

テクスチャレス環境における全方位画像列からの平行線検出を 利用した Structure from Motion

川西 亮輔^{*1}, 山下 淳^{*2}, 金子 透^{*1}, 浅間 一^{*2}

Structure from Motion by Using Parallel Lines Detected from Omnidirectional Image Sequence in Textureless Environment

Ryosuke KAWANISHI^{*1}, Atsushi YAMASHITA^{*2},
Toru KANEKO^{*1}, Hajime ASAMA^{*2}

^{*1} Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University
3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

^{*2} Department of Precision Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

In this paper, we propose an efficient estimation method of an omnidirectional camera movement. The proposed method is based on Structure from Motion utilizing a constraint of parallel lines. In an environment having man-made structures, parallel lines can be extracted from an omnidirectional image easily and constantly, because of its wide field of view. Parallel lines provides a valuable constraint for camera movement estimation. The proposed method can estimate 3-D camera movements by solving one degree of freedom problem three times without regard to the number of viewpoints. Experimental results show the effectiveness of our proposed method.

Key Words: Structure from Motion, Parallel lines, Omnidirectional camera

1. 緒 言

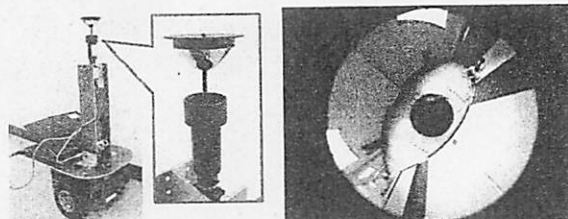
本研究では、1台のカメラのみをセンサとして用いた、テクスチャレス環境における移動ロボットの自己位置推定および周囲環境計測の手法を提案する。本研究ではテクスチャレス環境として図1のような環境を想定している。全方位カメラにより取得した画像列から平行線を検出し、その拘束条件を利用することで、一般に1台のカメラのみのセンシングでは困難であるテクスチャレスな環境において、ロボットのカメラ運動を推定できる。

テクスチャレス環境において、1台のカメラのみで安定したセンシングを行うためには、視野の広いカメラが有効である。そこで、本研究では全方位カメラを用いる。本研究で用いる全方位カメラは、双曲面ミラーを利用したものである(図2)。

魚眼カメラなども含めた広視野カメラを1台のみ用いた環境計測の手法はこれまでも多く提案されている⁽¹⁾。しかしそれらの多くはテクスチャの豊富な屋外、



Fig. 1 Example of textureless environment.



(a) Robot and camera.

(b) Acquired image.

Fig. 2 Mobile robot and omnidirectional camera.

あるいは屋内でも画像間の点対応が得られやすい環境で実験が行われている。

テクスチャレス環境では、点対応のみでは安定したカメラ運動推定が困難な状況が発生することがあるため、直線対応を利用することが有効である。直線を利

^{*1} 静岡大学工学部機械工学科 (〒 432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1) {f5945016, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

^{*2} 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) {yamashita, asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

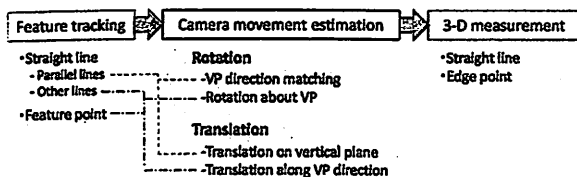


Fig. 3 Procedure of the proposed method.

用した Structure from Motion (SfM) や SLAM は数多く提案されているが⁽²⁾⁽³⁾, 様々な誤差を解消するためにバンドル調整⁽⁴⁾などで非線型最適化を行う必要がある。しかし、視点数の増加や初期値の与え方によっては大域的最適解が得られないという問題がある。

そこで、直線を用いた従来手法の中でも、平行線を利用することでカメラ運動の推定時の自由度を低減する手法が提案されている。パラメータ推定の自由度を削減することはシステムの安定性の向上に大きく寄与するため、有効な手段である。屋内環境において周囲360度を見渡しても平行線が3本未満しか存在しないという状況は考えにくい。したがって、視野の広い全方位カメラを用いたカメラ運動推定に平行線を利用するのは理にかなっている。

