

偏光情報から幾何モデルに基づいて光沢物体を認識する一手法

越川和忠 寺師泰代 白井良明

(電子技術総合研究所)

A Model-based Recognition of Glossy Objects Using Their Polarizational Properties

Koshikawa, K. Terashi, Y. Shirai, Y.

(Electrotechnical Laboratory)

A model-based approach to recognition of glossy objects is presented. Normals of surface patches are obtained by analyzing the polarizational state of the observed rays under illumination of light sources of circular polarization. Then, solid models are examined to find the one which matches the observed normals in their position and attitude by coordinate transformation.

0. はじめに

物体認識で扱われる対象物は光沢の少ない物体であることが多い。物体面の明るさの分布パターンを見ると、一定の照明下では、明るさの変化は、面に沿って連続で、輪郭線、稜、陰影との境界などの特殊な所で不連続になる。これらの性質が形状を知る手がかりとなる。Photometric stereo¹⁾では、明るさが照明方向に対する面の向きによってある既知の変化とする性質を利用して面の向きを求めている。また、測定環境を設定できる場合には、光切断のように、形状との対応の得やすいパターンと物体面に投じて解析する方法を採ることもできる。

ところが、対象物が非常に滑らかな面をもつ物体であると、著しい正反射が生じるために、見えた明るさの分布パターンは上に述べたものとはかなり異なる性質をもつ。したがって、このような物体(以下「光沢物体」とよぶ)の形状は通常の方法では求めにくい。

そこで、光沢物体の面の方向を観測された正反射光から求める研究がある。

Ikeuchi & Horn²⁾は、輝度と部位の対応が既知の面光源を用い、対象面に生じる光源の鏡像の輝度分布から面の向きを求める方法で、金属機械部品の形状を再構成している²⁾。また、筆者の一人は、正反射が入射角に依存した偏光変化を伴う性質に着目して、円偏光投光下で物体面から観測される正反射光の偏光状態を調べることにより、反射面の向きを知る方法を提案し、特にプラスチックやラッカー塗装された面をもつ物体の場合に有用であることを示した³⁾⁴⁾。その方法では、正反射光が観測された有限個所での法線方向が得られるだけであるから、その情報だけから直ちに対象物の形状を再構成することは期待できない。しかし、存在する可能性のある物体の形状の記述をあらかじめ持ち、それを物体のモデルとすることができるときには、そのモデルに基づいて、データと矛盾のない対象物の種類、位置、向きを探すという方式を採ることにより、少ないデータを有効に利用した認識手法を期待できる。その場合、モデル化の方法およびデータとモデルとの照合の方法

が重要な課題となる。

ここでは、GEOMAP⁵⁾により生成した形状モデルを利用し、偏光測定から得られた方向をもつ法線が観測された位置にあるような物体の種類と位置、姿勢を求めることによる光不物体の認識手法について報告する。

1. 偏光と面方向の情報

1.1 面の方向と座標系

図1で、 i , s , n は、入射光、反射光、反射面の法線、 $O-\xi\eta\zeta$ は観測座標系で ξ 軸が s に重なるようにとる。入射面が η 軸に対してなす角を φ ($-180^\circ < \varphi \leq 180^\circ$)、反射角(入射角に等しい)と 2ψ ($0^\circ \leq 2\psi \leq 90^\circ$)とすると、 n の観測座標系成分は、

$$(-\sin \varphi \sin 2\psi \quad \cos \varphi \sin 2\psi \quad \cos 2\psi)$$

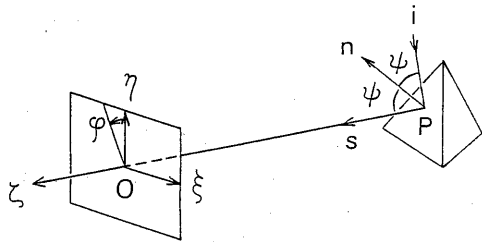


図1 観測座標系

1.2 反射面の偏光特性

偏光要素の特性は、互に直交する二つの主軸方向に関する振幅透過率と透過後両軸成分間に生じる位相差で表わされる。反射面は、光路に置かれた偏光要素と見ると、入射面に垂直および平行な方向が二つの主軸で、それぞれの振幅透過率 p_\perp , p_\parallel および位相差 δ が、表面材質の屈折率および入射角によって変化する。ここでは、実測しやすい量に入射角と関係づけられればよいから、 p_\perp , p_\parallel , δ から次のように定義したパラメータを用いる:

