

3. 複数の画像を利用した運動パラメータの推定

電子航法評価部

※矢田 士郎

1. はじめに

画像を利用して航法を支援するために、撮影した複数の画像から物体の抽出や運動の復元などを行う試みがいろいろ行われている。3次元空間中の相対的な位置検出や姿勢推定を利用して着陸や障害物回避などの航法援助に応用が可能である。複数の画像としては時系列画像(動画像)、ステレオ画像(多視点画像)などがある。この場合の画像解析における基本的な要素としてはカメラ、物体、光源があり、このうちどれが動くかによって解析方法も異なってくる。通常、運動の解析には特徴点などの画像間の対応付けが必要となるが、すでに参照画像または参照モデル(形状パラメータ)があれば、陰影などを補正してマッチングをとることによりカメラパラメータが既知の場合は単一の画像からでも位置や姿勢の推定が行える。画像間のマッチングには解像度を变化させて行うものや、ローカルサポートを利用して相関をとるものなど様々なものが提案されている。画像からの運動の復元の応用としては次のものがあげられる。

(a) 移動体の航法

物体や光線などの環境が一定の状態のもとでカメラを搭載した移動体が動いていく場合、環境との相対的な位置関係を画像から求め、運動パラメータを推定することにより航法に利用する。近接物体との奥行き(距離)推定により安全な航行を行う。

(b) 移動体の追跡

カメラ画像内の物体が移動するのを追跡し相対的な位置や速度、方向などの検出を行う。

時間的または空間的に異なる複数の2次元画像からの3次元の運動の復元にはいろいろな困難がある。ここではエピポーラ拘束を利用した線型近似射影画像からの角度計算、因子分解法による運動復元およびオプティカルフローによる速度場について述べる。

2. カメラと射影法について

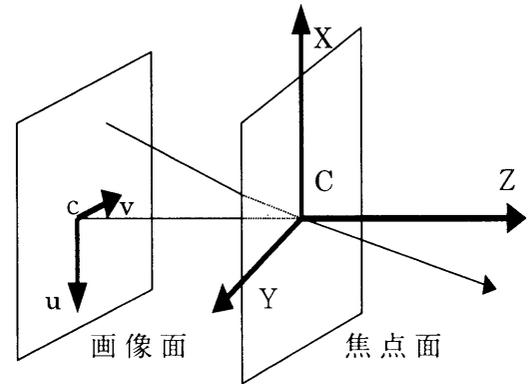


図1 カメラモデル

まず、射影法については3次元の物体を2次元の画像平面に投影する際の変換は次のように表される。図1においてcを光学中心、(u,v)を画像面の点、それに対応する物体の座標を(X,Y,Z)とする。画像面を焦点に対して反対の位置に移動して考えても同じなのでピンホールカメラモデルの透視変換における変換式はカメラ座標系に基づいて次のように表される

$$u = f X/Z, \quad v = f Y/Z$$

ここでfは焦点距離を表す。拡張ベクトルを用いて行列で表現すると

$$s \mathbf{m} = \mathbf{P} \mathbf{M}$$

ここで \mathbf{m} は画像座標の拡張ベクトル $(u, v, 1)^T$ 、 \mathbf{M} は物体座標の拡張ベクトル $(X, Y, Z, 1)^T$ で \mathbf{P} は射影行列である。またsはスケールに相当するスカラーである。上付きのTは転置行列を示す。物体は空間に固定した世界座標系で取り扱うことも多い。そのためにカメラ座標系を回転させ、それを平行移動することにより世界座標系を得る。回転は 3×3 の行列 \mathbf{R} で、並進は 3×1 のベクトル \mathbf{t} で表す。ある物体上の点のカメラ座標系における座標を \mathbf{M}_c 、世界座標系における座標を \mathbf{M}_w とすると

