

全方位画像列からの平行線による拘束条件を利用した カメラ運動推定

川西亮輔 (静岡大) 山下淳 (静岡大) 金子透 (静岡大)

1. 序論

移動ロボットの自律活動のためには、安定かつ高速な自己位置推定の機能が重要である。本研究は、1台の全方位カメラ（図1）から取得した画像列からカメラ運動を推定することによって自己位置推定を実現する手法を提案する。全方位カメラは360度の視野を有するため自己位置推定に有効であることが示されている [1]。

屋外などのように特徴が豊富な環境においては、画像列からのカメラ運動推定は比較的容易である。我々の従来研究において、屋外環境において安定したカメラ運動推定が行えることを示した [2]。一方、屋内環境（特に廊下など）においては、一般に特徴が少なく、単眼カメラから取得した画像列から安定してカメラ運動を推定することが困難である。

屋内環境においては画像中の直線を抽出し、カメラ運動推定に利用することが考えられる。人工物には直線形状であるものが多いため、直線は有効な特徴である。直線を利用したカメラ運動推定の従来手法として、Structure from Motion (SfM) に基づくアプローチ [3] や SLAM [4] などがある。しかし、直線を利用したカメラ運動推定では、最低でも3視点のカメラ運動を同時に推定する必要があるため、厳密な解の探索は自由度の多い複雑な非線形問題となる。カメラ運動の十分に精度の良い初期値が得られない場合には、バンドル調整などの非線形最適化を適用しても、局所解に陥る問題を回避することは困難であることや、視点数や直線数が増加することで計算コストが膨大になるという問題もある。

上記の問題を解決するため、本研究では、画像中から平行線を検出し、平行線から得られる拘束条件をカメラ運動推定に利用する。平行線から得られる拘束条件によって、カメラ運動推定を単純な1自由度探索問題の組み合わせとして解くことが可能である。人工物が存在する環境下では多くの平行線が存在するため、提案手法は屋内環境に限らず屋外環境においても適用可能である。また、通常の視野のカメラでは画像中に十分な数の平行線が得られない状況が頻発することが想定されるが、本研究で用いる全方位カメラは視野が広いので、特に床面（あるいは地面）に対して垂直な平行線に関しては、常に視野内に十分な数が得られると考えられる。

平行線を利用したカメラ運動推定の従来研究 [5, 6] が提案されているが、特定の環境やカメラ運動を前提としたものがほとんどである。本研究では、視点数によらず、1自由度の探索問題の組み合わせによってカメラの3次元運動が推定できる手法を提案する。提案手法の前提条件は、3本の平行線と、それらと異なる方

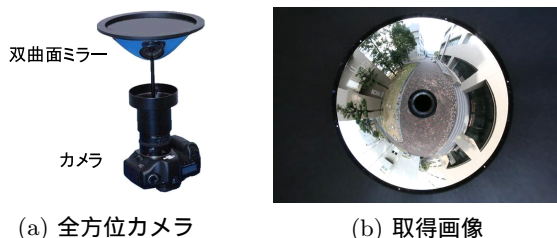


図1 本研究で用いる全方位カメラ

向の3本の直線が画像中から得られることのみである。これは人工物の存在する環境では極めて妥当な前提である。提案手法が視点数によらず1自由度探索問題の組み合わせでカメラの3次元運動を推定できることから、計算コストが視点数あるいは直線数に比例するのみであり、視点数が多い場合に非常に効率的であることをシミュレーションにより示す。

2. カメラ運動推定の概要

本研究で提案するカメラ運動推定の処理手順を以下に示す（図2）。提案手法では、3本の平行線と、それらと異なる方向である3本の直線の計6本の直線が必要である。また、少なくとも3視点以上の画像間に対応づけられている必要がある。ただし、視点数によらず1自由度探索問題の組み合わせで解くことができる。

回転行列を2つのステップに分けて推定する。まず、直線中から平行線を検出し、各カメラ座標系における平行線の消失点に向かうベクトルを算出する。各カメラ座標系における消失点ベクトルが同じ方向となるような回転行列を算出する。次に消失点ベクトルを軸とする回転行列を推定する。このときの入力平行線以外の直線である。