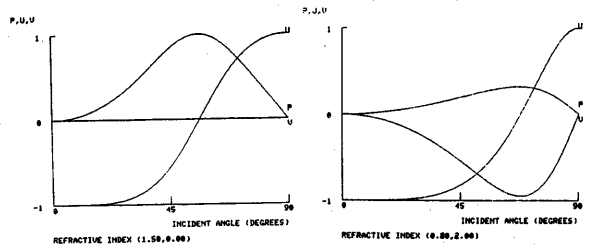
$$P = \frac{p_\perp^2 - p_\parallel^2}{p_\perp^2 + p_\parallel^2}$$

$$U = \frac{2p_\perp p_\parallel}{p_\perp^2 + p_\parallel^2} \cos \delta$$

$$V = \frac{2p_\perp p_\parallel}{p_\perp^2 + p_\parallel^2} \sin \delta$$

例として、図2に、屈折率が(a)1.5および(b)0.8-2.0iの場合の P , U , V と 2ψ の関係を示す。(a)は非金属にみられ V が常に0, (b)は金属で曲線がより 90° 側にかたよっている。

入射面が η 軸と φ の角をなすならば、この偏光要素が方位 φ に置かれていることに相当する。



(a)

(b)

図2 2ψ に対する P , U , V の変化

1.3 偏光の記述と面の向き

ここでは、実測しやすく機械的处理に適したStokesパラメータ I , L , X , O を用いて偏光状態を記述する(注)。

今、光源に円偏光を送れば、入射偏光の方位は考慮しなくてよいから、反

(注) 方位 0° , 90° , 45° , -45° の各直線検光子, 右, 左円検光子を介した観測光の強度を, それぞれ, I_0 , I_{90} , I_{45} , I_{-45} , $I_{右}$, $I_{左}$ とすると, Stokesパラメータ I , L , X , O は直観的に次のように定義できる:

$$I = I_0 + I_{90}$$

$$L = I_0 - I_{90}$$

$$X = I_{45} - I_{-45}$$

$$O = I_{右} - I_{左}$$

射光の偏光状態は φ と ψ とで定まる。光源が右円偏光のとき、反射光の L , X , O は, P , U , V および φ を用いて次のように表わすことができる³⁾:

$$\begin{aligned} L/I_p &= P \cos 2\varphi - V \sin 2\varphi \\ X/I_p &= P \sin 2\varphi + V \cos 2\varphi \\ O/I_p &= U \end{aligned}$$

ここに, $I_p = \sqrt{L^2 + X^2 + O^2}$ で, これは全強度 I のうちの純偏光成分の強度を表わす。

1.4 Stokes パラメータの測定方法

いろいろ知られているが, ここでは, 画面内の多数の点ごとに組織的に求める必要があるので, 次の方法を採用する。すなわち, 方位 θ の $\lambda/4$ 波長板および方位 0° の直線偏光板を介した強度 J は,

$$J = I + L \cos^2 2\theta + X \cos 2\theta \cdot \sin 2\theta - O \sin 2\theta$$

で表わせる³⁾。この設定で, $\theta = 22.5^\circ M$ ($M = 0, 1, \dots, 7$) でサンプルした値 J_m を用いて,

$$\begin{aligned} L &= J_0 - J_2 + J_4 - J_6 \\ X &= J_1 - J_3 + J_5 - J_7 \\ O &= -J_2 + J_6 \end{aligned}$$

1.5 法線方向決定の手順

以上を整理すると, 法線を求める手順は次のようになる。

0. P , U , V を ψ の関数としてあらかじめ求めておく。
1. J_0, J_1, \dots, J_7 を実測する。
2. L, X, O を計算する。
3. I_p を計算する。
4. I_p が設定した閾値以下のときは, 有効なデータが得られなかったことを意味し, 法線は求められない。

以下, 閾値を越えたとき,

5. $O/I_p = U$ となる ψ を求める。
6. その ψ に対応する P, V を求める。
7. P, V が 0 でなければ, 次の式

により, φ_1, φ_2 を算出し, 二者のうち, 光源側を指す方を φ として採る。

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \left(\tan^{-1} \frac{X}{L} - \tan^{-1} \frac{V}{P} \right)$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} \varphi_1 - 180^\circ & (\varphi_1 > 0) \\ \varphi_1 + 180^\circ & (\varphi_1 \leq 0) \end{cases}$$

