

投影パターンの戦略的変更による多面体追跡

三田 雄志[†] 日浦 慎作^{††}
加藤 博一[†] 井口 征士[†]

本論文では、タスクに応じて計測戦略を生成し、それを遂行するために必要な情報を能動的に獲得するレンジファインダシステムについて述べる。このシステムは、任意のパターンを投影可能なプロジェクタを用いることによって、対象物体の移動など動的なシーンの変化に適応した計測を行うことができる。我々は、このシステムをリアクティブ・レンジファインダと名付け、その有効性を示すために多面体の6軸追跡を行った。追跡システムは、多面体モデルから、その形状や見え方に応じて、オンラインで追跡に利用する面を選択する。次に、選択した面にスポット光を3つずつ投影するようなパターンを生成し、投影地点の3次元座標値から多面体の位置・姿勢を求める。対象物体の位置姿勢に応じてモデルベースな投影パターンの更新を行っていく。試作したトラッキングシステムは、特殊なハードウェアは用いていないが、計測点数が少なく画像処理も簡易なため、ほぼビデオレートでの追跡が可能であった。また、オンラインで投影パターンの変更を行ったため、スポット光を投影していた面が隠れ、それまで隠れていた面が新たに見えるようになるといった物体の見え方の変化にも柔軟に対応して追跡を行うことができた。以上の結果から、レンジファインダによる計測においてもアクティブビジョンの考え方が有効であることを確認した。

Tracking of Polyhedral Object by Strategic Change of Projection Pattern

TAKESHI MITA,[†] SHINSAKU HIURA,^{††} HIROKAZU KATO[†]
and SEIJI INOKUCHI[†]

This paper describes a new range finding system named Reactive Range Finder, which actively acquires the necessary range information according to each task. This system can generate projection pattern that enables an efficient measurement adapted to the change of the scene caused by movement of the object. To confirm the efficiency of this system, we made tracking application of polyhedral object moving with 6 degrees of freedom on this system. In order to determine the position and posture of the object, it selects measurable planes by using the object model. And it projects three spot lights to each selected plane. As the result, the image processing algorithm became easy, and reliable video-rate tracking was achieved without using particular hardware.

1. はじめに

対象にレーザなどの光を投影することによって計測を行う能動型距離画像センサ（レンジファインダ）は、信頼度の高い距離情報を獲得することが可能であり、通常の濃淡・カラー画像からは得ることが難しい立体的な情報が必要な場合には、非常に有効な計測装置である¹⁾。マニピュレーションのための対象物の位置・姿勢計測、アパレル産業における人の体型計測、CAD

やCGのための形状入力、部品の傷・位置ずれ検査など様々な分野で応用されている。また、応用目的によって、レンジファインダに要求される計測速度・計測精度は様々である。たとえば、金型製作のようにミクロンオーダーの非常に高い精度を要求されるかわりに計測速度には大きな制約がないタスクや、人体計測のようにミリオーダーの精度でよいが数秒程度の計測速度が要求されるタスクがある。

近年では、動的に変化するシーンの計測・認識を目標としてレンジファインダの高速化が図られるようになった。分解能は低いがビデオレートで距離画像を取得することが可能なレンジファインダ²⁾や、マニピュレータの先端に装着できるほど小型軽量のレンジファインダ³⁾が開発されている。高速化と高分解能化の

[†] 大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻
Department of Systems and Human Science, Graduate
School of Engineering Science, Osaka University

^{††} 京都大学大学院情報学研究所

Graduate School of Informatics, Kyoto University

両立は従来から困難とされてきたが、最近ではビデオレートで 512×420 画素の距離画像を取得可能なもの⁴⁾ やビデオレート・ステレオマシン⁵⁾ の報告もあり、視覚システムのリアルタイム化に際して非常に有効な計測装置と考えられる。しかしセンサの性能だけが、視覚システム全体の性能を決定する要因とはならない。レンジファインダで計測された距離画像をいかに効率的に処理し、目的のタスクを実行するかが重要である。高速なレンジファインダを用いて、動距離画像解析などの研究^{6),7)} もすすめられているが、動距離画像が持つ情報は膨大な量であり、高度なタスクになるほど、センサの性能に見合うだけの高速な画像処理を行うのは難しい。処理の高速化を図るためには、センサの性能を向上させるだけでなく、タスク実行のために必要な計測部位を限定し、目的の特徴量を抽出しやすい計測手法を選ぶなど能動的な計測計画機能も必要であると思われる。

他方、工場などで稼働している実システムでは、計測装置の種類や配置を専用に最適化して、処理を単純化しているものが多い。これはタスクや対象に関する知識を活用して、センシング・処理双方の効率を総合的に向上させていると考えられる。またこのような処理の単純化の結果、信頼性も向上しているが、システムとしての汎用性は少ない。

画像計測におけるこれら 2 つの流れから、汎用的かつ効率的な視覚システムを構築するためには、計測装置や画像処理をそれぞれ独立的に改良するだけでなく、統一的に性能向上させるアプローチが必要であると考えられる。そのためにはまず、与えられたデータを扱う処理ではなく、必要な情報を積極的に獲得するための計測操作を意識した処理を考えるべきである。また、タスクや処理の進行にともなって柔軟に計測方法を変化させることが可能なセンサの開発も必要である。このようなアクティブビジョンの考え方⁸⁾ に基づいた研究は、濃淡画像センサについて活発に行われてきた。しかし、レンジファインダについては計測部位や方向の自動計画⁹⁾ など、濃淡画像における成果の直接的な発展を除き、ほとんど行われていない。

本論文において述べるレンジファインダシステムは、タスクに適した計測戦略を生成し、それぞれのタスクにおいて必要な情報を能動的に獲得するシステムである。任意のパターンを投影することのできるハードウェア構成を採用し、スポット光投影法、スリット光投影法、空間コード化法などアクティブステレオ法に基づく様々な計測手法を組み合わせたり、切り替えて用いることができる。我々はこのシステムをリアクティ