従来研究で平行線を利用した SfM などが提案されているが、カメラ運動を2次元平面上に限っている⁽⁵⁾, 限定的な環境のみにしか対応できない⁽⁶⁾など、多くの制約が存在する。一方、我々も平行線を利用したカメラ運動推定の手法をすでに提案しており⁽⁷⁾, 必要とする前提条件としては、基本的には環境中に平行線が存在することのみである。平行線の検出と追跡は自動的に行われ、環境に対しての事前知識は必要なく、カメラの3次元運動に対応しているなど、多くの面で本研究は従来手法と比べ優れているといえる。

我々の従来手法⁽⁷⁾では、視点数にかかわらず、3回の1自由度探索によってカメラ運動の大域的最適解を推定できる。推定するパラメータの自由度の低さから、他の手法と比べ局所解に陥る危険性が低いのが大きな利点の1つである。しかし、推定パラメータが1自由度であっても、総当たりに解を探索するのはあまりに非効率的である。そこで、解の探索範囲を狭めることで効率的に探索する手法を提案する。

また、全方位カメラの広い視野は手法上で必要最低限の数の直線を検出するのは容易であるが、それだけではカメラ運動に対して強い拘束力をもった直線ばかりが得られるとは限らない。拘束力が弱い直線が多い場合、カメラ運動推定の精度は保証されないため問題である。そこで、テクスチャレス環境においても少数ではあるがカメラ運動推定に有用な特徴点が見られる

ことを利用し、特徴点との併用によってカメラ運動をより精度良く推定する枠組みが効果的である。

以上を踏まえ、本研究では平行線を含む直線を利用した SfM の枠組みでカメラ運動推定および環境計測を行う。今回は従来手法の課題であった、解の探索の効率化および特徴点との併用を提案する。

2. 処理の概要

本研究におけるカメラ運動推定の処理手順を図3に示す。本研究で最低限必要となるのは、平行線が3本と、平行線と異なる3次元方向の直線が3本である。これらの直線の3枚以上の画像間での対応関係が得られる必要がある。

提案手法は大きく3つの処理に分けられる。1つ目は特徴追跡である。特徴点および直線を画像中から抽出、画像列で追跡する。各画像中で抽出された直線の中から平行線を検出し、平行線とそれ以外の直線とに分ける。2点の特徴点を結ぶ直線を作成し、以降の処理では平行線でない直線として扱う。

2つ目はカメラ運動推定である。カメラ運動はまず回転運動のみが推定される。回転運動の推定は2つのステップに分かれている。次に並進運動を推定する。並進運動も2つのステップに分かれて推定される。このとき、各ステップでは直線とカメラ運動の幾何学的整合性を考慮し、解の探索範囲を限定する。

3つ目は3次元計測である。カメラ運動推定の際に同時に推定される直線に加え、推定されたカメラ運動を利用して直線以外のエッジ点も3次元計測する。

3. 特徴追跡

3.1 特徴点 特徴点と直線の抽出および追跡を行う。特徴点の追跡には KLT tracker⁽⁸⁾を用いる。特徴点の全方位画像座標 (u, v) は以下の式によってカメラの投影中心から注目点に向かうベクトル r (以下、光線ベクトルと呼ぶ) に変換される。

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

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

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るため光線ベクトルを単位ベクトルに変換する。

3.2 直線 直線の追跡には、全方位画像の歪んだ画像での直線追跡が可能で、文献⁽⁹⁾の手法を用いる。この手法では、多数のエッジ点を用いて直線が検出される。物体の見え方の変化などに強く、画像上で十分な長さがあれば特徴点よりも信頼性が高いことが確認されている。