$$\mathbf{M}_c = \mathbf{R} \mathbf{M}_w + \mathbf{t}$$

と表せる。

中心射影は非線型であり計算するときの安定性などの問題があるので線型近似を行うことが多い。正規化カメラ($f=1$)で考え、物体の

中心の座標まわりにテータ展開すると第0次近似は

$$(u, v)^T = (X, Y)^T / Z_c$$

となる。ここで Z_c は中心の Z 座標で、この場合を弱中心射影という。この特殊な場合が地図の投影などに用いられている直交投影(平行射影)となる。弱中心射影では光軸に平行な仮想平面に正射影し、それを画像面上に中心射影したものに相当している。さらに第1近似である擬似中心射影を含めた射影を総称してアフィン射影としている。

射影行列はカメラの内部パラメータとカメラの運動に依存する外部パラメータで表せる。そのうち内部パラメータは画像中心座標 (u_0, v_0) 、直交性(角度 θ)、縦軸と横軸のスケール (α_u, α_v) 、焦点距離 f などを用いて次のような行列式で示される。

$$A = \begin{bmatrix} f\alpha_u & -f\alpha_u \cot \theta & u_0 \\ 0 & f\alpha_v / \sin \theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

これはカメラ座標とピクセル座標との変換を示している。また外部パラメータは回転行列 R 、並進移動ベクトル t を使って表せる。よってカメラパラメータを考慮した射影行列は

$$P = A (R \ t)$$

のように表現できる。

3. エピポーラ関係を利用したオイラー角復元
複数の画像点のあいだの対応関係は特徴点や領域の相関関係から求められるが 2 次元探索となり計算量がふえるので、次に述べるエピポーラ

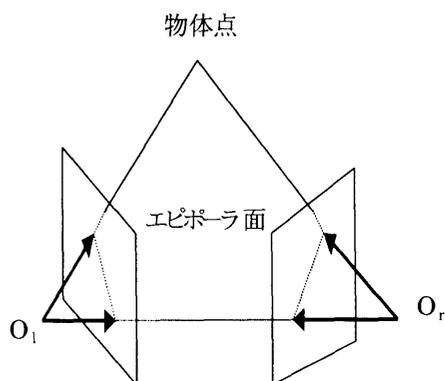


図2 エピポーラ

ラ拘束を利用することで 1 次元探索となる。2 枚の画像間の対応点の関係を図2に示す。空間中の点とカメラの中心がなす平面がエピポーラ平面で、これと画像面の交わる線がエピポーラ線である。物体上の点と2つのレンズ中心を結ぶ2つの線とレンズ中心を結ぶ線が同一平面上にあるという条件から次のエピポーラ方程式が成り立つ

$$Pr^T [t]xR P_1 = 0$$

ここで Pr 、 P_1 は 2 つの画像面でのカメラ座標の拡張ベクトルを示す。 $[t]x$ はベクトル積を表す非対称行列である。 $[t]xR$ は外部パラメータのみで表せる。また Pr 、 P_1 をピクセル座標の拡張ベクトル p_r 、 p_1 であらわすと

$$p_r^T F p_1 = 0$$

$$F = A_r^{-T} [t]xR (A_1^{-1})$$

これを利用して線型近似射影の場合のオイラー角の復元問題を述べる。特徴点はあらかじめ対応がとれているものとする。オイラー角ははじめに z 軸まわりに α 回転し、その新しい y 軸まわりに β 回転して最後に新しい z 軸まわりに γ 回転するものとして得られる。回転行列 R は

$$R = R(Z, \alpha) R(Z, \beta) R(Z, \gamma)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

