

反射型レーザ距離センサを応用した 物体の認識方法

大矢博史* 下山貴弘**

1. はじめに

半導体レーザとPSD (Position Sensitive Device) を用いた距離センサと、CCDカメラを用いて計測を主とした三次元物体の認識を行った。

レンジファインダなどと、CCDカメラを用いた研究はいくつかある。木下らは、物体平面上に環状のパターンを観測して距離情報や物体表面の特徴を検出する方法を提案した¹⁾。また、梅田らは、ロボットの視覚にはロバストである事が重要であると述べている。その手段として、距離情報から領域を、濃淡画像からはエッジを、更にこれらの融合を行う事がロバストさを実現する上での基本的な戦略であると述べている²⁾。また岡田らは、レンジファインダと単眼カメラを2台用いて全体の検出効率を向上している³⁾。また数少ない商品化の例として、スリットパターンを時系列的に投影する空間符号化法は、現在28×32の大きさの距離画像が得られているが将来画像サイズが大きくなれば有望と思われる⁴⁾。今回、我々が用いた方法は対象とする物体にレーザのエネルギーを照射することから、能動的三次元物体計測器とも呼ばれる。ロボットや自動機械などが外界に対して何らかの作業をしようとするとき、特に人間の代わりをさせようとするためには、三次元物体の認識は避けられない仕事となる。事実、作業用ロボットでは部品や製品の仕分け、分類、検査、組立加工などを行うためには三次元物体の認識が必要不可欠である⁵⁾。

三次元物体の計測は、空間座標の値 x, y, z を取得することであるからレーザ距離センサのみによっても可能なはずである。しかし、この場合認識精度を上げようとする多くの取得データが必要になり、結果として巨大な計算コストを抱えるなど問題が多い。またデータ取得量を節約して少数のデータで三次元物体を認識しようすると、取得データの疎密によって認識結果に誤りを生じたりする。さらに、物体エッジ部分の検出が、困難であることも見逃せない欠点である。そこでよく用いられる方法にCCDカメラを2台使用して、三角測量により z 座標を得る方法がある。即ち、ステレオ画像法などによる三次元認識を用いるが、対応点決定の問題がクリアできていない現在、三次元情報を得る方法として完全な手法は見つかっていない⁶⁾。三次元の認識は、いまなお古くて新しい問題なのである。そこで、現在それに対する解決の方法として、それぞれの分野で最適と思われる個別の手法や、それらの組み合わせによって対応している。これらの方法は、それぞれの事象においては十分な効果を発揮しているが、すべての機能を満たす手法はその報告を待っているところである。

*明星大学理工学部電気工学科 助手

**明星大学大学院理工学研究科電気工学修士課程97年修了

研究では近年、安価にして高精度を得られるようになったPSD半導体レーザによる距離センサを主とした距離情報に、CCDカメラの広範囲にわたる二次元データを補完的に組み合わせ、互いの欠点を補い合いながら中距離に対応した三次元物体の認識ができるのではないかと考え装置を試作し、その手法を研究した⁷⁾。このシステムは、三次元物体の中でも面を構成要素とする物体の検出が特に容易である。そこで、主として面によって構成される物体の特徴をもとにして、物体形状の復元を行った。また認識結果の妥当性を検証するため、認識した立体を座標変換してロボット座標に置き換えロボットによって把持し、種分け試験を行わせた⁸⁾。

2. 距離計による物体認識の問題点

使用したレーザ距離センサは、半導体レーザとPSDを用いた三角測量を用いて300mm程度の距離検出を可能としている。このような距離センサの一般的な使われ方は、偏心測定、高さ測定、枚数検出、反りうねり測定など比較的短い距離を高精度に測定するために用いられている。このレーザ距離センサを用いて対象とする物体に対して格子状に距離を検出すれば、ほぼ物体の形状を知ることができる。図2.1は、四角錐を対象とした研究室における実測結果である。

しかしながらこの方法では多点にわたって距離情報を入力しなければならないとともに、実用に際して対象とする物体位置の特定や各種エッジの検出が困難であった。図2.2は、レーザを当てる場所を物体の近辺だけに限定し格子点上の四点のデータによる四角形（平面）を作り法線ベクトルを求め、その成分から平面にラベリングを施し物体の面構成を再現したようすである。図からいくつかの情報が欠落し、面や線の関連性が危うくなっているのがわかる。そこで、面の情報と線の情報と物体位置情報それぞれを関連付けるために、二次元情報を広範囲にわたって取得することが可能なCCDカメラとレーザ距離センサのデータをそれぞれ補完的に組み合わせ、より効率よく三次元物体の認識ができるのではないかとその方法について試みた⁸⁾。

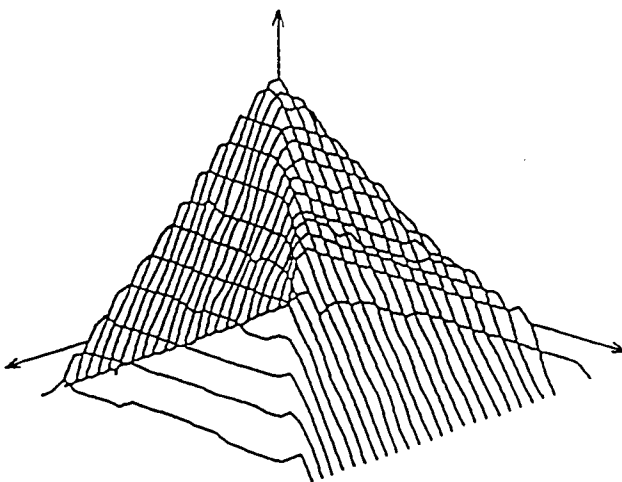


図2.1 レーザ距離センサを用いた物体の認識結果

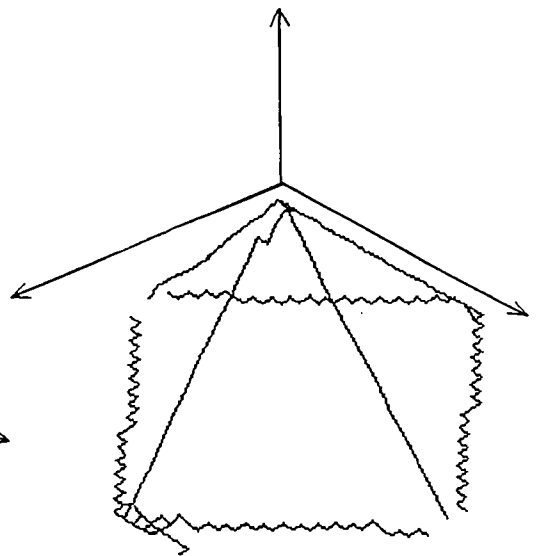


図2.2 レーザ距離センサによるフレームモデルの生成結果

3. 装置構成

3.1 概要

図3.1は、測定原理である。装置は、レーザ距離センサ、CCDカメラ、X-Yテーブル（測定台）、パソコン、多関節ロボット等により構成されており、レーザ距離センサとCCDカメラはX-Yテーブルの真上に配置してある^{9) 10)}。

研究に使用した装置は、主要な部分ごとに分類すると次のように四つの部分に分けて考えることができる。

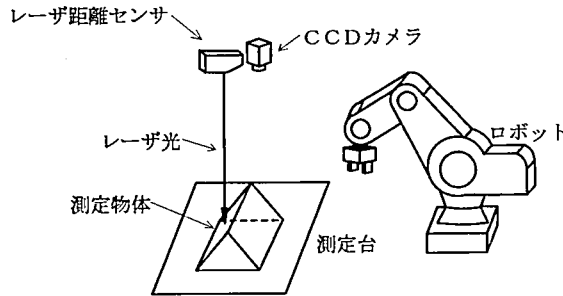


図3.1 測定原理

(1) レーザ距離センサ

使用したレーザ距離センサの基本原理は、三角測量である。発光素子として半導体レーザを用いているが、その光は検出体に照射される。照射されたレーザ光は、検出体により拡散反射され拡散反射光の一部はPSD上にスポットを結ぶ。この拡散反射光は検出距離に比例してPSD素子上を移動し距離に比例した出力が得られる（図3.2）。照射されるレーザ光の大きさは、縦2mm、横1mmの米粒状の大きさであり検出距離の分解能は $50\mu\text{m}$ である。この距離計は、この種の距離計測器としては比較的長距離（最大400mm）の測定が可能である。また、照明などの外乱に強いことも重要な特徴であり、照明装置は一般に室内照明に用いられるインバータ式の蛍光灯を用いている。測定した距離データは、専用のアン