並進ベクトルを2つのステップに分けて推定する。まず、平行線を用いて、平行線の3次元方向に対して垂直な平面上での並進ベクトルを推定する。次に、平行線に沿った方向の並進量を推定する。このときの入力平行線以外の直線である。

提案手法では、カメラ運動推定の各ステップは1自由度探索問題に帰着し、独立に推定することができるため、視点数が多くなっても局所解に陥る可能性が低く、かつ計算コストが小さくすむことが利点である。

3. 直線検出

提案手法では、全方位画像列中で直線を抽出、追跡する。ここでは直線検出手法の概要のみを述べる。手法の詳しい内容に関しては文献 [2] を参照されたい。

全方位画像中からエッジセグメントを抽出する。まず、Cannyのエッジ点検出によって、画像中の輝度勾

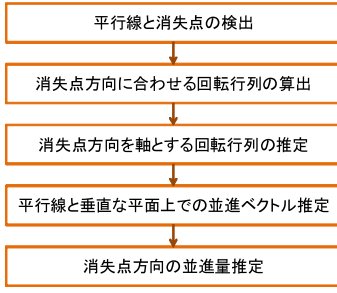


図2 カメラ運動推定の手順

配の大きい点がエッジ点として得られる．エッジ点のうち，コーナー点と思われるエッジ点を判定し，除去することで，分離されたエッジセグメントを得る．

エッジセグメントの中から，直線を検出する．エッジセグメントに属するエッジ点 i の光線ベクトル \mathbf{r}_i を用いて，光線ベクトルのなす平面の法線ベクトル \mathbf{n} を算出する．エッジ点 i の画像座標 (u_i, v_i) に向かう光線ベクトル \mathbf{r}_i は以下の式 (1), (2) で算出できる．

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} s(u_i - c_x)p_x \\ s(v_i - c_y)p_y \\ sf - 2\gamma \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$s = \frac{\alpha^2 \left(f\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} + \beta\sqrt{u_i^2 + v_i^2 + f^2} \right)}{\alpha^2 f^2 - \beta^2(u_i^2 + v_i^2)}, \quad (2)$$

ここで， f はカメラの像距離， (c_x, c_y) は全方位画像の中心， p_x, p_y はピクセルサイズ， α, β, γ は双曲面のパラメータである．後の演算での光線ごとの偏差をなくすため \mathbf{r}_i を単位ベクトルに変換し，正規化する．

ベクトル \mathbf{n} は，(3) 式を満たすエッジ点の数が最大となるときのベクトルとして算出される．(3) 式を満たすエッジ点の数がエッジセグメントに属する全エッジ点の過半数以上である場合，そのエッジセグメントを直線であると判定する．

$$\mathbf{r}_i^T \mathbf{n} < e_{th}. \quad (3)$$

ここで， e_{th} は閾値である．この法線ベクトル \mathbf{n} が一枚の画像から得られる，直線の位置や姿勢に関する情報である．

4. カメラ運動推定

提案手法による平行線の拘束条件を利用したカメラ運動推定の詳細を以下に述べる．提案手法では，少なくとも3つの平行線と，それらと異なる方向である3つの直線が必要である．また，少なくとも3視点以上の画像間でこれらの直線に関する法線ベクトル \mathbf{n} が得られている必要がある．

4.1 平行線と消失点の検出

まず，直線の中から平行線を検出し，各カメラ座標系における平行線の消失点に向かうベクトルを算出する．平行である直線対を考えると，その消失点に向かうベクトル \mathbf{v} とそれらの直線に関する法線ベクトル \mathbf{n} は以下の式を満たす．

$$\mathbf{n}^T \mathbf{v} = 0. \quad (4)$$

1枚の画像中から平行線を検出するためには少なくとも3本の平行線が必要である．そこで，各画像中の直線の中からランダムに3つを選択し，以下の式を満たすかどうかを判定する．