ブ・レンジファインダと名付けた¹⁰⁾。リアクティブ・レンジファインダは、レンジファインダにおいて投光を行う「アクティブ」な計測という意味に加え、能動的に情報を獲得するというアクティブビジョンの考え方に基づいた「アクティブ」な計測戦略をとるレンジファインダである。計測対象やタスクの変化に即時に対応するという反射的な性格を持つため「リアクティブ」と名付けた。

本論文ではさらに、このリアクティブ・レンジファインダによる計測の有効性を示すために多面体の移動追跡を行った結果を示す。多面体の物体モデルを用いて、追跡を実現するために必要な計測部位をシステムが自動的に決定し、その部位にスポット光を投影するパターンを生成する。構築したシステムでは、6 自由度の移動追跡が可能であり、物体の見え方の変化にも柔軟に対応することができた。また、レンジファインダでは、投光を行うという性質上、受動的画像センサに比べて制御しうるパラメータが多いため、本システムのようなアクティブビジョンの考え方に基づいた計測が特に有効であることを確認した。

2. リアクティブ・レンジファインダ

ここではまず、タスクの性質を利用した実用的なシステムの例をあげ、計測の効率化の必要性について述べる。次に、本論文において取り扱う動物体追跡について考察し、追跡を実行するためには特に効率的な計測が必要であることを示す。そして、タスクに応じて投影パターンを柔軟に変化させるリアクティブ・レンジファインダについて、ハードウェアおよびソフトウェアの構成を述べる。

2.1 タスクに応じた計測の効率化

これまでレンジファインダはシーンの密な距離情報を高速に得ることを目的として、開発が行われてきた。しかしタスクの種類によっては、必ずしもシーン全体の距離画像を得る必要はない。むしろ必要のない領域についても情報を得ることによって計測速度や処理速度の低下をきたしている場合もある。他方、工場の生産ラインなどにおいて実用化されているシステムでは、比較的簡易なシステム構成でもタスクの性質を利用して、信頼性と作業効率を向上させているものが多い。その例をあげ、タスクに応じた計測の必要性について考察する。

2 台のレーザスリットプロジェクタを用いて十字スリット光を穴を含む平面に投影し、穴の中心の 3 次元位置や穴の径を求めるシステムがある¹¹⁾ (図 1(a))。入力画像のスリット像から 4 つの端点を求め、その 3 次

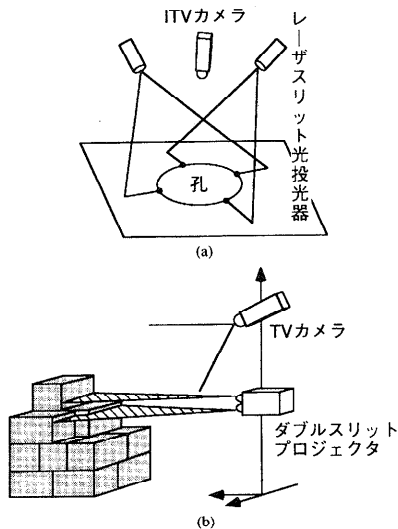


図1 FA システムの例。(a) 貫通孔の3次元位置計測システム、(b) 荷下ろし作業システム

Fig. 1 Example of FA systems. (a) 3-D measurement system for holes, (b) Vision system for depalletizer in automated storage.

元座標値を利用する。このシステムは自動車のフレームの組立用貫通孔の計測に適用されている。また、自動倉庫における段ボール箱の荷下ろし作業では、規則正しく積み立てられているはずの箱が振動で動いたりする場合がある。ダブルスリット光を投影することのできるレンジファインダを用いて、箱の存在検出と箱の3次元位置決定を効率良く行った例がある¹²⁾ (図1(b))。荷下ろし作業では、上に積み重ねられた箱から下ろしていく。上側のスリットは、注目している箱の上に箱が置かれていないことを確認するために用いる。下側のスリットは、箱の位置計測に用いて箱の位置ずれなどを検出する。

このように、実用化システムでは、計測タスクに応じたセンサを用い、必要な情報を得やすいように装置の配置や背景を制御する。必要な部分のみを計測することによって計算コストを削減し、処理効率を向上させている。

同様の機能を持つシステムは、シーン全体の距離画像を得ることのできるレンジファインダを用いても実現可能であろう。しかし、このような距離画像から必要な情報を抽出する処理アルゴリズムは、例にあげたシステムに比べ複雑になるため、処理の安定性や計算コストにおいて優れているとはいえない。要求される性能を満足させるためには、タスクに応じて計測方法を変化させたり、計測部位を限定したりすることが必要であると考えられる。

2.2 動物体追跡

移動物体の追跡(トラッキング)はロボットが人間と協調作業を行ったり、動的に変化する環境へ対応するためには必須の研究テーマであり、多くの研究者が取り組んでいる。濃淡画像を用いた追跡手法は数多く提案されており、ビデオレートでの追跡を実現しているものもある。Starkは濃淡画像から物体の輪郭を抽出しActive Contour Modelを用いて非常に高速に追跡を行った¹³⁾。Armstrongは輪郭だけでなく物体表面のテクスチャも利用し、部分的に物体が隠れていても追跡を行うシステムを提案した¹⁴⁾。しかし輪郭抽出は、背景や陰影の影響を受けやすいため、高い信頼性が要求される場合には実用化が難しいと考えられる。

レンジファインダは物体の絶対的な位置情報を精度よく安定に獲得することができるため、追跡への実用性も高いと考えられる。対象物体の表面形状モデルから距離画像を仮想的に生成し、それを計測データと比較することによって任意形状物体の追跡を行った例がある¹⁵⁾。しかし、この手法では、距離画像生成を行うシミュレータの速度が、センサの計測速度に比べて何倍もの高速性が要求されるという問題がある。

追跡を行う際、対象物体の形状が既知であることを仮定すると、必ずしも物体表面全体の計測を行う必要はなく、特定の部位のみの位置を計測するだけでよい場合がある。完全な物体モデルが得られている場合には、物体表面上の数点の3次元座標を求めることによって追跡が可能となる。数十個の計測点数であれば、ビデオレートでの距離計測は十分可能であり、必要な情報を入力画像から抽出するための画像処理は単純化できる。