ここでは直線検出の概要のみを述べる。詳しい内容に関しては文献⁽⁹⁾を参照されたい。まず Canny のオペレータによりエッジ点を検出し、その中に含まれるコーナ点を除くことで、エッジセグメントを得る。同一のエッジセグメントに属するエッジ点の光線ベクトル群のなす平面の法線ベクトル $\mathbf{n}$ を、以下の式を満たすエッジ点の数が最大となるとき単位ベクトルとして算出する。(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エッジ点数の過半数である場合、そのエッジセグメントは直線であると判定される。

$$r_i^T \mathbf{n} < e_{th}, \quad (3)$$

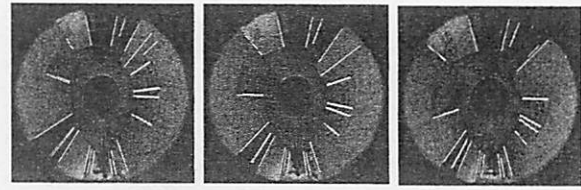
ここで、 e_{th} は閾値である。ベクトル $\mathbf{n}$ は、各視点の投影中心と3次元直線を通る平面の法線ベクトルで(以下、直線の法線ベクトルと呼ぶ)、基準となる座標系はその視点のカメラ座標系である。提案手法は、この直線の法線ベクトル $\mathbf{n}$ からカメラ運動を推定する。

3.3 擬似的な直線の作成 特徴点同士を結び、擬似的に直線を作成する。特徴点数が N とすると、作成される直線の候補数は $N(N-1)$ だけある。ここで、特徴点の対応付けには必ず何らかの誤差が生じるため、2つの特徴点の光線ベクトルのなす角度が小さい場合、わずかな誤差に対しても作成した直線の傾きが大きく変化することがあるため、信頼性が低い。そこで、光線ベクトル間の角度が小さいものは直線として採用せず、この時点で削除する。

ここで作成された直線は、平行線と異なる方向の直線として扱われる。擬似直線の法線ベクトルは、それを構成する2つの特徴点の光線ベクトルに対して垂直なベクトルとして算出される。

4. 平行線検出

3.2節で抽出された直線の中で、互いに平行となる直線を検出する。平行線の検出は基本的に RANSAC⁽¹⁰⁾に基づくアルゴリズムで行われる。まずランダムに3本の直線を選択する。選択されたいずれの直線の法線ベクトル $\mathbf{n}$ に対しても垂直なベクトル $\mathbf{v}$ が存在するとき、選択された3本の直線は互いに平行であり、そのときのベクトル $\mathbf{v}$ は平行線の消失点の方向と一致する。そこでまず、選択された3本の直線から以下の式を満たす単位ベクトル $\mathbf{v}$ を算出する。



(a) 0 frame. (a) 50 frame. (a) 100 frame.

Fig. 4 Parallel lines detection.

$$\sum_i^{n_p} (\mathbf{n}_i^T \mathbf{v})^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

ここで、 n_p は平行線の数である。算出されたベクトル $\mathbf{v}$ に対して以下の式を満たす直線の法線ベクトルの数をカウントする。

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

ここで、 v_{th} は閾値である。ランダム選択を繰り返し、カウント数が最大となるとき直線を互いに平行な直線であると判定する。平行線の法線ベクトルを用いて算出された(4)式を満たす単位ベクトル $\mathbf{v}$ を、カメラの投影中心から平行線の消失点に向かうベクトル(以下、消失点ベクトルと呼ぶ)とする。

この際、同一の画像中から複数の平行線が得られる可能性がある。本研究では、ロボットに搭載した全方位カメラは、ミラー軸が床面に対して垂直になるように設置することを想定しているため、視野角の関係から、安定して検出される平行線は床面に対して垂直な直線である。そこで、前フレームを取得したカメラ視点 c_{i-1} における消失点ベクトル $\mathbf{v}_{c_{i-1}}$ に対して一番近い消失点ベクトルとなる直線群を現フレームの平行線として採用する。フレーム間の姿勢変化が十分に小さければ安定して同じ方向の平行線が選択される。初期画像においては、ロボットが初期位置では床面に対して垂直な姿勢であることを前提とし、床面に対して最も垂直に近い平行線を採用する。全方位画像から実際に平行線を検出した結果を図4に示す。床面に対して垂直な方向の平行線が検出されていることが分かる。

5. カメラ運動推定

平行線の拘束条件を利用したカメラ運動推定を以下に述べる。本論文では、新規の内容について詳しく記述し、文献⁽⁷⁾と同様の数式や説明は一部省略する。

5.1 回転運動推定

5.1.1 消失点方向に対する姿勢合わせ 回転運動は2つのステップに分けて推定される。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