$$\sum_i^3 \mathbf{n}_i^T \mathbf{v} < p_{th}, \quad (5)$$

ここで， p_{th} は閾値である．全ての画像に関して上式を満たした3つの直線を平行線であるとみなす．以上の処理を繰り返し，最終的に互いに平行であるとみなされた直線を統合する．最多数 n_l の直線群を今後の処理で平行線として扱う．これらの平行線の各画像 j における消失点に向かうベクトル \mathbf{v}_j は，以下の式を最小二乗法で解くことで算出される．

$$\sum_i^{n_l} \mathbf{n}_{i,j}^T \mathbf{v}_j \rightarrow \min. \quad (6)$$

4.2 消失点方向に合わせる回転行列の算出

回転行列を2つのステップに分けて推定する．まず，各カメラ座標における消失点ベクトルが同じ方向となるような回転行列を算出する．これは解の探索を必要としない単純な演算によって得られる．

消失点は無遠に存在する点と考えられるので，画像間で対応する消失点ベクトルは，3次元空間中で同じ方向となるはずである．そこで，カメラの初期位置 c_0 での画像における消失点ベクトル \mathbf{v}_{c_0} を基準とし，その他の視点 c_i における消失点ベクトル \mathbf{v}_{c_i} が同じ方向となるような回転行列 $\mathbf{R}_{c_i}^m$ を算出する．

$$\mathbf{v}_{c_0} = \mathbf{R}_{c_i}^m \mathbf{v}_{c_i}. \quad (7)$$

回転行列 $\mathbf{R}_{c_i}^m$ は2つの消失点ベクトルに対して直交する軸 \mathbf{m}_{c_i} 周りに回転角 θ_{c_i} だけ回転させた回転行列として算出する．軸ベクトル \mathbf{m}_{c_i} と回転角 θ_{c_i} は以下の式で算出される．

$$\mathbf{m}_{c_i} = \mathbf{v}_{c_0} \times \mathbf{v}_{c_i}, \quad (8)$$

$$\theta_{c_i} = \arccos(\mathbf{v}_{c_0} \cdot \mathbf{v}_{c_i}). \quad (9)$$

4.3 消失点方向を軸とする回転行列の推定

次に消失点ベクトルを軸とする回転行列 $\mathbf{R}_{c_i}^v$ を推定する．このときの入力には平行線以外の直線である．前述の通り，消失点ベクトルは全てのカメラ座標系において同じ方向となるため，真の回転行列と消失点ベクトル \mathbf{v} を軸とする回転行列 $\mathbf{R}_{c_i}^v$ ，4.2節で算出した回転行列 $\mathbf{R}_{c_i}^m$ との間には以下の式が成り立つ．

$$\mathbf{R}_{c_i} = \mathbf{R}_{c_i}^m \mathbf{R}_{c_i}^v. \quad (10)$$

すなわち，直線の姿勢に対して矛盾のない回転行列 $\mathbf{R}_{c_i}^v$ を推定することができれば，カメラの回転運動の最適解が求まる．任意軸周りの回転行列の自由度はその回転角 ϕ_{c_i} のみであるため，1視点に対して求めるべきパラメータの自由度は，ここでは1となる．

ある視点 c_i の回転行列 $\mathbf{R}_{c_i}^v$ を決定すると、各直線の 3 次元方向ベクトル \mathbf{d}_j は以下の式から算出できる。

$$\mathbf{d}_j = \mathbf{n}_{c_0,j} \times \left(\mathbf{R}_{c_i}^v \mathbf{T} \mathbf{R}_{c_i}^m \mathbf{T} \mathbf{n}_{c_i,j} \right). \quad (11)$$

各カメラ視点 c_k における、直線に関する法線ベクトル $\mathbf{n}_{c_k,j}$ と回転行列 \mathbf{R}_{c_k} と直線の 3 次元方向ベクトル \mathbf{d}_j には以下の関係が成り立つ。

$$\left(\mathbf{R}_{c_k}^T \mathbf{n}_{c_k,j} \right)^T \mathbf{d}_j = 0. \quad (12)$$

