

4P-5 一般化Hough変換による内部パラメータを持つ3D物体認識

佐藤嘉伸 玉野隆一 田村進一  
(大阪大学 基礎工学部)

1. まえがき

一般に、物体の3次元空間中の位置、姿勢を記述するには6つのパラメータが必要であるが、物体のとりうる安定姿勢を考慮にいれ、回転を鉛直方向に限ると4つのパラメータで記述できる。この環境において、我々は画像エッジと3D物体モデルの辺との仮対応からこれらのパラメータを推定し、一般化Hough変換による仮説生成および検証、パラメータの精緻化を行う手法を開発した<sup>(1)</sup>。本稿では、その手法をさらに物体モデルに可変性を許した場合に拡張する。物体モデルの可変性は、大きさ、角度、関節など様々なものが考えられるが、ここではモデルの各辺の長さおよび方向(すなわち、各辺間の角度)を可変要素とする。ただし、物体の平行移動は地面(あるいはテーブル)上に制限し、鉛直方向の平行移動は許さないものとする。

2. 問題の定式化

ワールド座標系 $(x_w, y_w, z_w)$ 、物体座標系 $(x_m, y_m, z_m)$ 、画像平面座標系 $(U, V)$ を図1のように設定する。物体座標系からワールド座標系への変換 $T_{wm}$ は $x_w-z_w$ 平面上の平行移動 $t_{mw}=(t_{mw_x}, t_{mw_z})$ と $y_w$ 軸回りの回転 $\theta_{mw}$ の3つのパラメータで記述できる。ワールド座標系から画像平面座標系への変換 $T_{uw}$ は図1のように拘束され、レンズの中心(視点)は $y_w$ 軸上、光軸は $y_w-z_w$ 平面上とし、俯角 $\alpha$ 、焦点距離 $f$ および視点の高さ $h$ は既知と仮定する。

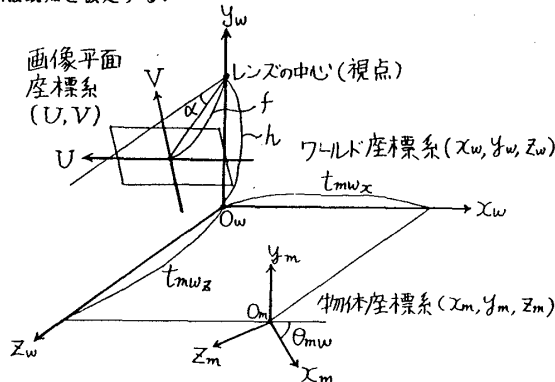


図1. 座標系の設定

認識の対象とする物体は、各辺が直線のワイアフレームで表現でき、各頂点において少なくとも1辺は方向が固定しているものとする。ただし、方向が可変の辺は2つの固定した方向ベクトルの線型和で表現する。図2の物体では $P_1, P_2, Q_1, Q_2$ の4つの内部パラメータがある。

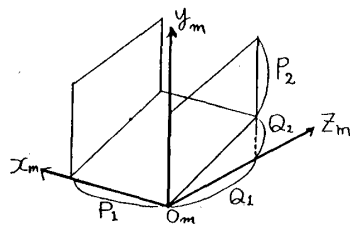


図2. 物体例(階段の近似モデル)

問題は、上記の条件設定で、単眼の中心投影画像と物体モデルの照合をとることにより、 $T_{wm}$ の3つのパラメータおよび $m+n$ 個の内部パラメータ $P_1, P_2, \dots, P_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ を求めることであり、解空間は $m+n+3$ 次元空間となる。

一般化Hough変換により解の仮説を生成するためには、局所的な画像特徴と物体のプリミティブ要素の対応を仮定した場合の解の拘束を明らかにする必要がある。プリミティブとしては、頂点で接続する2本の辺(ただし、少なくとも1辺は方向が固定しているとする。)を用い、

頂点を原点とするプリミティブ座標系 $(x_p, y_p, z_p)$ で表現する。プリミティブ座標系からワールド座標系への変換 $T_{pw}$ および物体座標系からプリミティブ座標系への変換 $T_{mp}$ はおおの平行移動( $y$ 方向も含む)と $y$ 軸回りの回転に制限する。図3のように画像中の端点の接続した2本のエッジとプリミティブ座標系の原点で接続する2辺の対応を仮定すると、後述のようにこれらの3点の対応から、一部の場合を除き $T_{pw}$ の回転成分 $\theta_{pw}$ は高々2通りに確定し、それぞれの $\theta_{pw}$ に対し $T_{mp}$ の平行移動成分 $t_{mp}=(t_{mp_x}, t_{mp_y}, t_{mp_z})$ および2辺に関する内部パラメータ(高々3個)は $y_w$ 座標を媒介変数とした線型拘束式で表せる。 $T_{mp}$ の回転成分は各プリミティブと物体モデルの対応部分毎に固定であるが、平行移動成分は物体内部パラメータに依存し、それぞれ物体モデルに埋め込まれる。