うに補正する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、画像間に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、以下の式を満たす回転行列 $R_{c_i}^m$ を算出する。

$$v_{c_0} = R_{c_i}^{mT} v_{c_i} \quad (6)$$

このステップ終了時では、消失点ベクトルの軸周りの回転成分 (1 自由度) は未知である。逆に言えば、平行線を利用することでカメラ回転は 1 視点につき 1 自由度とみなせる。

5.1.2 消失点方向を軸とする回転 次に消失点ベクトルを軸とする回転行列 $R_{c_i}^v$ を推定する。本ステップの入力は平行線以外の直線の法線ベクトルである。

提案手法の定義から、視点 $c_0 - c_i$ 間の回転行列 R_{c_i} と消失点ベクトルを軸とする回転行列 $R_{c_i}^v$ 、前項で算出した回転行列 $R_{c_i}^m$ との間には、以下の式が成り立つ。

$$R_{c_i} = R_{c_i}^m R_{c_i}^v \quad (7)$$

視点 $c_0 - c_i$ 間の最適な回転行列 R_{c_i} は以下の評価関数 (8) 式を最小化する行列として与えられる。

$$E_R(\phi_{c_i}) = \sum_k^{n_c} W_{c_k} e_R(\phi_{c_k}), \quad (8)$$

$$e_R(\phi_{c_i}) = \sum_j^{n_l} \left| \left(R_{c_i}^T n_{c_{i,j}} \right)^T d_j \right|^2, \quad (9)$$

$$d_j = n_{c_{0,j}} \times \left(R_{c_i}^T n_{c_{i,j}} \right), \quad (10)$$

$$W_{c_k} = \sum_i^{n_p} \left(\frac{1}{w_{c_{i,j}}} \right), \quad (11)$$

ここで、 n_c は視点数である。 ϕ_{c_i} は、視点 $c_0 - c_i$ 間の消失点ベクトルを軸とする回転行列 $R_{c_i}^v$ の回転角で、本ステップで求めるべきパラメータである。 d_j は直線 j の 3 次元方向ベクトルであり、視点 c_0 のカメラ座標系を基準としている。著者らは、本質的にこの推定ステップは、視点数にかかわらず、ある視点 $c_0 - c_i$ 間の回転角 ϕ_{c_i} を決める 1 自由度探索問題となることを文献⁽⁷⁾で示した。

W_{c_k} は、今回新たに導入した重み係数である。視点 c_k における (9) 式を 4 次関数に展開した際の、4 次の係数の和の逆数として定義される。4 次の係数はその定義から、視点間で直線の傾きの見え方に違いがあるほど大きな値になる。厳密には視差とは異なるが、直感的にはそれに近い評価基準であると考えてよい。画像間の見え方の違いが大きい直線から推定されたカメ

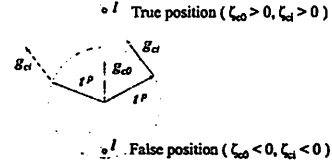


Fig. 5 Position relationship between g and t^p .

ラ運動は、三角測量の観点から信頼性が高い。そこで、 W_{c_k} を評価値に乗ずることで信頼性の高い直線から推定されたカメラ運動に高い評価を与える。これにより、特徴点の併用とともにカメラ運動推定の安定性を向上させる。

5.1.3 探索範囲の限定 従来手法では、基本的に総当たりに回転角 ϕ_{c_i} を与え、評価値が最小となる回転角を探索していたが、それではあまりに効率が悪い。しかし全探索以外の方法では、通常のカメラ運動推定と比べればわずかなではあるが、局所解に陥る危険性もある。そこで本研究では、直線とカメラ視点の幾何学的整合性を満たす探索範囲を算出し、その範囲内のみで探索を行う手法を提案する。