したがって、視点 c_i の回転行列 $\mathbf{R}_{c_i}^v$ がある値として決定された場合の、視点 c_k における最適な回転行列 $\mathbf{R}_{c_k}^v$ は、以下の評価関数を最小化する回転行列として与えられる。

$$E_R(\phi_{c_k}) = \sum_j^{n_l} \left| \left(\mathbf{R}_{c_i}^v \mathbf{T} \mathbf{R}_{c_i}^m \mathbf{T} \mathbf{n}_{c_k,j} \right)^T \mathbf{d}_j \right|^2, \quad (13)$$

ここで、 ϕ_{c_k} は回転行列 $\mathbf{R}_{c_i}^v$ の回転軸 \mathbf{v} 周りの回転角である。上式を展開することで ϕ_{c_k} に関する 4 次関数となる。したがって、ある視点 c_i における回転行列を決定することで、その他の視点における回転行列は一意に求まる。

以上のことから、評価関数の和が最小となる視点 c_i における回転行列を探索することで、全ての視点に対して最適な回転行列が推定できる。すなわち、提案手法における回転行列推定は視点数によらず 1 自由度探索問題に帰着する。

4.4 平行線と垂直な平面上での並進ベクトルの推定

並進ベクトルを 2 つのステップに分けて推定する。まず、平行線を用いて、平行線の 3 次元方向に対して垂直な平面上での並進ベクトルを推定する。ある視点 c_i の平面上の並進ベクトル $\mathbf{t}_{c_i}^p$ が決定されたとき、平行線の 3 次元位置ベクトル \mathbf{l}_j は以下の式で算出される。

$$\mathbf{l}_j = (\zeta \mathbf{g}_{c_0,j} + \eta \mathbf{g}_{c_i,j} + \mathbf{t}_{c_i}^p) / 2, \quad (14)$$

ここで、 $\mathbf{g}_{c_0,j}$ は平行線に向かい、平行線の 3 次元方向ベクトル \mathbf{v} と直線に関する法線ベクトル $\mathbf{R}_{c_i}^T \mathbf{n}_{c_i,j}$ に対して垂直なベクトルである。 ζ, η は

$$\left\| \zeta \mathbf{g}_{c_0,j} - \eta \mathbf{g}_{c_i,j} - \mathbf{t}_{c_i,p} \right\| \rightarrow \min, \quad (15)$$

を満たす定数である。視点 c_i における平面上の並進ベクトルは、以下の式で表現される。

$$\mathbf{t}_{c_i,p} = \mathbf{a} \cos \psi_i + \mathbf{b} \sin \psi_i, \quad (16)$$

ここで、 \mathbf{a}, \mathbf{b} は平行線に対し垂直な平面と平行で、互いに直交するベクトルである。 ψ_i は、この平面上において視点 c_0 を基準とした場合の視点 c_i の並進角度である。SfM では並進スケールが不定であるため、この並進角度 ψ_i が視点 c_i における未知パラメータとなる。

各カメラ視点 c_k における、平行線に対し垂直に向かうベクトル $\mathbf{g}_{c_k,j}$ と平行線の 3 次元位置ベクトル \mathbf{l}_j 、平面上の並進ベクトル $\mathbf{t}_{c_k}^p$ には以下の関係が成り立つ。

$$\mathbf{t}_{c_k}^p - \mathbf{l}_j - \delta_{c_k,j} \mathbf{g}_{c_k,j} = 0, \quad (17)$$

ここで、 $\delta_{c_k,j}$ は以下の式を満たす定数である。

$$\delta_{c_k,j} = \frac{(\mathbf{t}_{c_k}^p - \mathbf{l}_j)^T \mathbf{g}_{c_k,j}}{\mathbf{g}_{c_k,j}^T \mathbf{g}_{c_k,j}}. \quad (18)$$

