コンピュータビジョン 75－3
（1991. 11. 22）

# 正射影対応点による移動物体の認識方式

鎌田 洋　久保田 孝
株式会社 富士通研究所

正射影面における移動物体の特徴点の対応づけから、剛体の動きと形状を認識できる新方式を提案する。本方式の特長は、観察情報のみによる解の存在の判定条件と解が存在する場合の統一的な線型解法である。一般の三次元移動物体については、従来より議論されている４特徴点３時点という観察状況のもとで新認識方式を示す。また平面上の移動物体については３特徴点３時点による認識方式を示す。さらに、平面上の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、２特徴点や２時点からの認識方式を示す。計算機による方式の検証と共にパソコンでも５ミリ秒以下の平均処理速度を確認した。

# Recognizing Moving Objects from Orthographic Views

Hiroshi Kamada and Takashi Kubota

Pattern Information Processing Laboratory,
Fujitsu Laboratories Ltd.
1015 Kamikodanaka, Nakahara-ku, Kawasaki 211, Japan

We developed algorithms to recognize moving rigid objects from orthographic views using point correspondence. Criterias to determine whether a unique solution exists can be found using orthographic views alone. We also developed unified complete linear algorithms to recognize moving objects. We propose new algorithms to recognize general objects using 4-point correspondence over three views, and objects on a plane using 3-point correspondence over three views, and constant-speed objects on a plane using 2-point correspondence, and objects containing right angles on a plane over two views. We verified our algorithms, and confirmed that our process averages less than 5 milliseconds on a personal computer.

## 1．はじめに

移動物体の認識はコンピュータビジョンの中心的な課題の一つであるが，大規模な装置や長い処理時間を要するのが通常であり，産業分野に応用しにくいのが現状である。そこで我々は，産業分野に応用しやすい認識方式の構築を目指して，１台のＴＶカメラで捉えた移動物体の特徴点の画面上での対応づけを用いて移動物体を認識する方法の研究を採り上げた。

物体モデルは産業分野で一般的な剛体とした。実画像から安定に抽出できる特徴点は少なく，特徴点を抽出する処理量は特徴点数に従って増加する。従って，画像面は中心射影モデルよりも少ない特徴点で認識できる正射影モデルとした。

この研究分野では最初に，４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認識できるという原理が提案され，非線型な認識解法[(1)(2)]が示された。続いて，線型な認識解法の研究[(3)(4)]として，認識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。

本稿では正射影面における観測情報のみによる認識解が存在する判定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。

また，我々の日常生活では床の上の移動など水平面上での移動が多く見られるので，平面上の移動物体の認識問題を検討した。本稿では，平面上の移動物体については，さらに少ない対応点により認識できることを明らかにし，完全な線型解法と解の存在の判定条件とその幾何学的な意味づけを明らかにする。

## 2．三次元移動物体の認識方式

三次元移動物体の４特徴点を３時点で対応づけた状況のもとで認識できる新しい線型解法を提案する。

### 2．1　認識問題の定式化

正射影面による三次元移動物体の観測状況を図１に示す。正射影面にＸＹ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。

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。

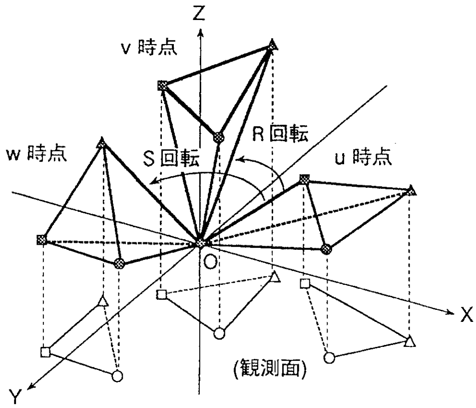



図１　三次元移動物体の観測

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１のように原点を中心として回転する移動物体の認識問題に還元できる。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)を$u_i$，$v_i$，$w_i$で表す。

さらに，特徴点ｉのＸＹＺ座標は順に第２添字ｊ(j=1, 2, 3)を付けることによって表す。例えば，u時点における特徴点ｉの座標は$u_{ij}$と表す。これらは方程式

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

の関係がある。三次元移動物体の認識問題は，方程式(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。

### 2．2　認識できる条件

認識解が求まるための，３次元座標系における幾何学的条件を定理１に示す。

【定理１】　認識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。

幾何学的条件①②は従来研究[4] で得られたものである。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，実際に認識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認識できるための判定条件を定理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。