8. ψ, φ により n が定まる。

ψ に対する P, U, V は, 屈折率が既知ならば Fresnel の式を用いて解析的に求めることができ, 未知ならば実測により求めておくことができる³⁾。たとえば, $\varphi = 0^\circ$ の入射面とすると $L/I_p = P, X/I_p = V, O/I_p = U$ であるから, この面内で ψ を変えて実測して補間すればよい。

ψ が 0° または 90° では, P および V が, したがって L も X も, 同時に 0 になるため, φ が定まらない。しかし, ψ が 0° のときは φ によらず n は (0, 0, 1) に定まる。 ψ が 90° のときは光源と直接見ていることになるから, 観測方向に輪郭線の背景のあることがわかる。

2. データ採取システム

データ採取システムの概念図を図3に, 実際に行なった実験の形態を図4に示す。

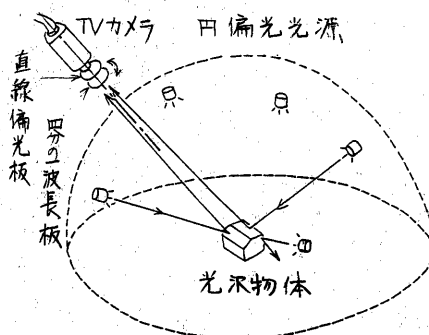


図3 データ採取システム

対象物は単体で机の上に置き、これに周囲から右円偏光を投じて、TVカメラで観測する。

光源には30W白熱電球使用の顕微鏡落射照明鏡筒(口径30mm)を利用した。直流で点灯し、フィラメント像を消すため拡散板を介してからホウロイド右円偏光板を透過させる。これを3~4基、対象物から正反射光としての光源像を観測できるように周囲に適宜配置した。

TVカメラから対象物までの距離はレンズの開口や対象物の寸法に比べて十分大きく、したがって、TV画面は観測されるどの正反射光に対しても垂直とみなし、この面を共通の偏光参照面にとる。すなわち、画面の水平方向を0°として、 $\frac{1}{4}$ 波長板を $\pm 2.5^\circ$ ずつ回転させて8枚の画像を撮り、画面内の各点ごとに I_p , φ , ψ を計算して、 I_p , φ , ψ の分布画像を作る。

図5は、黒いラッカーで塗装された円錐台を机の上に転がした状態から観測された8枚の偏光サンプル画像と I_p 分布画像である。用いたTVカメラはMOS型固体カメラKP-120で、全画面 256×256 のうち、中央部64

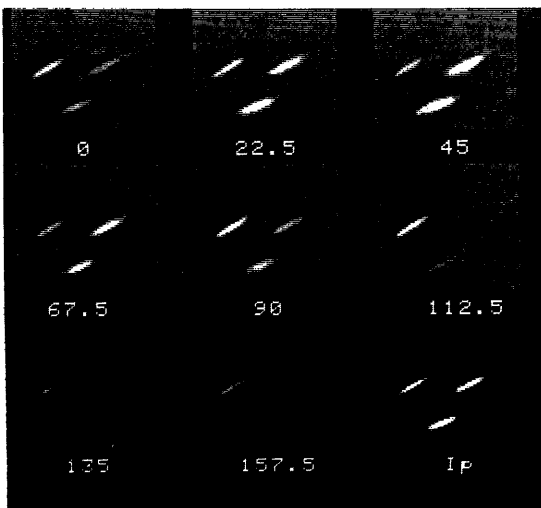


図5 偏光サンプル画像

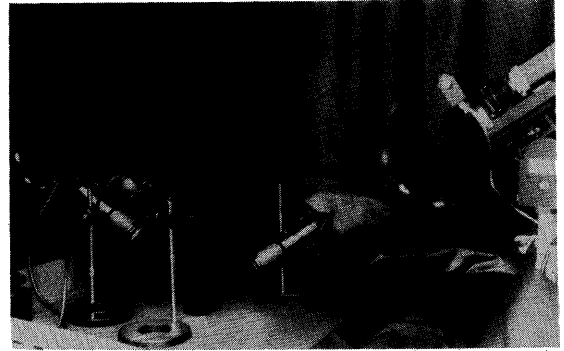


図4 実験配置

$\times 64$ を使用した。

画面内で信頼できる法線が得られる部分と次のようにして求める。まず、 I_p 画像の特徴として、光源像の部分は大きな値が集まる「島」を形成する。そこで、 I_p の最大値に対して一定の比率までの I_p をもつ画素を残して島を取出す。さらに、各島内で同様の操作を施して整形する。