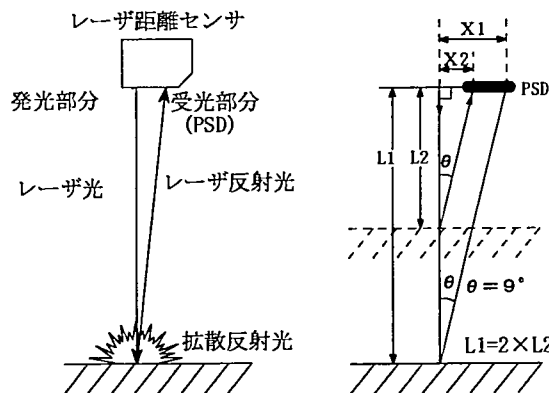


図3.2 レーザ距離センサによる距離の測定原理

プユニットによりパソコンへ送られる。

(2) CCDカメラ

用いたCCDカメラは、水平方向768画素、垂直方向494画素の画像を取り込むことができる。この画像を、パソコンに取り込むときに用いられるイメージボードの解像度は512×512画素である。このイメージボードから得られる画像データは、パソコンのメイン・メモリに読み込まれ各種画像処理演算が施される。

(3) X-Yテーブル

検出対象物を置く測定台である。ステップモータで駆動するガイドアクチュエータを二組90度に組み合わせたもので、その上に物体をおくテーブルがある。ステップモータでX-Yテーブルの位置制御を行い、ここから送られるパルス数でモータの移動距離が決まる。テーブル移動量の分解能は、1パルス20 μ mである。

(4) 多関節ロボット (MOVEMASTER EX MELFA RV-M1)

認識結果の応用として、ロボットを用いて把持試験を行わせた。ロボットは二つの平行移動する爪のハンドが装着されているため、面が正しく検出できないと物体を上手く把持できない。使用したロボットは、図3.3に示すような5自由度の垂直多関節形ロボットである。

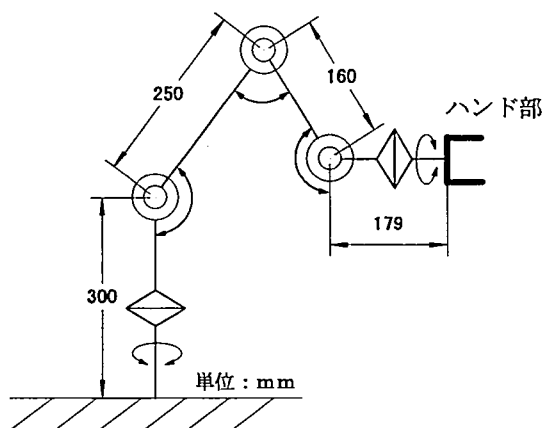


図3.3 多関節ロボットの機構

3.2 装置のキャリブレーション

研究に用いた装置の座標系を統一するために、キャリブレーションを行う必要がある。三次元物体をCCDカメラで眺めると、CCDカメラに近い部分が大きく映るため、斜めに傾いた長方形の面を持つような物体は台形のように歪んでしまうことがある。物体を正しく認識するためには、距離に対応したCCDカメラの画素サイズを正しく補正しなければならない。X-Yテーブルからの高さに対応する画素サイズの関係は次に示す方法で求めた。

- (a)既知の四角形を水平方向、垂直方向にそろえてX-Yテーブルに置く。
- (b)CCDカメラから画像を取り込み、2値化、エッジ検出、細線化を行う。
- (c)Hough変換によってエッジを求め、求めたエッジの方程式（直線）を導く。

- (d)エッジの方程式から、四角形の水平方向、垂直方向のそれぞれの画素幅を求める。
- (e)四角形を置く場所と高さを変えて(a)～(d)を繰り返す。
- (f)最小二乗法を用いて、高さと画素サイズの関係式を求める。

Hough 変換とは、エッジの集合を線の方程式に変換する手法で、主にエッジの修正に用いられている。ここでは測定物体が四角形なので直線の方程式に変換する。

X-Y座標上に存在する点 (x,y) は、X 軸のなす角 θ と原点からの距離 ρ によって表現される (式3・1)。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \cdots \cdots \cdots (3 \cdot 1)$$

この式を、 θ について変化させると同じ直線と思われるエッジの座標は1点で交わる。

この交点の頻度表を作成し、ピークを検出しこのピーク (ρ, θ) を式(3・1)に代入すればエッジの直線の方程式を求めることができる。このHough変換は、とぎれているエッジが検出されていてもエッジを修正することは可能であるが、頻度表のピークを検出するのが困難である。ここでは測定物体を水平方向、垂直方向に揃えておくため、検出されるX軸のなす角 θ は 0° と 90° の部分が多く検出される。よって頻度表のピーク検出を、この部分に限定した。これより画素補正時の高さ h に対して求められる画素の関係式はそれぞれ

水平方向

$$\rho_x = -1147.0 \times 10^{-6} h + 322.5 \times 10^{-3} \cdots \cdots \cdots (3 \cdot 2)$$

(h : 画素サイズ補正時の高さ)

垂直方向

$$\rho_y = -919.0 \times 10^{-6} h + 261.6 \times 10^{-3} \cdots \cdots \cdots (3 \cdot 3)$$

となった。

一般的に、計測を主とする三次元物体の認識では必ず何らかのキャリブレーションを必要としている。これは精度よく認識するために重要なポイントであるが、同じく重要な項目としてキャリブレーションは容易にできなければならない。

使用した装置のキャリブレーションは、さきの3-2節(a)～(d)で説明したように比較的単純であると同時に自動化も可能である。

4. 平面の認識

このレーザ距離センサとCCDカメラを用いた認識方法では、物体表面に直接レーザを当てることにより距離を検出するので面の検出は比較的容易である。研究では、始めに物体の認識を行うためにレーザ距離センサを利用してCCDカメラから得られた画像データを補正し、平面の特徴値である面積と頂点座標を精度よく検出できるかを検討した。

4.1 平面の面積測定

4.1.1 平面の面積測定方法

一般的にCCDカメラを用いて平面の面積を求めるには、領域内の画素の数を数えるこ

とで求めることができる。しかし、傾いた平面の面積を求めるためには、遠近法の原理に基づく画素サイズの変化のため誤差が大きくなる。よって正しい面積を求めるには、距離と面の向きに対応した、正しい画素サイズを決定する必要がある。平面の場合、面に含まれる空間上の x, y, z 軸に対応するそれぞれの座標を a, b, c とすれば、その座標3点の三次元情報を求めることにより法線ベクトル n が得られる。

$$n = (a, b, c) \dots\dots\dots (4 \cdot 1)$$

これより面の向きが求まる。また、これから求められる平面の方程式は

$$ax + by + cz + d = 0 \dots\dots\dots (4 \cdot 2)$$

となる。さらにCCDカメラでとらえた画像は物体の形状をCCDカメラの位置から見た投影形状であることを利用して

$$z = -\frac{ax + by + d}{c} \dots\dots\dots (4 \cdot 3)$$

となり、実際に測定しなくても領域内すべての画素に対する Z 座標である距離情報を計算で求めることができる。平面に対して一つの領域には、3点の距離情報だけで領域内すべての距離情報を検出することができる。求めた高さで平面の向き（傾き）から1画素の面積 S_p は、式（3・2）、（3・3）より求められる画素サイズを補正するためのキャリブレーション定数 S_a, S_b を用いれば

$$P = S_a \cdot z + S_b \dots\dots\dots (4 \cdot 4)$$

（ P ：傾きがない場合の高さに対応する1画素の面積、 S_a ：高さに対する面積変化の割合、 S_b ：基準面（高さ＝0）における1画素の面積、 z ： Z 軸座標値）

$$S_p = \frac{P}{\cos\theta} \dots\dots\dots (4 \cdot 5)$$

（ θ ：面の向き（傾き））

となり、求める平面全体の面積 S は

$$S = \sum S_{pi} \dots\dots\dots (4 \cdot 6)$$

（ n ：求める領域内の画素数）

として求めることができる。

4.1.2 測定手順

（1）原画像の取り込み

CCDカメラにより、認識対象となる物体の原画像を取り込む（図4・1）。

（2）物体と背景の分離

原画像に対して、判別分析法によって二値化を行い画像データが1の部分だけ原画像の輝度にすることで背景ノイズをなくしている。この処理により背景部分の輝度が0になるので、背景のノイズをなくすることができる¹¹⁾（図4・2）。

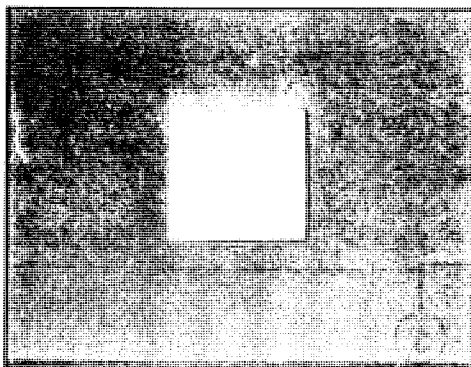


図4. 1 CCDカメラでとらえた認識対象物体

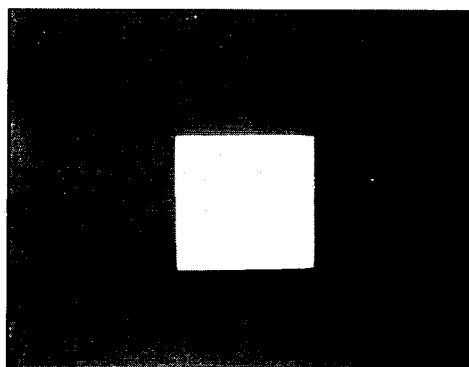


図4. 2 原画像から背景を分離した画像

(3) 処理範囲の決定

処理時間を節約するため、画像処理を行う前に測定台上に置かれた物体の存在する領域を、原画像データをもとに特定する必要がある。物体の置かれた領域の水平、垂直の最大値、最小値を求め、以後この範囲内のみに対して種々の計算処理を行う。そうすれば、検出時間を短縮することができる。