行列Mの最後行を除去した部分行列をM’で表し，Mが行ベクトルであるときは，Mから最後列を除いた部分ベクトルをM’で表した。

## ２．３ 認識解

統一的な線型解法を求める準備として補題１，２をまず示す。補題１は行列の逆転公式[5] から得られる。

**【補題１】** 回転行列Rの成分値 $r_{ij}$ は，その成分がある行と列を除いた部分行列 $R_{ij}$ から式

$r_{ij}=(-1)^{i+j}\ |R_{ij}|$ により求まる。

**【補題２】** 判定条件③が成り立つとき，ｉ）ii）が成立する。

ｉ）ｐ（＝１または２）に対して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，行列

$\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1' & v_2' & v_3' \\ w_{1p} & w_{2p} & w_{3p} \end{bmatrix}^{-1}$ の１～２行，１～２列からなる部分行列が正則である。

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

ii）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。

認識解を求める過程ではii）を直接用いる。ｉ）はii）の証明で用いる。認識解を求める具体的手順を定理３に示す。

**【定理３】** 判定条件③が成り立つとき，下記の手順で認識解が求まる。

Ⅰ．準備：④を満たす $p(=1,2)$ 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 $h(=1,2)$ を選ぶ。

$\alpha_i$ $(i=1,2)$，$\beta$，$\gamma$ を下式により計算する。

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

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

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

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。

$a_{i3}\neq 0$ のとき，$\begin{bmatrix} a_i' \\ \beta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \gamma_i \end{bmatrix}$

$a_{i3}=0$ のとき，$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} / \gamma_i$

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。

$r_{13}\neq 0$ のとき，$-\beta_1\ r_{13}/\beta_2$

$r_{13}=0$ のとき，$\pm(1-r_{21}^2-r_{22}^2)^{1/2}$

残りの $r_{3i}(i=1,2,3)$ は，$r_{3i}=(-1)^{i+1}\,|R_{3i}|$ で求める。

Ⅲ．回転Ｓの計算：ｐ行目を次式で求める。

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

$a_3$ を $\begin{bmatrix} R' \\ s_p \end{bmatrix}^{-1}$ の３行目として求める。

$u_{i3}(i=1,2,3)$ を $a_3 \begin{bmatrix} v_i' \\ w_{ip} \end{bmatrix}$ として求める。

$q\neq p$，$q=1,2$ 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。残りの $s_{3i}(i=1,2,3)$ は，

$s_{3i}=(-1)^{i+1}\,|S_{3i}|$ 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。

$v_{i3}=r_3\ u_i$，$w_{i3}=s_3\ u_i$

**証明** Ⅰ．準備：④を満たすｐ（＝１，２）を１つ選ぶ。(1)から得られる式

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

の両辺を $A\equiv(a_{ij})$ とおくと $\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$ が求まる。

$$式\quad \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ s_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

と回転行列の行が正規直交系を成す性質から，R’に関する線型方程式(4)(5)(6) を得る。ただし記号は (7)の通りである。

$$[a_{i1}\ a_{i2}]\begin{bmatrix} r_{1i} \\ r_{2i}\end{bmatrix} = \alpha_i \quad (i=1,2) \tag{4}$$

$$[\beta_1\ \beta_2]\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2\end{bmatrix} = \gamma \tag{5}$$

$$[\gamma_1\ \gamma_2]\begin{bmatrix} r_{i1} \\ r_{i2}\end{bmatrix} = \beta_i \tag{6}$$

$$\alpha_i \equiv (1+a_{i1}^2+a_{i2}^2-a_{i3}^2)/2 \tag{7}$$

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

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

(4)(5)(6) が成立することを以下に示す。(3) をij成分(i=1,2;j=1,2,3) について記すと，式

$$\sum_{k=1}^{2} a_{ik}r_{kj} + a_{i3}s_{pj} = \delta_{ij} \tag{8}$$

となる。(8)を変形すると式

$$a_{i3}s_{pj} = \delta_{ij} - \sum_{k=1}^{2} a_{ik}r_{kj} \tag{9}$$

となる。(9)を2乗してjについて加算した

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

を変形すると式(4) を得る。式(8) においてi＝1，2とおいた2式から$s_{pj}$を消去すると式(5)を得る。式(5) を変形した式 $\beta_h r_{hj} = \gamma_j - \beta_i r_{ij}$ (i,h=1,2; i≠h; j=1,2,3) を $\sum_{j=1}^{3} r_{ij}r_{hj}=0$ に代入すると式(6) 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 $\begin{bmatrix}R' \\ s_p\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a_1\\a_2\\a_3\end{bmatrix} = I$ (単位行列) の3列目は，