まず視点 $c_0 - c_i$ 間の回転角 ϕ_{c_i} を設定し、視点間の回転行列 R_{c_i} を算出する。平行線の 3 次元方向、すなわち消失点ベクトル v_{c_0} に対して垂直で、カメラ視点 c_i から平行線 j の 3 次元位置に向かう視線ベクトル $g_{c_{i,j}}$ (以下、視線ベクトルと呼ぶ) をそれぞれ算出する。 $g_{c_{i,j}}$ は $g_{c_{i,j}} \perp v_{c_0}$ かつ $g_{c_{i,j}} \perp R_{c_i}^T n_{c_{i,j}}$ を満たす単位ベクトルとして算出される。

平行線の 3 次元方向に対して垂直な平面上でのカメラの並進運動 $t_{c_i}^p$ (以下、平面上の並進運動と呼ぶ) と、平行線の 3 次元位置 l_j は、理想的には以下の関係を満たす。

$$l_j = \zeta_{c_{0,j}} g_{c_{0,j}} = \zeta_{c_{i,j}} g_{c_{i,j}} + t_{c_i}^p, \quad (12)$$

ここで、 $\zeta_{c_{i,j}}$ は視点 i から平行線 j の 3 次元位置までの奥行きを示す定数である。 $\zeta_{c_{i,j}}$ が負となるとき、画像中での見た目の平行線の位置と計測された平行線の位置の幾何学的整合性が満たされていないといえる。ただし、現在の推定ステップでは平面上の並進運動は未知であるため、さらに以下の手順を踏む必要がある。

(11) 式がカメラ視点と直線との位置関係の矛盾がない、すなわち $\zeta_{c_{0,j}} > 0$ かつ $\zeta_{c_{i,j}} > 0$ となる平面上の並進運動 $t_{c_i}^p$ が正常な範囲を求める (図 5)。ここで ζ の符号は、平面上の並進運動の方向のみを考慮すれば判別できる。したがって平面上の並進運動の正常範囲はその移動方向の角度範囲で表わされる。

ζ の符号が正から負へと変化する境界は、 $\zeta_{c_{0,j}} = 0$ のときと $\zeta_{c_{i,j}} = 0$ のときにそれぞれ 2 つずつ存在す

る。各ベクトルの定義から、 $\zeta_{c_0,j} = 0$ の境界における並進方向は、 $t_{c_i}^p = g_{c_{i,j}}$ もしくは $t_{c_i}^p = -g_{c_{i,j}}$ であり、 $\zeta_{c_{i,j}} = 0$ の境界における並進方向は、 $t_{c_i}^p = g_{c_{0,j}}$ もしくは $t_{c_i}^p = -g_{c_{0,j}}$ である。これらの境界前後の $\zeta_{c_{0,j}}$ および $\zeta_{c_{i,j}}$ の符号を確認することで、 $\zeta_{c_{0,j}} > 0$ かつ $\zeta_{c_{i,j}} > 0$ となる範囲を得る。

視点 $c_0 - c_i$ 間の、ある回転角 ϕ_{c_i} において、すべての平行線で共通する並進運動の正常範囲が存在する場合、その回転角では直線と視線ベクトルの幾何学的整合性が保証されている、すなわち解である可能性がある。以上の操作を、回転角を $-\pi$ から π まで変化させ、解が存在する可能性のある範囲、つまり 5.2.2 項において回転角 ϕ_{c_i} の探索すべき範囲を決定する。この処理自体は非常に単純であり、カメラ運動の評価値の算出と比べ計算コストが極めて低いため、実用上は探索範囲の限定を行う分だけ処理時間が短縮される考えてよい。

また、探索範囲を限定することによって、処理時間が短縮されるだけではなく、局所解に陥る危険性を低減できるという利点がある。基本的に回転角 ϕ_{c_i} の変化が微小であれば、回転角 ϕ_{c_i} によって決まる (9) 式の評価値の変化も同じく微小であり、最適解から離れるほど評価値は増加傾向を示す。これは回転角 ϕ_{c_i} の値が最適解と大きく異なる場合にはその限りではないが、探索範囲を幾何学的整合性に基づいて限定することにより、明らかに不自然な解となる範囲はあらかじめ除外されるため、問題とはならない。探索範囲内を 2 分法などの簡易な方法で探索することで、容易に大域的最適解を得ることができる。