このようにして得られた島は必ずしも一つの面に対応しているとは限らず、稜を持したいくつかの面から成るかもしれない。これと分離するには、島内の φ , ψ を調べればよい。

ここでは本アプローチの第一段階として、面と島が一対一で分離できた場合に、島中央点の位置およびそこで得られた φ , ψ から定まる法線を認識のための情報として利用する。図6は、図5の場合にこのようにして抽出された法線を示す。なお、屈折率は1.5とした。

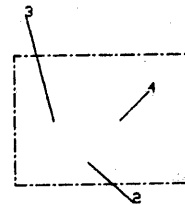


図6 抽出された法線情報

3. 内部モデル

対象物の形状モデルは、GEOMAPにより生成する。その結果、各物体の面、稜、頂点およびそれらの接続に関する情報が内部に用意される。平面方程式および頂点位置を表わすための座標系は、各物体に固有で、生成時、空間座標系に一致したものがとられ、これが標準の姿勢となる。

これらのモデルに対する回転、移動、表示その他種々の操作は、GEOMAPのもつ機能を用いて行なうことができる。

なお、使用した version では、曲面体は多面体で近似している。

4. 認識方式

物体認識の問題を、ここでは、観測された法線の向きと位置をもつような面の組がモデル中のどの物体のどの面の組であるかを求め、物体をそのような位置、姿勢に置いてやるプロセスに帰着する。

基本的には一つのモデルに対して次のステップで調べる：

① 観測された法線間の角度の関係が一定誤差以内ですべて合う面の組を探す。

そのような組がなければ次のモデルに移る。

② 標準の位置、姿勢にあるモデルのそれらの面の法線が観測された各法線の方に合うような回転変換を求める。

③ それらの各面が、対応する観測法線位置をそれぞれに含むような平行移動を求める。

画面内の法線位置間の距離の関係が合わなければ①に戻る。

①では、まず、第一の法線に対応す

る面の候補をとり、次に、第二の法線となす角の合う面を見つける。更に、第三の法線が前二者となす関係と合う面を探し、もし、第四の法線も観測されていれば、同様に前三者との関係の合う第四の面を探す。

③において、観測データから得られる反射点の位置は画面内の位置であって奥行はわからないから、平行移動のベクトルは一義に定まらず、ある二次空間の範囲を形成する。

机面に密着して置かれている場合

①の処理を無条件に行なうと、物体の面の数が増すにつれて調べるべき組合せの数が増大する。そこで、対象物や環境設定に拘束のある場合には、その条件を有効に利用して処理の高速化を図る必要がある。ここでは、対象物がいずれかの面を机面上に密着させて置かれている場合をとりあげる。

まず、モデルにおいて、各面が机面に密着しているかどうかをあらかじめ調べて印をつけておく^(注)机面はあらかじめ知ることができるから、その法線の符号と反転したものを第一の法線として利用し、対応する面の候補は机面に密着している印のついたものだけ拾えばよい。

また、③における平行移動の範囲は机面に平行な面内の二次元空間になる。

(注) これを行なうには、一つの面に対してその外側に頂点が一つでも存在すればその面は密着しえないことを利用する。GEOMAPによるモデルは、各面が平面方程式をもち、すべての面あるいは頂点を簡単にたどれる構造をもつので、この処理は容易に行なえる。