$T_{wm}, T_{pw}, T_{mp}$ をそれぞれ同次変換行列として表せば、

$$T_{wm} = T_{mp} T_{pw} \quad (1)$$

となり、 $T_{wm}$ の拘束が得られ、 $T_{wm}$ の $y$ 方向の平行移動成分が0であるという拘束条件と合わせ、端点が接続する2本のエッジ対の対応より、変換および内部パラメータに対する5~6個の拘束式が得られ、 $m+n+3$ 次元の解空間のうち、 $m+n-2 \sim m+n-3$ 次元に解を拘束することができる。

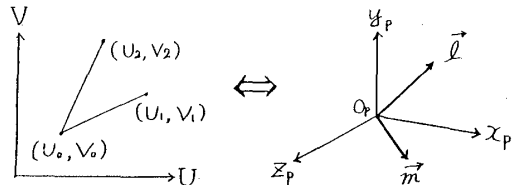


図3. 対応を仮定する画像特徴と物体プリミティブ

3. 画像特徴と物体プリミティブの対応による変換パラメータと物体内部パラメータの推定

図3の対応から $\theta_{pw}$ の値を推定する方程式の導出とその解の性質、および $t_{mp}$ とプリミティブの2辺に関する内部パラメータの拘束式の導出について述べる。

3.1  $\theta_{pw}$ の推定

まず、図4のように1点と1方向の対応を基に $\theta_{pw}$ の推定式を導く。画像上の点の同次座標を $i=(u, v, t)$ 、物体プリミティブの点の同次座標を $p=(x_p, y_p, z_p, 1)$ とすると、次式が成立する。

$$i = p T_{pw} T_{uw}, \quad (U, V) = (u/t, v/t) \quad (2)$$

ただし、

$$T_{pw} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{pw} & 0 & \sin \theta_{pw} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{pw} & 0 & \cos \theta_{pw} & 0 \\ t_{pw_x} & t_{pw_y} & t_{pw_z} & 1 \end{bmatrix}, \quad T_{uw} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & -h \cos \alpha & h \sin \alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1/f) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$(U, V)$ は、画像平面座標系での画像点。

図4におけるプリミティブ座標系の原点と画像の $(U_0, V_0)$ 、 $l$ と $L$ の方向のそれぞれの対応から、次の3つの方程式が得られる(下線部は未知数。導出過程は省略)。

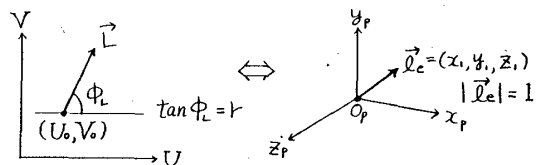


図4.  $\theta_{pw}$ を推定するための仮対応

$$\begin{aligned} t_{px} &= -a t_{py} + b t_{pz} &= -ah & (3) \\ &= -c t_{py} + d t_{pz} &= -ch & (4) \end{aligned}$$

$$-r t_{px} - (c-ar) t_{py} + (d-br) t_{pz} + ((d-br)x_1 + rz_1) \sin \theta_{PB} + ((d-br)z_1 - rx_1) \cos \theta_{PB} = (c-ar)(y_1 - h) \quad (5)$$

ただし,  $a=U_0 \sin \alpha / f, b=U_0 \cos \alpha / f, c=V_0 \sin \alpha / f + \cos \alpha, d=V_0 \cos \alpha / f - \sin \alpha$ .  
 (3)と(4)+(5)より次式が得られ,

$$((d-br)x_1 + rz_1) \sin \theta_{PB} + ((d-br)z_1 - rx_1) \cos \theta_{PB} = (c-ar)y_1 \quad (6)$$

さらに, (6)式と  $\sin^2 \theta_{PB} + \cos^2 \theta_{PB} = 1$  より,  $\sin \theta_{PB}$  に関する2次方程式が得られ, 図4の対応から  $\theta_{PB}$  の推定は次式を解くことに帰着できる.

$$((d-br)^2 + r^2)(x_1^2 + z_1^2) \sin^2 \theta_{PB} - 2((d-br)x_1 + rz_1)(c-ar)y_1 \sin \theta_{PB} + ((c-ar)^2 y_1^2 - ((d-br)x_1 + rz_1)^2) = 0 \quad (7)$$

ただし,  $x_1=0$ かつ $z_1=0$ , あるいは,  $d=0$ かつ $r=0$ のとき解は不定または不能となり, (7)式の判別式  $D < 0$  のとき, 解は得られない.

