4B−5

平面上移動物体の三次元認識方式

鎌田 洋* 塩原 守人* 柳下 秀樹**
*(株)富士通研究所 **(株)富士通プログラム技研

1．はじめに

移動物体をコンピュータで認識するために，剛体である物体上の特徴点の正射影面での対応づけから，物体の三次元形状を認識する方式の研究がある。最初に4特徴点の3時刻間での対応で認識可能という原理[1]が示された後，線型な解法の研究[2][3]が続いた。特に，我々[3]は統一的な線型解法を示すとともに，物体と観測系が同一平面上にある場合は，さらに少ない対応点で認識できることを示した。

本稿では，平面上の移動物体を平面外から俯瞰した画像から，俯角と物体の三次元形状を認識する方式を示す。本方式の特長は少ない対応点で，しかも線型解法により認識できることである。また，原理的に認識できるための観測値のみによる判定条件についても明らかにする。

2．認識問題の定式化

移動物体の平行移動のうち，正射影面に平行な成分は観測値から直接求められ，垂直な成分は求めることができない。したがって，移動物体の特徴点の一つを正射影面上の原点に移動することにより，原点を通る回転軸を持つ移動物体の認識問題に還元できる（図1）。回転軸の正射影がY軸上にあるように，正射影面上のXY直交座標軸と，これらに直交するZ軸を設ける。Y軸から回転軸までの俯角をψとする。原点以外の特徴点を1つは観測しなければならない。この特徴点と原点の距離の回転軸に平行な成分を

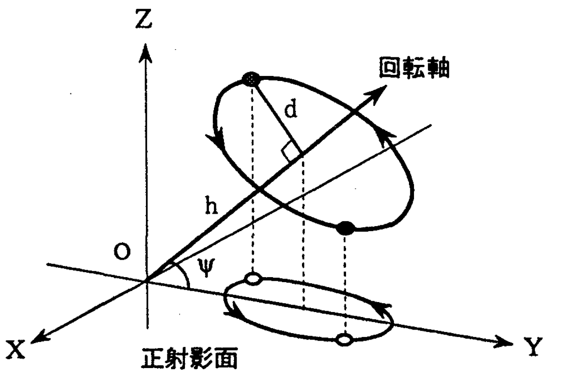

図1． 移動物体の特徴点の軌跡

h，垂直な成分をdとする。特徴点の第i時刻における座標を(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, 3) と表す。正射影面における特徴点の軌跡は，観測系が平面上にない場合は，

$$x^2 + (y - h\cos\psi)^2 / \sin^2\psi = d^2 \quad \text{(楕円)} \qquad (1)$$

であり，観測系が平面上にある場合は，

$$-d \leqq x \leqq d,\ y = \pm h \quad \text{(線分)} \qquad (2)$$

である。

3．俯角の認識方式

俯角を認識するには，特徴点の観測座標から方程式の種類を求めた後，ψを決めなければならない。方程式と未知数の個数の関係から，命題1に示すように，例外的な場合を除いて3時刻の観測が必要である。

【命題1】 移動物体の2特徴点を観測する。

1）1時刻の観測；原理上認識できない。

2）2時刻の観測；

A) Y座標が等しくX座標の絶対値が異なる時；

Y座標≧0ならば$\psi=0$，Y座標＜0ならば$\psi=\pi$

B) その他；原理上認識できない。

3）3時刻の観測；2）A)に該当しない範囲を記す。

A) 2時刻以上のY座標が等しいが，X座標の絶対値が全て等しい時；原理上認識できない。

B) Y座標が全て異なる時；ψを認識できる。

3）B)の場合，定理1に示すように，俯角ψが具体的に計算できる。

【定理1】 3時刻のY座標が異なれば下記が成立する。

$$\sin\psi = \pm\left[(y_1-y_2)(y_2-y_3)(y_3-y_1) / \{x_1^2(y_2-y_3)+x_2^2(y_3-y_1)+x_3^2(y_1-y_2)\}\right]^{1/2} \qquad (3)$$

$\cos\psi$の符号は式(4)による$h\cos\psi$の値から求まる。

$$h\cos\psi = \{(x_i^2-x_1^2)\sin^2\psi + (y_i^2-y_1^2)\} / \{2(y_i-y_1)\} \quad (i=2, 3) \qquad (4)$$

1）$\sin^2\psi=1$の時；$\cos\psi=0$

2）$h\cos\psi\neq0$の時；$\cos\psi$の符号＝$h\cos\psi$の符号

3）その他；$\cos\psi$の符号は2通りある。

証明 観測系が平面上にない場合であり，特徴点の3時刻の正射影座標は式(1)を満たす。dを消去し$h\cos\psi$につい

3-D Recognition of Moving Objects on a Plane
Hiroshi KAMADA, Morito SHIOHARA, Hideki YANAGISHITA
FUJITSU LABORATORIES Ltd.