2.3 リアクティブ・レンジファインダによる計測
リアクティブ・レンジファインダは要求される性能を満たすように、タスクに応じて投影パターンを変化させるシステムである。必要となる情報は、タスクによって異なる。すべての画素において距離情報が必要な場合もあれば、数点しか必要でない場合もある。このような計測を行うために必要なハードウェア構成とソフトウェア構成について以下で説明する。

2.3.1 ハードウェア構成

タスクの変化や物体の移動に対応して即時にパターンを変更するためには、以下の機能が必要である。

- (1) 任意のパターン光を投影することができる。
- (2) 任意の投影パターンを高速に生成し、かつそれらをすばやく切り替えることが可能である。

これらの条件を満たすものとして、今回採用したハードウェア構成を図2に示す。NTSC信号の入出

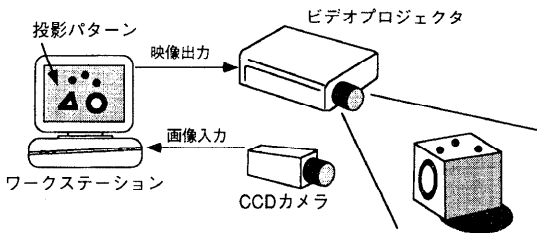


図2 リアクティブ・レンジファインダのハードウェア構成
Fig. 2 Hardware component of Reactive Range Finder.

力機能を有するワークステーションに CCD カメラと市販のビデオプロジェクタを接続し、ステレオ配置する。昨今のワークステーションは CG のレンダリングハードウェアを搭載したものが多く、高速な画像生成を行うことができる。ワークステーションの画面に描画したグラフィックス映像を映像信号に変換してプロジェクタに出力する。最近のプロジェクタは、プレゼンテーションなどに利用され、非常に鮮明な画像を投影することができるものが多い。レーザ光には及ばないものの、通常の照明下においても計測可能なコントラストを得ることができる。

このような構成により、任意のパターンの生成・投影を高速に行うことが可能となる。スポット光を投影したいのであれば点を描き、スリット光を投影したいのであれば線分を描けばよい。点を複数描画すれば、同時に多数の点の 3 次元座標値を得ることができる。

2.3.2 ソフトウェア構成

今回採用したハードウェア構成ではスポット光投影法、スリット光投影法、空間コード化法など各種のアクティブステレオ法を用いることができる。数点の距離情報を得たい場合には、スポットを複数描画した投影パターンを用い、密な距離画像計測を行う場合は、グレイコードパターンなどを用いればよい。投影パターンの生成、投影パターン抽出のための画像処理、3 次元座標演算など計測を行うための一連の処理はそれぞれの計測手法によって異なるので、ライブラリとして個別に用意しておき、これらを組み合わせたり切り替えて用いる。

また、どの計測手法を用いるのが適当であるか、得られた 3 次元座標をどのように利用するかなど、タスクに直結した計測戦略を生成するソフトウェアが必要である。これには計測対象の形状モデルなどタスクに関する知識を積極的に利用する。これまでの研究では、タスク指向型のビジョンシステムとして、与えられた物体モデルを基に物体の見え方の解析を行い、その物体の姿勢決定に有効な特徴を利用した解釈木を生成するピンピッキングシステムがあげられる^{16),17)}。ここ

では、同一形状物体が山積みされたピンピッキング問題における姿勢決定を取り扱っていた。また、実行時において問題設定が変化することはないので、事前にオフラインで認識プログラムを生成していた。しかし、動的に変化するシーンの認識を行う際にはオンラインでの計測戦略生成が必要となると考えられる。

3. スポット光の戦略的配置による多面体追跡

形状が既知である多面体の位置および姿勢は、各面が物体のどの面であるか対応がとれているとき、互いに平行でない 3 つ以上の平面の方程式から解析的に求めることができる。各面の法線ベクトルから回転行列を求め、原点から各面までの有向距離から並進ベクトルを最小 2 乗法により求める¹⁸⁾。平面の方程式を求めるには、その平面上の同一直線上にない 3 つの点の 3 次元座標が得られればよい。多面体の各面にスポット光を 3 つずつ投影し、投影地点の 3 次元位置から平面の方程式を求めれば、多面体の位置や姿勢を決定することができる。つまり 9 つの点を描いた投影パターンを生成し、9 つの点の 3 次元座標を求めることによって追跡を行うことが可能である。

我々は、このような単純な原理に基づいて追跡を行うシステムを構築した。このシステムは、対象(多面体)のモデルを与えれば、その形状や見え方に応じて自動的に投影パターンを生成し、さらに対象の位置や姿勢に応じてモデルベースに投影パターンを更新しながら追跡を行う。ただし、対象の初期位置および初期位置における姿勢は既知と仮定している。追跡を行う前にあらかじめ対象物体が同定され、その位置姿勢が決定されていることを仮定するのは大きな制約条件であると思われる。しかし、ハンドアイ作業などでは作業開始時に物体の同定および位置姿勢決定の問題が解決されていても、実際には計測誤差やロボットの移動誤差が存在するため、移動中に計測を繰り返す必要がある¹⁹⁾。本システムは、ハンドアイ作業を行うものではないが、ベルトコンベアで搬送中の対象に対する作業などでは、振動などによる予期しない姿勢変化があるため、初期位置・姿勢が決定していても、つねに計測しながらの作業が要求される。本システムはこのようなタスクへの応用が考えられる。

本システムは、対象物体の形状や見え方の変化に応じて、追跡に利用する面をオンラインで選択し、スポット光を 3 つずつ配置する。この際、カメラからは撮影できない物体の裏側の面や面積が非常に小さい面は除外する。これには多面体のポリゴンモデルとカメラやプロジェクタの位置などのキャリブレーション情報を

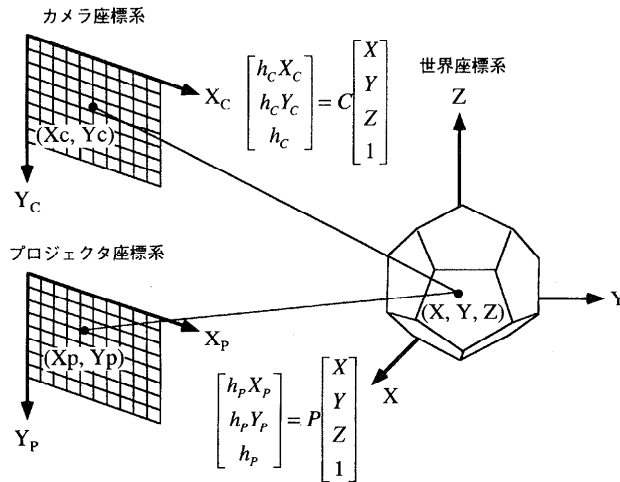


図3 座標系の関係

Fig. 3 Coordinate systems.