(4) Sobelオペレータ処理

Sobelオペレータを用いてエッジ検出し、判別分析法を用いて二値化を行う(図4.3)。

(5) ラベリング処理

エッジで囲まれた各領域にラベリングを施す。これによって、物体がいくつかの面で構成されているのかが分かる。ラベリングの方法は、図4.4に示すように 3×3 のマスクをラスタ走査して*を中心にまず1の領域が物体であるならば、*には1と同じラベルをつけてゆく。もし1が領域でない(エッジまたは背景)ならば2, 3, 4の順で判別処理をする。

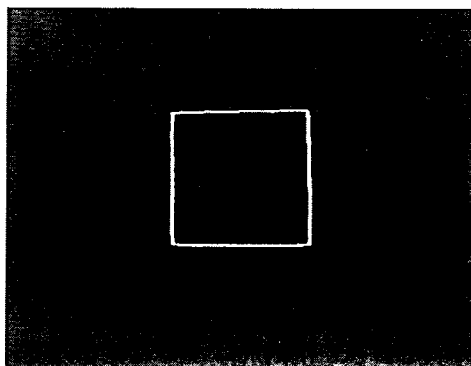


図4. 3 Sobel オペレータをかけたあと二値化処理を行った画像

	2	4
1	*	3

図4. 4 ラベリング時に使用したオペレータ

この流れを図に表すと図4.5のようになる。しかし図4.6のようなエッジの時は、同じ領域であるにもかかわらず違う領域と認識してしまうので補正処理をおこなっている。

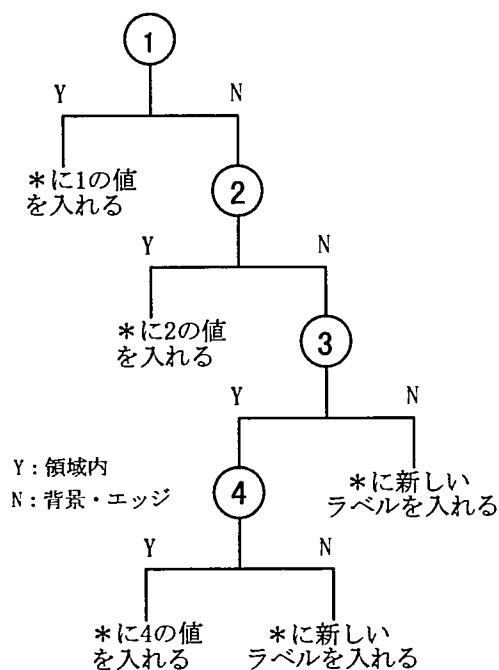


図4. 5 ラベリングの流れ

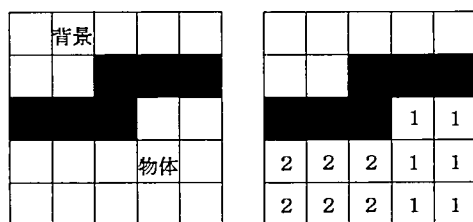


図4. 6 異なる領域と認識してしまうエッジの例

(6) 距離情報の取得

X-Yテーブルを操作し、レーザ距離センサを用いて求める領域の三次元座標を取得する。レーザを当てる点は、平面の方程式を求めるためなので最小三点の三次元座標でよい。

(7) 面の特定

対象とする平面の法線ベクトルを求め、平面の方程式を求める。式(4・3)により領域内のZ座標(高さ)を求め、この高さで平面の向きから、対象物体に対する正しい画素サイズを式(4・4)、(4・5)により決定する。さらに、領域内のすべてについて正しい画素サイズをもとめ、その総和が求める平面の面積となる(式4・6)。面積を測定す

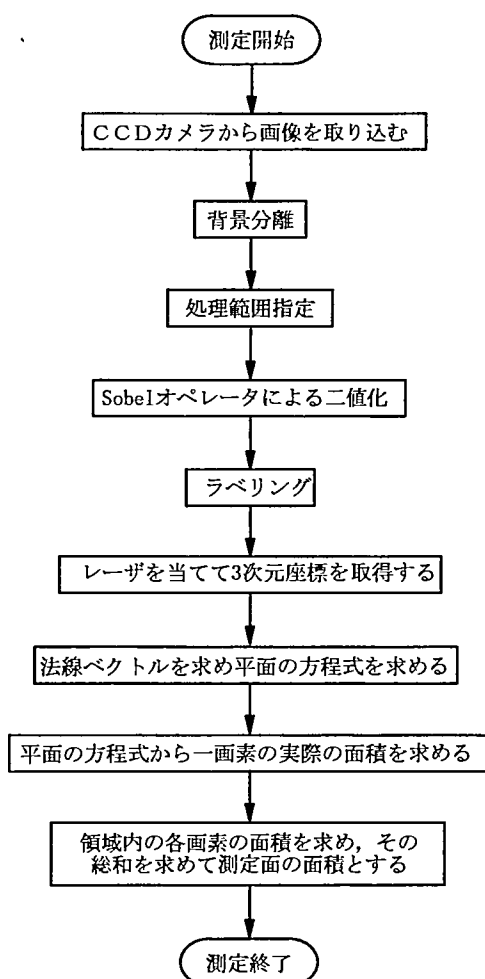


図4. 7 面積測定の流れ

るときの、測定の流れを図4.7に示す。

4.1.3 面の傾きによるレーザ距離センサの誤差

計測対象となる面の傾きと、レーザ距離センサの測定精度の関係を調べた。使用しているレーザ距離センサが拡散反射光を利用しているタイプであるため、傾斜している面にレーザ光を当てると反射する光が弱くなる。これが原因で検出面の傾斜角が大きくなるにつれ誤差が大きくなる。このようなタイプの距離計には、検出角度の差こそあれこのような制約があり、使用に当たっては配慮が必要である。図4.8に、面の傾きとレーザ距離センサの測定精度の関係を示す。使用したレーザ距離センサは、傾きが大きくなるにつれてプラスの誤差を生じ、実際の距離より大きい値が出力されている。

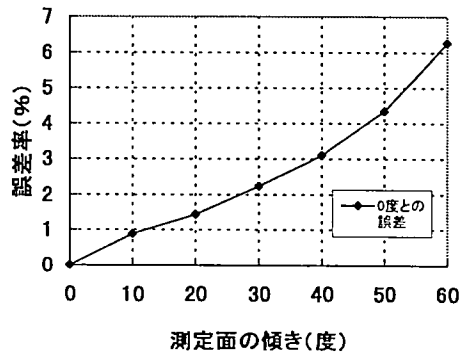


図4. 8 面の傾きとレーザ距離センサの測定精度

4.1.4 測定結果

平面面積の測定は四角形を二つ、三角形、円などの平面図形を斜めに傾かせ面積を測定し、実物の実測面積と比較した。

測定結果を図4. 9に示す。正しい一画素の実面積は、高さが高い値になるほど小さい値をとる。従って、面の傾きとレーザ距離センサの測定精度の関係からわかるように面の傾きを大きくすると実際の値より高い値が検出されるので、一画素の面積が小さい値になるためマイナスの誤差が生じる。これは距離センサの誤差測定結果と良く一致している。

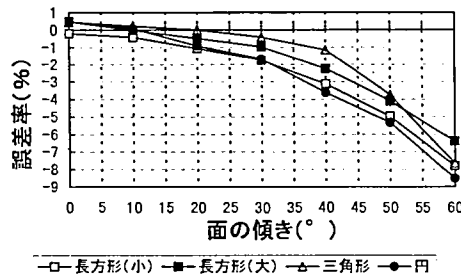


図4. 9 面の傾きによる取得面積の誤差率

4.1.5 面の傾きと検出面積の誤差の検討

物体によって測定面積の誤差やばらつきが生じるが、理由は二つ考えられる。

一つはCCDカメラの画素の各辺を物体のエッジが斜めや曲線で横切る場合、その画素面積に対して物体の面積がどの程度の割合で1になるか0になるかと言う問題である。この問題は、画素にかかっている映像が50%を境にそれ以上のときは1それ以下の場合は0と分かっている場合は軽減の見込みがあるが、実際にはこの値を保証するメーカーや装置は極めて少ないのが現状である。この問題などが起因してCCDカメラからの画像にSobelオペレータ、二値化など画像処理を施したとき、実際の物体と背景の境界部分にあいまいさ（誤差）を生じる。