$\begin{bmatrix} r_{13}\\r_{23}\\s_{p3}\end{bmatrix} a_{33} = \begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}$ である。$a_{33}\neq 0$だから

$r_{13}=r_{23}=0$であり，$R=\begin{bmatrix}U & \\ & \pm 1\end{bmatrix}$ となり条件①に反する。

II．回転Rの計算：(4)と(5) の1，2列目から，

$$\begin{bmatrix} a_i' \\ \beta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}r_{1i}\\r_{2i}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\alpha_i\\\gamma_i\end{bmatrix} \quad (i=1,2) \tag{10}$$

$\begin{vmatrix} a_i' \\ \beta\end{vmatrix} = -a_{i3}\begin{vmatrix}a_{11}&a_{12}\\a_{21}&a_{22}\end{vmatrix}$ であり，条件④より右辺の第2項は0でないから(10)より

$a_{i3}\neq 0$のとき $\begin{bmatrix}r_{1i}\\r_{2i}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}a_i'\\\beta\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\alpha_i\\\gamma_i\end{bmatrix}$

であり，$a_{i3}=0$のときは(6) より，

$\begin{bmatrix}r_{1i}\\r_{2i}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\beta_1\\\beta_2\end{bmatrix}/\gamma_i$ (i=1,2) である。

$\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}\\r_{21}&r_{22}\end{bmatrix}$が求まった。また，

$r_{13}=\pm(1-r_{11}^2-r_{12}^2)^{1/2}$ である。

(5)の3列目から，$\beta_1 r_{13}+\beta_2 r_{23}=0$

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

$r_{13}\neq 0$のとき，$r_{23}=-\beta_1 r_{13}/\beta_2$

$r_{13}=0$のとき，

$r_{23}=\pm(1-r_{21}^2-r_{22}^2)^{1/2}$

残りの$r_{3i}$(i=1,2,3) は補題1により，式

$r_{3i}=(-1)^{i+1}\,|R_{3i}|$ により求まる。

III．回転Sの計算：(9)においてi＝hとおくと，次式により$s_p$が求まる。

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

$a_3$ は$\begin{bmatrix}R'\\s_p\end{bmatrix}^{-1}$の3行目として求まる。

(2) からの式 $u_{i3}=a_3\begin{bmatrix}v_i'\\w_{ip}\end{bmatrix}$ により

$u_i$ のZ座標である$u_{i3}$(i=1,2,3) が求まる。

(1) を変形した

$\begin{bmatrix}R'\\S'\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}v_1' & v_2' & v_3'\\ w_1' & w_2' & w_3'\end{bmatrix}[u_1\ u_2\ u_3]^{-1}$

から$s_q$ (q≠p; q=1,2)は式

$s_q = [w_{1q}\,w_{2q}\,w_{3q}]\,[u_1\ u_2\ u_3]^{-1}$

で求まる。残りの$s_3$ は補題1により，

$s_{3i}=(-1)^{i+1}\,|S_{3i}|$(i=1,2,3)

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，(1) の一部である式

$v_{i3}=r_3 u_i$，$w_{i3}=s_3 u_i$

により求まる。（証明終）

定理3ではIIにおいて$r_{13}$等が2つの符号を持つことから2つの認識解が求まるが，これらの解は正射影面に関して互いに鏡映関係にある。

## 3．平面上の移動物体の認識方式

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。

## 3．1　一般の場合

### 3．1．1　認識問題の定式化

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。２章に記したように，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。図２はこれをＸＺ平面に正射影したものである。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１として得られる。

【命題１】　平面上の移動物体を認識するには３特徴点を３時点で対応づけることが必要十分である。

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

正射影面で３特徴点を３時点で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。２章と同様に記号を定義する。条件式

$v_i = R u_i,\ w_i = S u_i\ (i=1,2)$　　(11)

