

全方位カメラを用いた周囲環境計測のための 特徴点フローモデルによる位置姿勢推定

川西 亮輔[†] 山下 淳[†] 金子 透[†]

[†] 静岡大学工学部 〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

E-mail: [†] {f0730034, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

あらまし ロボットが未知環境で自律的に活動するためには、ロボット自身が周囲環境を計測し、地図を生成する必要がある。周囲環境の計測に適した機器として、視野の広い全方位カメラが挙げられる。全方位カメラによる地図生成の研究はこれまでも行われてきたが、積極的に全方位カメラの視野の広さを利用している手法は少ない。そこで本論文では、全方位カメラの視野の広さを効果的に利用した計測手法を提案する。我々の提案する手法は、カメラ運動に伴う画像上の特徴点の動きを提案するモデルに当てはめることでカメラの移動前後の位置姿勢を推定する。実験により、本手法が全方位カメラを用いた位置姿勢推定および環境計測に有効であることを示す。

キーワード 全方位カメラ, 特徴点フローモデル, 位置姿勢推定, 環境計測

Estimation of Camera Motion with Feature Flow Model for Environmental Measurement by Using Omni-Directional Camera

Ryosuke KAWANISHI[†] Atsushi YAMASHITA[†] and Toru KANEKO[†]

[†] 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

E-mail: [†] {f0730034, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

Abstract Map information is important for path planning and self-localization when mobile robots accomplish autonomous tasks. Then, in unknown environments, they should generate an environment map by themselves. An omni-directional camera is effective for environmental measurement, because it has a wide field of view. We propose an estimation method of omni-directional camera motions with feature flow model. Our method fits feature point movements to feature flow model for estimation of camera motions. Experimental results showed the effectiveness of the proposed method.

Keyword Omni-Directional Camera, Feature Flow Model, Camera Motion Estimation, Environmental Measurement

1. 序論

移動ロボットが経路生成や自己位置同定を行うためには地図情報が必要である。しかし、ロボットが未知環境で自律的に行動する場合にはロボット自身が周囲環境を計測し、地図を作成する必要がある。

地図生成にはカメラによって視野内の物体の計測を行うアプローチがある。そのとき、広い範囲を計測するには視野の広いカメラが有効である。これには魚眼カメラによる計測[1]や周囲360度の視野を持つ全方位カメラによる計測[2]などがある。環境計測を行うロボットを考慮すると、ロボットの前後左右を一度に撮影できる全方位カメラが有効である[3]。

周囲環境の計測には、対象の計測とロボットの位置姿勢推定を同時に行う Structure from Motion (SFM) と呼ばれる手法がある。我々はすでに SFM による周囲環境計測の手法を提案している[4]。

SFM による計測の精度を向上させるためには、より

精度良くカメラの位置姿勢を推定する手法が必要である。我々が提案した従来手法ではカメラの位置姿勢推定には、8点法で基礎行列を求め特異値分解によってカメラの移動前後の回転行列および並進ベクトルを算出するという、一般的によく用いられる手法を採用していた。しかしこの手法は誤対応などの外れ値に対するロバスト性が十分ではない。また全方位カメラの視野の広さを積極的に利用していないことが課題であった。そこで本論文では、全方位カメラの視野の広さを効果的に利用した位置姿勢推定の手法を提案する。

提案手法では、動画像中で追跡された特徴点の動きを我々の提案するモデルに当てはめることでカメラの位置姿勢を推定する。推定されたカメラの位置姿勢情報を用いて計測を行い、その計測精度を評価し、提案手法の有効性を示す。

2. 処理の概要

移動ロボットとしては、ビデオカメラに双曲面ミラ

ーを取り付けた全方位カメラを搭載した車輪型移動ロボットを用いる(図1). 移動ロボットを環境中で走行させ、走行中に撮影した動画をを用いて計測を行う.

まず動画を取得する. 最初に取得した画像から特徴点を抽出し、以後のフレームで追跡を行う. 追跡を行った画像間で対応点が取得できる. 各画像中の特徴点座標から光線ベクトルを算出し、対応する光線ベクトルの組を提案モデルに当てはめることでカメラの位置姿勢を推定する. 推定された位置姿勢を用いて対応点の3次元座標を算出する. それぞれの対応点の計測結果の精度を評価し、対応点の信頼度を算出する. 各計測を行った観測点間の位置姿勢情報を用い、対応点の信頼度を考慮して計測結果を合成する.