図4.10は実際に物体を二値化した画像の一部である。測定物体は三角形で1の部分領域内であり0の部分は領域外である。図中の線は全体の画像からエッジと思われると

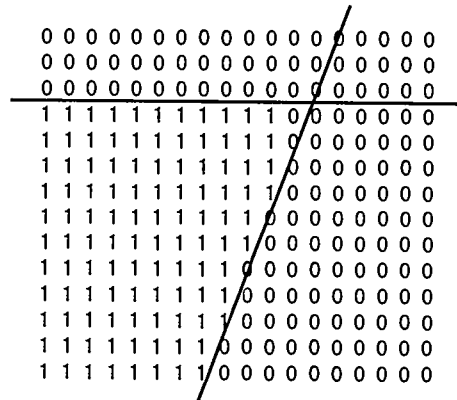


図4. 10 エッジがあいまいに検出される例

ころを人為的に引いたものであるが、この図からも分かるように斜めになっているエッジと鋭角部分の検出部にあいまいさが目立つ。また、誤差の要因としては他にも形状により面積を求める計算方法が違うことなども影響していると思われる。いずれにしても我々が面積を求める場合は一般的な幾何学の計算に基づくが、CCDカメラを用いた場合の基本計算式は画素のたて×よこであり、後はその面積の積算を求めることになる。使用したレーザ距離センサは平面における検出精度は $50\mu\text{m}$ となっているが、おおよそ30度以内の平面であるならば、それに準ずる精度で面積を求めることができる。距離検出精度がこの程度あれば、人間が識別できないほどわずかな違いを持った形状の物体を高精度に識別判定することができる。

4.2 頂点の検出

4.2.1 検出手順

4.1節では、物体の持つ特徴の一つである面積を精度良く求めることにより、物体の大小などを識別することができた。これは、高さに対応する正しい画素サイズを求めることにより可能となった。ここでは、一部に傾いた長方形を持つ物体の投影面が台形のように歪んでしまう現象を補正し、頂点の座標を求めることによって平面の認識を行った。

頂点の検出方法は、いくつかの方法を試みた。今回は線分間の完全な接続を仮定して¹²⁾、構成するエッジ同士をスキャンしてゆき、お互いのなす角を求めるという手法である。図4.11は、その様子を表した図である。縦軸に角度、エッジ番号を横軸としてグラフを作成し、その角が変化の大きいところを頂点とする方法である。

この方法は、エッジ上の座標のみで頂点を求めるので、比較的精度よく頂点角度の検出ができる。しかし図4.11のようにエッジが斜めになっている場合、角度がギザギザに出てしまう場合があるので、このようなノイズの処理をしなければならない。また円や楕円など頂点が存在しない図形に対しては、頂点の検出レベルをプログラム上で工夫するなどの対策が必要となる。他の方法についてもそれぞれ長短あるが、今回はこの方法が最適と判断し採用した。つぎに、検出の流れについて説明する。

検出は、以下に示す手順で行った。

(1) 領域内の二値画像と、三点の三次元座標を取得する。この方法は、平面の面積測定

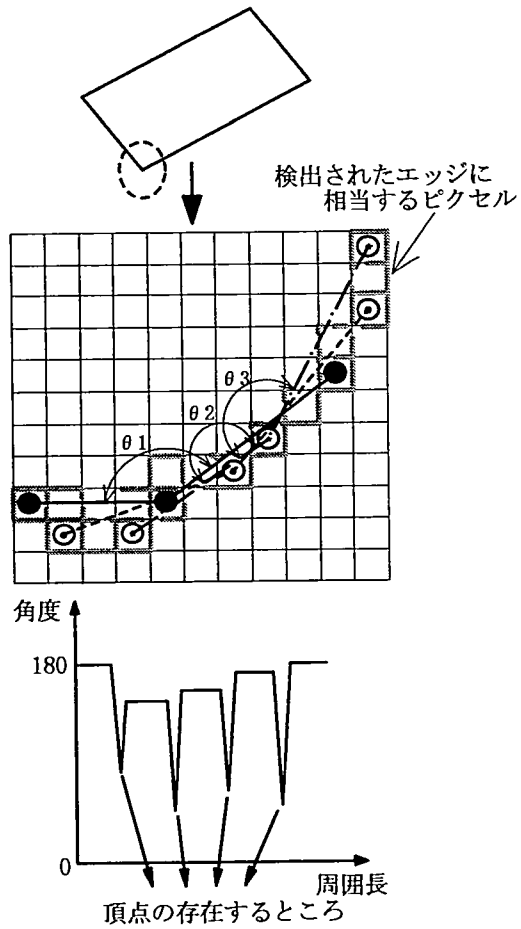


図4.11 エッジ角による頂点の検出

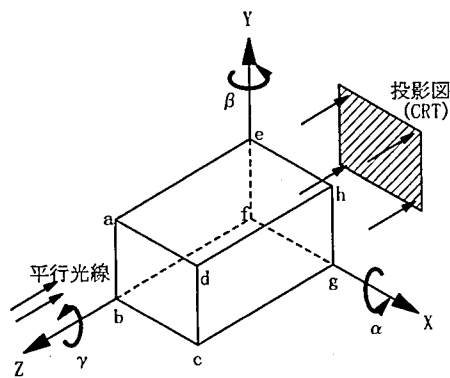


図4.12 三次元図形と投影図

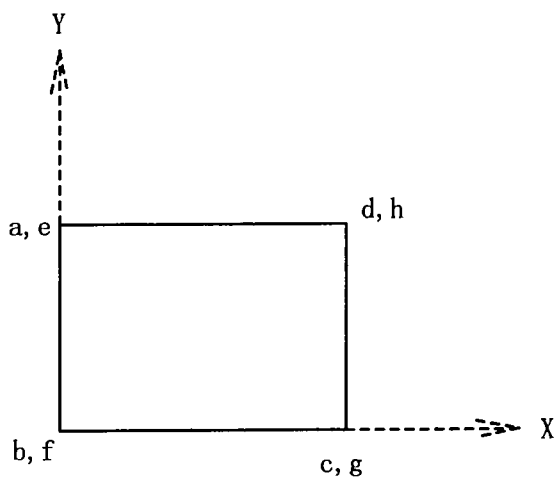


図4.13 図4.12をX-Y平面に投影した面

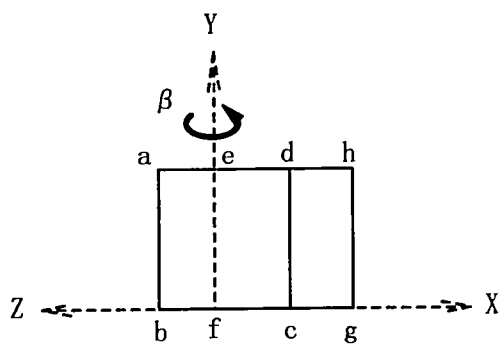


図4.14 図4.13をy軸まわりに β° 回転

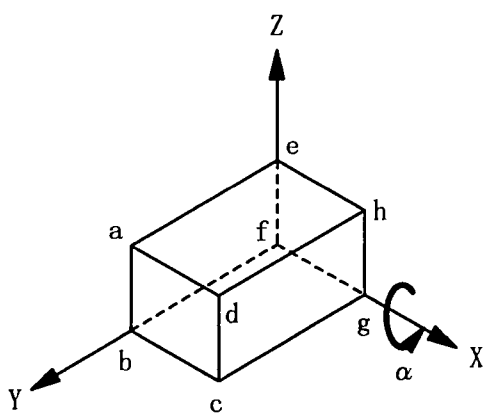


図4.15 図4.14をx軸まわりに α° 回転

で用いた方法と同じである。

- (2) 実際の面が長方形であるのに、遠近法の作用により台形のように歪んでしまう現象を補正し、実際の面である長方形に表示する。ここでは遠近法の作用により、台形のように歪んでいる画像を3D画像、実際の面である長方形に表示する画像を3D画像の2D化画像と呼んでいる。表示の方法は、直方体の場合を例に挙げると三次元座標をCRT(二次元平面)に表示するため x, y, z 座標軸上に直方体が図4.12のように置かれているものとする。この物体を、 z 軸に平行な平行光線を用いて $x-y$ 平面に投影したとしても図4.13のように長方形に投影されるだけで立体的に見えない。そこで、これを y 軸回りに β° だけ回転させて $x-y$ 平面に投影すると図4.14のようになり、さらに x 軸回りに α° 回転させて $x-y$ 平面に投影すると図4.15のようになり立体らしく見える。