弱中心射影のときのエピポーラ方程式は

$$g_1 x + g_2 y + g_3 x' + g_4 y' + g_5 = 0$$

のように線型式となる。 (x, y) 、 (x', y') はそれぞれ対応する特徴点の座標である。 $\alpha_u = \alpha_v = 0, \theta = \pi$ の場合、物体の中心位置の Z 座標をそれぞれ Z_c, Z_c' とし、 R の成分を $[r_{ij}]$ とし、 t を $[t_x, t_y, t_z]$ 、画像中心を (x_0, y_0) 、 (x_0', y_0') 、焦点距離を f, f' とすると、このエピポーラ方程式の係数 g は

$$g_1 = (-r_{23}) Z_c / f$$

$$g_2 = r_{13} Z_c / f$$

$$g_3 = (-r_{32}) Z_c' / f'$$

$$g_4 = r_{31} Z_c' / f'$$

$$g_5 = r_{23} x_0 - r_{13} y_0 + r_{32} x_0'$$

$-r_{31}y_0' + r_{23}t_x - r_{13}t_y$
 となる。 $\beta \neq 0$ の場合、 α 、 γ は

$$\alpha = \text{atan2}(g_1, -g_2)$$

$$\gamma = \text{atan2}(g_3, g_4)$$

と表される。

オイラー角の第2要素 β は3枚の画像の回転行列の関係式

$$R_{12}R_{23} = R_{31}^T$$

などを利用して求められる。

$$\beta_{12} = \text{atan2}(c_1, \sqrt{1 - c_1^2})$$

$$\beta_{23} = \text{atan2}(c_2, \sqrt{1 - c_2^2})$$

$$\beta_{31} = \text{atan2}(c_3, \sqrt{1 - c_3^2})$$

ただし

$$w_{12} = \gamma_{12} + \alpha_{23}$$

$$w_{23} = \gamma_{23} + \alpha_{31}$$

$$w_{31} = \gamma_{31} + \alpha_{12}$$

$$a_1 = \cos w_{12}, \quad a_2 = \cos w_{23}, \quad a_3 = \cos w_{31}$$

$$b_1 = \sin w_{12}, \quad b_2 = \sin w_{23}, \quad b_3 = \sin w_{31}$$

$$c_1 = (a_3 a_1 - a_2) / (b_3 b_1)$$

$$c_2 = (a_1 a_2 - a_3) / (b_1 b_2)$$

$$c_3 = (a_2 a_3 - a_1) / (b_2 b_3)$$

この結果を利用して実際の画像に基づいて計算を行った。テスト画像としては模型の建物の向きを20度ずつ回転させて撮影した3枚の画像を用いた。（図3，4，5）

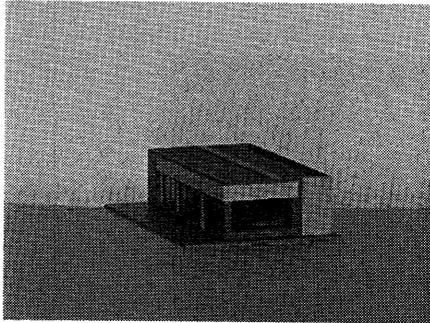


図3 模型建物のテスト画像1

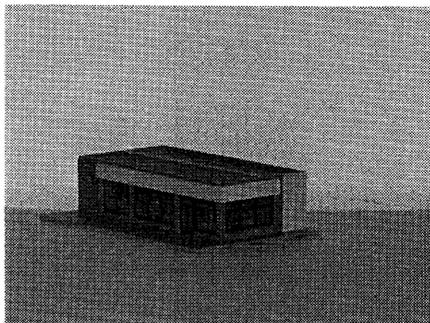


図4 模型建物のテスト画像2

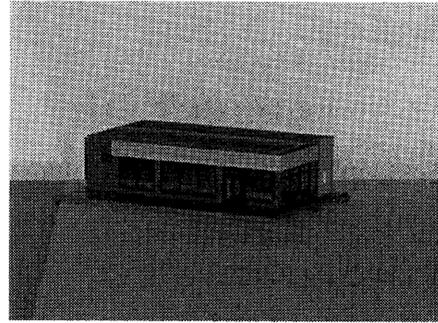


図5 模型建物のテスト画像3

これらの画像から、オイラー角を計算すると次のようになる。（単位：度）

$$\alpha_{12} = 0.652 \quad \beta_{12} = 19.3 \quad \gamma_{12} = 2.58$$

$$\alpha_{23} = 2.49 \quad \beta_{23} = 20.4 \quad \gamma_{23} = 1.08$$

$$\alpha_{31} = -3.70 \quad \beta_{31} = -39.7 \quad \gamma_{31} = -3.42$$

