$g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{21}, g_{23}, g_{31}, g_{33}$
R2, h4	G の 9 個の元
R2, h5	$g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{31}, g_{32}, g_{33}$
R2, h6	$g_{21}, g_{22}, g_{23}, g_{31}, g_{32}, g_{33}$
R2, h7	$g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{31}, g_{33}$
R3, h1	$g_{12}, g_{13}, g_{21}, g_{22}, g_{23}, g_{31}$
R3, h2	$g_{12}, g_{13}, g_{22}, g_{23}, g_{31}$
R3, h3	$g_{12}, g_{13}, g_{21}, g_{31}$
R3, h5	$r_{22}, r_{23}, 1$ (定数)
R3, h6	r_{22}, r_{23}
R3, h7	$r_{22}, r_{23}, 1$ (定数)
R4, h1	h_1, h_2, h_3
R4, h2	h_1, h_2

運動条件(R1, h2) (R2, h1) (R2, h2) (R2, h4) の場合は、従来方式と同じく G の 9 個の成分は線型独立であるため、9 個未満の元で線型展開できず、3 次元復元のためには 8 対応点が必要である。

表 4. 5 に運動条件毎に 3 次元復元に必要な対応点数を示す。3 次元復元に必要な対応点数は、G を求めるために必要な対応点数と等しいため、G の成分を線型展開する最少の元の数から 1 減じた数である。また、復元方式の冗長度を、必要対応点数から G の自由度を引いた数として定義して、表 4. 5 に示した。

表4. 5 3次元復元に必要な対応点数

Table 4.5 Number of necessary corresponding points for 3-D recovery.

運動条件	必要な 対応点数	Gの 自由度	提案する復元 方式の冗長度
R1, h2	8	4	4
R1, h6	5	3	2
R2, h1	8	4	4
R2, h2	8	3	5
R2, h3	6	3	3
R2, h4	8	3	5
R2, h5	5	2	3
R2, h6	5	2	3
R2, h7	4	2	2
R3, h1	5	3	2
R3, h2	4	2	2
R3, h3	3	2	1
R3, h5	2	1	1
R3, h6	1	1	0
R3, h7	2	1	1
R4, h1	2	2	0
R4, h2	1	1	0

上記の4条件(R1, h2) (R2, h1) (R2, h2) (R2, h4)を除いた13条件では、従来よりも少ない対応点で3次元復元できる。従来方式の冗長度は3であるが、提案する復元方式の冗長度は、上記の13条件では3以下であり、そのうち10条件においては3未満である。また、上記の13条件では、 $\{g_i\}$ の一部がhやRの成分と一致する場合があるなど、hやRが従来よりも直接的に計算できる。付録Bに個別の運動条件における提案方式による計算例を示す。

実応用で出現しやすい場合の例としては、TVカメラを搭載した移動車が平面上を運動し、平面方向が既知であり、TVカメラを搭載した移動車の回転軸の方向が平面と直交している場合がある。平面方向にY軸とZ軸、物体の回転軸の方向にX軸を設定すると、表4.5において、Rの制約条件がR3、hの制約条件がh3の場合になり、3次元復元に必要な対応点数は3になる。

4. 6 従来の最小2乗復元解法

従来の最小2乗法による3次元復元解法[4.7]の要点を記す。(R, h)と r, r' を①～④の手順で求める。N (≥ 8) 個の対応点を m_a, m_a' ($a=1, \dots, N$) とする。

① G を式 (4.9) を満たすように求める。

$$\sum_{a=1}^N (m_a, G m_a')^2 \rightarrow \min \quad (4.9)$$

9 次正方行列 $\underline{M} = (\underline{M}_{xy})$ を、添え字 ij と kl に添え字 x と y を対応させ下式で定義する。

$$\underline{M}_{xy} = \left(\sum_{a=1}^N m_a i m_a j' m_a k m_a l' \right)_{ij, kl}$$

式 (4.9) は式 (4.10) と同値であり、行列 $\underline{M}$ の最小固有値に対するノルム $\sqrt{2}$ の固有ベクトルとして $\underline{G}$ すなわち G が求まる。

$$(\underline{G}, \underline{M} \underline{G}) \rightarrow \min \quad (4.10)$$

② h を式 (4.11) を満たすように求める。

$$\sum_{i=1}^3 (g_i, h)^2 \rightarrow \min \quad (4.11)$$

式 (4.11) は式 (4.12) と同値であり、行列 $G G^T$ の最小固有値に対する単位固有ベクトルとして h が求まる。

$$(h, G G^T h) \rightarrow \min \quad (4.12)$$

h の符号は、式 (4.13) を満たすように決める。

$$\sum_{a=1}^N |h m_a G m_a'| > 0 \quad (4.13)$$

③ R を式 (4.14) を満たすように求める。

$$|h \times R - G|^2 \rightarrow \min \quad (4.14)$$

$K = G \times h$ と定義するとき、式 (4.14) は式 (4.15) と同値であり、 R は K を極分解した直交成分行列として求まる。

$$\text{Tr} [R^T K] \rightarrow \max \quad (4.15)$$

④ r, r' を式 (4.16) を満たすように求める。

$$|r m - r' R m' - h|^2 \rightarrow \min \quad (4.16)$$

線型復元解法と同様に式 (4.4) で求まる。

4. 7 提案する最小 2 乗復元解法

3 節で述べた提案する線型復元解法を最小 2 乗復元解法に拡張する。4. 6 節の従来法のステップ①～③が独立に改良できる。

① G の計算：展開式 (4.6) が成立する場合の改良法を記す。 $A = (a_{ki})$ と定義すると、式 (4.6) は式 (4.17) に表現できる。

$$\underline{G} = A \underline{g} \quad (4.17)$$

p 次正方行列 $\underline{m} = (\underline{m}_{ij})$ を下式で定義する。

$$\underline{m}_{ij} = \sum_{x=1}^9 \sum_{y=1}^9 \underline{M}_{xy} a_{xi} a_{yj} \quad (i, j = 1, \dots, p) \quad (4.18)$$

$\underline{e}$ を行列 $\underline{m}$ の最小固有値の長さ 1 の固有ベクトルと定義する。 $\underline{G}$ は式 (4.19), 式 (4.17) から求まる。

$$\underline{g} = (\sqrt{2} / |A \underline{e}|) \underline{e} \quad (4.19)$$

〔証明〕 $(\underline{G}, \underline{M}\underline{G}) = (\underline{g}, \underline{m}\underline{g})$ から式(4.10) すなわち式(4.9) は式 (4.20) と同値である。

$$(\underline{g}, \underline{m}\underline{g}) \rightarrow \min \quad (4.20)$$

ここで、行列 $\underline{m}$ は p 次対称行列であるため、 α を正数とすると、 $|\underline{g}| = \alpha$ の制約のもとに式 (4.20) を満たす $\underline{g}$ は $\alpha \underline{e}$ である。

求める $\underline{g}$ はこれらのうち $|\underline{G}| = \sqrt{2}$ を満たす必要がある。式 (4.17) から $\alpha = \sqrt{2} / |\underline{A}\underline{e}|$ であるから、式(4.19) が求まる。〔証明終〕

② h の計算: $h_i = 0$ (i は 1, 2, 3 のいずれか) の場合の改良法を記す。

順に $\underline{h}$, $\underline{G}\underline{G}^T$, $\underline{m}_a \times \underline{G}\underline{m}_a'$ を $\underline{h}$, $\underline{G}\underline{G}^T$, $\underline{m}_a \times \underline{G}\underline{m}_a'$ から列ベクトルについては第 i 行を除いた 2 次元ベクトル、行列については第 i 行と第 i 行を除いた 2 次正方行列と定義する。 $\underline{h}$ を求めればよい。

$\underline{h}$ は行列 $\underline{G}\underline{G}^T$ の最小固有値に対する単位固有ベクトルとして求まる。 $\underline{h}$ の符号は、式 (4.21) を満たすように決める。

$$\sum_{a=1}^N (\underline{h}, \underline{m}_a \times \underline{G}\underline{m}_a') > 0 \quad (4.21)$$

〔証明〕 $(\underline{h}, \underline{G}\underline{G}^T \underline{h}) = (\underline{h}, \underline{G}\underline{G}^T \underline{h})$ であるため、式 (4.12) は式 (4.22) と同値である。

$$(\underline{h}, \underline{G}\underline{G}^T \underline{h}) \rightarrow \min \quad (4.22)$$

$\underline{G}\underline{G}^T$ は対称行列であるため、 $\underline{h}$ は行列 $\underline{G}\underline{G}^T$ の最小固有値に対する単位固有ベクトルである。また

$$|\underline{h}\underline{m}_a \underline{G}\underline{m}_a'| = (\underline{h}, \underline{m}_a \times \underline{G}\underline{m}_a')$$

であるため、式 (4.13) は式 (4.21) と同値である。〔証明終〕

③ R の計算: $r_{ii} = 1$ (i は 1, 2, 3 のいずれかの数) となる R の場合の改良法を記す。

$\underline{R}$, $\underline{K}$ を順に R , K から第 i 行と第 i 行を除いた 2 次正方行列と定義する。 $\underline{R}$ を求めればよい。

$\underline{R}$ は $\underline{K}$ を極分解した直交行列成分として求まる。

$$[\text{証明}] \text{Tr} [\underline{R}^T \underline{K}] = \text{Tr} [\underline{R}^T \underline{K}] + k_{ii}$$

であるため、式 (4.15) は式 (4.23) と同値である。

$$\text{Tr} [\underline{R}^T \underline{K}] \rightarrow \max \quad (4.23)$$

$\underline{R}$ は直交行列であるため、 $\underline{R}$ は $\underline{K}$ を極分解した直交成分行列として求まる。〔証明終〕

付録 B に個別の運動条件における提案方式による計算例を示す。

4. 8 TVカメラが固定され物体が動いている場合

4. 7 節までの第 4 章では、中心射影画像からの 3 次元復元方式を、TVカメラが運動し物体が固定されている状況で記述し、TVカメラの運動が座標系に従っている多くの場合に、3 次元復元に必要な特徴点数を減じることができることを示した。これに対して、本 4. 8 節では、TVカメラが固定され物体が運動している状況において、本方式が有効な場合を求める。このため、4. 2 節における TVカメラの運動パラメータの定式化を、TVカメラが固定され物体が運動している状況で捉え直した場合に持つ意味

を考察する。

まず、4. 2節におけるTVカメラの運動パラメータ (R, h) の定式化を再度記す。TVカメラのレンズの中心が座標原点に一致する3次元座標系を考える。観測時点ごとに座標系が考えられるが、第1の観測時点の座標系について、TVカメラのレンズの中心を固定して3次元回転行列 R だけ回転した後、TVカメラを3次元並進ベクトル h のみ移動したとする。3次元空間中の点 P の第1時点の座標系における3次元座標ベクトルを p 、第2時点の座標系における3次元座標ベクトルを p' と記すと、式(4.24)の関係がある。

$$p' = R^{-1} \{ p - h \} \quad (4.24)$$

以下に、TVカメラが固定され物体が運動している状況において、4. 7節までの方式が有効な場合を求める。TVカメラが固定され物体が運動している状況と、TVカメラのレンズの中心が座標原点に一致する3次元座標系を想定する。

式(4.24)を変形して、下式(4.25)を得る。

$$p = R p' + h \quad (4.25)$$

3次元座標ベクトルが p' である点 P を座標原点を中心に3次元回転行列 R だけ回転した後、3次元並進ベクトル h のみ移動させて得られる3次元座標ベクトルが p である関係を、式(4.25)は表している。従って、4. 7節までの定式化は、固定したTVカメラの回りに物体を R 回転した後、 h 並進した場合の定式化と等価である。従って、物体がTVカメラを中心として R 回転した後、 h 並進したと捉えたとき、 R と h に座標系に従った制約条件がある場合は、 R と h を置き換えずに、4. 7節までの方式を適用できる。