したがって対象物体に含まれる三次元座標 (x, y, z) をCRT投影座標 (P_x, P_y) の変換式を表すと次のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = x \cos \beta + z \sin \beta \\ y_1 = y \\ z_1 = -x \sin \beta + z \cos \beta \\ x_2 = x_1 \\ y_2 = y_1 \cos \alpha - z_1 \sin \alpha \\ P_x = x_2 \cos \gamma - y_2 \sin \gamma \\ P_y = x_2 \sin \gamma + y_2 \cos \gamma \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{.....} \\ \text{.....} \\ \text{.....} \\ \text{.....} \\ \text{.....} \\ \text{.....} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{.....} \\ \text{.....} \\ \text{.....} \\ \text{.....} \\ \text{.....} \\ \text{.....} \end{array} \quad (3 \cdot 8)$$

x-y平面に投影される座標

α, β, γ の各設定値は

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 140^\circ \\ \beta = 150^\circ \\ \gamma = 240^\circ \end{array} \right\} \quad \text{.....} \quad (3 \cdot 9)$$

図4.12は、これらの値を用いた描画の結果である。この α, β, γ の値を、式(3・10)のように平面の法線ベクトルをもとにして決定すれば、図4.16のように傾きを持った平面であっても正確な図形として表示することができる。

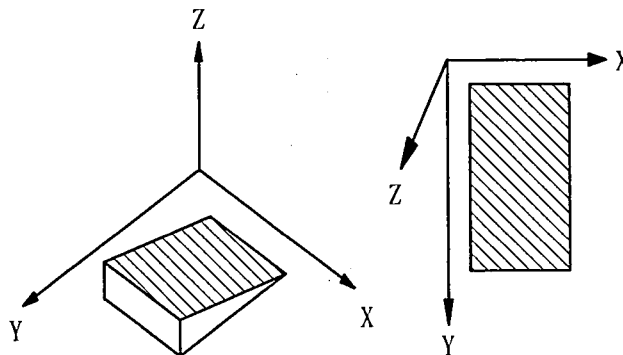


図4.16 3D画像(左)と2D化画像(右)

$$\begin{cases} \alpha = 180^\circ - \sin^{-1} n_x \\ \beta = 180^\circ - \sin^{-1} n_y \dots\dots\dots (3 \cdot 10) \\ \gamma = 180^\circ \end{cases}$$

- (3) Sobelオペレータによってエッジを検出し、細線化を行い画素の幅を一画素にする。
 (4) エッジを追跡し、座標を記録する。追跡しながら座標を記録するので、前後の座標の値は隣り合った画素である。
 (5) 図4.17のようにエッジ角を求める。これは一定の間隔を置いた三点を求め、それをつなぐ直線同士がなす角を求める方法である。

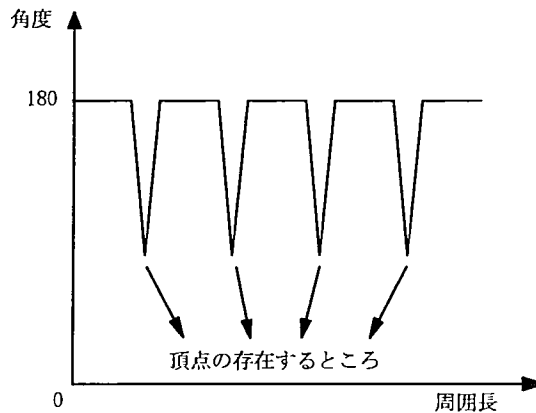


図4.17 エッジ角と周囲長の関係

- (6) 直線の部分を検出する。この方法で行うと、直線はエッジ角が180度の時である。しかしエッジ角が180度と検出されるのはX-Yテーブルにそろっているエッジのみであり、エッジが斜めになっている場合など180度と検出されない場合のほうが多い。よってエッジ角が175度以上の時と、同じエッジ角が連続して5回以上検出された場合このエッジの集合は直線と見なし、エッジ角を180度に行っている。この時の検出回数は、実験より経験的に求めた最適値である。
- (7) (6) の処理により、エッジ角と周囲長の関係を求めグラフに表す。このグラフの谷から、頂点候補を求める。
- (8) 頂点候補が実際に測定面の頂点であるかどうか判別する。この判別は、まず頂点候補から生成される画像が測定面の画像と同じ画像であるか調べる。これは、頂点候補から生成される画像と測定面画像それぞれの画素数を調べる。また頂点候補が内角か外角かを判別し、外角の時は内角を求めて内角の和を求めることにより、n角形と内角の和の関係が幾何学的に正しいかどうか調べた。この二つの条件がそろったとき、頂点候補がこのエッジ角の間隔に置ける頂点候補と見なす。
- (9) エッジ角をとる間隔を変えて、(5)～(8)を頂点候補が三つになるまで繰り返す。
- (10) (9) によって三つの頂点候補のうち、一番頂点の数の少ない頂点候補を測定面の頂点とする。

これら検出の流れを図4.18に示す。

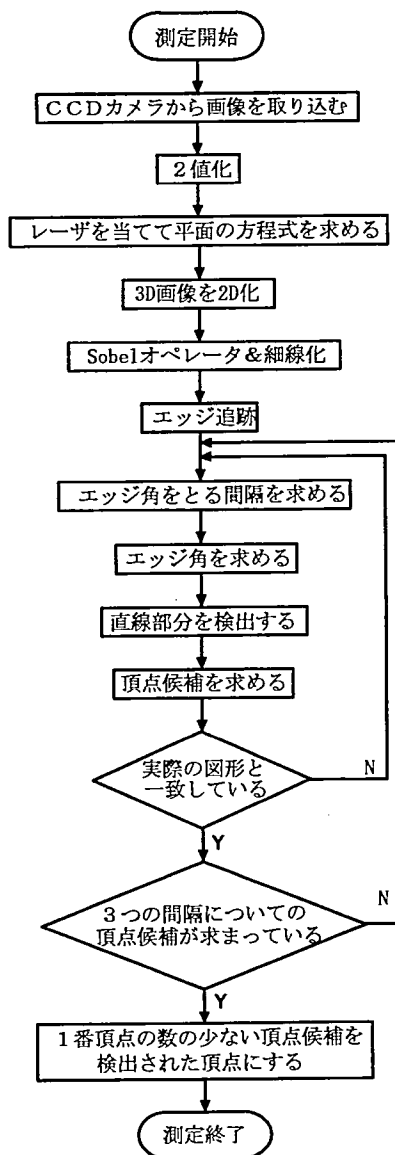


図4.18 頂点検出の流れ

4.2.2 検出結果

図4.18による測定結果を図4.19～4.21に示す。まず頂点検出が正確に行うことができるかを確認するために、特徴のある数種類の二次元画像を用いている。図中の四角い点は、検出された頂点を表している。

この方法によれば、つぶれた図形や凹の形状を持った面でも検出することが可能である。

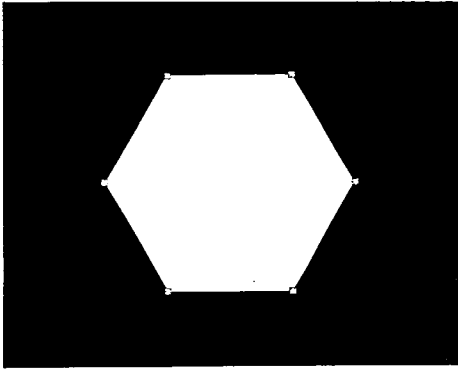


図 4. 19 正六角形の頂点検出

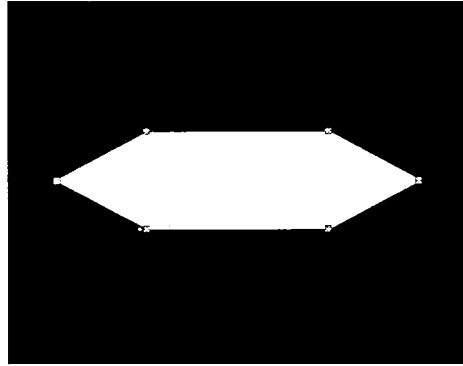


図 4. 20 つぶれた六角形の頂点検出

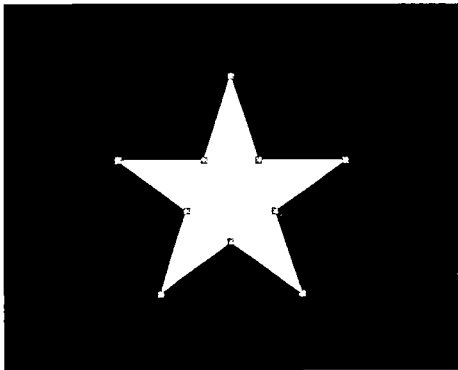


図 4. 21 星形の頂点検出

4. 2. 3 頂点削除検出結果の検討

エッジ角をもとにした頂点検出は、重心などエッジ以外の点を用いて検出していないので、星形など凹の部分を持った頂点でも検出できる。今回は、エッジの画素数から間隔を決めて数回間隔をかえることにより頂点を検出した。しかし間隔をかえ、再度頂点候補を検出するので時間がかかるという欠点がある。よって面の大きさや平べたさなど、面全体のマクロ的な情報から間隔を決定することにより、最適な間隔が求められるのではないかと考えている。また、もともと頂点の存在しない円や楕円の図形