3. 環境計測

3.1. 対応点抽出

ロボットの移動前後の2画像間における対応点を取得するため、移動前の画像から特徴点を抽出(図2左)、移動後の画像(図2中央, 右)まで追跡する. 本手法では、Lucas Kanade Tracker と画像をピラミッド構造化して探索する手法を組み合わせた特徴点追跡手法[5]を用いる.

3.2. 光線ベクトルの算出

カメラから3次元空間中の点に向かう光線を光線ベクトル $\mathbf{r}=[x, y, z]^T$ とする. 本研究で用いる全方位カメラはカメラ前方に双曲面ミラーを装着したものであり、この光線ベクトル \mathbf{r} は、双曲面のミラー側の焦点から3次元空間中の点へ向かう光線が双曲面上で反射する点へのベクトルで表せる(図3).

特徴点の画像座標 $[u, v]$ から式(1)(2)により \mathbf{r} を求める. ここで a, b, c は双曲面のパラメータであり、 f は焦点距離である.

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} su \\ sv \\ sf - 2c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$s = \frac{a^2 \left(f\sqrt{a^2 + b^2} + b\sqrt{u^2 + v^2 + f^2} \right)}{a^2 f^2 - b^2(u^2 + v^2)} \quad (2)$$

3.3. カメラ運動と特徴点の動き

通常の視野のカメラが一度に撮像可能な範囲は、カメラ光軸方向を中心とした狭い領域である. そのため周囲環境によっては特徴点の画像上の動きのみからカメラの回転運動と並進運動を判断することが難しい場合がある(図4). しかし、本研究で用いる全方位カメラの視野は水平方向360度を撮像可能なため、特徴点の画像上の動きからカメラの回転運動と並進運動を明確に判断することが可能である(図5).

そこで、本研究では全方位カメラの回転運動と並進運動における特徴点の動きの違いを利用し、画像間の

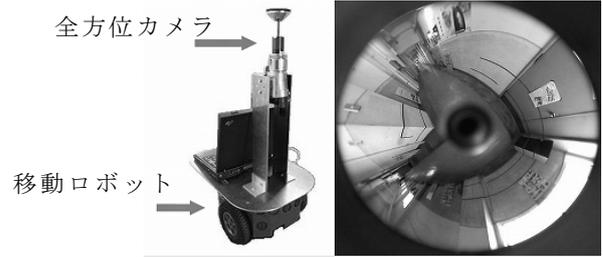


図1 全方位カメラ搭載移動ロボット

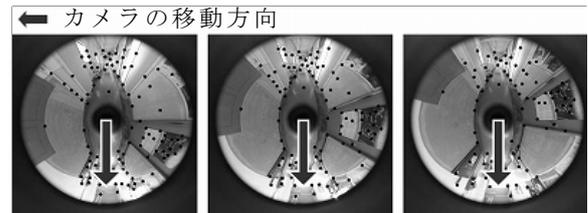


図2 特徴抽出・追跡

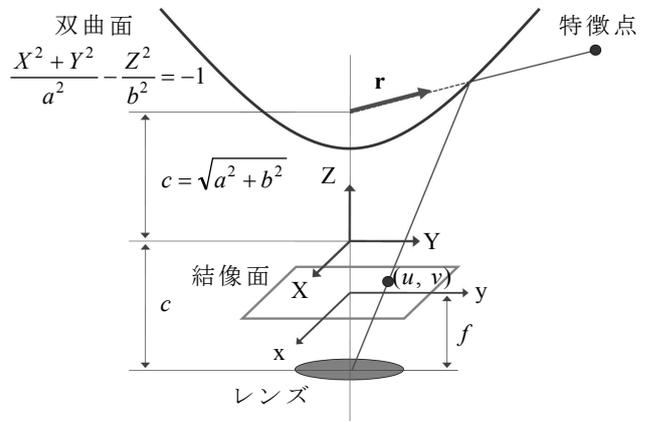


図3 光線ベクトルの算出

カメラの回転運動および並進運動を推定する手法を提案する.