しかし、上記のような場合は出現頻度が少ないと考えられる。そこで、物体がその中心の回りに回転した後、並進した、という通常に考えられる状況設定で以下に考察する。

移動前の物体の中心の3次元座標ベクトルを g' 、 I を単位行列として、式(4.25)を変形して、下式(4.26)を得る。

$$(p - g') = R(p' - g') + \{ h + (R - I)g' \} \quad (4.26)$$

式(4.26)は、物体が中心 g' の回りに R 回転した後、 $\{ h + (R - I)g' \}$ だけ並進したことを表している。TVカメラを回転の中心とした式(4.25)の場合と比較して、回転成分 R は変化していないが、並進成分 h は $\{ h + (R - I)g' \}$ に変化している。4. 7節まで、回転行列 R と並進ベクトル h が座標系に従った制約条件を持つ場合を考察したため、以下においても、物体がその中心 g' の回りに R 回転を行った後、3次元並進ベクトル $\{ h + (R - I)g' \}$ だけ並進したと捉えたとき、 R と $\{ h + (R - I)g' \}$ に座標系に従った制約条件がある場合を考察する。

4. 7節までの方式を適用するには、(1) 3次元並進ベクトル h を「制約条件なし」の条件で適用するか、(2) R と $\{ h + (R - I)g' \}$ の座標系に従った制約条件から h に関する座標系に従った制約条件を求めて適用する、ことが必要である。

まず、(1) 3次元並進ベクトル h を「制約条件なし」の条件で適用する場合を考察する。表4. 3から、下記の3つの場合(a)(b)(c)のいずれかに等価である。

(a) RがX軸回転×Y軸回転(R2)の場合；運動条件が(R2, h1)の場合であり、表4. 5により、本方式により必要な対応点数である8を減らすことはできない。

(b) RがX軸回転(R3)の場合；運動条件が(R3, h1)の場合であり、表4. 5により、本方式による必要な対応点数は5である。

(c) Rが回転なし(R4)の場合；運動条件が(R4, h1)の場合であり、表4. 5により、本方式による必要な対応点数は2である。

次に、(2) Rと $\{h+(R-I)g'\}$ の座標系に従った制約条件から、3次元並進ベクトルhに関する座標系に従った制約条件を導出できる場合を考察する。hに関する座標系に従った制約条件を求められるならば、必要な特徴点数をさらに減じ得るためである。hに制約条件を生じない場合は、上記(a)(b)(c)で考察したため、以下では、hに座標系に従った制約条件を生じる場合のみを考察する。

$\{h+(R-I)g'\}$ の制約条件の種類は、hの制約条件の種類と同一とする。 $\{h+(R-I)g'\}$ の制約条件に従い、表4. 6のように g' が制約されるものとしても一般性を失わないので、表4. 6のように約束する。 g' が完全に既知である場合は考えにくいので考察外とする。

表4. 6 $\{h+(R-I)g'\}$ と g' の制約条件の組の種類

$\{h+(R-I)g'\}$ の制約条件	g' の制約条件
3次元移動(未知、既知)	3次元空間点(未知)
座標平面上(未知、既知)	$\{h+(R-I)g'\}$ と同一の座標平面上(未知)
座標軸上(既知)	$\{h+(R-I)g'\}$ と同一の座標軸上(未知)

$h = \{h+(R-I)g'\} - (R-I)g'$ であるから、hに関する座標系に従った制約条件の導出の考察のために、Rの制約条件、 g' の制約条件から、 $(R-I)g'$ の制約条件を考察した後、 $\{h+(R-I)g'\}$ の制約条件を合わせて用いて、hの制約条件を考察する。

Rの制約条件ごとに考察する。4. 4. 2節、4. 4. 3節における考察により、Rの制約条件に関して、下記の4つの場合を考察すれば十分である。

(d) Rが3次元回転(R1)の場合

(e) RがX軸回転×Y軸回転(R2)の場合

(f) RがX軸回転(R3)の場合

(g) Rが回転なし(R4)の場合

以下に、順に考察する。

(d) Rが3次元回転(R1)の場合

Rは下記の形式の行列である。

$$R = \{X軸回転\} \times \{Y軸回転\} \times \{Z軸回転\}$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} 1 & & \\ C\phi & -S\phi & \\ S\phi & C\phi & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & \\ & 1 & \\ S\theta & C\theta & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\psi & -S\psi & \\ S\psi & C\psi & \\ & & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} C\theta & C\psi & -C\theta & S\psi & -S\theta \\ -S\phi S\theta C\psi + C\phi S\psi & S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & -S\phi C\theta \\ C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi & -C\phi S\theta S\psi + S\phi C\psi & C\phi C\theta \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Rの成分はすべて未知であるため、 $(R-I)g'$ も未知の3次元ベクトルであり、 $|h+(R-I)g'|$ の制約条件が何であろうと、 h は未知の3次元ベクトルである。
従って、 h の制約条件は導けない。

(e) RがX軸回転×Y軸回転(R2)の場合

Rは下記の形式の行列である。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & & \\ C\phi & -S\phi & \\ S\phi & C\phi & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & \\ & 1 & \\ S\theta & C\theta & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta & 0 & -S\theta \\ -S\phi S\theta & C\phi & -S\phi C\theta \\ C\phi S\theta & S\phi & C\phi C\theta \end{bmatrix}$$

$(R-I)g'$ は、 g' がY軸上に制約される場合のみ、X成分が0となる制約を生ずる。
この時、表4. 6から $|h+(R-I)g'|$ はY軸上に制約される条件であり、 h はX成分が0となり、YZ平面上の制約条件となる。

$|h+(R-I)g'|$ および g' がY軸上に制約される場合にのみ、 h はYZ平面上に制約される条件(h3)が生ずる。このとき、運動条件が(R2, h3)の場合であり、表4. 5により、本方式による必要な対応点数は6である。

(f) RがX軸回転(R3)の場合

Rは下記の形式の行列である。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & & \\ C\phi & -S\phi & \\ S\phi & C\phi & \end{bmatrix}$$

(f.1) g' が3次元空間点(未知)の場合； $(R-I)g'$ のX成分が0となるが、 $|h+(R-I)g'|$ は3次元移動(未知、既知)であるため、座標系に従った h の制約条件は導けない。

(f.2) g' が座標平面上(未知)の場合

g' がZX座標平面上の場合は、 g' がXY座標平面上の場合と等価であるため、 g' がXY座標平面上の場合とYZ座標平面上の場合のみ考察する。どちらも、 $(R-I)g'$ のX成分が0となる。

(f.2.1) g' がXY座標平面上(未知)の場合； $|h+(R-I)g'|$ はXY座標平面上移動(未知、既知)であるため、座標系に従った h の制約条件は導けない。

(f.2.2) g' がYZ座標平面上(未知)の場合； $|h+(R-I)g'|$ はYZ座標平面上移動(未知、既知)であるため、 h の制約条件はYZ座標平面上移動(未知：h3)となる。運動条件が(R3, h3)の場合であり、表4. 5により、本方式による必要な対応点数は3である。

(f.3) g' が座標軸上 (未知) の場合

等価な場合を1つのみ考察することとし、 g' がX座標軸上の場合とY座標軸上の場合のみ考察する。

(f.3.1) g' がX座標軸上 (未知) の場合 ; $(R-I)g'$ は0ベクトルになる。 h は $|h+(R-I)g'|$ に等しく、 h の制約条件はX座標軸上移動 (既知: $h6$) である。運動条件が $(R3, h6)$ の場合であり、表4. 5により、本方式による必要な対応点数は1である。

(f.3.2) g' がY座標軸上 (未知) の場合 ; $(R-I)g'$ のX成分が0となる。 $|h+(R-I)g'|$ はY座標軸上移動 (未知、既知) であるため、 h の制約条件はYZ座標平面上移動 (未知: $h3$) となる。(f.2.2)の場合の1部となった。

(g) Rが回転なし(R4)の場合

$(R-I)g'$ は0ベクトルになる。 h は $|h+(R-I)g'|$ に等しい。表4. 3により、 h の制約条件としては、 $h1$: 3次元空間移動、 $h2$: XY平面移動、のみ考察すれば十分である。前者の場合は、(c)で考察済みである。後者の場合、運動条件が $(R4, h2)$ の場合であり、表4. 5により、本方式による必要な対応点数は1である。

以上の(a)~(g)の結果において、3次元復元に必要な対応点数を従来方式よりも減らせる場合のみをまとめると表4. 7になる。

表4. 7 Rと $|h+(R-I)g'|$ に座標系に従った制約条件がある場合において、3次元復元に必要な対応点数を従来方式よりも減らせる場合

Rの制約条件	$ h+(R-I)g' $ の制約条件	g' の制約条件	導かれるhの制約条件	必要な対応点数
R2	Y軸上 (未知)	Y軸上 (未知)	h3	6
R3	YZ座標平面上 (未知)	YZ座標平面上 (未知)	h3	3
	X座標軸上 (既知)	X座標軸上 (未知)	h6	1
	制約なし	制約なし	h1(制約なし)	5
R4	XY平面移動 (未知)	XY平面上 (未知)	h2	1
	制約なし	制約なし	h1(制約なし)	2

R2：X軸回転×Y軸回転

R3：X軸回転、R4：回転なし

h1：3次元空間移動（制約なし）、h2：XY平面移動

h3：YZ平面移動、h6：X軸移動（既知）

実応用で出現しやすい場合の例としては、物体が平面上を運動し、平面方向が既知であり、物体の回転軸の方向が平面と直交している場合がある。平面方向にY軸とZ軸、物体の回転軸の方向にX軸を設定すると、表4. 7において、Rの制約条件がR3、 $|h+(R-I)g'|$ の制約条件がYZ座標平面上(未知)の場合になり、3次元復元に必要な対応点数は3になる。

4. 9 むすび

正射影撮像モデルよりも汎用性が高い中心射影撮像モデルを用いた物体の運動と形状の3次元復元方式について述べた。

具体的には、2画像間のTVカメラの運動条件を用いて、従来よりも少ない対応点をもとに、剛体の形状とTVカメラの運動を3次元復元する原理および座標系に従った運動条件に対する新復元方式を明らかにした。

TVカメラの運動条件として、座標系に従った153条件を対象とし、座標変換による同一視により17の運動条件に帰着させた。TVカメラの運動パラメータから合成される9未知変数を最少個数の別変数に線型展開する共通原理に基づき、17運動条件のうち13条件において必要な対応点数を減らせた。線型復元解法と、最小2乗法により条件式の誤差を吸収する最小2乗解法を示した。

提案した復元方式によれば、従来の汎用方式に比べて少ない対応点を用いて3次元復元できる。

提案した復元方式で示した、2画像間のTVカメラの運動条件をより単純な条件に帰着した後、基本行列の要素を最少の新変数に展開する提案方式の3次元復元原理は、本論文で扱う運動条件に限らず、適用できる汎用性がある。

ただし、一般に、中心射影画像からの3次元復元方式では、面の方向が投影方向と直交するような場合は、面の投影結果が幅の狭い図形になり、少しの誤差が結果に大きな変化を与えることがあることに留意する必要がある。

今後の課題は、提案した復元方式を実際の画像処理システムに応用することである。

第5章 ビデオ画像入力からの 対話型物体3次元復元システム

あらまし 3次元復元方式を応用した、対話型3次元物体復元システムを提案する。画像処理による対応点抽出問題を、人間との対話処理と画像処理による特徴点位置補正により代替したシステムで、実世界のビデオ映像からCGモデルを簡易に生成できる効果があることを述べる。