に対しては、この方法に加えて、円弧度や縦横比などを用いた方法とをミックスした方法で図形認識をおこなう必要がある。

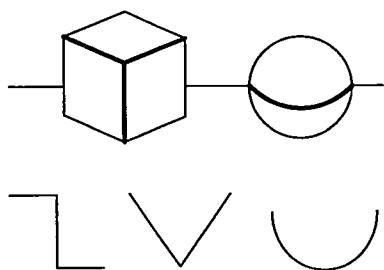
5. 物体の認識

レーザ距離センサとCCDカメラを用いて、三次元平面を精度良く認識することが前章で確認できた。この結果を用いて、物体を構成する面の情報を組み合わせ、立体として認識する手法について検討した。

5. 1 ルーフエッジの検出

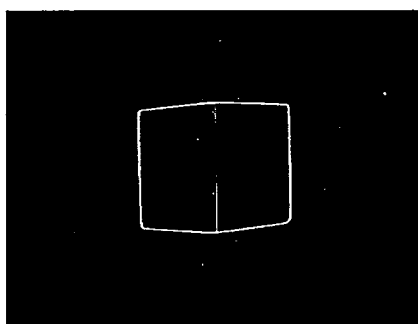
前章までは、一つの面についてのみ測定を行っていた。しかし、立体は一面だけで構成されていることはなく、必ず複数の面から構成されている。X-Yテーブルの上部に装備されているCCDカメラから眺めた画像が複数面存在するときには、エッジ検出の方法に工夫が必要となる。エッジは距離分布に応じて、ジャンプエッジ、ルーフエッジ、スムーズエッジ、の三種類に分類される(図5.1)。

ジャンプエッジは、物体と領域の境界線である。ルーフエッジは、物体の内部にあるエッ

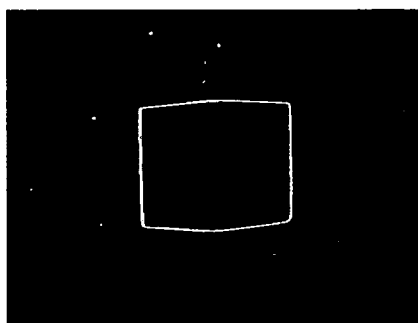


ジャンプエッジ ルーフエッジ スムーズエッジ

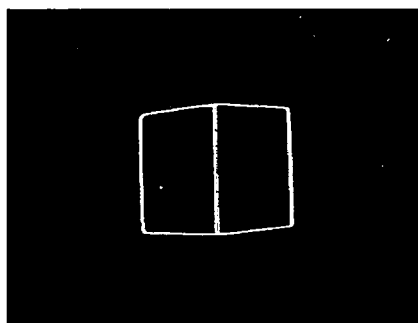
図5. 1 エッジの種類



(a) Sobel オペレータをかけた画像



(b) しきい値90にしたときの画像



(c) しきい値を変えたときの画像

図5. 2 二値化しきい値を変えたときの画像変化

ジで稜線と呼ばれている。スムーズエッジは、曲面物体を扱う場合のみ生ずるエッジで滑らかに連続する曲面と曲面の境界に生じるエッジである。これらは単純にSobelオペレータなどのエッジ検出をおこなっただけでは、スムーズエッジはほとんど検出されてこない。ジャンプエッジはSobelオペレータなどを用いて確実に検出できる。今回、検出の対象とする物体は平面で構成されていることが前提であるため、ルーフエッジを検出することに重点を置いた。なお、ルーフエッジを検出する方法は以下の方法を検討した。

- (a)濃度ヒストグラムを用いて二値化しきい値を決定する方法
- (b)ネガポジ画像を利用した方法
- (c)輝度を変化させることにより明るい画像と暗い画像を合成してエッジ検出をおこなう方法

その結果(a)の方法が一番良い結果であったので、この方法をベースにルーフエッジを検出した。

図5.2は、Sobelオペレータをかけたあと、しきい値を変化させ二値化をおこなった画像である。この画像のヒストグラムは図5.3のようになる。

このヒストグラムを利用してエッジ検出をおこなった。エッジ検出の方法は、まずSobelオペレータをかけた画像を判別分析法によって、Aを二値化しきい値として二値化する。ここでジャンプエッジが検出される。つぎに輝度が0～Aの範囲内で判別分析法によって、Bを二値化しきい値とし二値化する。ここでルーフエッジが検出される。この二つの画像を合成し、すべてのエッジを求める。この方法は、二段階に分けて二値化をおこなっているの、二段階二値化しきい値法と呼んでいる。

また二段階二値化しきい値法においても、はっきりとエッジが検出できないエッジを

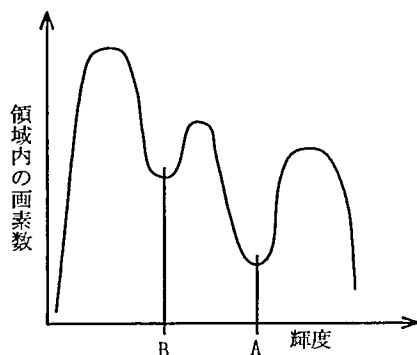


図5. 3 Sobel オペレータ後のヒストグラム

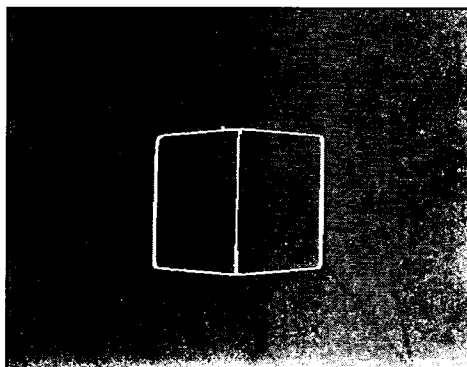
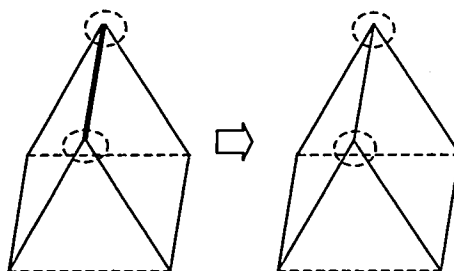


図5. 4 Sobel の後、膨張と縮小によりエッジの修正をした画像

膨張、収縮によりエッジの修正をおこなうなどの処理によりエッジ検出を行った(図5. 4).

5.2 頂点の結合

エッジ検出をして、ラベリングを施し各々の面が識別され面の頂点が検出される。しかしエッジ検出の精度により物体上では、同じ頂点であるのにも関わらず別々の頂点として検出されるので、これらの頂点を結合する必要がある。この場合、一定間隔以内に頂点が



(破線で囲まれた部分が結合されている)

図5. 5 頂点の結合

検出されたとき、これらの頂点は一つの頂点であると見なしている。頂点座標は、一定間隔内にある頂点座標の平均を取っている。

5.3 底面を求める

物体には上面だけでなく底面、側面が存在する。研究ではレーザ距離センサとCCDカメラは物体の上部に設置してあるので、物体をCCDカメラでとらえた画像を2値化し距離に対する補正を行えば、その画像が底面である。

ここで、底面に含まれるすべての頂点は高さが0 mmであるから、物体上面の頂点座標であるxとyの成分がそのまま底面の頂点の座標になる。しかし図5.6のように上面が複数存在するときは、底面の内部にルーフエッジの線分が存在することになる。この線分は上面において共有する線分であるので、このような線分間の頂点を取り除くことによって底面を求めている。

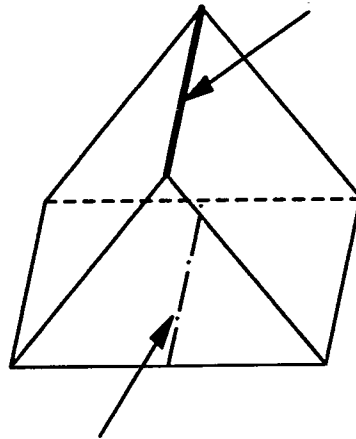


図5.6 底面を求める方法

5.4 側面を求める

側面は、底面の各辺の上部に上面の座標が存在する面である。これより底面の隣どうしの座標から直線の方程式を求め、この直線上に上面の座標があるかないかを探索する。この座標が存在する場合、この座標と直線の方程式を求めた底面の座標との間に面が存在する。探索の方法は、直線の方程式に上面頂点のxとyの座標を代入し、方程式が成り立つとき直線上に上面の座標があるとしている。

5.5 物体を表示

以上のことから、測定物体の面の数、各面の向き（法線ベクトル）、頂点の数、頂点の座標といった面の特徴を得ることができた。これらの特徴をもとに、CCDカメラで得られた投影像を三次元に復元することができる。表示方法は、式(4・8)を用いた。