1)  $x_1=0$ かつ $z_1=0$ のとき, 物体の辺がx-z平面に垂直であることを表し,  $c-ar=0$ のとき対応は可能で解は不定になり, それ以外のとき解は不能でどのように  $\theta_{PB}$  を選んでも対応は不可能なことを表す.

2)  $d=0$ かつ $r=0$ のとき,  $(U_0, V_0)$ に対応する視線がx-z平面に平行であることを表し,  $y_1=0$ または $c=0$ のとき対応は可能で解は不定になり(ただし,  $c=0$ は実現不可能), それ以外のとき不能となる.  $y_1=0$ のときは, x-z平面に平行な辺が偶然, 高さhのところにある場合に相当する.

3) 1), 2)以外のときで,  $D < 0$ のとき, どのように  $\theta_{PB}$  を選んでも対応は不可能で,  $D = 0$ のときは1個,  $D > 0$ のときは2個それぞれ解が定まる.

3.2  $t_{PB}$  の推定

(3),(4)式より,  $t_{px}, t_{py}, t_{pz}$ (すなわち, 頂点の $y_0$ 座標)を媒介変数とした1次式で表せる. これは, 単に視線方向の拘束である.

3.3 内部パラメータの推定

$\theta_{PB}$ が定まった場合について,  $y_0$ を媒介変数とする内部パラメータの拘束式を導出する.

辺の方向が可変のとき, 辺の方向は  $m_0 = n_{10} + s n_{20}$  (ただし,  $n_{10}, n_{20}$ は既知で,  $|n_{10}| = 1, |n_{20}| = 1$ とする.)と表せ, これを(6)式に代入するとsが定まり  $m_0$  を決定できる.  $m = q m_0$ とのおくと, mの先端が  $(U_1, V_1)$ に対応するので(2)式よりqを  $y_0$ を媒介変数として表せる. よって, 辺の長さ方向を表す2つの内部パラメータ  $q_{n1} = q, q_{n2} = sq$ の拘束式が得られる.

辺の方向が固定のときも同様に,  $l = p_1 l_0$  (ただし,  $|l_0| = 1$ とする.)とおくと(2)式より  $p_1$  の拘束式が得られる.

3.4 物体プリミティブの分類

3.1~3.3の考察を基に, プリミティブは次の4種類に分類される.  
 1) 2辺とも方向が固定. 1.1) 2辺ともx-z平面に垂直(以下, 単に垂直と略す.)でない.

1.2) 1辺が垂直.

2) 1辺の方向が可変. 2.1) 他辺は垂直でない.

2.2) 他辺が垂直.

2辺とも方向が可変の場合は, 2. で述べた物体に対する制限より考慮に入れない. 1.1)では, 2辺のそれぞれが対応可能で, しかもそれぞれに対して得られた  $\theta_{PB}$  の値が等しい(十分近い)ときのみ対応可能で, 1.2)では, 2辺のそれぞれについて解が存在するとき対応可能で, 垂直でない辺の対応から  $\theta_{PB}$  が得られ, 1.1), 1.2)ともに  $t_{PB}$  と2つの内部パラメータ  $p_1, p_2$  の拘束式が得られる. 2)では, 方向が固定した辺について解が存在するとき対応が可能で, 2.1)では,  $\theta_{PB}$  が得られるので  $t_{PB}$  と3つの内部パラメータ  $p_1, q_{n1}, q_{n2}$  の拘束式が得られるが, 2.2)では, 1つの内部パラメータ  $p_1$  の拘束式のみ得られる.

4. 物体の表現

物体は一般化Hough変換のR-table(あるいは拘束table<sup>[2]</sup>)の枠組で表現される. 物体プリミティブ(単位ベクトルの組  $l_0$  と  $m_0$ , または,  $l_0$  と  $n_{10}, n_{20}$ )をindexとして, 3. により得られた  $T_{PB}, p_1, p_2$  (または  $p_1, q_{n1}, q_{n2}$ )の拘束式から  $T_{PB}$  の拘束式を導くための変換  $T_{MP}$ , その変換により  $l_0$  と  $m_0$  ( $l_0$  と  $n_{10}, n_{20}$ )が対応する辺および  $p_1, p_2$  ( $p_1, q_{n1}, q_{n2}$ )が定める内部パラメータ  $P_i, P_j, Q_i, Q_j$  が記述される. すなわち, この表現を通して画像特徴(画像中の端点が接続するエッジ対)と物体プリミティブの対応を仮定し, 対応が可能なら,  $T_{PB}$  と内部パラメータおよび画像エッジと物体の辺についての対応関係の部分仮説が生成される.