本システムは、ビデオカメラにより捉えた物体の2次元画像に対して、3次元再構成技術を応用して、物体の形状と動きを3次元物体モデルとして計算機内に簡便に復元できるシステムである。本システムの特長は、任意の環境において捉えた物体の2次元画像に対して、人間がポインティングデバイスにより特徴点を指示するだけで、システムが自動的に3次元物体モデルを復元できることである。本システムは、人間が指示した2次元画像上の特徴点の位置を2次元画像処理により自動補正した後、補正された特徴点位置に3次元再構成方式を適用することにより物体の3次元形状と動きを同時に復元し、復元した3次元形状に2次元入力画像のテクスチャを自動マッピングする。適用範囲を広くするため1台のビデオカメラで捉えた入力画像を用い、3次元を想起させつつ手ぶれ誤差を吸収できる人間の負担が軽いインタフェースを考案した。3次元再構成では、復元可否判定ができる独自の復元方式を応用すると共に、複数方向からの3次元物体復元の結果を統合することにより隠れの問題に対処した。

5.1 まえがき

3次元復元方式を応用した、対話型3次元物体復元システムを提案する。画像処理による対応点抽出問題を、人間との対話処理と画像処理による特徴点位置補正により代替したシステムで、実世界のビデオ映像からCGモデルを簡易に生成できる効果があることを述べる。

近年、マルチメディア技術のニーズが拡大している。特に、3次元コンピュータグラフィックス(CG)は、ハードウェアの進歩により、3次元図形が容易に表示可能になったことで急速に需要が高まっている。3次元CGでは写実性を高める研究[5.1]が特に多い。

写実性を決定する上で、物体の3次元モデルは大きな役割を持つ。形状モデリングでは、基本図形に様々な操作を施すことで3次元物体モデルをボトムアップに構築するが、多大な工数を要する。動きモデリングでは物理法則などにより計算するが、計算量が多くなることが多い。

そこで、現実を模倣することにより3次元モデルを構築する場合が多いことに着眼し、3次元モデルを構築する手段として、画像理解の研究に注目した。そして、実際の3次

元物体を捉えたビデオ画像に3次元再構成方式を適用することにより簡便に3次元物体モデルを復元できるシステムを構築した。

画像理解はコンピュータビジョン(CV)の位置づけで、自動検査や視覚制御を目的として長年にわたり精力的に研究されてきた。図5.1にCVシステムの代表的な構成を示す。ビデオカメラで捉えた物体の画像から特徴を抽出し、抽出した特徴に3次元再構成方式を適用して物体を再構成し、その情報により様々な機器を自動制御する。ところが、任意の照明環境において一様に画像特徴を抽出するのは困難であり、工場内などの整備された照明環境下でのみ適用されている。

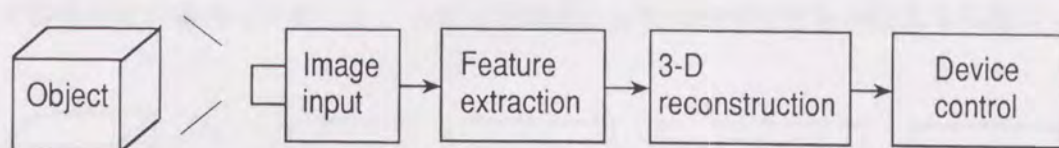


図5.1 CVシステムの構成

Fig. 5.1 Configuration of CV systems.

一方、マルチメディアのプラットフォームとなる計算機はワークステーション(W S)であり対話型環境である。対話型環境では完全自動を強いて目指すよりも人間と計算機の長所を生かした作業環境を実現することがより重要である。物体画像からの特徴抽出の完全自動化は将来も困難であるが、人間は容易に行っていることに着眼し、人間の物体画像に対する特徴指示を活用した。これにより、任意の環境で捉えた2次元画像から3次元物体モデルを一様に復元することを可能にした。

人間が指示する特徴は、最も的確に指示できる特徴点とした。3次元再構成では特徴点の2次元射影座標から特徴点の3次元位置と動きを再構成する方式を用いた。入力画像は、最も汎用な1台のビデオカメラで捉えた画像とした。1枚の画像では3次元再構成できないため、複数画像を入力とした。

この対応点による3次元再構成方式は再構成解の存在の提示[5.2]を発端として研究が開始され、撮像モデル毎に研究された。一般の剛体を認識するためには、中心射影の撮像モデルでは2画像間で対応づけられた8特徴点が必要である[5.3][5.4]が、正射影の撮像モデルでは3画像間で対応づけられた4特徴点で十分である[5.5][5.6]。特に、正射影の撮像モデルによる著者らの独自の3次元再構成方式[5.6]は入力画像の情報のみから再構成可否の判定ができるため適用した。この他、再構成の精度を高めるために多数の特徴点を用いる方式[5.7]があるが、人間が特徴点を指定する負担が大きすぎるので、少ない特徴点を用いる3次元再構成方式を適用した。

本研究では実画像に画像理解技術を応用し、CGを含むマルチメディアへの応用を図っているが、従来研究[5.8][5.9][5.10]とは異なる。ビデオ構造の視覚化を行う研究[5.8]では、2次元の画像認識によりカット分割や被写体の存在の判定などを実現している。CGと動画の合成により景観シミュレーションを行う研究[5.9]では、動画のオプティカルフローの解析によりカメラパラメータを求めている。しかし、これらの研究では対象物体の3次元形状を再構成していない。アイデアスケッチからの3次元形

状自動復元システム[5.10]では、3次元形状を再構成するために形状断面線の入力が必要とし、ビデオ画像に対して適用できない。

本システムは、実画像から外界の3次元の形状と運動を再構成し、外界の3次元物体モデルを簡易に復元することを可能にする。

5. 2 システム構成

図5.2に本システムの構成を示す。図5.1のCVシステムが自動的に行う特徴抽出処理を、人間の特徵指示処理に置き換えた。これにより任意の環境で捉えた画像における特徴情報の獲得を可能にし、3次元再構成と3次元物体モデルの復元を可能にした。

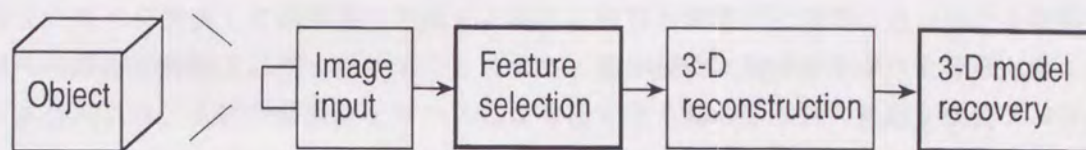


図5.2 本システムの構成

Fig. 5.2 Configuration of our system.

入力画像としては、最も標準的で汎用性が高いためシステムの利用範囲を広くできる1台のビデオカメラで捉えた画像を用いた。特に、家庭用の簡易ビデオカメラで捉えた画像をも対象にできる。

人間が指示する画像特徴としては、指示の確実性と容易性の観点から端点などの物体形状を表す特徴点を用いた。2次元画像上の特徴点位置から、3次元形状を再構成するには、直交性などの特殊な前提条件がない限り、一般に複数の入力画像上の特徴点位置と対応関係が必要である。

そこで、ハードウェアとしては、ビットマップディスプレイとポインティングデバイスであるマウスを備えたワークステーションを用い、人間が画面上でマウスにより対話的に複数の物体画像の特徴点とその対応関係を指示するようにした。そして、システムが2次元画像上の特徴点位置から物体の3次元モデルを再構成するようにした。

本システムでは、下記の処理(1)~(4)を順に実行する。

(1) 画像入力：複数方向から捉えた物体画像を計算機に入力し、各画像を画面に表示する。

(2) 特徴点指示：物体上の特徴点とその対応を画面上で人間がマウスで指示する。

(3) 3次元再構成：指示された特徴点に3次元再構成方式を適用し、3次元形状と動きを再構成する。

(4) 3次元物体復元：獲得した物体の3次元形状に入力画像中におけるテクスチャをマッピングして3次元物体モデルを復元する。

各処理の詳細を以下に説明する。

5. 3 特徴点指示

物体上の特徴点と複数の画像間の特徴点の対応関係を、人間が画像上で指示するには、マウスを用いて画面上で直接指示するのが適当である。この指示操作のために、人間が指示しやすい下記のインタフェースを設けた。

(1) 3次元を想起できる表示；物体画像上で指示した特徴点を稜を表す線分で結んで、物体の概形を線画で重畳表示し、人間に3次元形状を想起させつつ円滑な特徴点指示ができるようにした。

(2) ヒューマンエラーの対処；稜を表す線分をマウスの動きと共にラバーバインド表示して新たな特徴点の位置ぎめを最適に行える環境を基本とした。極端に短い新たな線分をただちに消去して指示誤りを除くと共に、既存の特徴点に極端に近い新たな特徴点はその既存の特徴点に同一化することにより、指示操作における手ぶれを吸収した。

具体的には、人間が特徴点をマウスにより指示する時の手ぶれの範囲を閾値 S (>0)として定め、下記の(1), (2)段階により特徴点とその間の稜の登録処理を行う。

(1) ボタンを押(離)した点の処理

(1.1) 既登録の特徴点との距離が S 以上の場合；ボタンを押(離)した点を線分の開始(終了)点とする。

(1.2) 既登録の特徴点との距離が S 未満の場合；既特徴点を線分の開始(終了)点とする。

(2) 特徴点と稜の登録処理

(2.1) 開始点と終了点の距離が S 以上の場合；開始点と終了点を特徴点として登録し、2点を結ぶ線分を稜として登録する。

(2.2) 開始点と終了点の距離が S 未満の場合；特徴点と稜の登録を行わない。

以上が特徴点指示における基本的なインタフェースであるが、なお下記の(1)~(3)の問題が残る。

(1) 人間の思い違いで登録した特徴点の位置が不適当な場合がある。

(2) テクスチャが複雑であるなどの理由で、人間が特徴点の位置を指示しにくい場合がある。

(3) 人間が特徴点の微妙な位置決定に確信を持ってない場合がある。

これらの問題については、上記の基本的なインタフェースである特徴点指示モードに、順に下記(1)~(3)のモードを加えることにより、問題を解決した。

(1) 特徴点修正モード；人間が特徴点を追加、削除でき、かつ位置を修正できる。

(2) 拡大表示モード；人間が画像部位を拡大指示して特徴点位置を微妙に補正できる。

(3) 画像認識による特徴点の自動位置補正モード；人間が指示した特徴点の画像近傍で画像認識を行い、特徴点の位置を自動補正する。

画像認識による特徴点の自動位置補正モードでは、特徴点の近傍画像の濃淡分布が最も一致するように、特徴点の位置を自動補正する方式を適用した。基準画像の特徴点位置を基準として、補正画像の特徴点位置を自動補正する。

具体的な処理を以下に説明する。画像座標 (x, y) の濃淡値を $I(x, y)$ と記す。基準画像

の特徴点座標を (x_0, y_0) 、補正画像の対応する特徴点の座標を (x_1, y_1) とする。 S_1, S_2 を閾値とし、補正画像の座標点 (x_2, y_2) で式

$$|x_2 - x_1| < S_1, |y_2 - y_1| < S_1 \quad (5.1)$$

を満たすものから (x_1, y_1) を補正する点を決定する。補正画像の点 (x_2, y_2) の近傍と基準画像の点 (x_0, y_0) の近傍の濃淡分布の相違度を式(5.2)で定義する。

$$\sum |I(x_2+m, y_2+n) - I(x_0+m, y_0+n)| \quad (5.2)$$

$$|m| < S_2, |n| < S_2$$

式(2)を最小にする (x_2, y_2) である (x_1', y_1') を求め、補正画像の特徴点座標 (x_1, y_1) を (x_1', y_1') に自動補正する。