したがって、視点 c_i の並進ベクトル $\mathbf{t}_{c_i}^p$ が決定された場合の、視点 c_k における最適な並進ベクトル $\mathbf{t}_{c_k}^p$ は、以下の評価関数を最小化する並進ベクトルとして与えられる。

$$E_t(\psi_{c_k}) = \sum_i^{n_p} \left\| \mathbf{t}_{c_k,p} - (\mathbf{l}_j + \delta_{c_k,j} \mathbf{g}_{c_k,j}) \right\|. \quad (19)$$

上式を展開すると、 ψ_{c_k} に関する 4 次関数となるため、ある視点 c_i における並進ベクトル $\mathbf{t}_{c_i}^p$ を決定することで、その他の視点における並進ベクトルは一意に求まる。以上のことから、平行線に対し垂直な平面上の並進ベクトルの推定は、視点 c_i における並進角度 ψ_{c_i} のみを未知パラメータとする 1 自由度探索問題に帰着する。

4.5 消失点方向の並進量推定

次に、平行線に沿った方向の並進量を推定する。このときの入力は平行線以外の直線である。これも 1 視点につき 1 自由度であるが、4.4 節と同様に、ある 1 視点の並進量が決定されると他の視点の並進量も一意に決定できる。したがって、この推定も視点数によらず 1 自由度探索問題を解くことで最適解が得られる。具体的には以下に示す各視点 c_k における評価関数の和が最小化となる、視点 c_i の並進量 ω_{c_i} を推定する。

$$E_T(\omega_{c_k}) = \sum_j^{n_l} \left| 1 - (\mathbf{l}_j - \mathbf{t}_{c_k} + \mu_{c_k,j} \mathbf{d}_j)^T \mathbf{h}_{c_k,j} \right|^2, \quad (20)$$

$$\mathbf{t}_{c_k} = \mathbf{t}_{c_k}^p + \omega_{c_k} \mathbf{v} \quad (21)$$

$$\mu_{c_k,j} = \frac{(\mathbf{t}_{c_k} - \mathbf{l}_j)^T \mathbf{d}_j}{\mathbf{d}_j^T \mathbf{d}_j}, \quad (22)$$

ここで、 $\mathbf{h}_{c_k,j}$ は直線の 3 次元位置に向かい、直線の 3 次元方向ベクトル \mathbf{d}_j と直線に関する法線ベクトル $\mathbf{R}_{c_i}^T \mathbf{n}_{c_i,j}$ に対し垂直なベクトルである。

以上のことから、提案手法では、視点数によらずそれぞれ独立な 1 自由度探索問題を解くことによりカメラの 3 次元運動を推定できる。

5. 実験

シミュレーション実験により、提案手法が 3 つの平行線とその他の方向である 3 つの直線からカメラの 3 次元運動を推定できることを確認した。視点数は 10 で、カメラ運動は 3 次元的な並進運動と回転運動を含んでいる。カメラ運動と直線の配置を図 3 に示す。緑線が平行線で、青線がその他の方向である直線である。赤、橙、黄の軸はカメラ視点ごとのカメラ座標系を示している。カメラ運動推定の結果と真値との誤差を表 1 に示す。回転は、カメラ座標系の各軸の推定値と真値との角度誤差で評価している。並進に関しては、初期視点と最終視点との距離を 1 とした場合の値である。表

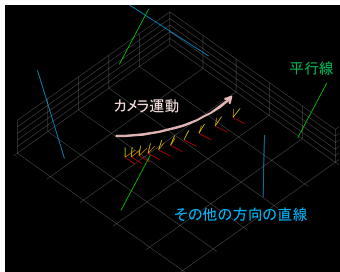


図3 カメラ運動と直線の配置

表1 カメラ運動推定の精度検証

	平均誤差	最大誤差
回転 [deg]	0.021	0.034
並進 [-]	0.0048	0.0098

から十分に真値に近い値が得られていることが分かる。今回は一定の探索幅で全探索的に解を求めたため、わずかに誤差が残ったが、探索幅を小さくすることでより真値に近い値が得られると考えられる。より効率的な解の探索方法や、データ中に含まれるアウトライアへの対処に関しては今後の課題である。