用いる。また、物体が移動するため、いつまでも同じ面にスポット光を投影することができなくなる。投影パターンを物体の移動に追従させたり、回転によって見えなくなった面から、新たに見えるようになった面にパターンを投影し直す処理も行う。戦略的にスポット光を配置するこの追跡手法では、シーン全体の密な距離画像から、ボトムアップ処理によって画像特徴を抽出したり、またそれをモデルと対応付けたりする必要がない。複雑な組合せ演算を行わなくてよいため、安定で高速な追跡が可能である。

3.1 システムキャリブレーション

ピンホールカメラに基づいた透視変換モデルを用いる。1辺16cmの基準立方体の3辺に沿って世界座標系を設定し、この立方体にグレイコードパターンを時系列的に投影して3行4列の行列であるカメラパラメータCとプロジェクタパラメータPを得る¹⁾。2軸方向にグレイコードパターンを8枚ずつ投影し、256×256の空間分解能を得た。グレイコードを用いるのは符号境界でのコード化誤りを最小化できる特徴があるからである。これらの行列により世界座標系とカメラ座標系、世界座標系とプロジェクタ座標系の関係が式(1)、(2)で表現される。

$$h_c[X_c Y_c 1]^T = C[XYZ1]^T \quad (1)$$

$$h_p[X_p Y_p 1]^T = P[XYZ1]^T \quad (2)$$

世界座標系における点(X, Y, Z)は、カメラ座標系において座標(X_c, Y_c)の点に、プロジェクタ座標系において座標(X_p, Y_p)の点に投影される。つまり、式(1)、(2)はカメラおよびプロジェクタの視線の方程式であり、h_cおよびh_pは媒介変数である。各座標

系の関係を図3に示す。これにより、世界座標系の点(X, Y, Z)にスポット光を投影する際には、式(2)により(X_p, Y_p)を求め、プロジェクタ画面においてこの座標の点にスポットを描画すればよい。また式(1)から、投影したスポット光の入力画像中での像の位置(X_c, Y_c)を求めることができる。

3.2 モジュール分割(戦略生成部と計測部)

この追跡システムは大きく2つのモジュールに分かれる。1つは物体モデルから追跡に利用する面を選択し、スポットを配置するといったオンラインでの追跡戦略生成を行うモジュールであり、もう1つはパターン光投影・画像入力・画像処理などを行うモジュールである。それぞれのモジュールを戦略生成部と計測部と呼ぶ(図4)。戦略生成部は、物体モデルを用いてスポット光の投影目標位置を計算する。世界座標系における投影目標位置から、カメラ座標系およびプロジェクタ座標系におけるスポット位置を求め、計測部にその情報を伝える。計測部ではスポットのプロジェクタ座標を用いて投影パターンを生成し、複数のスポット光が投影されたシーンを撮影する。スポットのカメラ座標は入力画像内での観測予測位置であるが、実際には物体が移動しているため、予測された位置とは微小に異なった位置でスポット光が観測される。各スポットの3次元座標値を戦略生成部に返し、戦略生成部ではその情報から物体の位置・姿勢を求める。戦略生成部では数値演算処理のみが行われるため、ハードウェアに依存しないが、計測部では投影パターンの描画や画像入力などハードウェアに依存した処理を行う。ソフトウェアの再利用性も考慮して、以上のようなモ

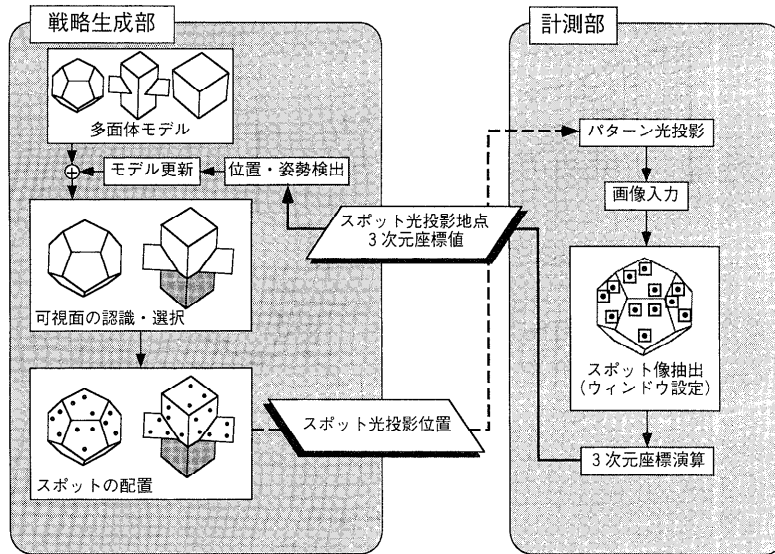


図4 追跡モジュール (戦略生成部と計測部)
Fig.4 Tracking modules: generation of tracking strategy and measurement.