5. 4 3次元再構成

特徴点指示処理では1台のビデオカメラで捉えた複数の入力画像における物体特徴点の2次元位置を決定するが、3次元再構成では物体の3次元形状を獲得する。このため、対応づけられた特徴点の2次元位置から物体の3次元形状を再構成する方式を適用する。人間が指示する特徴点を少なくするため、対象物体を剛体と仮定した3次元再構成方式を適用した。

対応点を前提とする適用した3次元再構成方式を表5. 1に示す。撮像モデルは一般的な中心射影モデルと正射影モデルを用いた。再構成の対象は任意の剛体を基本としたが、応用上重要な平面をも対象とした。実現したシステムでは3つの再構成方式を予めモード選択できるようにした。表5. 1における特徴点数と画像数は再構成のために最低限必要な数である。

表5. 1 適用した3次元再構成方式

Table 5.1 Applied 3-D reconstruction algorithms

撮像モデル	対象	必要特徴点数	必要画像数
正射影[5.6]	剛体	4	3
中心射影[5.4]	剛体	8	2
	平面	4	2

中心射影モデルによる再構成方式[5.3][5.4]は、最もよく研究されている。任意の剛体と平面を再構成する方式を適用した。任意の剛体を再構成する方式は最も汎用性が高い。平面を再構成する方式では多面体の再構成に適する。多面体の面毎に平面再構成方式を適用することにより、再構成した3次元形状モデルにおいて面ごとの平面性を保てる。特徴点指示の処理とも整合性が高い。どちらの再構成方式も必要数以上の特徴点がある場合は最小2乗法を用いて精度を高めた。

正射影モデルによる認識方式は物体を小さい画角で捉える場合に有効である。剛体を捉える特徴点が中心射影モデルの場合の8点に比べて4点と少なく済むのが利点であ

る。しかし、従来の再構成方式[5.5]は付加条件毎の解法であり、前提知識なしには適用できない。そこで、独自の統一的な線型解法である3章の3次元復元方式[5.6]を考案した。さらに、観測画像のみの情報から原理的な再構成可否を判定することの重要性を提起し、具体的な判定条件を明らかにした。本システムでは、この観測画像のみからの原理的な再構成可否判定と統一的な線型解法からなる独自の3章の3次元復元方式[5.6]を適用した。本方式を概略説明する。図5.3に3次元物体の正射影面による観測状況を示す。

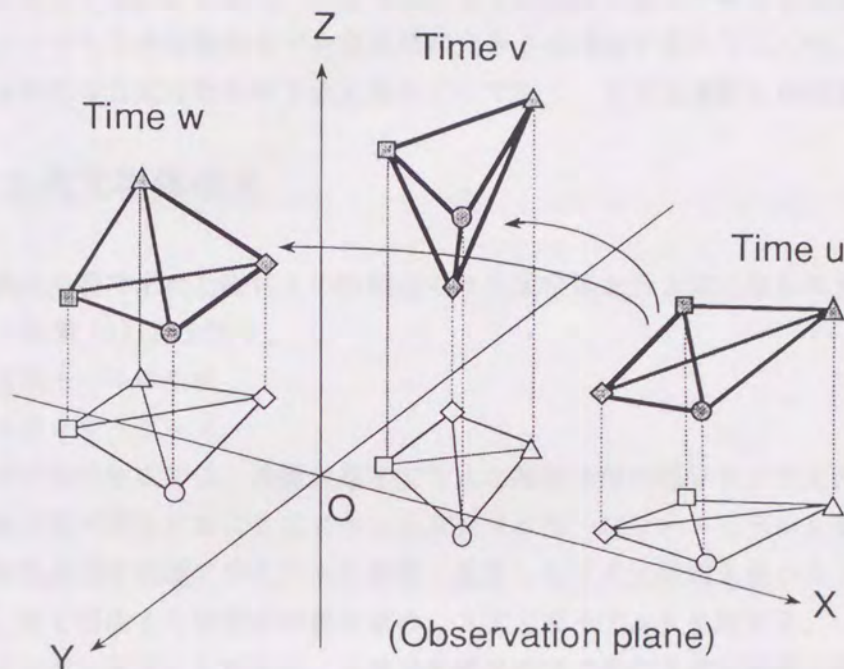


図5.3 3次元物体の正射影観測

Fig. 5.3 Orthographic observation of a 3-D object.

正射影面にX Y直交座標をとり、正射影面に垂直な座標軸をZ軸とする。u, v, wの3時点で物体上の4つの特徴点を観測する。正射影観測なので、物体の特徴点の1つを座標軸の原点に移動して、原点を中心として回転する物体の再構成問題に還元できる。u時点からv時点までの回転を3次行列 $R \equiv (r_{ij})$ 、u時点からw時点までの回転を行列 $S \equiv (s_{ij})$ で表す。原点以外の特徴点に番号 i ($i=1,2,3$)を付け、u, v, w時点における特徴点 i ($i=1,2,3$)のベクトルを u_i , v_i , w_i で表す。第2添字 j ($j=1,2,3$)を付けてX Y Z座標を u_{ij} 等と表す。再構成問題は方程式

$$v_i = R u_i, w_i = S u_i \quad (i=1,2,3) \quad (5.3)$$

から回転 R , S と特徴点のZ座標 u_{i3} , v_{i3} , w_{i3} ($i=1,2,3$)を求める問題に帰着できる。

再構成できる条件は下記の(1)(2)であることが従来理論[5.5]で示されている。

- (1) 4特徴点が同一平面上に無い。
- (2) 2画像間の物体の回転はZ軸の回りの回転や観測面内の軸の回りの180度回転で無い。

幾何条件(1)(2)は直観的に分かり易いが、観測できないので再構成できるかを判定できない。そこで、この条件を観測情報のみにより記述した判定条件が、3次元ベクトルAの1～2行からなるベクトルをA'と表記するとき、3つの行列

$$\begin{bmatrix} u_1' & u_2' & u_3' \\ v_1' & v_2' & v_3' \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ w_1' & w_2' & w_3' \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} w_1' & w_2' & w_3' \\ u_1' & u_2' & u_3' \end{bmatrix}$$

のランクが全て最大(=3)であることをまず明らかにした。この判定条件を基盤として、統一的な線型解法を構築した。

1台のビデオカメラで捉えた画像を入力するため物体の3次元形状は求まるが、絶対的な大きさは求まらない。しかし、CGでは大きさは自由に指定するのが通常であるため、本システムでも3次元物体モデル復元時に大きさを指定するようにした。また、適用した3次元再構成方式は物体の3次元形状だけでなく、3次元運動も再構成できる。

5. 5 3次元物体復元

3次元再構成処理で求めた物体上の特徴点の3次元位置から3次元物体モデルを復元する。下記の処理(1)(2)を行う。

- (1) 3次元面モデルの生成
- (2) テクスチャマッピング

3次元面モデルの生成では、特徴点指示で与えた特徴点間の線分を3次元再構成で得た3次元特徴点間の稜とすることにより、3次元ワイヤーフレームモデルをまず構成する。次に、特徴点指示処理で与えた入力画像に重畳した2次元線画を最小ループの多角形に分割し、面を構成する特徴点の組を求め、3次元面モデルを生成する。

平面再構成方式を適用する場合は、3次元再構成処理で先に2次元線画の多角形分割を行い、多角形毎に平面と仮定して適用する。この際、複数の再構成結果において、同じ特徴点の3次元座標が必ずしも一致しないが、各面が平面を保つように複数の再構成結果を統合する。具体的には、複数の再構成結果の座標点の平均値から最も近い、複数の再構成平面の共通部分における点とした。

3次元再構成方式の適用では、複数の入力画像の共通部分の3次元形状を再構成できるが、対象物体の全ての3次元形状を再構成できない隠れの問題が生ずることがある。この隠れの問題に対処するためには、3次元再構成方式を必要数を越える画像に対して適用するようにした。具体的には、必要数の画像毎の共通部分を再構成し、複数の再構成結果において重複した部分は平均化して、複数の再構成結果を統合した。

入力画像から3次元面モデルへのテクスチャマッピングは、2次元線画から分割した各多角形内の入力画像毎に行う。各多角形を3角形に分割し、3角形内の入力画像を3次元面モデル上の対応する3角形にテクスチャマッピングする。

複数の入力画像があるため、使用するテクスチャは一意には定まらない。テクスチャの決定方法として下記の(1)、(2)の2つの方法を考案し選択できるようにした。

(1) 3次元物体モデルの表示角度の入力画像の表示角度による補間値により、入力画像のテクスチャを補間してマッピングする。

(2) 3次元物体モデルの表示角度に最も近い入力画像のテクスチャをマッピングする。

方法(1)は3次元物体モデルを動かして連続表示する場合にテクスチャの変化が滑ら

かである利点がある。ただし、入力画像のテクスチャが細かい場合は、補間結果のテクスチャが量子化誤差によりぼけることがある。このような場合、方法(2)によるテクスチャはより鮮明であることがある。方法(1)は動的表示に適する傾向があるのに対し、方法(2)は静的表示に適する傾向がある。

5. 6 実験

本システムをワークステーションSファミリーS-4/2を用いて試作し実験した。画像入力のために、ワークステーションにビデオカメラと画像フレームメモリを接続した。残りの処理は全てソフトウェアで実現した。

本システムの実験例を図5.4～図5.8に示す。図5.4～図5.7は3次元物体の復元例である。図5.8は特徴点の自動補正例である。

図5.4～図5.7は、ユーザが指示した特徴点と稜からなる線画を重畳表示した入力画像と、復元した3次元物体モデルを入力画像とは異なる角度から表示した図からなる。3次元物体モデルの観測方向は、入力画像の観測方向の線形内挿または線形外挿とした。どの画像の解像度も横512画素、縦400画素である。入力画像上に表示した数字は特徴点を同定する番号である。初期入力では指示した特徴点の順に1から数を増加させて特徴点番号を付けている。入力画像毎に対応する特徴点を同じ順番で指示するが、自然なインタフェースであると考えた。

図5.4～図5.6は入力画像の共通部分に3次元再構成方式を適用した例である。図5.7は、2枚の入力画像の共通部分毎に3次元再構成方式を適用し、複数の3次元再構成結果を統合した例である。

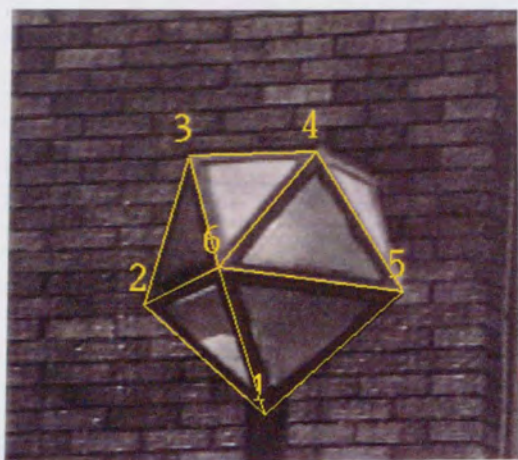
図5.4は、独自の正射影3次元再構成方式による3次元物体復元例である。復元対象は街灯であり、全体で6特徴点しか指示できず、面ごとに3特徴点しか指示できないので、正射影方式のみ適用できる。

図5.5は、中心射影平面3次元再構成方式による3次元物体復元例である。計算機のハードディスクが復元対象であり、各面毎に4特徴点を指示して平面3次元再構成方式を適用し、3次元物体モデルで面の平面性を保った。

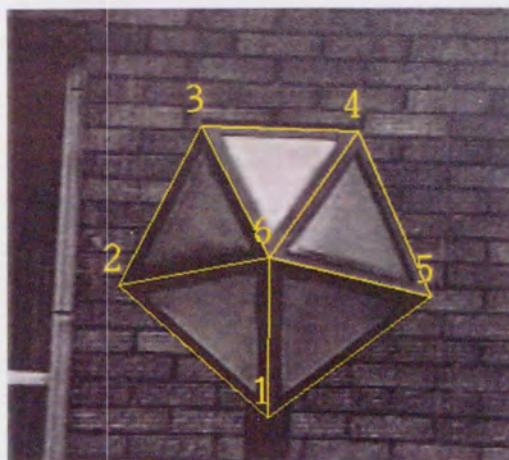
図5.6は、中心射影3次元再構成方式による3次元物体復元例である。復元対象は電話機であり、特徴点の必要数8を越える13個の特徴点を指示し最小2乗法を適用して精度を高めた。