6. 把持面の決定

物体認識結果を検証するため、その応用として二つの平行移動をする爪を持った多関節ロボットによる把持試験を行った¹³⁾。

このロボットハンドによって把持する面は、次の二つの条件を満たす必要がある。

- (a) 爪と平行な面が2つ以上存在する。
- (b) ロボットハンドの爪の開き幅を W 、対象物体のつかむ部分の幅を W' としたときに $W' < W$ の関係が成立する。

検出結果がこの条件を満たしているときには、把持可能な物体と認識した。ロボットがつかむためのパラメータとして、手首の回転角度を求めた。これを、さらにX-Yテーブルの座標系からロボットの座標系に座標変換した。

6.1 ロボットを用いた物体の把持

ロボットを用いて物体の把持を行こなわせた。

物体認識の二値化を行う段階では、背景と物体が近い輝度で検出されたため減算法によるシェーディング補正を追加した。手順をフローチャート図6.1に示す。

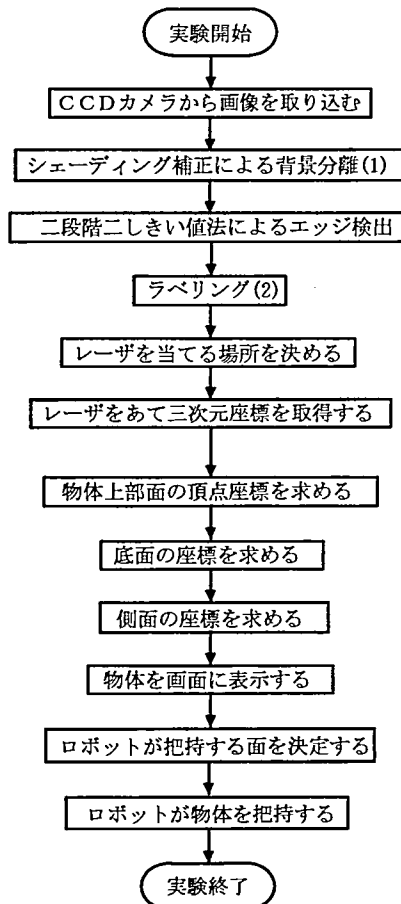


図6.1 物体把持試験のフローチャート

6.2 認識結果

実際にロボットを用いて物体を把持するため、物体の認識を行った。対象とした物体は、図6.3に示した形状をしている。これは検出面が正しくないときは把持できないような物体として、わざと斜面を持った形状を選択した。

図6.2は、把持試験を行うときの実物をCCDカメラで上部から取り込んだときの原画像、即ち画像処理を施すための一番もとなる画像である。

表6.1は、検出された面の頂点座標の一覧である。表の面番号とは、検出物体（図6.3）の各面にラベリングを施したときの面の番号である。面の数は底面を含んで五面である。また検出物体には四角形が三面、三角形が両側二面である。したがって、面番号1～

表6.1 検出された物体の頂点座標一覧

面番号	頂点の数	X座標	Y座標	Z座標
1	4	38.71	56.83	30.02
		9.29	55.55	0.00
		12.47	7.68	0.00
		42.60	9.09	29.87
2	4	73.97	10.86	0.00
		70.10	59.00	0.00
		38.71	56.83	30.02
		42.60	9.09	29.87
3	4	9.29	55.55	0.00
		12.47	7.68	0.00
		73.97	10.86	0.00
		70.10	59.00	0.00
4	3	42.60	9.09	29.87
		73.97	10.86	0.00
		12.47	7.68	0.00
5	3	38.712	56.827	30.021
		9.285	55.545	0.00
		70.098	59.004	0.00

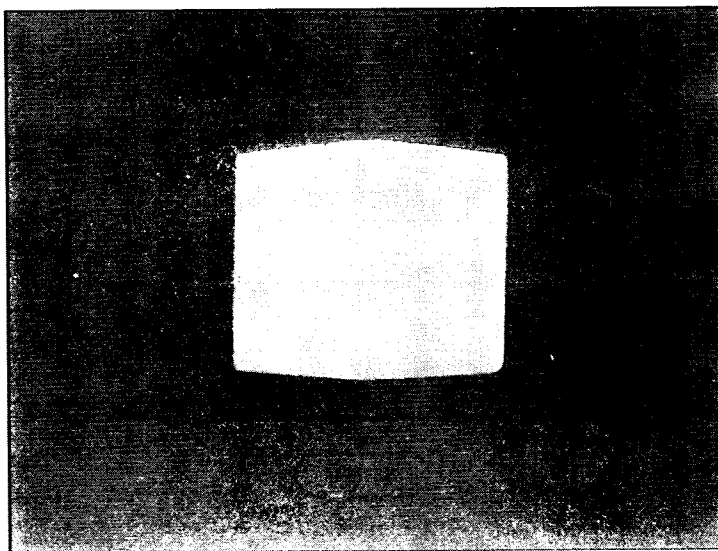


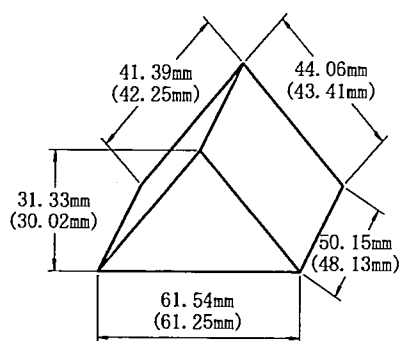
図6.2 CCDカメラでとらえた把持試験用物体の原画像

3は、頂点の数が四つある事から四角形に対応した検出結果であることが分かる。同じように、頂点の数三は、両側の三角形の面であることが分かる。また各面番号の x, y, z 座標は、検出した面の頂点の座標をそれぞれ示している。特に z 座標の値（高さ）に特徴があるので、それに注目すると面番号1と面番号2には0がそれぞれ2箇所ある。つまり頂点が二箇所基準面にある四角形であり、これは検出物体の斜面に対応している部分である。同じく面番号3は底面に対応する。また面番号4と5は側面の三角形部分であり、頂点だけが高さを持っている。

図6.3は、検出距離と実測距離の比較を図にしたものである。

図6.4は、実際に使用した装置の全景である。右の部分が認識部分であり、左側が把持実験を行ったロボットである。

図6.5は、コンピュータにより把持面を認識し、決定した時のディスプレイ表示画面



(カッコ内の数字はプログラムによる実測値である)

図6.3 検出距離と実測距離の比較

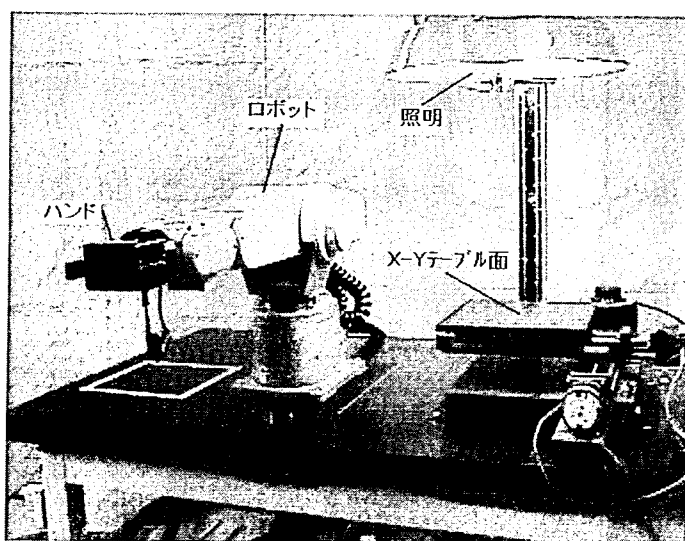


図6.4 装置全景

である。

図6.6は、爪の面と物体の面を一致させ、把持する瞬間の写真である。爪の面と物体の面が一致しているのが分かる。このとき、物体が移動しないよう爪の真中になるように、精度良く把持面の検出をするということも大切なポイントである。