3.4. 特徴点フローモデルによる位置姿勢推定

カメラの移動前後の画像から得られる光線ベクトル $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ とカメラの並進移動ベクトル \mathbf{t} , カメラの回転運動の中心軸および角度変位量との関係を考える. このとき、ある単位球を仮定する. 光線ベクトルと並進移動ベクトルは単位球の中心を始点とする単位ベクトルとし、回転軸は単位球の中心を通るものとする.

カメラが並進運動のみをする場合(図6(a)), 移動前後の2つの光線ベクトル $\mathbf{r}_{t1}, \mathbf{r}_{t2}$ からなる平面上に並進移動ベクトルが存在する. したがって、2つの光線ベクトルからなる平面の法線ベクトル \mathbf{n} と並進移動ベクトルは垂直である((3), (4)式).

$$\mathbf{n} = \mathbf{r}_{t1} \times \mathbf{r}_{t2} \quad (3)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{t} = 0 \quad (4)$$

カメラが回転運動のみをする場合(図6(b)), 光線ベクトルの変位はある回転軸を中心にした一定の角度変

位となる. この角度変位による2つの光線ベクトル \mathbf{r}_{R1} , \mathbf{r}_{R2} の関係は, カメラの回転運動を記述する回転行列 \mathbf{R} を用いて以下のように表わせる ((5)式).

$$\mathbf{r}_{R1} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}_{R2} \quad (5)$$

カメラが並進運動と回転運動の両方を行う場合, 移動前後の光線ベクトル \mathbf{r}_1 , \mathbf{r}_2 の関係は前述の2つの変位の組み合わせで記述できる. この仮定において2つの変位はそれぞれ独立であるため, カメラの回転運動による変位成分を取り除くと, カメラが並進運動のみを行う場合と同様に扱える. 以上のことから, 以下の式が成り立つ ((6)式).

$$(\mathbf{r}_1 \times \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{t} = 0 \quad (6)$$

(6)式を満たす解は4つ存在する. 4つの解とは, 並進移動ベクトルの正負 (\mathbf{t} と $-\mathbf{t}$) と, 正しいカメラ運動の回転行列とそこから並進ベクトルを軸としてさらに180度回転した回転行列との組み合わせである. そこで以下に述べる2つの拘束条件によって解を絞り込む.

1つ目の拘束条件は, 光線ベクトルの変位が並進移動ベクトルの端点 (以降, 正極と呼ぶ) から離れる方向で, かつ並進移動ベクトルと正負反対の成分をもつベクトルの端点 (以降, 負極と呼ぶ) に集まる方向になることである. これにより並進ベクトルの向きが決まる. もう1つの拘束条件は, それぞれの光線ベクトルが移動前後の変位で正極, 負極をまたがないことである. これにより正しい回転行列が決まる. 回転行列, 並進ベクトルが前述の2つの拘束条件を満たすとき, 提案モデルにおいて幾何学的に以下の式を満たす ((7)式).

$$\mathbf{q}_1 \cdot \mathbf{q}_2 < 0 \quad \text{かつ} \quad \mathbf{q}'_1 \cdot \mathbf{q}'_2 < 0 \quad (7)$$

ここで,

$$\mathbf{q}_1 = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1, \quad \mathbf{q}_2 = \mathbf{t} - \mathbf{r}_1, \quad \mathbf{q}'_1 = \mathbf{r}_1 - \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}_2, \quad \mathbf{q}'_2 = -\mathbf{t} - \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}_2$$

である. これはすなわち, \mathbf{q}_1 と \mathbf{q}_2 のなす角, \mathbf{q}'_1 と \mathbf{q}'_2 のなす角がともに鈍角となるときである (図7).

すべての光線ベクトルの組 \mathbf{r}_{1i} , \mathbf{r}_{2i} に対して(6), (7)式を満たすような回転行列および並進ベクトルを求め. 具体的には以下の評価式を最小化する.

$$e_i = \begin{cases} (\mathbf{r}_{1i} \times \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}_{2i}) \cdot \mathbf{t} & (7)式を満たす場合 \\ 1 & (7)式を満たさない場合 \end{cases} \quad (8)$$

$$E = \sum_i e_i \quad (9)$$

我々の提案する手法では, この単位球の球面上に投影されるそれぞれの特徴点 (光線ベクトルの端点) の動きが一様な流れになるモデルである. このことから, 本論文ではこの単位球によるモデルを, 特徴点フロー

モデルと呼ぶ.