図5.7は、複数の中心射影3次元再構成結果の統合による3次元物体復元例である。復元対象は建築物である。入力画像(a), (b)の共通部分である特徴点18, 17, 1, 10, 2, 12, 16, 3, 4, 5, 22, 21, 20, 19で囲む部分の3次元再構成結果と、入力画像(b), (c)の共通部分である特徴点1, 10, 2, 9, 6, 14, 13, 7, 8, 3, 4, 5, 11, 15で囲む部分の3次元再構成結果を統合し、3次元物体モデルを復元した。

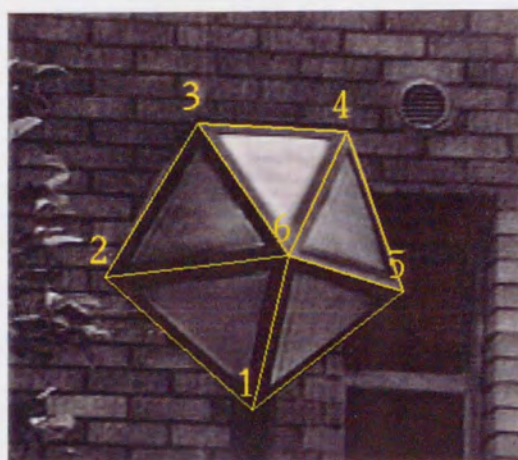
図5.8は、画像認識による特徴点の自動位置補正例である。補正後の画像(b)は図5.7の入力画像(c)と同一である。補正前の画像(a)の特徴点10の位置を図5.7の入力画像(b)を基準として自動位置補正した例である。特徴点10が自動補正により建築物の縁に正しく位置した。



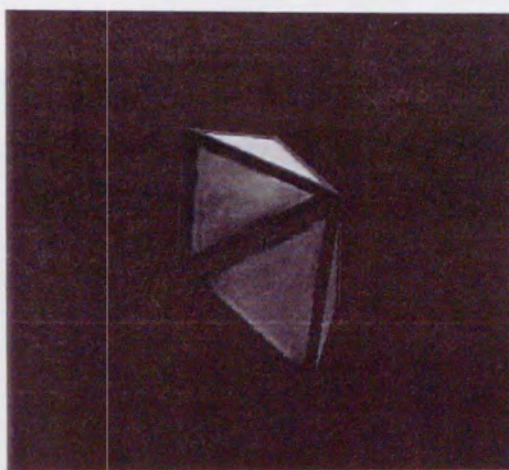
(a) Input image 1



(b) Input image 2



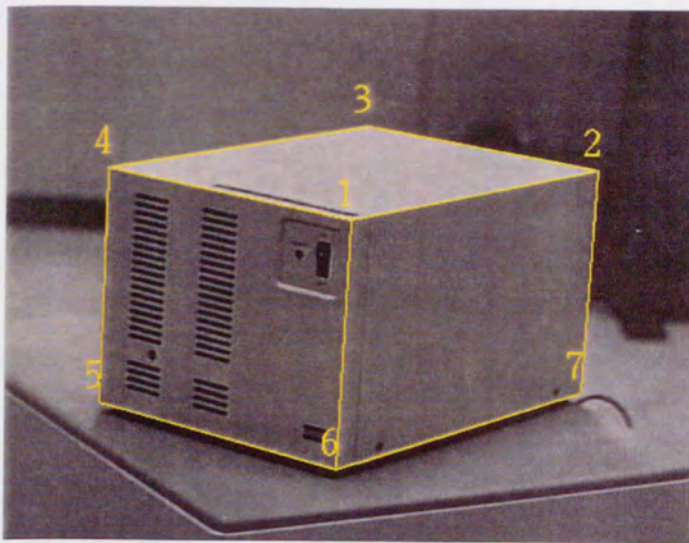
(c) Input image 3



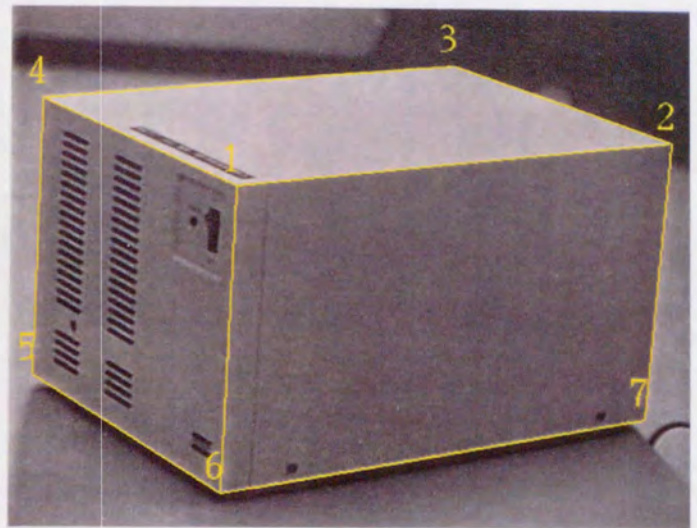
(d) Generated 3-D model

図 5. 4 正射影 3 次元再構成を適用した 3 次元物体復元例

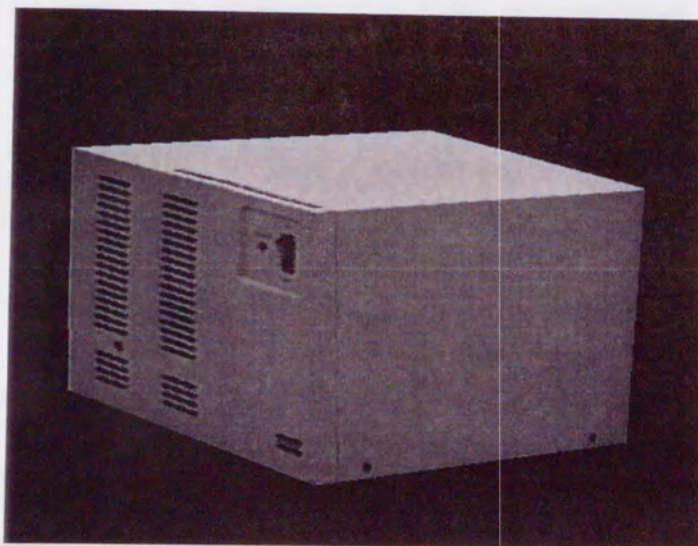
Fig. 5.4 An example of 3-D object recovery by applying the orthographic 3-D reconstruction.



(a) Input image 1



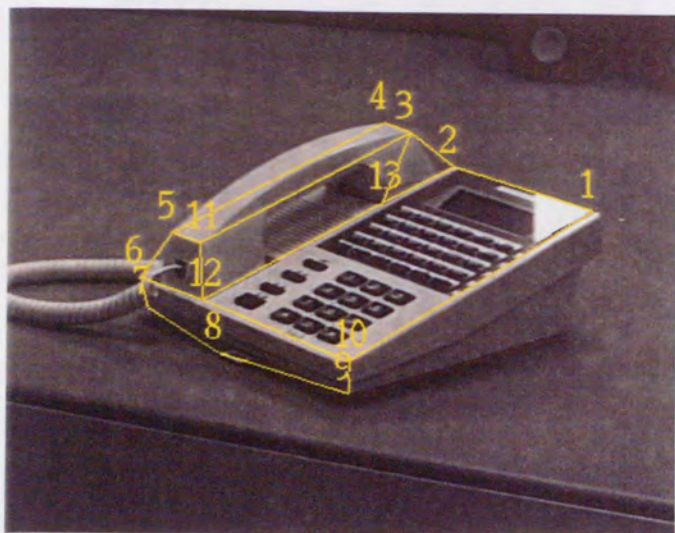
(b) Input image 2



(c) Generated 3-D model

図 5. 5 中心射影平面 3 次元再構成を適用した 3 次元物体復元例

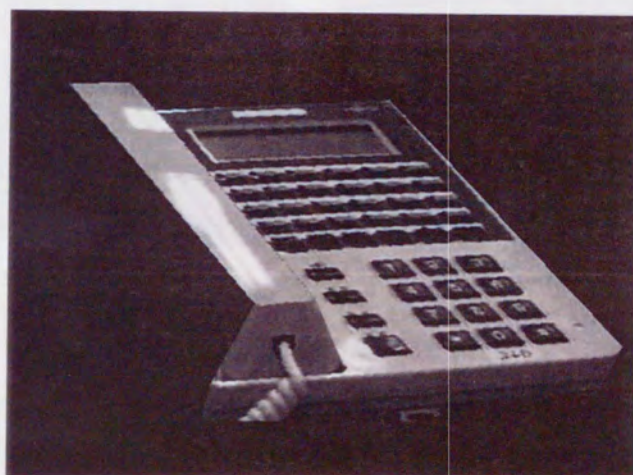
Fig. 5.5 An example of 3-D object recovery by applying the perspective plane reconstruction.



(a) Input image 1



(b) Input image 2



(c) Generated 3-D model

図 5. 6 中心射影 3 次元再構成を適用した 3 次元物体復元例

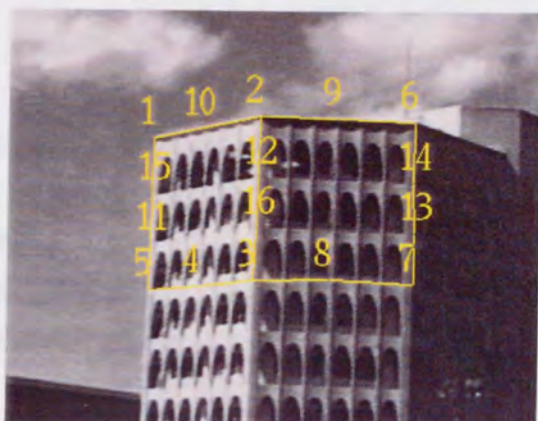
Fig. 5.6 An example of 3-D object recovery by applying the perspective 3-D reconstruction.



(a) Input image 1



(b) Input image 2



(c) Input image 3



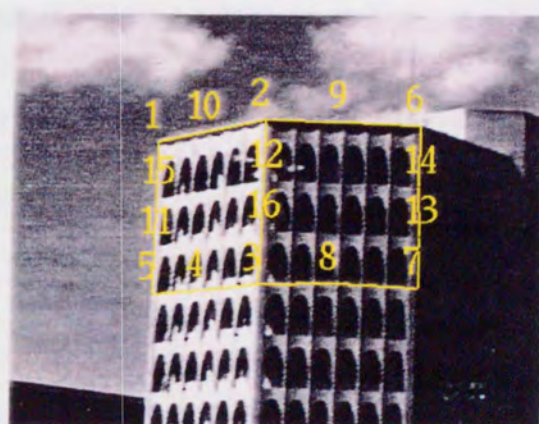
(d) Generated 3-D model

図 5. 7 複数の中心射影 3 次元再構成の統合による 3 次元物体復元例

Fig. 5.7 An example of 3-D object recovery by integrating multiple perspective reconstructed 3-D structures.



(a) Before revision



(b) After revision

図 5. 8 画像認識による特徴点の自動位置補正例 (特徴点10を補正)

Fig. 5.8 An example of automatic position revision of feature points by image recognition (position revision of feature point 10).