この結果より β の変化は約20度になっていることがわかる。

4. 因子分解法

相関法などで対応点があらかじめ求められた時系列画像から運動と形状の復元を行う方法として因子分解法がある。これは全特徴点を一様に処理し、数値計算で比較的安定な特性を示すことが知られている。 j 番目の物体点(拡張ベクトル X_j)の i 番目の画像フレームにおける画像点を (u_{ij}, v_{ij}) として、 i フレームの射影行列を P_i とすると次の関係が成り立つ

$$\lambda_{ij}(u_{ij}, v_{ij}, 1)^T = P_i X_j$$

ここで λ_{ij} はスケールファクタに相当する射影的深さを表す。これを複数の点をまとめた行列で表現すると ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$)

$$W = (P_1, P_2, \dots, P_n)^T (X_1, X_2, \dots, X_m)$$

と表せる。 W は画像点より構成され、計測行列と呼ばれるものである。 W はカメラ運動を含む行列と物体の形状を表す行列の積で表され、ノイズが無い場合は W のランクは4となる。計測行列より P と X を求めるには特異値分解を利用して W を次のように表す。

$$W = U \Sigma V^T$$

ここで U は直交行列、 Σ は対角行列、 V は直交行列である。 Σ は W から求まる特異値を降順に対角線上にならべたものである。ところで W のランクを考慮すると、この式は U の最初の4列である U' 、 4×4 の対角行列 Σ' 、 V^T の最初の4行である行列 V'^T の積で次のように近

似的に表せる。

$$W = U' \Sigma' V'^T$$

これからひとつの分解結果として

$$M = U' \quad S = \Sigma' V'^T \quad W = MS$$

が得られる。ただし任意の4行4列の正則行列Cにより別の解が可能となるので、この分解は一意的ではない。そこでさらにユークリッド復元のために拘束式が必要となる。ところでi番目のカメラの射影行列Piは

$$P_i = \mu_i K_i [R_i \quad t_i]$$

とあらわされる。ここで K_i はカメラの内部パラメータの行列、 R_i は回転行列、 t_i は並進運動を表すベクトルで、 μ_i はスカラーである。回転行列の正規直交性を利用することにより拘束条件が得られる。よってこれから M および S が求められ、回転運動および並進運動が計算できる。

5. オプティカルフロー

動画像から直接的に速度場を求める方法としてはオプティカルフローによるものがある。ノイズやフレーム間の照明の変動等の影響を受けやすいが、直接的に速度ベクトルが求められるメリットがある。動画像から求めたオプティカルフローと動画像の1つのフレームを重ね合わせたのが図6である。これは狭い地形を飛行

する場合を想定してカメラを建物の間を移動させて取得した画像である。オプティカルフローを示す線の向きから、カメラは画面中心方向に動いていることがわかる。また線が長いものはカメラとの距離が近いことを示している。このようにオプティカルフローを計算することにより物体との間の奥行きがわかる。

6. まとめ

複数画像を利用して航法のための応用についていくつかの手法と計算例を紹介した。画像から求められる値は必ずしも信頼性のあるものとは限らないので、その限界についておさえておく必要がある。また近接回避などでは正確な値はあまり必要でなく、むしろロバスト性が重要である。またこれらの手法を適用するにあたっては特徴点の抽出や対応も重要であるので、それらを含めた総合的な手法の融合と改良を行っていきたい。

参考文献

- (1) 画像処理ハンドブック
- (2) T. Kanade CMU-RI-TR-00-09
- (3) 徐、辻 3次元ビジョン 共立出版
- (4) 蔵田 信学会総合大会, D-12-119, '97



図 6 オプティカルフロー