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。

### 3．1．2　認識できる条件

認識解が求まるための幾何学的条件が定理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５に示す。

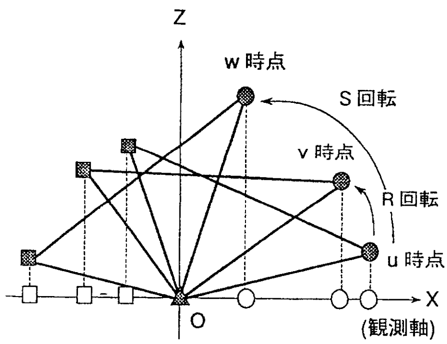



図２　平面上移動物体の観測

【定理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５】　幾何学的条件⑥⑦は，判定条件⑧と同値である。

⑧　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。

### 3．1．3　認識解

認識解を求める具体的手順を定理６に示す。定理６で求めた２つの解は三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

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

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

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：　$a_2$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

$$u_{i2} = a_2 \begin{bmatrix} v_{i1} \\ w_{i1} \end{bmatrix}\ (i=1,2)$$

で求める。$v_{i2}$，$w_{i2}$(i=1,2) は式

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

で求める。

## 3．2　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時点で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。

### 3．2．1　認識問題の定式化

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時点で対応づけることは最低必要である。逆に，2特徴点を3時点で対応づければ，移動物体を認識できることを以下に示す。この状況での正射影面による移動物体の観測を図3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。

3．1節と同様に記号を定義する。認識問題は，

$$v_1 = R u_1,\ w_1 = R^2 u_1 \qquad (12)$$

と定式化できる。Rの回転角をθと表す。

### 3．2．2　認識できる条件

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7に示す。

【定理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。

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8に示す。幾何学的条件⑩は判定条件でもある。

【定理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。

### 3．2．3　認識解

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9により求まる。

【定理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。

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

$$v_{12} = r_2 u_1,\ w_{12} = r_2 v_1$$

### 3．3　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時点で対応づけることにより認識できる線型解法を示す。

### 3．3．1　認識問題の定式化

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時点で対応づけることは最低必要である。

逆に，3特徴点を2時点で対応づければ，移動物体を認識できることを以下に示す。この状況での正射影面による移動物体の観測を図4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。

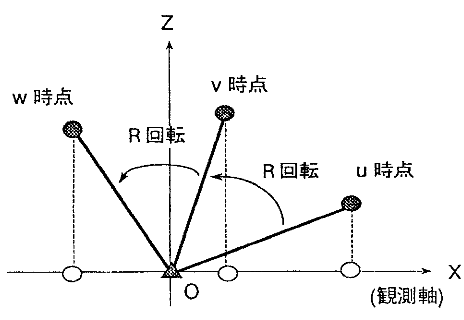



図3　動きが一定の物体の観測

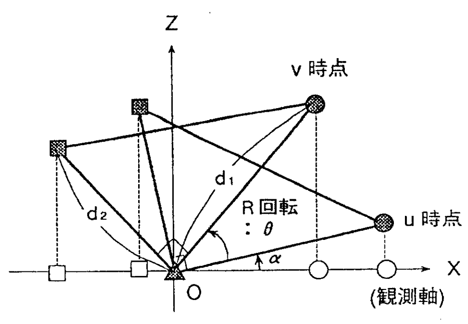



図4　直角の縁がある物体の観測

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

$v_i = R u_i \ (i=1,2)$ (13)

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$d_1$，$d_2$，$\alpha$，$\theta$を求めることが必要十分である。

### 3．3．2 認識できる条件

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

**【定理10】** 認識解が求まるためには，幾何学的条件⑪⑫が必要十分である。

⑪ 対象物の回転角は0度でも180度でもない。

⑫ 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11】** 幾何学的条件⑪⑫は，判定条件⑬と同値である。

⑬ $|u_{11}| = |v_{11}|$，$|u_{21}| = |v_{21}|$でない。

幾何学的条件⑫は判定条件⑭と同値でもある。

⑭ $u_{11}v_{21} + u_{21}v_{11} \neq 0$

### 3．3．3 認識解

認識解を求める具体的手順を定理12に示す。

**【定理12】** 判定条件⑬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。

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

$r_{12} = \pm(1 - r_{11}^2)^{1/2}$ (14)