5. 7 むすび

3次元復元方式を応用した、対話型計算機環境を用いてビデオ画像入力から3次元物体を簡易に復元できるシステムを考案し開発した。本システムの特長は、任意の環境において捉えた2次元物体画像に対して、人間が特徴点を指示するだけで、画像理解技術を応用することにより、3次元物体モデルを復元できることである。

CVシステムでは暗黙の了解であった画像特徴の自動抽出を、本システムでは人間による特徴点指示に置き換えることにより、従来は不可能であった任意環境で捉えた実画像からの3次元物体の復元を可能にした。本システムにより3次元物体の復元ができる条件は、人間が画像上で特徴点を指示できることであり、画像撮像時の照明条件には特に関わらない。

まず、1台のビデオカメラで捉えた物体画像に対して、人間が特徴点の位置を指示する。本システムは、特徴点の位置を2次元画像認識技術により自動補正し、特徴点位置に3次元再構成方式を適用することにより3次元形状を再構成し、3次元形状に入力画像のテクスチャをマッピングして3次元物体モデルを復元する。3次元再構成では、再構成可否判定ができる3章の3次元復元方式[5.6]を応用すると共に、複数の3次元再構成の結果を統合することにより隠れの問題に対処した。

復元した3次元物体モデルにより、入力画像とは異なる角度からの表示ができるうえに、3次元CGの部品として活用し3次元CGの写実感を大きくできる。物体の動きも復元できる効果もある。2次元画像に3次元情報を付加できるので、マルチメディアにおける画像メディアの応用範囲を拡大できる。

本提案は、本稿の実現範囲に限るものではなく、他の様々な画像特徴や3次元再構成方式を適用することができる。例えば、ステレオ視による3次元再構成方式を適用できる。

さらに、完全自動であるCVシステム(図5.1)を迅速に開発できる効果もある。様々な画像特徴の自動抽出を模擬しつつ、3次元再構成方式を適用することで、自動抽出すべき画像特徴を迅速に明らかにできる。

今後の課題は、本提案の様々な応用システムにおける実用化技術を追求することである。

第6章 結論

剛体である物体の特徴点の2次元画像上での少ない対応点情報を用いた、産業分野に適用しやすい3次元復元の方式とシステムを研究し構築した。

3次元復元の研究において、2次元画像上で物体の特徴点を求める研究を行うと共に、対応点情報から物体の運動と形状を3次元復元する研究を行った。

2次元画像上で物体の特徴点を求める研究では、特徴点を特徴線の交点として求めることができるため、特徴線の抽出処理の高速化方式を研究した。具体的には、物体画像内に1本の特徴線のみ存在する画像処理の対象領域を設ける、という前提条件を用いて、高速Hough変換方式を考案した。

この高速Hough変換の適用システムとして、カラー動画像処理プロセッサとファジー推論をも使用した視覚制御システムを開発し、屋外における無人走行実験で高速Hough変換の有効性を実証できた。具体的には、画像入力からハンドル出力まで平均100msの高速処理と、対象物体列に沿って5cmの誤差内での追従が確認できた。

この実験により、動画像処理プロセッサと高速Hough変換とファジー推論の3つの技術の組み合わせが有効であることも確認できた。本視覚制御システムは、一般の知能ロボットのビジョンシステムとしての応用など、広汎な産業応用に適用可能である意義がある。

対応点情報から物体の運動と形状を3次元復元する研究では、より少ない4特徴点の対応点情報により3次元復元できる正射影の撮像モデルを用いた3次元復元方式と、より汎用な中心射影の撮像モデルを用いた3次元復元方式を研究した。

正射影の撮像モデルを用いた3次元復元方式の研究では、従来より解の存在が示されている4特徴点の3時点間の対応のもとで新復元方式を考案した。この新復元方式は、従来方式と比較して、下記1)2)の2点で優位性がある。

- 1) 原理的に3次元復元可能であることを、観測情報のみにより判定できる。
- 2) 原理的に復元可能な場合は付加情報なしで統一的に復元できる。

本方式によれば、行列のランク計算により復元可能性を判定した後、逆行列計算などの線型演算により統一的かつ高速に復元解を求めることができる。低速なCPU(i80386, 25MHZ)でも平均復元時間が5ミリ秒未満と実時間処理できることを確認すると共に、実画像を入力した3次元復元実験により、有効性を確認した。本復元方式は、正射影対応点による移動物体復元の線型復元理論における従来の問題を解決して、理論面でひと区切りをつけた意義がある。

中心射影の撮像モデルを用いた3次元復元方式の研究では、2画像間のTVカメラの運動条件を用いて、従来の汎用方式に比べて少ない対応点を用いて3次元復元できる新復元方式を明らかにした。TVカメラの運動条件としては、回転成分は座標軸回りの回転の合成、平行移動成分は座標軸で張る空間内、という代表的な計153条件を対象とし、まず、座標変換による同一視により17の運動条件に帰着できることを明らかにした。次いで、TVカメラの運動パラメータから合成される9未知変数を最少個数の別変数に線型展開する共通原理に基づき、17運動条件のうち13条件において、従来方式

よりも少ない対応点で復元できる線型復元解法、および最小2乗法により条件式の誤差を吸収する最小2乗解法を明らかにした。

2画像間のTVカメラの運動条件をより単純な条件に帰着した後、基本行列の要素を最少の新変数に展開する提案方式の3次元復元原理は、本論文で扱う運動条件に限らず、適用できる意義がある。

さらに、3次元復元方式を応用した、対話型計算機環境を用いてビデオ画像入力から3次元物体を簡易に復元できるシステムを考案し開発した。本システムの特長は、任意の環境において捉えた2次元物体画像に対して、人間が特徴点を指示するだけで、画像理解技術を応用することにより、3次元物体モデルを復元できることである。CVシステムでは暗黙の了解であった画像特徴の自動抽出を、本システムでは人間による特徴点指示に置き換えることにより、従来は不可能であった任意環境で捉えた実画像からの3次元物体の復元を可能にした。3次元再構成では、再構成可否判定ができる3章の3次元復元方式を応用すると共に、複数の3次元再構成の結果を統合することにより隠れの問題に対処した。

復元した3次元物体モデルにより、入力画像とは異なる角度からの表示ができるうえに、物体の動きも含めて3次元CGの部品として活用し3次元CGの写実感を増すことができる。2次元画像に3次元情報を付加できるので、マルチメディアにおける画像メディアの応用範囲を拡大できる意義がある。

今後の課題は、本論文の方式を様々な応用システムに適用し、評価と改良を行うことである。

謝 辞

本論文をまとめるにあたって、大阪大学の白井良明教授には、終始、懇切なる御指導をいただき、的確なる御教授と御助言を数多くいただきました。大阪大学の北橋忠弘教授、浅田稔教授には、有益なる査読をしていただき、多くの御教授と御助言をいただきました。ここに心から深く感謝申し上げます。

また、本研究は（株）富士通研究所において、多数の方々の御支援と御協力のもとに行ったものです。

本研究論文をまとめるにあたって、御支援をいただきました、日頃御指導をいただく林弘取締役、秋元晴雄主管研究員、山本栄一郎部長に感謝いたします。

研究の機会を与えていただき、研究の推進に御支援をいただいた棚橋純一常務取締役（当時；情報処理研究部門長）、東京工科大学の上原貴夫教授（当時；情報処理研究部門長）、富士通（株）の吉田真澄主席部長（当時；パターン研究部長、パターン処理研究部長）、富士通ゼネラル（株）の岩田清部長（当時；パターン処理研究部長代理、中京サテライトラボ担当部長）に感謝いたします。

研究の討論や実験に協力をいただきました横浜国立大学の後藤敏行教授（当時；富士通研究所の研究員）、塩原守人殿、HAO Yingli殿、久保田孝殿、柳下秀樹殿に感謝いたします。

参考文献

[第1章 序論]

- [1.1] 白井良明：“コンピュータビジョン”，昭晃堂（1980）。
- [1.2] 森川博之，原島博：“動画像からの剛体・非剛体3次元構造の逐次的推定—運動の滑らかさに基づくアプローチ”，電子情報通信学会論文誌（D-II），J74-D-II，8，pp.1032-1042（1991）。
- [1.3] 金谷健一：“画像理解—3次元認識の数理—”，森北出版株式会社（1990）。
- [1.4] Ullman S.：“The Interpretations of Visual Motion”，MIT Press, Cambridge, MA（1979）。
- [1.5] Longuet-Higgins H.C.：“A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections”，Nature, 293, 10, pp.133-135（1981）。
- [1.6] Longuet-Higgins H.C.：“The reconstruction of a scene from two projections—Configurations that defeat the 8-point algorithm”，Proceedings of the 1st IEEE Conference on Artificial Intelligence Applications, Denver, CO, pp.395-397（1984）。
- [1.7] 浅田稔，谷内田正彦，辻三郎：“2次元画像列からの物体の3次元パラメータの復元”，電子通信学会論文誌，J65-D,4，pp.490-491（1982）。
- [1.8] Zhuang X., Huang T.S. and Haralick R.M.：“A Simple Procedure to Solve Motion and Structure from Three Orthographic Views”，IEEE Journal of Robotics and Automation, 4, pp.236-239（1988）。
- [1.9] Huang T.S. and Lee C.H.：“Motion and Structure from Orthographic Projections”，IEEE Trans. PAMI-11, pp.536-540（1989）。
- [1.10] Ullman S.：“The Interpretations of Visual Motion”，MIT Press, Cambridge, MA（1979）。
- [1.11] Longuet-Higgins H.C.：“A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections”，Nature, Vol.293, No.10, pp.133-135（1981）。
- [1.12] Tsai R.Y. and Huang T.S.：“Uniqueness and estimation of three-dimensional motion parameters of rigid objects with curved surfaces”，IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.6, pp.13-27（1984）。
- [1.13] Zhuang X., Huang T.S. and Haralick R.M.：“Two-view motion analysis: A unified algorithm”，Journal of Optical Society of America, Vol.A-3, pp.1492-1500（1986）。
- [1.14] Weng J., Huang T.S. and Ahuja N.：“Motion and structure from two perspective views: Algorithms, error analysis, and error estimation”，IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, pp.451-476（1989）。

- [1.15] 金谷健一：“画像理解－3次元認識の数理－”，森北出版株式会社（1990）。
- [1.16] 鎌田洋，後藤敏行，吉田真澄：“画像処理とファジー推論による視覚制御システム”，電子情報通信学会論文誌（D-II），J73-D-II，12，pp.1967-1975（1990）。
- [1.17] Kamada H. and Yoshida M.：“A Visual Control System Using Image Processing and Fuzzy Theory”，Springer-Verlag New York, Inc., “Vision-based Vehicle Guidance”，Chapter 4, pp.111-128（1992）。
- [1.18] 鎌田洋，塩原守人，HAO Yingli：“3次元移動物体の運動と形状の同時復元方式”，電子情報通信学会論文誌（D-II），J76-D-II，8，pp.1554-1561（1993）。
- [1.19] Kamada H., Yanagishita H. and Shiohara M.：“Recognizing Moving Objects from Orthographic Views”，Proceedings of 11th ICPR (IAPR International Conference on Pattern Recognition), Vol.I, pp.121-124（1992）。
- [1.20] 鎌田洋：“運動条件を利用した剛体の3次元復元方式”，電子情報通信学会論文誌（D-II），J80-D-II，6，pp.1450-1457（1997）。
- [1.21] 鎌田洋：“ビデオ画像入力からの対話型3次元物体復元システム”，画像電子学会誌，第26巻，第6号，pp.701-707（1997）。

[第2章 高速Hough変換による物体画像の特徴抽出と特徴配列に基づく移動車の走行]

- [2.1] T.Kanade, et al.：“3-D vision for an autonomous vehicle”，Proc. of International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence（1987）。
- [2.2] E. D. Dickmanns：“Subject-object discrimination in 4D-dynamic scene interpretation for machine vision”，Proc. of Workshop on VISUAL MOTION, IEEE（1989）。
- [2.3] 吉田真澄，後藤敏行，佐々木繁：“カラー動画画像処理システム：FIVIS/VIP”，FUJITSU 39, 4, pp.206-213（1988）。
- [2.4] 後藤敏行，太田善之，吉田真澄，白井良明：“連結領域の高速ラベル付けアルゴリズム”，信学論（D-II），J72-D-II，2，pp.247-255（1989）。
- [2.5] 廣田薫：“ファジィ制御の現状と展望”，計測と制御，27, 5（1988）。
- [2.6] L.A.Zadeh：“Fuzzy Sets”，Information & control, 8, pp.338-358（1965）。
- [2.7] 伊藤正美：“自動制御”，丸善（1981）。
- [2.8] 菅野道夫：“ファジィ制御”，日刊工業新聞社（1988）。
- [2.9] 金谷健一：“画像理解－3次元認識の数理－”，森北出版株式会社（1990）。

[第3章 正射影撮像モデルを用いた物体の運動と形状の3次元復元方式]

- [3.1] 鎌田洋，後藤敏行，吉田真澄：“画像処理とファジー推論による視覚制御システム”，電子情報通信学会論文誌（D-II），J73-D-II，12，pp.1967-1975（1990）。
- [3.2] 森川博之，原島博：“動画画像からの剛体・非剛体3次元構造の逐次的推定－運動の滑らかさに基づくアプローチ”，電子情報通信学会論文誌（D-II），J74-D-

II, 8, pp.1032-1042 (1991).