5. 実験例

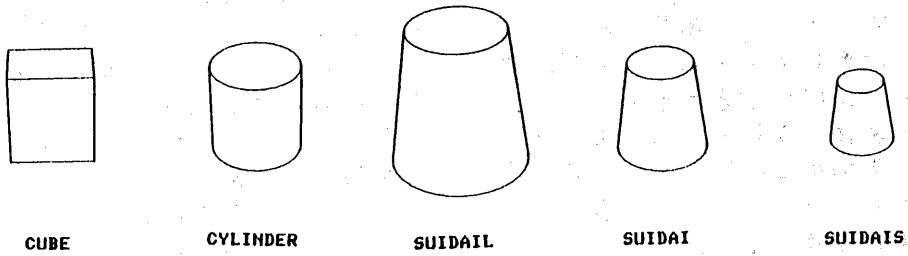


図7 照合に用いた内部モデル

2. で例にあげた円錐台の位置と姿勢を偏光データから抽出した法線情報を用いて求めた場合を例として示す。

図7に示す直方体, 円柱, 大中小の円錐台が内部モデルとして登録してある。認識プログラムでは, モデルを順にとり出して調べ, 条件が合うと, 標準姿勢から回転, 机上載せ, 平行移動により観測位置に合わせた過程を表示する(図8)。さらに, 結果を見やすい図に表示し直す(図9)。この例で円錐部分は3角錐で近似してあり,

角度間照合時の許容誤差は 4.5° である。平行移動は, 平行移動範囲の重心に対して行なった。図9で, 一点鎖線の枠は 64×64 画面の対応範囲, ハッチ部分は利用した観測光の得られた面, ハッチ部分に重なっている点線三角形は平行移動の範囲を示す。

一つ候補が見つめると, 内部にやはり GEOMAP のデータ構造で結果が保存され, つづいて, 同じモデルで他の場合を調べるか, 次のモデルに移るか, 角度許容誤差を変えてはじめてから調べ

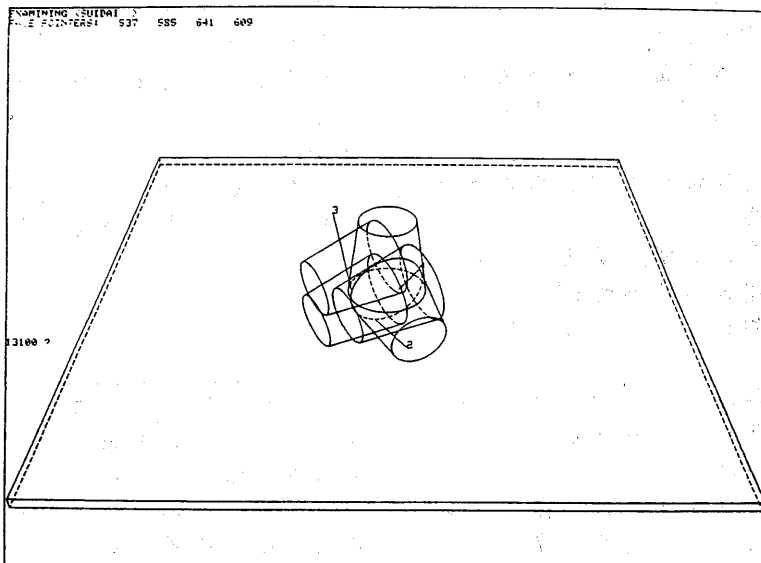


図8 円錐台の姿勢, 位置合せの過程

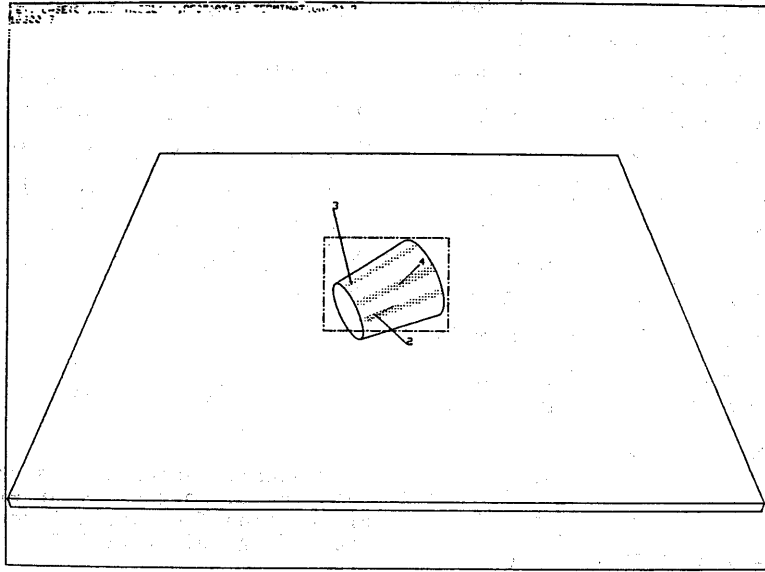


図9 円錐台の認識結果

直すか、打切るかのいずれかを実行する。

対象に用いた円錐台のモデルは中円錐台（図7のSUIDA1）である。大中小の円錐台はいずれも角度の関係では合格するがサイズの点で中だけが残る。サイズの点で小円錐台が棄却された結果を図10に示す。