ジュール分割を行った。

3.3 戦略生成部における処理

戦略生成部では、入力された多面体モデルから以下の3つの条件を満たす面をすべて選択し、選択された面にスポットを3つずつ配置する。

- (1) 互いに平行でない3つ以上の面
- (2) カメラおよびプロジェクタから可視である面
- (3) カメラおよびプロジェクタ画像面上での面積が大きい面

以下に多面体モデルの記述方法、面の選択方法および選択した面へのスポットの配置方法について詳しく述べる。

3.3.1 多面体モデルの記述

システムに入力する多面体モデルは、各頂点の世界座標系における3次元座標値と頂点・エッジ・ポリゴンのリンク関係を記述したポリゴンモデルである(図5)。各エッジは2つの頂点のリンクであり、各面は3つ以上の頂点およびエッジのリンクで構成されるポリゴンである。各ポリゴンは凸図形にする必要があり、複雑な形状の平面は複数のポリゴンに分別して記述する。また、物体の外部から物体表面を見て、左回りとなるようにポリゴンのリンクを設定した。これは、面の法線ベクトルを求める際に、その向きがつねに物体の内部から外へ向くようにするためである。

3.3.2 可視面の認識・選択

まず、世界座標系の座標で記述されている面ポリゴンをカメラパラメータとプロジェクタパラメータを用

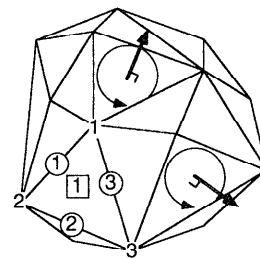
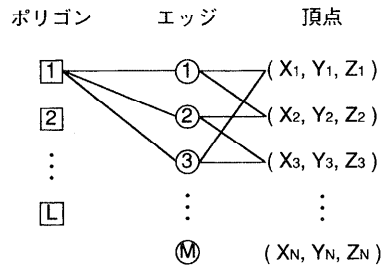


図5 多面体モデル
Fig.5 Model of polyhedral object.

いて、カメラ画像面、プロジェクタ画像面に投影する(図6)。次に投影したポリゴンのリンク方向を調べる。あらかじめ設定していたリンク方向と同じ(左回り)であるとき、そのポリゴンは可視であり、逆の方向(右回り)であるとき不可視である。しかし、凹部分のある多面体に関しては、面の向きが可視方向であっても、他の面により隠蔽されている場合がある。そこでリンク方向から可視と判断されたポリゴンに関して、投影面内において重なりを持つすべてのポリゴンとの前後

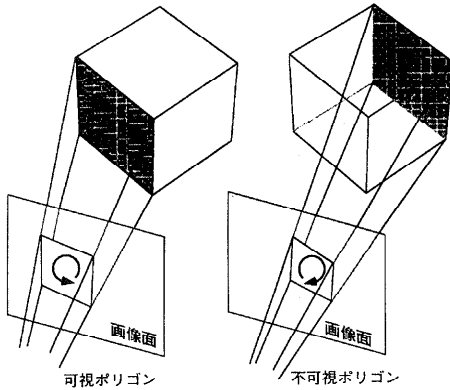


図 6 ポリゴンの可視/不可視判別

Fig. 6 Judgement whether the polygon is visible or invisible.

関係を求め、そのポリゴンが他のポリゴンによって隠されているかを調べる。これにより、カメラおよびプロジェクタの画像面において、可視方向かつ隠れた部分のないポリゴンを同定できる。さらにそれらの面について、カメラ画像面、プロジェクタ画像面における見かけの面積を計算する。あらかじめ設定しておいたしきい値以下の面積の面は、安定に検出できない可能性があるため選択しない。本システムでは、可視方向でオクルージョン部分がなく、面積がしきい値以上となる面をすべてスポットを配置する面として選択している。

3.3.3 スポットの配置

スポットは面の重心と頂点との内分点に投影する(図7(a))。面内に広くスポットを配置すれば面の検出精度はあがるが、物体の移動速度が大きい場合、スポットの投影位置を修正する前にスポットが面外へはみ出してしまうため計測不能となる。内分の比率は対象物体の移動速度に応じて変更することができる。また、対象面が多角形であるので、どの頂点の内分点にスポットを配置するかによっても面の検出精度が変化する。頂点を選択するために、モデルを入力した時点で、ポリゴンごとにルックアップテーブルを作成しておく。たとえば、対象面が八角形の場合、3つの頂点を選ぶ選び方は56通りである。すべての選び方について、モデル表面にスポットを配置し、スポットによって形成される三角形の周囲長の2乗を面積で割った値が最小になるような配置方法をテーブルに保存する。図7(b)に戦略生成部においてスポットを配置した結果を示す。対象が多面体であれば形状が異なった物体であっても、システムが自動的にスポットを配置することが可能である。

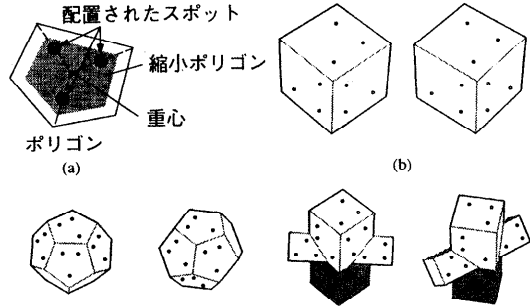


図 7 スポット光の配置

Fig. 7 Arrangement of spot lights.

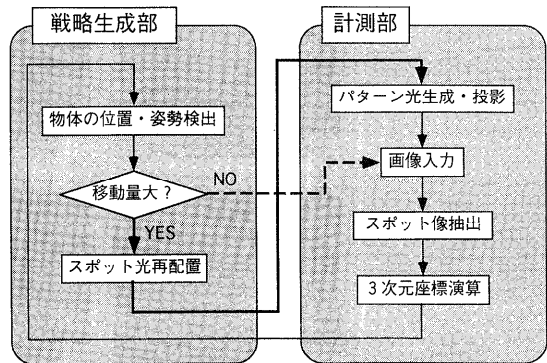


図 8 追跡処理手順

Fig. 8 Tracking process.