- [3.3] 金谷健一：“画像理解－3次元認識の数理－”，森北出版株式会社（1990）。
- [3.4] Ullman S.：“The Interpretations of Visual Motion”，MIT Press, Cambridge, MA (1979)。
- [3.5] Longuet-Higgins H.C.：“A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections”，Nature, 293, 10, pp.133-135 (1981)。
- [3.6] Longuet-Higgins H.C.：“The reconstruction of a scene from two projections－Configurations that defeat the 8-point algorithm”，Proceedings of the 1st IEEE Conference on Artificial Intelligence Applications, Denver, CO, pp.395-397 (1984)。
- [3.7] 浅田稔，谷内田正彦，辻三郎：“三面世界で動く物体の線画の解釈”，電子通信学会論文誌，J65-D, 5, pp.606-613 (1982)。
- [3.8] 浅田稔，谷内田正彦，辻三郎：“2次元画像列からの物体の3次元パラメータの復元”，電子通信学会論文誌，J65-D, 4, pp.490-491 (1982)。
- [3.9] Zhuang X., Huang T.S. and Haralick R.M.：“A Simple Procedure to Solve Motion and Structure from Three Orthographic Views”，IEEE Journal of Robotics and Automation, 4, pp.236-239 (1988)。
- [3.10] Huang T.S. and Lee C.H.：“Motion and Structure from Orthographic Projections”，IEEE Trans. PAMI-11, pp.536-540 (1989)。
- [3.11] 有馬哲：“線型代数入門”，東京図書株式会社（1974）。
- [3.12] Tomasi C. and Kanade T.：“Shape and motion from image streams：a factorization method”，Technical Report CMU-CS-91-172, CMU (1991)。

[第4章 中心射影撮像モデルを用いた物体の運動と形状の3次元復元方式]

- [4.1] 白井良明：“コンピュータビジョン”，昭晃堂（1980）。
- [4.2] Ullman S.：“The Interpretations of Visual Motion”，MIT Press, Cambridge, MA (1979)。
- [4.3] Longuet-Higgins H.C.：“A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections”，Nature, Vol.293, No.10, pp.133-135 (1981)。
- [4.4] Tsai R.Y. and Huang T.S.：“Uniqueness and estimation of three-dimensional motion parameters of rigid objects with curved surfaces”，IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.6, pp.13-27 (1984)。
- [4.5] Zhuang X., Huang T.S. and Haralick R.M.：“Two-view motion analysis：A unified algorithm”，Journal of Optical Society of America, Vol.A-3, pp.1492-1500 (1986)。
- [4.6] Weng J., Huang T.S. and Ahuja N.：“Motion and structure from two perspective views：Algorithms, error analysis, and error estimation”，IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11,

pp.451-476 (1989).

[4.7] 金谷健一：“画像理解－3次元認識の数理－”，森北出版株式会社 (1990).

[4.8] 有馬哲：“線型代数入門”，東京図書株式会社 (1974).

[第5章 ビデオ画像入力からの対話型物体3次元復元システム]

[5.1] 秋葉澄伸，山本強，青木由直：“コンピュータグラフィックスによる景観シミュレーション”，情報処理学会グラフィックスとCAD研究会報告，29-9 (1987).

[5.2] Ullman S.：“The Interpretations of Visual Motion”，MIT Press, Cambridge, MA (1979).

[5.3] Longuet-Higgins H.C.：“A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections”，Nature, 293, 10, pp.133-135 (1981).

[5.4] 金谷健一：“画像理解－3次元認識の数理－”，森北出版株式会社 (1990).

[5.5] Huang T.S. and Lee C.H.：“Motion and Structure from Orthographic Projections”，IEEE Trans.PAMI-11, pp.536-540 (1989).

[5.6] 鎌田洋，塩原守人，Hao Y.：“3次元移動物体の運動と形状の同時復元方式”，電子情報通信学会論文誌 (D-II)，J76-D-II，8，pp.1554-1561 (1993).

[5.7] 金出武雄，Poelman C.J.，森田俊彦：“因子分解法による物体形状とカメラ運動の復元”，電子情報通信学会論文誌 (D-II)，J76-D-II，8，pp.1497-1505 (1993).

[5.8] 上田博唯，宮武孝文，炭野重雄，長坂晃朗：“動画画像解析に基づくビデオ構造の視覚化とその応用”，電子情報通信学会論文誌 (D-II)，J76-D-II，8，pp.1572-1580 (1993).

[5.9] 曾山豊，岡本敬，鳥脇純一郎：“動画画像合成による景観シミュレーション”，情報処理学会グラフィックスとCAD研究会報告，53-3 (1991).

[5.10] 明尾誠，橋本博，小林泰介，澁澤哲雄：“アイデアスケッチからの3次元形状自動復元システム”，第9回NICOGRAPH 論文集，pp.55-65 (1993).

付録

付録A. 第3章における定理3.3の証明

I. 準備; 条件④を満たす p (1または2) を1つ選ぶ。式 (3.1) から得られる式

$$\begin{bmatrix} R' \\ S_p \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ -w_{1p} & -w_{2p} & -w_{3p} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.2)$$

の両辺を $A \equiv (a_{ij})$ とおく。行列 A の第1～2行からなる部分行列

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \text{ は式 (3.2) の一部である式 (3.2)' で計算できる。}$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1' & u_2' & u_3' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ -w_{1p} & -w_{2p} & -w_{3p} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.2)'$$

$$\text{定義からの式} \quad \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ S_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

と回転行列の行が正規直交系を成す性質から、 R' だけの線形方程式 (A.2) (A.3) (A.4) を得る。ただし記号は式 (A.5) のように定義した。

$$(a_{i1} \quad a_{i2}) \begin{bmatrix} r_{1i} \\ r_{2i} \end{bmatrix} = \alpha_i \quad (i=1,2) \quad (A.2)$$

$$(\beta_1 \quad \beta_2) \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \gamma \quad (A.3)$$

$$(\gamma_1 \quad \gamma_2) \begin{bmatrix} r_{i1} \\ r_{i2} \end{bmatrix} = \beta_i \quad (A.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i &\equiv (1 + a_{i1}^2 + a_{i2}^2 - a_{i3}^2) / 2 \\ \beta &\equiv (a_{11}a_{23} - a_{21}a_{13}, \quad a_{12}a_{23} - a_{22}a_{13}) \\ \gamma &\equiv (a_{23}, \quad -a_{13}, \quad 0) \end{aligned} \right] \quad (A.5)$$

式 (A.2), (A.3), (A.4) が成立することを以下に示す。式 (A.1) を ij 成分 ($i=1,2$; $j=1,2,3$) について記すと、式

$$\sum_{k=1}^2 a_{ik} r_{kj} + a_{i3} s_{pj} = \delta_{ij} \quad (A.6)$$

となる。式 (A.6) を変形すると式

$$a_{i3} s_{pj} = \delta_{ij} - a_{i1} r_{1j} - a_{i2} r_{2j} \quad (A.7)$$

となる。式 (A.7) の両辺を2乗し j について加算すると

$$a_{i3}^2 = 1 + \sum_{k=1}^2 a_{ik}^2 - 2 \sum_{k=1}^2 a_{ik} r_{ki}$$

となる。この式を変形すると式 (A.2) を得る。式 (A.6) において $i=1, 2$ とおいた2式から s_{pj} を消去すると式 (A.3) を得る。式 (A.3) を変形した式

$$\beta_h r_{hj} = \gamma_j - \beta_i r_{ij} \quad (i, h=1,2; i \neq h; j=1,2,3)$$

を $\sum_{j=1}^3 r_{ij} r_{hj} = 0$ に代入すると式 (A.4) を得る。また $a_{h3} \neq 0$ となる $h (=1,2)$ があ

ることを示す。もしも $a_{i3}=0$ ($i=1,2$) とすると、定義式

$$\begin{bmatrix} R' \\ s_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = I \text{ (単位行列) の 3 列目は, } \begin{bmatrix} r_{13} \\ r_{23} \\ s_{p3} \end{bmatrix} a_{33} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ である。}$$

$a_{33} \neq 0$ だから $r_{13}=r_{23}=0$ なので、 $R = \begin{bmatrix} U & & \\ & \pm 1 & \\ & & \end{bmatrix}$ となり、条件①に反する。

Ⅱ. 回転 R の計算； 式 (A.2) と (A.3) の 1, 2 列目から、

$$\begin{bmatrix} a_i' \\ \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1i} \\ r_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \gamma_i \end{bmatrix} \quad (i=1,2) \quad (A.8)$$

$$\begin{vmatrix} a_i' \\ \beta \end{vmatrix} = -a_{i3} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \quad \text{であり、条件④より右辺の第 2 項は 0 でないから、}$$

式 (A.8) より $a_{i3} \neq 0$ のとき $\begin{bmatrix} r_{1i} \\ r_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_i' \\ \beta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \gamma_i \end{bmatrix}$ である。

$$a_{i3}=0 \text{ のときは、式 (A.4) を展開すると } \begin{cases} a_{23}r_{11} - a_{13}r_{12} = \beta_1 \\ a_{23}r_{21} - a_{13}r_{22} = \beta_2 \end{cases} \text{ だから}$$

$$\begin{bmatrix} r_{1i} \\ r_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} / \gamma_i \quad (i=1,2) \text{ である。 } \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \text{ が求まった。}$$

回転行列の行ベクトルの長さは 1 なので、 $r_{13} = \pm (1 - r_{11}^2 - r_{12}^2)^{1/2}$ が求まる。式 (A.3) の 3 列目は式 $\beta_1 r_{13} + \beta_2 r_{23} = 0$ であり、

$$\beta_2 = \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} \text{ だから、行列 } (a_{ij}) \text{ の定義と行列の逆転公式より、} r_{13} \neq 0 \text{ と}$$

$\beta_2 \neq 0$ は同値である。従って、 r_{23} は次のように求められる。

$$\begin{cases} r_{13} \neq 0 \text{ のとき, } r_{23} = -\beta_1 r_{13} / \beta_2 \\ r_{13} = 0 \text{ のとき, } r_{23} = \pm (1 - r_{21}^2 - r_{22}^2)^{1/2} \end{cases}$$