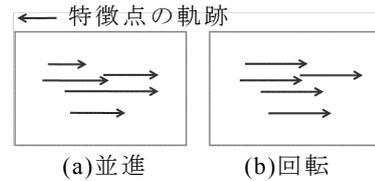


図4 通常の視野のカメラでの特徴点の動き

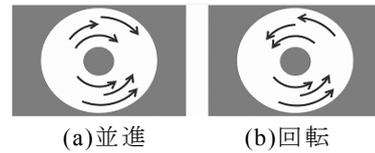
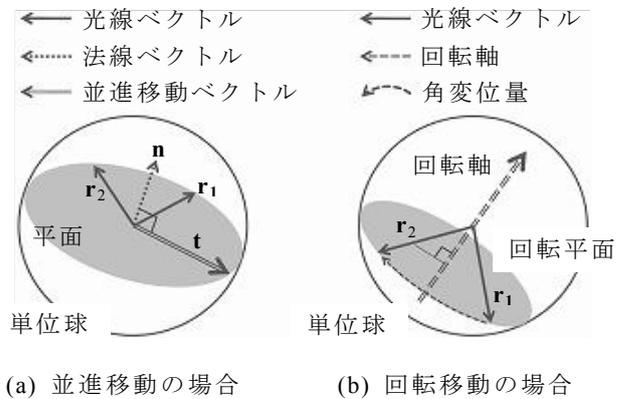


図5 全方位カメラでの特徴点の動き



(a) 並進移動の場合 (b) 回転移動の場合

図6 カメラ運動と光線ベクトル

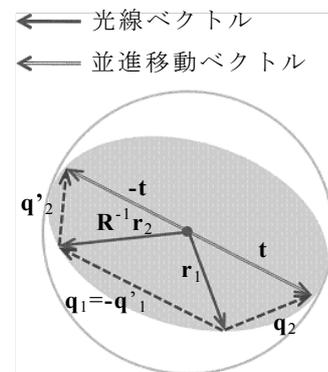


図7 拘束条件

3.5. 対応点の3次元座標算出

推定された回転行列 \mathbf{R} と並進移動ベクトル \mathbf{t} を用いて, 対応点の3次元計測を行う. 移動前後のそれぞれの観測点のカメラ位置から特徴点へ向かう光線ベクトルが交わる点を計測結果とする.

3.6. 計測結果の精度評価

計測精度は一般にカメラの移動方向の延長線付近ほど, またカメラから遠いものほど悪い. そこで計測精度を推定し, 評価する. 計測結果 $p_{m,i}$ を2画像上の

特徴点座標 $[u_{m,i}, v_{m,i}]^T$, $[u'_{m,i}, v'_{m,i}]^T$ で偏微分したものをから誤差を評価するベクトル \mathbf{g}_i を求める ((10)式). 以後の処理では, ベクトル \mathbf{g}_i のノルムが閾値 h 以下である計測結果のみを用いる ((11)式).

$$\mathbf{g}_i = \left| \frac{\partial \mathbf{p}_{m,i}}{\partial u_{m,i}} \right| + \left| \frac{\partial \mathbf{p}_{m,i}}{\partial v_{m,i}} \right| + \left| \frac{\partial \mathbf{p}_{m,i}}{\partial u'_{m,i}} \right| + \left| \frac{\partial \mathbf{p}_{m,i}}{\partial v'_{m,i}} \right| \quad (10)$$

$$\|\mathbf{g}_i\| < h \quad (11)$$

また, このベクトル \mathbf{g}_i を用いて, 各計測点 $\mathbf{p}_{m,i}$ の信頼度 w_i を以下のように定義する ((12)式). 計測精度が良い計測結果ほど, 信頼度の値は大きくなる.

$$w_i = \frac{1}{\|\mathbf{g}_i\|} \quad (12)$$

3.7. 計測結果の合成

本手法では計測結果のスケール情報が不明である. したがって異なる観測点間の計測結果を合成する際には, それぞれの計測結果のスケールを合わせる必要がある. そこで, 隣り合った観測点間で同じ特徴点の計測された場合, その3次元座標が等しくなるようにスケールを合わせる.