また、対象が静止しているときや移動量が小さいときには、必ずしもスポット投影位置の修正を逐次行う必要はない。物体の移動量が大きくなったらスポット光の投影位置を修正する。これには、スポット光を投影しているポリゴンの内側に、そのポリゴンを縮小したポリゴンを仮定し(図7(a))、スポットがそのポリゴンの外にはみ出したら、投影位置を修正し再配置する。図8にスポット光投影地点の修正処理を含めた処理手順を示す。物体の移動量が小さいと判断されると、スポット光を再配置したり、投影パターンを描画し直す必要がないため、さらなる高速化が可能となる。

3.4 計測部における処理

計測部において最も重要な処理は、スポット光を投影したシーンの入力画像から、スポット像を安定に抽出するための画像処理である。また複数のスポット光を投影しているので、それぞれの3次元位置を求めるためには、プロジェクタ画像中のスポットが入力画像から抽出されたどのスポットに対応するかを求める必要がある。スポット光の投影位置情報は戦略生成部から伝えられるので、入力画像内でのスポットの位置も予測することができる。図4のようにウィンドウを設

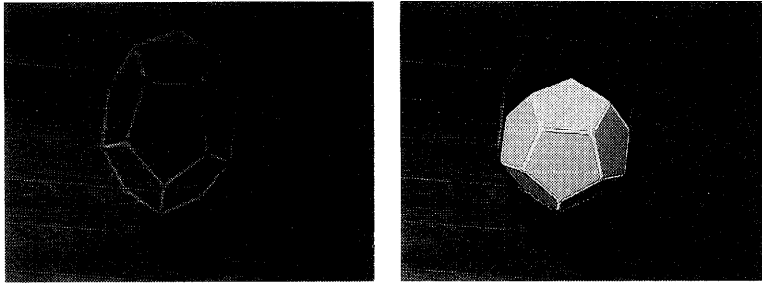


図9 対象物体の輪郭投影
Fig.9 Projection of object contour.

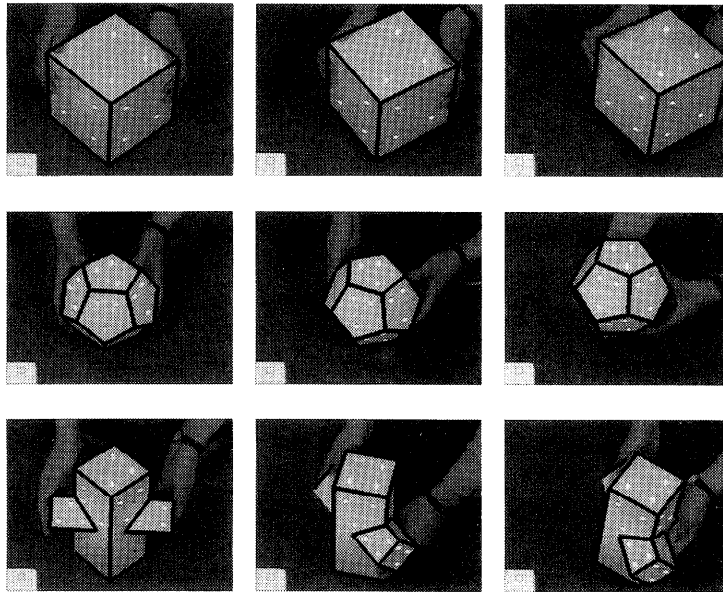


図10 追跡実験の様子(立方体, 五角十二面体, 角柱相貫体)
Fig.10 Tracking experiment of polyhedral objects.

定し, 限定された領域内のみスポット抽出のための画像処理を行う。画像全体を処理することに比べ, 画素数を大幅に減らすことができる。また各ウインドウ内でしきい値を求めるため, 安定に2値化することが可能である。次に各スポット像の重心を求め, その点とカメラのレンズ主点を通る平面とプロジェクタ画像面のスポットを通る直線との交点を求めることによってスポット光投影地点の3次元座標を求める。図4のように1つのスポット像を開くウインドウを設定していれば簡単に対応付けを行うことができる。また, カメラパラメータおよびプロジェクタパラメータを用いて, カメラ画像面上でのエピポーラ線の方程式を求め, 入力画像から抽出されたスポットとエピポーラ線の距離が最小となるものを対応スポットとして決定することもできる。

4. 実 験

提案手法による多面体の追跡実験を行った。

ビデオプロジェクタ (SHARP XV-E500) およびビデオカメラ (SONY DCR-VX1000) を SGI ONYX に S-Video 信号線で接続し, 垂直ステレオ配置した。計測装置からおよそ 1.3 m 離れた位置に対象物体を置いて計測を行った。ONYX は約 640×480 画素の画像を毎秒 30 フレーム入力することが可能である。以下の実験においては, 画像処理や行列演算処理においてハードウェアは用いず, R8000 (75 MHz) の 1 個の CPU ですべてソフトウェア的に処理を行った。投影パターンの生成には GL (Graphics Library) を用いた。

なお, 提案手法ではつねに世界座標系における絶対的な位置・姿勢を算出する。この計算において, 過去

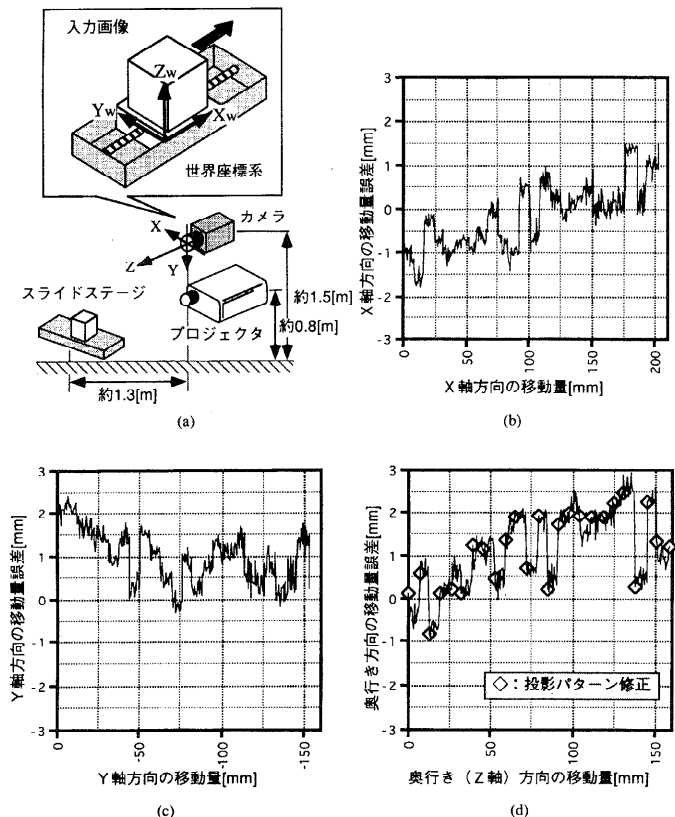


図 11 平行移動における計測精度評価
Fig. 11 Error evaluation of translation measurement.