行列 R の残りの成分である r_{3i} ($i=1,2,3$) は補題 3. 1 により、下式で求まる。

$$r_{3i} = (-1)^{i+1} |R_{3i}|$$

Ⅲ. 回転 S の計算； 式 (A.7) において i を h に、 j を i と置き換えると、次式により行ベクトル s_p が求まる。

$$s_{pi} = (\delta_{hi} - a_{h1}r_{1i} - a_{h2}r_{2i}) / a_{h3} \quad (i=1,2,3) \quad (A.9)$$

a_3 は式 $\begin{bmatrix} R' \\ s_p \end{bmatrix}^{-1}$ の 3 行目として求まる。式 (3.2) を変形した式

$$u_{i3} = a_3 \begin{bmatrix} v_i' \\ w_{ip} \end{bmatrix} \text{ により } u_i \text{ の } Z \text{ 座標である } u_{i3} (i=1,2,3) \text{ が求まる。}$$

$$\text{式 (3.1) を変形した } \begin{bmatrix} R' \\ S' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ w_1' & w_2' & w_3' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix}^{-1} \text{ から行ベクトル}$$

$$s_q \quad (q \neq p; q=1,2) \text{ は式 } s_q = \begin{bmatrix} w_{1q} & w_{2q} & w_{3q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix}^{-1} \text{ で求まる。}$$

回転行列 S の残りの成分である s_{3i} ($i=1,2,3$) は補題 3. 1 により、式

$$s_{3i} = (-1)^{i+1} |S_{3i}| \text{ により求まる。}$$

Ⅳ. 特徴点の Z 座標の計算； v_{i3}, w_{i3} ($i=1,2,3$) は、式 (3.1) の一部である式

$$v_{i3} = r_3 u_i, \quad w_{i3} = s_3 u_i \text{ により求まる。}$$

付録B 第4章の提案方式を用いた個別運動条件における3次元復元の計算例

提案方式による個別の運動条件における3次元復元の計算例を示す。代表的に、表4.5において必要な対応点の数を減らせた13条件のうち、最初の2条件である(R1, h6)および(R2, h3)について、提案した線型復元解法および最小2乗復元解法による3次元復元の計算を示す。

B. 1 運動条件(R1, h6)における3次元復元計算

hは既知であるから、Rとr, r'の計算を示す。

B. 1. 1 線型復元解法

Gの計算；表4.4に示したように、Gの成分を線型展開する最少個数の元 $\{g_i\}$ は $\{g_{21}, g_{22}, g_{23}, g_{31}, g_{32}, g_{33}\}$ である。式(4.8)における係数行列Aは下式で与えられる。

$$A = \begin{bmatrix} I_6 \\ 0_{36} \end{bmatrix} \quad (B.1)$$

ただし、 I_i を*i*次元単位行列、 0_{ij} を*i*行*j*列の零行列と定義した。従って、式(4.7)における $\{\underline{m}_i\}$ は下式で計算できる。

$$\begin{bmatrix} \underline{m}_1 \\ \underline{m}_2 \\ \underline{m}_3 \\ \underline{m}_4 \\ \underline{m}_5 \\ \underline{m}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{M}_1 \\ \underline{M}_2 \\ \underline{M}_3 \\ \underline{M}_4 \\ \underline{M}_5 \\ \underline{M}_6 \end{bmatrix}$$

5組の対応点から得られる $\{\underline{m}_i\}$ を式(4.7)に代入して $\{g_i\}$ に関する方程式を得る。連立方程式(4.7)を解いて $\{g_i\}$ を得る。 $\{g_i\}$ を式(4.8)に代入して、Gを得る。

Rの計算；下式の関係により、Rの第2, 3行の要素の値が求まる。

$$G = \begin{bmatrix} 0_{13} \\ -r_{31} - r_{32} - r_{33} \\ r_{21} \quad r_{22} \quad r_{23} \end{bmatrix}$$

Rの第1行の要素の値は下式から求まる。

$$r_{1i} = (-1)^{1+i} |R_{1i}| \quad (i=1, 2, 3)$$

ただし、 R_{ij} は、行列Rから*i*行と*j*行を除いた部分行列である。

r, r'の計算；式(4.4)にhの値を代入して得られる下式でr, r'の値が求まる。

$$\begin{cases} r = \frac{m_1 - (m, Rm')(Rm')_1}{1 - (m, Rm')^2} \\ r' = \frac{(m, Rm')m_1 - (Rm')_1}{1 - (m, Rm')^2} \end{cases} \quad (B.2)$$

B. 1. 2 最小2乗復元解法

Gの計算；式(B.1)を式(4.18)に代入すると、 $\underline{m}_{ij} = \underline{M}_{ij}$ ($i, j=1, \dots, 6$)となり、下式のように6次正方行列 $\underline{m}$ が求まる。

$$\underline{m} = \begin{bmatrix} \underline{M}_{11} & \dots & \underline{M}_{16} \\ \vdots & & \vdots \\ \underline{M}_{61} & \dots & \underline{M}_{66} \end{bmatrix}$$

上記の $\underline{m}$ を用いて、式(4.19) (4.17)からGが求まる。

Rの計算；Kは定義式 $G \times h$ にhを代入した下式により求まる。

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \\ -g_{21} & -g_{22} & -g_{23} \end{bmatrix}$$

RはKを極分解した直交成分行列として求まる。

r, r'の計算；式(B.2)によって、r, r'が求まる。

B. 2. 運動条件(R2, h3)における3次元復元計算

(R, h)とr, r'の計算を示す。

B. 2. 1 線型復元解法

Gの計算；表4.4に示したように、Gの成分を線型展開する最少個数の元 $\{g_i\}$ は $\{g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{21}, g_{23}, g_{31}, g_{33}\}$ である。式(4.8)における係数行列Aは下式で与えられる。

$$A = \begin{bmatrix} I_7 \\ 0_{27} \end{bmatrix} \quad (B.3)$$

従って、式(4.7)における $\{\underline{m}_i\}$ は下式で計算できる。

$$\begin{bmatrix} \underline{m}_1 \\ \underline{m}_2 \\ \underline{m}_3 \\ \underline{m}_4 \\ \underline{m}_5 \\ \underline{m}_6 \\ \underline{m}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{M}_1 \\ \underline{M}_2 \\ \underline{M}_3 \\ \underline{M}_4 \\ \underline{M}_5 \\ \underline{M}_6 \\ \underline{M}_7 \end{bmatrix}$$

6組の対応点から得られる $\{\underline{m}_i\}$ を式(4.7)に代入して $\{g_i\}$ に関する方程式を得る。連立方程式(4.7)を解いて $\{g_i\}$ を得る。 $\{g_i\}$ を式(4.8)に代入して、Gを得る。

hおよびRの計算； $r_{12}=0$ を用いて、 $G = h \times R$ を展開すると下式になる。

$$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & 0 & g_{23} \\ g_{31} & 0 & g_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_2(r_{31} \ r_{32} \ r_{33}) - h_3(r_{21} \ r_{22} \ r_{23}) \\ h_3(r_{11} \ 0 \ r_{13}) \\ -h_2(r_{11} \ 0 \ r_{13}) \end{bmatrix}$$

上式を、hとRの要素について解くと、以下ようになる。

まず、 h_2 は下式で求まる。

$$h_2 = \pm (g_{31}^2 + g_{33}^2)^{1/2}$$

$h_2 \neq 0$ のときの解は下記の通りである。R を下式のように表現する。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & & \\ C\phi & -S\phi & \\ S\phi & C\phi & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & \\ & 1 & \\ S\theta & C\theta & \end{bmatrix}$$

ただし、 $\cos$ を C , $\sin$ を S と略記した。 $(r_{11}, r_{13}) = (C\theta, -S\theta)$ であるから、R を求めるには、 (r_{11}, r_{13}) と $(C\phi, S\phi)$ を求めれば十分である。 (r_{11}, r_{13}) は下式で求まる。

$$(r_{11}, r_{13}) = -(g_{31}, g_{33}) / h_2$$

h_3 は下式で定まり、 h が定まる。

$$h_3 = \begin{cases} r_{11} \neq 0 \text{ のとき} : g_{21} / r_{11} \\ r_{13} \neq 0 \text{ のとき} : g_{23} / r_{13} \end{cases}$$

$\begin{bmatrix} C\phi \\ S\phi \end{bmatrix}$ は下式で求まり、R が求まる。

$$\begin{cases} r_{11} \neq 0 \text{ のとき} : \frac{1}{h_2^2 + h_3^2} \begin{bmatrix} h_2 g_{13} / r_{11} - h_3 g_{12} \\ h_3 g_{13} / r_{11} + h_2 g_{12} \end{bmatrix} \\ r_{11} = 0 \text{ のとき} : \frac{1}{h_2^2 + h_3^2} \begin{bmatrix} -h_2 g_{11} / r_{13} - h_3 g_{12} \\ -h_3 g_{11} / r_{13} + h_2 g_{12} \end{bmatrix} \end{cases}$$

$h_2 = 0$ のときの解は下記の通りである。 $h_3 = \pm 1$ であり h が求まる。R は下記の3式により求まる。

$$(r_{11} \ r_{12} \ r_{13}) = (g_{21} \ 0 \ g_{23}) / h_3$$

$$(r_{21} \ r_{22} \ r_{23}) = -(g_{11} \ g_{12} \ g_{13}) / h_3$$

$$r_{3i} = (-1)^{3+i} |R_{3i}| \quad (i=1, 2, 3)$$

r, r' の計算 ; 式(4.4)に h の値を代入して得られる下式で r, r' の値が求まる。

$$\begin{cases} r = \frac{(h, m)_{23} - (m, Rm') (h, Rm')_{23}}{1 - (m, Rm')^2} \\ r' = \frac{(m, Rm') (h, m)_{23} - (h, Rm')_{23}}{1 - (m, Rm')^2} \end{cases} \quad (B.4)$$

ただし、3次元ベクトルの第 i, j 成分に関する内積を記号 $(,)_{ij}$ で表した。

B. 2. 2 最小2乗復元解法

G の計算 ; 式(B.3)を式(4.18)に代入すると、 $\underline{m}_{ij} = \underline{M}_{ij}$ ($i, j=1, \dots, 7$) となり、下式のように7次正方行列 $\underline{m}$ が求まる。

$$\underline{m} = \begin{bmatrix} \underline{M}_{11} & \dots & \underline{M}_{17} \\ \vdots & & \vdots \\ \underline{M}_{71} & \dots & \underline{M}_{77} \end{bmatrix}$$

上記の $\underline{m}$ を用いて、式(4.19)(4.17)から G が求まる。

h の計算 ; $h_1 = 0$ であるため、順に $\underline{h}, \underline{G} \underline{G}^T, \underline{m}_a \times \underline{G} \underline{m}_a'$ を $\underline{h}, \underline{G} \underline{G}^T, \underline{m}_a \times \underline{G} \underline{m}_a'$ から列ベクトルについては第1行を除いた2次元ベクトル、行列については第1行と第1行を除いた2次正方行列と定義する。 $\underline{h}$ は式(4.21)を満たす行列 $\underline{G} \underline{G}^T$ の最小固有値に対する単位固有ベクトルとして求まる。

Rの計算；従来方式通り、Kを定義式 $G \times h$ により計算し、RをKを極分解した直交成分行列として求める。

r, r'の計算；式(B.4)によって、r, r'が求まる。

著者紹介

鎌田 洋

昭56広島大学・大学院理学研究科・数学専攻・博士課程前期終了。同年株式会社富士通研究所入社。以来、C A Iシステム、視覚制御システム、ファジー理論、画像理解、コンピュータ・グラフィックス、文書画像認識の研究開発に従事。技術士（情報工学部門）。平4, 平5 画像工学コンファレンス優秀ポスタ賞受賞。平5 NICOGRAPH 論文コンテスト佳作受賞。電子情報通信学会、情報処理学会、画像電子学会、各会員。