図6.7は、対象とする物体を目標の位置まで運んだところである。この動作は、物体の種分けなどに相当する。

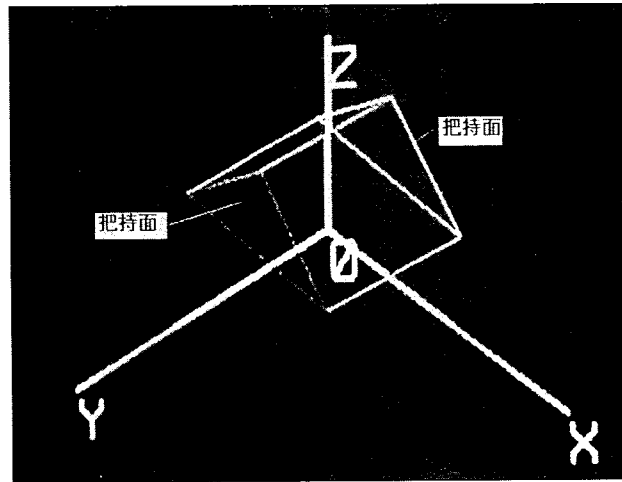


図6.5 コンピュータにより把持面を認識しディスプレイに表示したところ

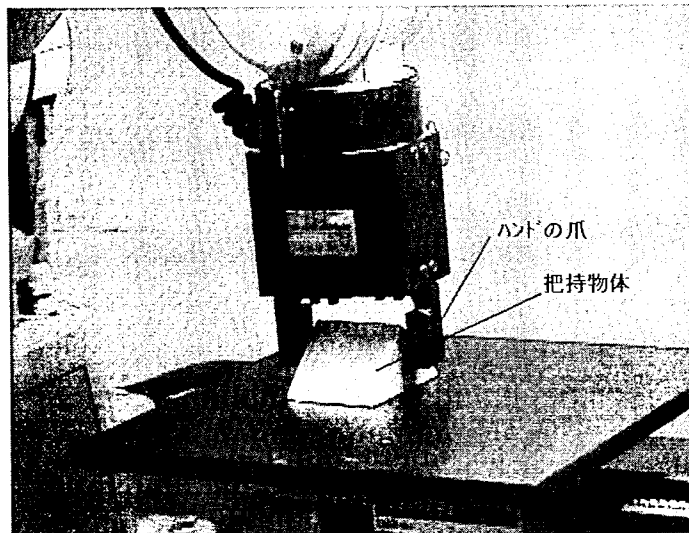


図6.6 爪の面と物体の面を一致させて把持するところ

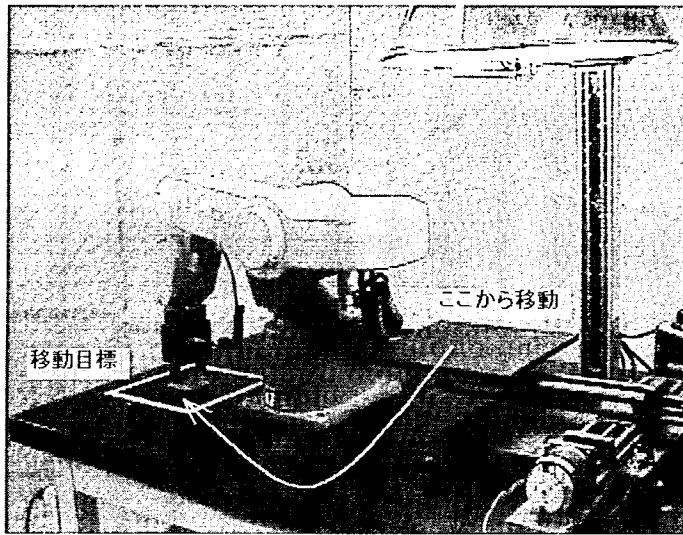


図6. 7 対象物体を目的の位置まで運んだところ

7. おわりに

反射型レーザ距離センサの距離情報と、CCDカメラの二次元情報を利用して、面を構成要素とする物体認識をおこなった。その結果、次のような成果が得られた。

- (1) 反射型レーザ距離センサとCCDカメラの比較的簡便な組み合わせで、面を構成要素とする物体の形状を認識することができる
- (2) 反射型レーザ距離センサの検出精度が高いので、検出形状についても計測的な精度が期待できる
- (3) CCDカメラの二次元データに画像処理を施すことにより、一つの面につき最小三点の距離計測で面を特定する事ができた。
- (4) 空間コード法¹⁾では照射エネルギーが拡散するために検出が困難になるような遠方の対象物体に対して、本方法は特に有効であると思われる。
- (5) 認識結果は、面を構成要素とする物体の認識に有効であり、ロボットによる物体の把持などに応用が可能である。

研究に用いた手法は、平面を構成要素とする物体に対して精度良く認識が可能であったが、今後その応用範囲を広くするための改善が必要である。また、死角の改善、傾斜面における計測の制限、輝度に関する対象物体の制限などの欠点を補う必要がある。一例として、人が物を見るとき、視点を変えてみるという動作に相当する機能追加について検討する必要がある¹⁴⁾。また、CCDカメラの解像度は一様でありダイナミックレンジが狭いのに対し、人間など生物は対象をよりよく観測するために解像度の最も高い部分（人間の場合中心窩）があり、その部分で対象をとらえている¹⁵⁾。中心窩が最も解像度が高いならば、分解能も高いのではないかなどの理由から、今後は次のような課題を検討している。

- (1) 曲面の認識にはたくさんの距離情報が必要とされているため、曲面を必要最小限の情報から推測、認識する方法について検討する。

- (2) マルチセンサ化による死角改善及び、検出精度向上の可能性について検討する。
- (3) 距離検出精度、認識対象の形状、ルーフエッジの検出方法が、形状計測精度に与える誤差の度合いについて因果関係を明確にして全体の検出精度を向上する。
- (4) CCDカメラの画像に部分ごとに重みづけをすることにより、検出精度の向上が期待できないか検討する。

謝辞

この研究は、1996年度「大学特別研究費 A」の助成を得て、電気工学科助手大矢博史が明星大学理工学研究科修士課程の1997年卒業生である下山貴弘氏との共同研究で行なった研究です。また、この場をお借りして研究の機会を与えてくださった下山貴弘氏の指導教授である藤井新兵衛博士を始め電気工学科の諸先生方、大学の方々および、研究、実験に対し多大なる協力をしていただいた、藤井研究室の大学院生、渡部仁志君、保泉誠司君、平成7年度と成8年度の3D班卒業研究を行った学部学生の皆さんに心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 木下源一郎, 出澤正得: 環状光投射形ロボット用近接センサー距離情報と表面傾斜状態の取得一, 電気学会論文誌, Vol. 107-C, No. 5, pp. 436-442, 1987
- 2) 梅田和昇, 新井民夫, 田淵真: 距離画像と濃淡画像との融合の戦略と基礎アルゴリズム, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集No1 No. 1284, pp. 297-298, 199
- 3) 岡田伸廣, 長田正: 異種ビジュアルセンサを組み合わせたアクティブビジョンシステムとそのパーツピッキングへの応用, 日本ロボット学会論文誌 Vol. 14 No. 4, 1996
- 4) 井口征士, 佐藤宏介: 液晶レンジファインダ, 信学会論文誌, Vol. 71-D, No. 7, p. 1249, 1988
- 5) Berthold Klaus Paul Horn: Robot Vision, McGraw-Hill Book Company, pp. 469 ~500, 1986
- 6) J. K. Aggarwal, L. S. David & W. N. Martin: Correspondence processes in dynamic scene analysis, IEEE Proc. Vol. 69, No. 5, pp. 562-572
- 7) 平成6年度藤井研究室卒業論文: ロボットの知能化に関する研究
- 8) 下山貴弘, 大矢博史, 藤井新兵衛: レーザ距離センサとCCDカメラを用いた三次元物体の認識, 平成8年電気学会全国大会講演論文集 [3] No. 575, pp. 3-53~3-54, 1996
- 9) 谷内田正彦: ロボットビジョンの設計, 日本ロボット学会論文誌 Vol. 4, No. 4, pp. 72-78, 1986
- 10) 谷内田正彦: ロボットビジョンの概要と今後の展望, 日本ロボット学会論文誌 Vol. 10, No. 2, pp. 2-7, 1992
- 11) 鈴木良, 小谷信司, 森英夫: 広ダイナミックレンジ画像の合成と野外道路環境での利用, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集 [3] No. 3A1-5-5 (II), pp. 941~942, 1996
- 12) 内海章, 八木康史, 谷内田正彦: 視覚センサにより得られた三次元線分情報からの面情報の獲得, 日本ロボット学会論文誌, Vol. 13, No. 8, pp. 85~92, 1995
- 13) 大矢博史, 下山貴弘, 藤井新兵衛: レーザ距離センサとCCDカメラを用いた物体の把持, 平成9年電気学会全国大会講演論文集 [3] Vol. 13 No. 602, pp. 3-76~3-77, 1997
- 14) 脇迫仁, 鎌田清一郎, 河口英二: 曲率符号による距離画像領域分割法の考察, 日本ロボット学会誌 Vol. 13 No. 4, pp. 117~125, 1995
- 15) 喜多伸之: 中心窩能動システムにおける注視点シフトについての考察, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集 [No. 3] No. 3M2-5-8 (II), pp. 947 ~948, 1996
- 16) 八木伸行, 井上誠喜, 林正樹, 中須英輔, 三谷公二, 奥井誠人, 鈴木正一, 金次保明: C言語で学ぶ実践画像処理, オーム社, 1994

- 17) 河西朝雄：C言語によるはじめてのアルゴリズム入門，技術評論社，1992
- 18) 矢尻豊寿：パソコンによる最新画像処理入門，技術評論社，1996
- 19) 井口征士，佐藤宏介：三次元画像計測，昭晃堂，1994
- 20) 谷内田正彦：ロボットビジョン，昭晃堂，1995