

単眼画像における線特徴を用いた 物体の平行移動の算出

4M-9

深田陽司

ATR視聴覚機構研究所

1. まえがき

物体は一般的に3次元空間において、6自由度(回転3と平行移動3)を持つ。単眼からこれらの自由度を決定することは、ロボットのナビゲーションなどに適用可能であり有用である。本稿では回転の自由度が決定された[1],[2]として、平行移動の自由度を中心投影された物体の部分エッジと単眼画像の部分エッジとの対応から決定する手法、特に抽出エッジが正確でない場合に適用可能な手法について述べる。

2. 問題設定

本稿では3つの座標系、即ちワールド系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 、物体系 $O_m X_m Y_m Z_m$ 、カメラ系 $O_c X_c Y_c Z_c$ を設定し各々の座標系における点やベクトルの表現を区別するため、 (\dots) , $[\dots]$, $\langle \dots \rangle$ の表記を用いる。すると、同次座標で表現された3次元空間の点 $P = \{x, y, z, 1\}$ ($\{ \}$ は3つの座標表記のどれかを表す) は以下の式で関係づけられる。

$$(P) = \langle P \rangle R_{cw} H, \quad (P) = [P] R_{mw} T \quad (1)$$

ここで、 R_{cw} はカメラの回転行列、 H は平行移動行列であり、観測設定できるパラメータである。 R_{mw} は本稿の仮定よりなんらかの方法で決定されている物体の回転行列、 T が算出決定すべき物体の平行移動行列である。 H と T は以下のように具体的に表現される。

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ h_x & h_y & h_z & 1 \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{pmatrix}$$

3. 平行移動の決定

3.1 平行移動に対する拘束

点 P が画像上 $p = \langle x_p, y_p, z_p \rangle$ に中心投影されるとする。すると P は p への単位視線ベクトル E_p と奥行き変数 k_p を用いると、以下のように表せる。

$$\langle P \rangle = k_p \langle E_p \rangle$$

一方、 P を方向単位ベクトル E_A をもつ物体エッジ A (頂点は P_0 と Q_0) 上の任意の点とすると、ベクトル $P_0 P$ の長さを表す変数 λ を用いて、

$$[P] = [O_m P] = [O_m P_0] + \lambda [E_A]$$

これらの2つの式を(1)の関係に代入し整理すると、

$$k_p \langle E_p \rangle R_{cw} = ([O_m P_0] + \lambda [E_A]) R_{mw} T H^{-1}$$

これを、一般的に成り立つ式

$$(k_p \langle E_p \rangle R_{cw}) \cdot ([E_A] R_{mw} X \langle E_p \rangle R_{cw}) = 0$$

(\cdot は内積、 X はベクトル積) に代入し整理すると、

$$([O_m P_0] R_{mw} T H^{-1}) \cdot$$

$$([E_A] R_{mw} X \langle E_p \rangle R_{cw}) = 0$$

通常座標を用いて書き改めると、

$$([O_m P_0] R_{mw} - h + t) \cdot$$

$$([E_A] R_{mw} X \langle E_p \rangle R_{cw}) = 0 \quad (2)$$

ここで、 $h = (h_x, h_y, h_z)$, $t = (t_x, t_y, t_z)$ であり、回転行列は各々左上の 3×3 を採用する。

(2)式において変数は t のみであり、 t_x, t_y, t_z 空間での平面を表している。つまり、一本の物体エッジと画像エッジの対応(仮説)によって、平行移動パラメータは平面上に拘束される。平面の法線ベクトルは $m = ([E_A] R_{mw} X \langle E_p \rangle R_{cw})$ であり、定点 $(h - [O_m P_0] R_{mw})$ を通る。特にナビゲーション等の例では $t_y = 0$ であることが多く、この時には拘束は以下に示す t_x, t_z 面上の直線となる。

$$m_x t_x + m_z t_z + m \cdot ([O_m P_0] R_{mw} - h) = 0 \quad (3)$$

ここで、 $m = (m_x, m_y, m_z)$ である。

3.2 平行移動の算出

1つの物体の平行移動量は、正しい対応からは理論的には同じ値を出力するので、全ての仮説をパラメータ空間に分布させると正しい平行移動量のところで投票が多くなるはずである(ハフ変換)。このことを利用して、パラメータ空間で点が密に分布する位置を選び平行移動の大きさを決定する。

拘束が直線の場合は、交点をパラメータ空間(t_x, t_z 面)に分布させクラスタリングによって密集点を求める。以下に拘束が平面の場合について述べる。

前項で拘束が平面であることを導出したので、理論的には平面上の点を3次元空間で分布させればよい。

しかし、平面は無限にのびており、このままでは使え

Determination of Translation based on Matching of Edge Segments

Youji FUKADA

ATR Auditory and Visual Perception Res. Lab.