次に、視点数の変化に対する処理時間の変化を検証した。平行線とその他の直線の数はそれぞれ10で、視点数を3~200まで変化させて処理時間の推移を確認した(図4)。グラフから、視点数が増加してもデータ数が増加した分、視点数に比例して処理時間が増加するのみである。ただし、並進推定に関しては、視点数が増加することにより探索範囲が限定され、処理時間の増加は見られないことがある。以上のことから、提案手法は推定する視点数が多いほど従来手法と比べ効率が良くなるといえる。さらに、原理的には視点数が増加しても局所解に陥る可能性が増加することはないため、安定したカメラ運動推定が可能である。また、今回の実験では全探索的に解を求めているため、効率的に解を探索することによって大幅な処理時間の短縮が可能である。

最後に、ノイズを含んだデータからのカメラ運動推定のシミュレーション実験を行った。ノイズは平均して0.01~1.28degの角度誤差がnに含まれるという前提で行った。ノイズの大きさに対する回転と並進の誤差を図5に示す。グラフから、角度誤差0.16deg程度までは安定してカメラ運動推定が行えており、それ以上の誤差が含まれる場合には大きな推定誤差が生じることが確認された。予備実験として行った直線検出精度の検証では、理想的には800×600画素の全方位画像で角度誤差0.05deg以内の直線検出が期待できることから、提案手法はノイズに対しても十分にロバストであるといえる。

6. 結論

本論文では平行線の拘束条件を利用した効率的なカメラ運動推定の手法を提案した。実験結果から、提案手法の有効性が示された。今後の課題として、解の効率的な探索方法の検討および実画像での検証などが挙げられる。

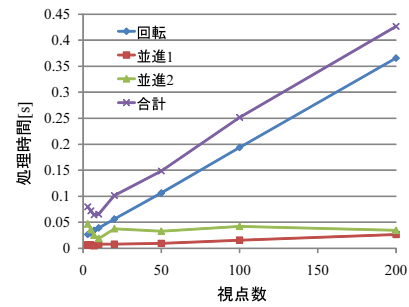
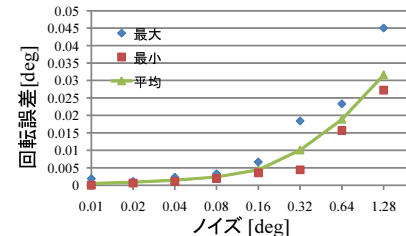
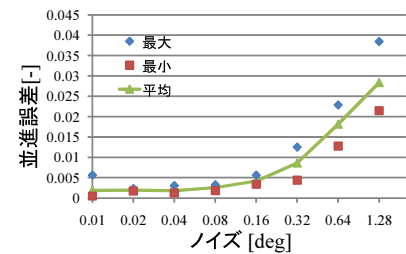


図4 視点数に対する処理時間の比較



(a) 回転



(b) 並進

図5 ノイズを含んだデータからのカメラ運動推定誤差

参考文献

- [1] J. Gluckman and S. K. Nayar: "Ego-motion and Omni-directional Cameras", *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, pp. 999-1005, 1998.
- [2] 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: "全方位画像の特徴点と直線エッジ分布に基づく基線長の最適化アルゴリズムを有する Structure from Motion による 3 次元環境計測", 第 16 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 449-456, 2011.
- [3] A. Bartoli and P. Sturm: "Structure-from-motion using lines: Representation, Triangulation, and Bundle Adjustment", *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 100, Issue 3, pp. 416-441, 2005.
- [4] P. Smith, I. Reid and A. Davison: "Real Time Monocular SLAM with Straight lines", *Proceedings of the 2006 British Machine Vision Conference*, pp. 17-26, 2006.
- [5] G. Schindler, P. Krishnamurthy and F. Dellaert: "Line-Based Structure from Motion for Urban Environments", *Proceedings of the 3rd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pp. 846-853, 2006.
- [6] G.L. Mariottini and D. Prattichizzo: "Uncalibrated Video Compass for Mobile Robots from Paracatadioptric Line Images", *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 226-231, 2007.