に計測された物体位置の情報を用いないため、計測誤差は累積しない。

4.1 6軸追跡の様子

対象物体として、1辺16cmの立方体、1辺の長さ約5cmの五角十二面体、高さ約21cmの角柱相貫体を用いた。対象を初期位置に設置するために、プロジェクタで対象物体の輪郭線を投影し、その輪郭線が物体のエッジに一致するように物体を設置した(図9)。図10は6軸追跡を確認するため手によって任意に移動させた結果である。白く写っている点は投影されたスポット光であり、計測結果を黒い輪郭線として入力画像に重ね合わせて表示している。アスペクト変化が生じても追跡が行えている様子を確認できる。計測速度は投影しているスポット光の個数や対象物体の複雑さによって変化する。立方体は28.0fps、五角十二面体は26.4fps、角柱相貫体は23.3fpsの速度で追跡を行うことができた。

4.2 精度評価(平行移動)

図11(a)のように実験装置を配置し、立方体をスライドステージで1mmずつ300mmまで平行移動させ

た。入力画像中では、立方体が左下から右上へ移動する。世界座標系のX_w軸とスライドステージの移動方向がほぼ平行になるように設置している。カメラのレンズ主点を原点とし、レンズ光軸をZ軸とするXYZ座標系を設定する。

図11(b), (c), (d)には、立方体の移動量をXYZ座標系のX軸、Y軸、Z軸(奥行き)方向に分解し、その計測誤差を示している。世界座標系X_w軸方向への300mmの移動は、XYZ座標系において、X軸方向へは202mm、Y軸方向へは-153mm、Z軸方向へは158mmの移動であった。右上がりのグラフになっているが、これは画像の端ではレンズのひずみによるキャリブレーション誤差が生じているためであると考えられる。また、図11(d)において、投影パターンが修正された地点に◇をプロットしている。位置誤差にステップ状の変化が生じている箇所と一致しているのが分かる。これは立方体の移動量が大きくなりパターンを再投影することによって、入力画像中でのスポット像の位置検出において、誤差が生じたためと考えられる。画像面上で垂直方向の検出誤差が1ピクセル

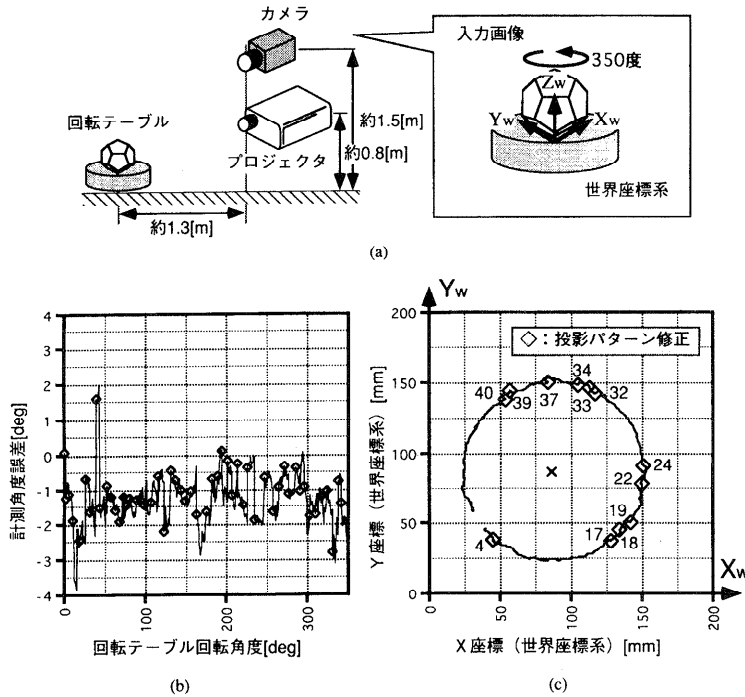


図 12 回転移動における計測精度評価

Fig. 12 Error evaluation of rotation measurement.

ル生じたとき、XYZ 座標系におけるスポットの位置誤差は X 軸および Y 軸方向では 1 mm 以下、Z 軸方向では 3 mm 程度生じることをシミュレーションにより確認した。また、X 軸方向の計測誤差の 2 乗平均は 0.77 mm であり、Y 軸方向は 1.15 mm、Z 軸方向は 1.71 mm であった。奥行き方向の誤差が大きくなっている。また、回転角は一定であるべきだが、最大でも 1 deg 程度の誤差であった。

4.3 精度評価 (回転移動)

図 12 (a) のように実験装置を配置し、五角十二面体を回転テーブルにのせ、1 度ずつ 350 度まで回転させた。図 12 (b) は回転角の計測誤差を示している。全体として負に偏った誤差が生じているが、対象を初期位置に設置する際の誤差があったためと考えられる。ここでもパターンの切り替えによるステップ状の誤差変化が生じている。投影パターンの修正を行った地点に◇をプロットしている。計測誤差の 2 乗平均は 1.48 deg であった。

図 12 (c) は世界座標系 $X_w Y_w$ 平面における 1 つの頂点の軌跡を示した結果である。回転軸を中心としてほぼ円運動をしている様子が分かる。この実験中に、投影パターンの修正は計 52 回あった。投影パターンが修正された地点で、目立って大きな計測誤差を生じ

ている部分に◇をプロットしている。付記した数字は何回目の修正であったかを意味している。立方体の平行移動ではつねに同じ 3 つの面にスポット光を投影していたが、五角十二面体の回転では見え方が変化するため、スポット光を投影していた面の数が最小 4 から最大 6 へと変化した。面数が多いほど平面の検出誤差を緩和できるので、計測誤差にも変動が生じている。たとえば、◇4 では面数は 5 から 4 へ、◇22 および ◇24 では面数が 4→5→4 と変化している。

5. ま と め

LSI 技術などを応用して、高速化を実現したレンジファインダが開発されているが、視覚システムの総合的な性能向上を図る場合、センサのみの改良では不十分であることを述べた。我々が提案したリアクティブ・レンジファインダは、タスクに応じて投影パターンを変更することによって、それぞれのタスクごとに必要な情報を効率良く得ることを目的としたものである。多面体の各面にスポット光を配置するような投影パターンを自動的に生成し、モデルベースにパターンを更新していくという追跡手法を提案した。これにより、特殊なハードウェアを用いなくても、高速な追跡が可能であることを示した。対象物体の見え方や形