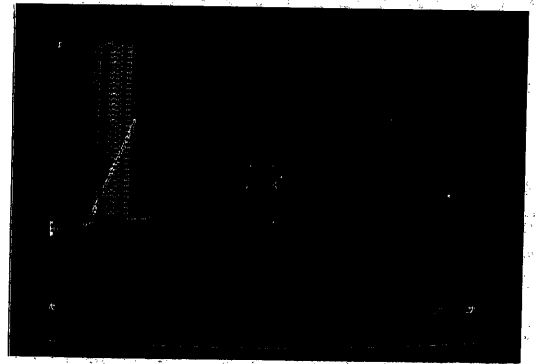


図10 サイズ不一致の例

6. 検討

正反射の偏光変化を利用して法線の向きと存在位置を求め、これを内部モデルと照合することにより、光沢物体の種類と位置、姿勢を同定する手法を述べ、簡単な立体の場合で実験した結果を示した。以下、検討事項を箇条書きする。

データ採取に関して

1. 面固有の光学的性質を利用するの

下、その P 、 L 、 V が既知でしかもそれらの値から逆に n を見出しやすい特性をもつ場合に限られる。この点、プラスチックや光沢紙などの非金属は屈折率が似た値をもち特性も比較的扱いやすい。

2. 正反射光が情報のにない手であるので、なるべく多くの部分からそれを観測できるように光源を周囲に配置する必要がある。しかし、個々の光源を同定する必要はなく、また、拡散反射と異なり他の光源の影響を無視できる

ので、光源を移動させて測定した結果をそのまま追加することが出来る。

3. 偏光板や波長板は必ずしも理想的ではない。特に波長板の位相差が 90° になるのは特定の波長に対してであって、これを白色光で使用する場合には波長のちがひによるずれを込みにした測定を行なっていることになる。しかし、TVカメラの画像を利用するわれわれの目的には差支えないと思われる。ただし、用いたTVカメラは入出力の線形性が良好で、この種のアナログ測定には通している。

4. 二つの平均値のいずれを採用するかは、ここでは、観測部分のそこに一番近い光源で外側から入射光を受けていると仮定して決めた。しかし、一般にはいずれの場合もあるので、その組合せを調べる方法を確立する必要がある。

認識方式に関して

5. 高速化を図る余地は多い。たとえば、島の島の形状および島内の法線方向の分布の様子から、面の境界の存在や、平面、母線、凸面、凹面を区別してその情報を利用する方法を現在検討している。

6. 角度、位置の関係が共に合格しても、その位置、姿勢のとき、実際にはいずれかの面が自分自身に隠されるかもしれない。平行移動が一意的でなく範囲をもつため、この判断のための処理は簡単ではなく、まだ用意していない。

7. 物体認識でまず必要なのは姿勢を知ること、その後の平行移動は比較的やさしい。偏光データから得られるのはむしろ姿勢に関する情報であり、平行移動の決定は輪郭など存在限界の情報をもつデータを利用する方がよい。

おわりに

光沢物体の形状情報として部分的な法線を偏光測定から求めたが、その情報を利用した認識方式は最早偏光とは無関係である。したがって、テクスチャその他のデータから有限個数の法線が得られた場合にも、この認識方式を適用できる。

参 考 文 献

1) Woodham: Photometric stereo: a reflectance map technique for determining surface orientation from image intensity, Proceedings of SPIE(1978)

2) Ikeuchi & Horn: An application of the photometric stereo method, 6-th IJCAI (1979)

3) Koshikawa: A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects, 6-th IJCAI(1979)

4) 越川: 反射偏光を利用する面方向検出法, 計測自動制御学会論文集, 18-10(1982)

5) Kimura & Hosaka: Program package GEOMAP reference manual (preliminary version)(1977)