物体プリミティブは物体の各頂点におけるすべての可能なベクトル対で, 平行移動, y軸回りの回転で重ね合わせられるものは同じプリミティブとする. たとえば, 図5に示す物体プリミティブと画像特徴の対応から解が得られた場合, 1つの解から4つの部分仮説を生成するための情報が, R-table内のそのプリミティブをindexとする場所に埋め込まれる.

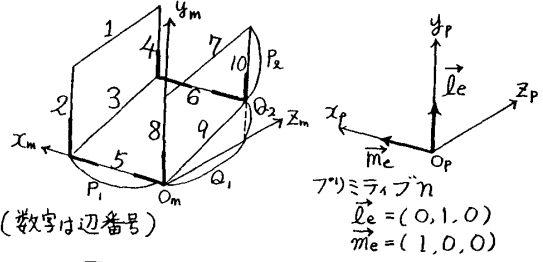


図5. 物体プリミティブ

図5のプリミティブに対しては,  $T_{PB}$  は4通り記述され, 回転成分  $\theta_{PB}$  はそれぞれの場合に応じ定数となるが, 平行移動成分  $t_{PB}$  は内部パラメータに依存する. 一般に  $\theta_{PB}$  は定数となり,  $t_{PB}$  は内部パラメータの組み合わせで記述され, 次式で表すことができる.

$$t_{PB} = (t_{px}, t_{py}, t_{pz}) = p \cdot E \quad (8)$$

$$\text{ただし, } p = (p_1, \dots, p_m, q_1, \dots, q_n), E = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m+n} & b_{m+n} & c_{m+n} \end{bmatrix}$$

R-tableには  $\theta_{PB}$  とEが格納され, それらから  $T_{PB}$  が得られ,  $T_{PB}, p_1, p_2 (p_1, q_{n1}, q_{n2})$  に対し, (1)式を適用することにより,  $T_{PB}$  の拘束式が得られる. 図6に, 図5のプリミティブに対するR-tableの表現を示す.

この表現では, 物体の各辺の方向, 内部パラメータの割り当て方によって, 物体の対称性, 辺の長さの比の拘束などが暗黙に表現される. さらに物体が複数になった場合も, 共通のプリミティブをindexとして, R-tableに物体ラベルの情報も格納することにより, 1つの表現に埋め込まれる. 表現の明快さ, 変更の容易さに問題があるが, この表現は, 宣言的な物体モデルを並列物体認識(Hough変換)用にコンパイルしたものと捉えることもできる.

index	対応する物体の辺番号	対応する内部パラメータ	$\theta_{PB}$	E
プリミティブ n	1. - 8 -	$P_2$	$0^\circ$	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	m. - 5 -	$P_1$		
プリミティブ n の2辺	1. - 10 -	$P_2$	$0^\circ$	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0
	m. - 6 -	$P_1$		
$l_0 = (0, 1, 0)$ (垂直)	1. - 2 -	$P_2$	$180^\circ$	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	m. - 5 -	$P_1$		
$m_0 = (1, 0, 0)$	1. - 4 -	$P_2$	$180^\circ$	1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0
	m. - 6 -	$P_1$		

図6. R-tableによる物体モデル

5. 認識過程

画像から端点が接続するエッジ対を抽出し, すべてのエッジ対に対して, R-tableのすべてのプリミティブとの照合を試み, 解が得られた場合, 部分仮説が生成される. 通常のHough変換では部分仮説はパラメータ空間(解空間)の軌跡として写像されるが, その場合記憶領域の問題が深刻になる. 本研究の設定では, 幾何学的拘束が強く, 得られる部分仮説の数はある程度限られるので, 部分仮説はリストセルとして蓄え, 上記の問題を解決し, 解空間のピークの探索は, 整合のとれる部分仮説セルを統合していき, その大きなクラスタを求めることに置き換える. なお, 部分仮説セルの表現法および統合の方法の詳細は別稿に譲る.

6. むすび

内部パラメータを持つ3D物体認識を行うため, 4つの座標系間のパラメータの拘束を明らかにし, 一般化Hough変換で解決する手法を述べた. 現在, 物体表現および照合法の階層化について検討している. 本手法のimplementationと評価が今後の課題である.

【文献】

[1] 玉野, 佐藤, 田村, "エッジ対応に基づく3D物体認識", 情報処理学会論文誌 44-2(1988).  
 [2] D.H. Ballard and D. Sabbah, "On Shapes", Proc. of '81 IJCAI, pp.607-612(1981).