ない。そこで n 個の仮説により生ずる n 枚の平面の交線を用いることを考える。 n 枚の平面から最大で $m = nC_2 = n(n-1)/2$ 本の交線が生じる。しかし、交線も無限にのびるので、更にこれらの交線の交点を利用する。交点は最大で $k = mC_2$ 個生じる。

ところが、拘束平面は雑音を含んだ画像から得られるので、正しい対応といえども直線が3次元空間で交点をもつことは殆ど期待できない。そこで、まず直線間の最短距離とそれを与える直線上の点(最接近点)の中点を擬似的な交点として算出する。次に、互いに距離の近い、つまり密集している直線群をこの距離マップを利用して検出する。そしてこれらの直線群の交点としては、先ほど求めておいた擬似的交点群の中心を採用し、これを平行移動量とする。

2本の直線の最短距離とそれを与える最接近点は次のようにして算出する。

直線 i : 点 P_i を通り、方向単位ベクトル E_i ($i = 1, 2$) が与えられているとき、直線上の点は媒介変数 k_i を用いると、 $k_i E_i + P_i$ と表せるから、2点間の距離の最小を算出するには、

$D = |(k_2 E_2 + P_2) - (k_1 E_1 + P_1)|^2$ を k_1, k_2 で偏微分した2式を解いて k_1, k_2 を求めればよい。又、最接近点もこれらの値を用いて容易に求められる。以下において、 $\cos \beta = E_1 \cdot E_2$ である。

(Case 1) : $\sin \beta \neq 0$ の場合

$$k_1 = (E_1 - \cos \beta E_2) \cdot (P_2 - P_1) / \sin^2 \beta$$

$$k_2 = (\cos \beta E_1 - E_2) \cdot (P_2 - P_1) / \sin^2 \beta$$

(Case 2) : $\sin \beta = 0$ (2直線が平行) の場合

偏微分した2式は等しくなり、 k_1, k_2 は自由度を1つもつ。つまり、最接近点は一意には決まらないので平行移動量の決定からは除外する。しかし、最短距離はこの場合でも算出できるので投票には加える。

$$D = |P_2 - P_1|^2 \sin^2 \gamma$$

ここで、 $\cos \gamma = E_1 \cdot ((P_2 - P_1) / |P_2 - P_1|)$

4. 実験

拘束の効果を確かめるために、作成した情景画像を用いて2種類の平行移動量復元実験を行なった。画像化は $P = \langle x, y, z \rangle$ が画像上の $p = \langle fx/z, fy/z \rangle$ (f は焦点距離であり、 $f=100$ である) に中心投影される。

実験1では斜四角柱を対象にし、 $T1 = (-400, 0, 500)$ から $T10 = (500, 0, 500)$ まで t_x 方向のみ 100きざみで10回のテストを行なった。10回のテストの全てにおいて、 t_x も t_z も 1×10^{-4} 以下の誤差であった。

実験2では2つの同一三角錐と1つの斜四角柱を含み、 $t_y = 0$ の場合の三角錐の復元を行なった。三角錐の

平行移動は右が $(0, 0, 500)$ 、左は $(-100, 0, 300)$ である。実験は図1に示す原画の部分線画である図2に対して行なった。交点の分布図を図3に示す。同図で X は頻度が6を、 \square は1を表す。誤差は両三角錐とも 1×10^{-4} 以下であった。

5. あとがき 物体の平行移動を、中心投影された単眼より算出するための拘束の導出と手法について述べた。本稿では対応のための画像特徴としては部分エッジでよく、現実の世界に対して適用可能な手法である。更に復元誤差も充分小さいことが確かめられた。

謝辞：本研究を実施する機会を与えて頂いた当研究所の淀川社長及び上野室長に感謝します。

参考文献

- [1] 尺長、金子, "透視角変換-角度情報からの形状情報復元," 信学論, Vol. J70-D, No. 7, pp. 1931-1940, 1987. [2] 深田, "線特徴からの3次元情報復元と物体認識," 信学技報, PRU, 1990. (7月発表予定)

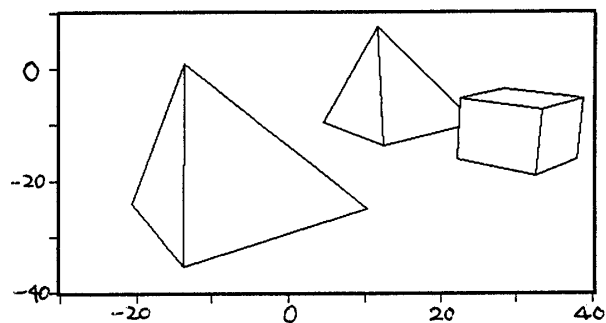


図1. 原画

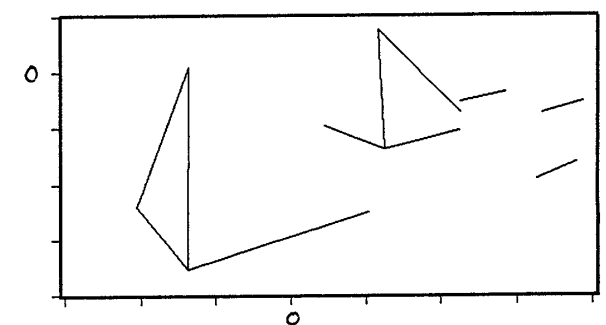


図2. 復元のための線画

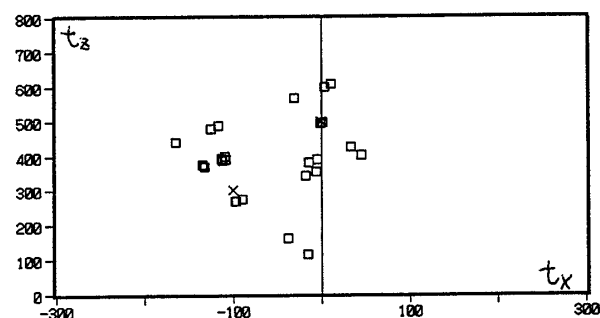


図3. パラメータ分布結果