状の複雑さによって、計測速度は変化するがほぼビデオレートでの追跡が可能であった。また、つねに絶対的な位置と姿勢を求めるため、計測誤差が累積せず安定に追跡を行うことも確認した。以上の結果から、主に濃淡画像センサについて研究されてきたアクティブビジョンの考え方が、レンジファインダによる計測においては特に有効であることを示した。

本システムでは追跡対象として多面体のみを取り扱っており、曲面を含む物体の追跡では処理が複雑化すると考えられる。より複雑な形状の物体を追跡することが今後の課題である。そのためにはスポット以外の投影パターンを用いることが必要であろう。たとえば、円筒面を含む物体の追跡ではスリット光を投影し、円筒の軸の位置を検出するなどが考えられる。また、エッジに対して複数のスリット光を投影し、撮影したスリット像の途切れた点や屈曲した点を検出することによって、エッジの3次元位置を求め、その情報を利用することも可能であると思われる。

参 考 文 献

- 1) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990).
- 2) 横山 敦, 佐藤宏介, 芦ヶ原隆之, 井口征士: 無調整型フォト VI.SI センサを用いた実時間距離画像計測—シリコンレンジファインダ, 電子情報通信学会論文誌, Vol.D-II, No.9, pp.1942-1500 (1996).
- 3) 服部数幸, 佐藤幸男: スキャン式符号化法による小型高速レンジファインダ, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1528-1535 (1993).
- 4) Beraldin, J.A., Rioux, M., Blais, F., Cournoyer, L. and Domey, J.: Registered intensity and range imaging at 10 mega-samples per second, *Optical Engineering*, Vol.31, No.1, pp.88-94 (1992).
- 5) 金出武雄, 木村 茂: ビデオレート・ステレオマシン, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.3, pp.322-326 (1995).
- 6) 山本正信, ピエール・ボランジャー, アンジェロ・ベラルディン, マーク・リュウ, ジャック・ドメイ: 距離動画像を用いた非剛体運動パラメータの直接的推定法, 情報処理学会論文誌, Vol.32, No.9, pp.1129-1141 (1991).
- 7) Hiura, S., Yamaguchi, A., Sato, K. and Inokuchi, S.: Real-Time object tracking by rotating range sensor, *Proc. 13th ICPR*, Vol.1, pp.825-829 (1995).
- 8) 久野義徳: アクティブビジョン, 人工知能学会誌, Vol.10, No.4, pp.493-499 (1995).
- 9) 大槻正樹, 佐藤幸男: 自動視点移動機能を備え

たカラーレンジファインダ, 電子情報通信学会総合大会, D-12-200 (1997).

- 10) 三田雄志, 日浦慎作, 山口 証, 井口征士: リアクティブ・レンジファインダ, 画像の認識・理解シンポジウム講演論文集 II, pp.229-234 (1996).
- 11) 中野康夫, 水野秀明, 平山真明, 上田澄広, 小池 健: 貫通孔の三次元位置計測システムの開発, 32回システムと制御研究発表講演会講演論文集, pp.297-298 (1988).
- 12) Inokuchi, S., Sato, K. and Ozaki, Y.: Vision system for depalletizer in automated storage, *Proc. Ipara-U.S. Symposium on Flexible Automation*, pp.711-714 (1986).
- 13) Stark, K. and Fuchs, S.: A method for tracking the pose of known 3-D objects based on an active contour model, *Proc. ICPR '96*, pp.1-905-909 (1996).
- 14) Armstrong, M. and Zisserman, A.: Robust object tracking, *Proc. 2nd ACCV*, pp.1-58-62 (1995).
- 15) 日浦慎作, 山口 証, 佐藤宏介, 井口征士: 動距離画像の計測と生成による任意形状物体の実時間追跡, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, No.6, pp.1539-1546 (1997).
- 16) Ikeuchi, K.: Generating an interpretation tree from a CAD model for 3D-object recognition in bin-picking tasks, *International Journal of Computer Vision*, pp.145-165 (1987).
- 17) 池内克史: 物体認識と認識プログラムの自動生成, 人工知能学会誌, Vol.4, No.1, pp.30-42 (1989).
- 18) 山本正信: 3次元運動解析—時間的結合の手法, 計測自動制御学会「計測と制御」, Vol.34, No.6, pp.453-456 (1995).
- 19) 松下俊夫, 佐藤知正, Heikkila, T.: ハンドアイシステムのための能動的な視覚計測の計画機能, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.2, pp.235-243 (1992).

(平成 9 年 8 月 4 日受付)

(平成 10 年 3 月 6 日採録)



三田 雄志

1996年大阪大学基礎工学部システム工学科卒業。1998年同大学院基礎工学研究科修士課程修了。3次元画像計測の研究に従事。現在、(株)東芝に勤務。



日浦 慎作

1993年大阪大学基礎工学部制御工学科飛級中退。1995年同大学大学院修士課程修了。1997年同大学大学院博士課程修了。現在京都大学工学部電子通信工学専攻研究員。3次元動画画像計測・処理の研究に従事。工学博士。1993年電気関係学会関西支部連合大会奨励賞受賞。電子情報通信学会会員。



加藤 博一（正会員）

1986年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1988年同大学大学院修士課程修了。1989年同大基礎工学部制御工学科助手、1996年講師。ヒューマンインタフェース、パターン認識、画像計測の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会、計測自動制御学会等会員。



井口 征士（正会員）

1962年大阪大学工学部電気工学科卒業。1964年同大学大学院修士課程修了。1965年同大基礎工学部助手、1969年助教授、1984年教授（現システム工学科）。工学博士。1970年仏国サクレ原子力研究所、1979年南カリフォルニア大学画像処理研究所。パターン計測、画像処理、感性情報処理の研究に従事。著書「三次元画像計測」（昭晃堂）、「感性情報処理」（オーム社）等。電子情報通信学会、計測自動制御学会、システム制御情報学会、IEEE各会員。