て解くと，i=2,3 に対して，式(4) を得る。式(4) の2式から左辺を消去すると，

$$\{(x_2^2-x_1^2)(y_3-y_1)-(x_3^2-x_1^2)(y_2-y_1)\}\sin^2\psi =(y_1-y_2)(y_2-y_3)(y_3-y_1)$$

であり，右辺が0でないので左辺の｛ ｝内も0でない。左辺の｛ ｝内を変形して，式(3) を得る。

1）は明らか。2） $h\cos\psi\neq 0$ のとき，$h>0$ だから $\cos\psi$ の符号は $h\cos\psi$ の符号として求まる。3） $\sin^2\psi\neq 1$ より $\cos\psi\neq 0$ であり，$h\cos\psi=0$ だから $h=0$ である。このとき ψ と $\psi+\pi$ は共に解となる。（証明終）

4．移動物体の三次元認識方式

俯角を算出した後の移動物体の3次元形状を認識する2つの方式について述べる。第一の方式は3節で俯角を求めるのに用いた回転軸パラメータを利用する方式であり，第2の方式は既に認識解を明らかにした平面世界の場合[3]に帰着させる方式である。認識できる条件と2方式が適用できる場合を定理2にまとめて示す。

【定理2】 3次元形状認識について1)～3)が成立する。

1） $\psi=\pm\pi/2$ の時；原理上認識できない。

2） $\psi=0$，π の時；平面世界の認識方式[3]

3） $\psi\neq\pm\pi/2$，0，π の時；

3.1) 2特徴点を2時刻で観測；

A)特徴点のY座標が等しい時；原理上認識できない。

B)特徴点のY座標が異なる時；回転軸パラメータの利用方式のみ適用可能

3.2) 2特徴点と2時刻よりも多く観測；

A)同一特徴点のY座標が等しい時；原理上認識できない。

B)Y座標が異なる特徴点がある時；

a)回転軸パラメータの利用方式が常に適用可能

b)特徴点のX座標について所定の条件を満たす時；平面世界に帰着させる方式が適用可能

証明 1）2）明らか。3）移動物体の三次元形状が認識できるためには，同一特徴点に関する方程式(1)から未知数h，dを決定できることが条件となる。3.1)A)と3.2)A)の場合は，同一特徴点に関する方程式(1)が同一となり未知数は決定できない。3.1)B)と3.2)B)a)は定理3で，3.2)B)b)は定理4で具体的な計算式を示す。（証明終）

定理3，4では，物体上の特徴点(x, y, z) をX軸の回りに $-\psi$ 回転させた点を(x', y', z')とすると，式

$$x = x' \qquad (5)$$

$$y\cos\psi+z\sin\psi=y'=h \qquad (6)$$

$$-y\sin\psi+z\cos\psi=z' \qquad (7)$$

が成立することを共通して利用する。

4．1 回転軸パラメータの利用方式

【定理3】 $\psi\neq\pm\pi/2$，0，π で，特徴点の2時刻のY座標が異なるときZ座標 z_i (i=1, 2) は式(8)(9)で求まる。

$$h=\{(x_2^2-x_1^2)\sin^2\psi+(y_2^2-y_1^2)\}/\{2\cos\psi\,(y_2-y_1)\} \qquad (8)$$

$$z_i=(h-y_i\cos\psi)/\sin\psi \qquad (i=1,2) \qquad (9)$$

証明 $\psi\neq 0$，π かつ2時点における特徴点のY座標が異なるので，2節の定理1の式(4) が成立する。

$$h\cos\psi=\{(x_2^2-x_1^2)\sin^2\psi+(y_2^2-y_1^2)\}/\{2(y_2-y_1)\} \qquad (4)$$

$\psi\neq\pm\pi/2$ より $\cos\psi\neq 0$ だから式(8) によりhが求まる。さらに，式(6) を変形した式(9) に式(8) を代入すると，特徴点のZ座標 z_i (i=1, 2) が求まる。（証明終）

4．2 平面世界に帰着させる方式

【定理4】 $\psi\neq\pm\pi/2$ のとき，特徴点のX座標を入力として平面世界の認識方式[3]を適用してZ座標z'が求まる場合，特徴点のZ座標zは下式で求まる。

$$z=(y\sin\psi+z')/\cos\psi \qquad (10)$$

証明 移動物体を全ての時点において，X軸の回りに $-\psi$ 回転させた移動物体'を想定する。移動物体'はY軸を中心に回転しており，(5)からX座標は同じxであるので，xを入力として平面世界の認識方式[3]を適用できる。所定の判定条件を満たすとき移動物体'のZ座標z'が求まる。

特徴点のZ座標zは，式(7) を変形した式(10)により，Z座標z'から求めることができる。（証明終）

4．3 移動物体の三次元運動認識

定理3を適用した場合は三次元形状を求めた後，式(7)により座標z'を求め，XZ平面の原点を中心として回転する2時刻の座標(x_i, z_i') (i=1, 2) から回転角 θ を式

$$\cos\theta=(x_1x_2+z_1'z_2')/(x_i^2+z_i'^2) \qquad (11)$$

$$\sin\theta=(x_1z_2'-x_2z_1')/(x_i^2+z_i'^2) \qquad (12)$$

により求めることができる。定理4を適用した場合は形状と同時に運動が求まる。

5．まとめ

平面上の移動物体を俯瞰した画像から，俯角と物体の三次元形状，運動を認識する方式を示した。本方式の特長は，わずか2特徴点を2～3時刻捉えるだけで，線型解法により認識できることである。また，原理的に認識できるための観測値のみによる判定条件についても明らかにした。

【参考文献】

1)S.Ullman: "The Interpretations of Visual Motion", MIT Press, Cambridge, MA (1979).
2)T.S.Huang, C.H.Lee: "Motion and Structure from Orthographic Projections", IEEE Trans. PAMI-11, pp.536-540 (1989).
3)鎌田洋，久保田孝：“正射影対応点による移動物体の認識方式”，情報処理学会研究報告 CV75-3 (1991).