4. 実験

4.1. 実験環境

屋内環境 (図 8(a): L 字廊下) でそれぞれ計測を行った. L 字廊下における計測では, 全方位カメラを搭載した移動ロボットを約 100mm/s の速度で走行させながら撮影を行った. 画像取得は 5fps で, 計測に用いた入力画像は全方位画像であり (図 8(b)), 画像サイズは 1920×1080 pixels である.

特徴追跡は取得した全画像に対して行った. 計測は 10 フレーム間隔 (基線長は約 200mm) で行った.

4.2. 実験結果

廊下および部屋の計測結果を上から見た図 9 に示す ((a): 従来手法, (b): 提案手法). 矢印の間の点が計測を行った観測点, その他の点が計測点である. ここで従来手法とは, [4] で我々が提案した計測手法である. ただし, 公平な比較をするため本論文で述べられていない手法 (RANSAC など) は用いていない.

従来手法では廊下の曲がり角 (図 9(a)中の円) における位置姿勢推定の精度が低いため, 不自然な推定結果となっており, 同様に計測結果にも不自然なずれが見られる. 提案手法による計測では, L 字廊下の曲がり角でのカメラの位置姿勢の推定結果 (図 9(b)中の円) の不自然さがなく, 計測結果のずれが少ない. この結果から, 提案手法は従来手法よりも精度良くカメラの位置姿勢推定が行えたことが分かる.

5. 結論

本論文では, 全方位カメラの視野の広さを効果的に利用した位置姿勢推定の手法を提案した. 実験結果か

ら, 位置姿勢推定の精度向上が確認でき, 本手法の有効性が示された.

今後の課題としては, より正確にカメラの位置姿勢を推定するため, 画像間で誤対応している点の除去手法を構築することが考えられる. また, 累積誤差による影響を低減する手法を取り入れる必要がある.

謝辞

本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金若手研究(B) 20700184, および財団法人立石科学技術振興財団の補助を受けた.

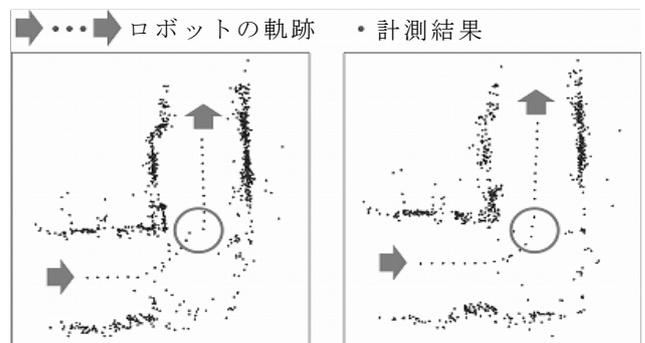
文献

- [1] T. Nishimoto, J. Yamaguchi: "Three Dimensional Measurement Using Fisheye Stereo Vision", Proceedings of the Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference 2007, 3A05-1, pp.2008-2012, 2007.
- [2] R. Bunschoten and B. Krose: "Robust Scene Reconstruction from an Omnidirectional Vision System", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.19, No.2, pp.351-357, 2003.
- [3] J. Gluckman and S. K. Nayar: "Ego-Motion and Omnidirectional Cameras", Proceedings of 6th International Conference on Computer Vision, pp.999-1005, 1998.
- [4] R. Kawanishi, A. Yamashita and T. Kaneko, "Construction of 3D Environment Model from an Omni-Directional Image Sequence", Proceedings of the 3rd Asia International Symposium on Mechatronics, TP1-3(2), pp.1-6, 2008.
- [5] J. Y. Bouquet: "Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Tracker Description of the Algorithm", Open CV, Intel Corporation, 2000.



(a) 実際の環境 (b) 入力画像

図 8 実験環境



(a) 従来手法 (b) 提案手法

図 9 計測結果