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

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

$\tan\alpha = (v_{11} - u_{11}r_{11}) / u_{11}r_{12}$ (15)

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

(b) $u_{11} = 0$のとき

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

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

(c) $u_{21} = 0$のとき

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

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

(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$\alpha$は，命題2，3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2】** ベクトル$u_i$ (i=1,2) において，$u_2$が$u_1$を90度回転させたものであるとき，$u_1$のX軸からの回転角度$\alpha$は，X座標$u_{11}$，$u_{21}$の符号と表1により90度の範囲で定まる。従って式(15)により$\alpha$が一意に定まる。

表1．特徴点の位置関係$\alpha$の範囲

| $\alpha$ | 0 | … | 90 | … | 180 | … | 270 | … |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $u_{11}$ | ＋ | ＋ | 0 | － | － | － | 0 | ＋ |
| $u_{21}$ | 0 | － | － | － | 0 | ＋ | ＋ | ＋ |

（$\alpha$の単位：度）

命題2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$\beta$（$=\alpha+\theta$）も90度の範囲で定まる。

命題2の結果を用いると，回転Rの成分$r_{12}$の符号が命題3により決定できる。

**【命題3】** 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2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2により$r_{12}$の符号を決定できる。

表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により$r_{12}$の符号を決定できる。

### 4．検証実験

計算機で作成した対応点を入力とした実験を行い本方式を検証した。また，表4に示すように認識速度が5ms以下であることを確認した。計算機環境としてはパソコンFMR-70(i80386)と言語C（MS-C）を用いた。

さらに，実画像を入力とした認識実験を行った。

表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$r_{12}=0$）

表4．物体の動きと認識速度

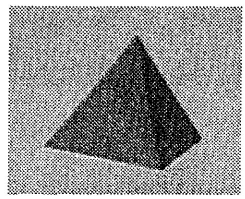
| 物体の動き | | 特徴点数 | 時点数 | 認識速度(ms) |
|---|---|---|---|---|
| 三次元 | | 4 | 3 | 4.6 |
| 平 | 一般 | 3 | 3 | 0.27 |
| 面 | 動き一定 | 2 | 3 | 0.12 |
| 上 | 直角の縁 | 3 | 2 | 0.69 |

図5に実験例を示す。対象物体は一辺が１０cmの正四面体であり，ＴＶカメラからの距離は3m とした。物体を動かしつつ３画像を入力した。（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。実験の結果，物体の動きと形状の認識誤差は10％以下であった。また，平面上の移動物体について垂直エッジを特徴点として実験した時の認識誤差は2 ～3 ％であった。

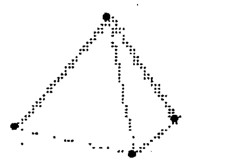
## 5．まとめ

産業分野に応用しやすい認識方式の構築を目指して，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動きと形状を認識する方式の検討を行った。また，実画像への適用のしやすさを目指して，物体の動きや形に一般的な制約を設けることで，必要な対応点の数を減らせることを明らかにした。

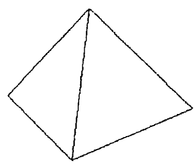
具体的には，一般の三次元移動物体については，４特徴点を３時点で対応づけた状況で，完全な線型解法と解の存在の判定条件を示した。平面上の移動物体については，３特徴点を３時点で対応づけた状況での線型な認識解法を示すとともに，動きが一定であったり直角の縁がある物体については，さらに少ない特徴点や時点間の対応づけによる線型な認識解法を明らかにした。



（ａ）入力画像



（ｂ）処理画像



（ｃ）認識結果

図５　認識実験の例

謝辞　本研究に関して討論いただいた大阪大学の白井良明教授と浅田稔助教授，当社パターン研究部の岩田清部長代理と鳥生隆室長に感謝します。

### 文　献

(1) S. Ullman ："The Interpretations of Visual Motion", MIT Press, Cambridge, MA (1979).
(2) 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) X. Zhuang, T. S. Huang, R. M. Haralick："A Simple Procedure to Solve Motion and Structure from Three Orthographic Views", IEEE Journal of Robotics and Automation, 4, pp.236-239 (1988).
(4) T. S. Huang, C. H. Lee：" Motion and Structure from Othographic Projections", IEEE Trans. PAMI-11，pp.536-540 (1989).
(5) 有馬哲："線型代数入門"，東京図書(1974).