ただし、これはデータ中にアウトライアが多数含まれていたり、カメラの移動量が非常に短かったりする場合には成り立たない点に注意が必要である。そこで提案手法では、カメラ運動の各推定ステップごとに RANSAC アルゴリズムに基づくアウトライア除去を行う。推定ステップごとにアウトライア除去を行うことで、よりインライアとアウトライアの切り分けが容易になるのも、提案手法の有用性の 1 つである。加えて、カメラの移動量を文献⁽¹¹⁾に基づく方法で評価することでこの 2 つの問題に対処する。

今回の実験環境においては、10 回以内の探索回数で大域的最適解に対して 0.1deg 以下の誤差の回転角 ϕ_{c_i} が得られた。単純に 0.1deg 刻みで全探索を行う場合と比べ、少なくとも 360 倍の高速化が実現できた。従来の総当たりの探索では 200ms の処理時間かかっていた回転運動推定を、1ms 以内で行えることを実験において確認した。

5.2 並進運動推定

5.2.1 消失点方向に対して垂直な平面上の並進
並進運動を 2 つのステップに分けて推定する。まず平面上の並進運動を推定する。このステップの入力は 5.1 節で推定した回転運動および平行線の法線ベクトルである。ある視点 $c_0 - c_i$ 間の平面上の並進運動 $t_{c_i}^p$ が決定されたとき、平行線の 3 次元位置ベクトル l_j は以下の式で算出される。

$$l_j = (\zeta_{c_{0,j}} g_{c_{0,j}} + \zeta_{c_{i,j}} g_{c_{i,j}} + t_{c_i}^p) / 2, \quad (13)$$

ここで、 $g_{c_{0,j}}$ 、 $g_{c_{i,j}}$ はそれぞれ視点 c_0 、 c_i における視線ベクトルである。 $\zeta_{c_{0,j}}$ 、 $\zeta_{c_{i,j}}$ は

$$\|\zeta g_{c_{0,j}} - \eta g_{c_{i,j}} - t_{c_i}^p\| \rightarrow \min, \quad (14)$$

を満たす定数である。視点 $c_0 - c_i$ 間の平面上の移動距離を 1 とすると、並進ベクトル $t_{c_i}^p$ は、以下の式で表現される。

$$t_{c_i}^p = a \cos \psi_i + b \sin \psi_i, \quad (15)$$

ここで、 a 、 b は平行線に対して垂直な平面と平行で、互いに直交する単位ベクトルである。 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 の並進方向である。SiM では並進スケールが不定であるため、この並進方向 ψ_i が推定すべき未知パラメータとなる。平面上の並進方向 ψ_i は、以下の評価関数を最小化することで推定される。

$$E_i(\psi_{c_i}) = \sum_i^{n_i} e_i(\lambda_a, \lambda_b), \quad (16)$$

$$e_i(\lambda_a, \lambda_b) = \sum_i^{n_i} \|t_{c_k}^p - l_j + \delta_{c_k,j} g_{c_k,j}\|^2, \quad (17)$$

$$\delta_{c_k,j} = \frac{(t_{c_k}^p - l_j)^T g_{c_k,j}}{g_{c_k,j}^T g_{c_k,j}}. \quad (18)$$

$$t_{c_k}^p = \lambda_a a + \lambda_b b \quad (19)$$

ここで n_i は平行線以外の直線の数である。 $\delta_{c_k,j}$ は視点 c_k から平行線 j の 3 次元位置までの奥行きを示す定数である。その他の視点 $c_0 - c_k$ 間の並進運動を推定する際には、視点 $c_0 - c_i$ 間の並進運動に対する相対的な並進運動、すなわちスケールを含めた並進運動を推定する必要がある。(15) 式は移動距離を 1 とした場合の式表現であるため、視点 $c_0 - c_k$ 間の平面上の並進方向ベクトル $t_{c_k}^p$ を (19) 式のように定義する。(18)、(19) 式を (17) 式に代入し、 λ_a と λ_b に関する連立方程式として解くことで、 $t_{c_k}^p$ の解が得られる。ここで得られる $t_{c_k}^p$ の解は、視点 $c_0 - c_i$ 間における並進角度 ψ_{c_i} に依

存する。入力データに誤差が含まれない場合、 ψ_{c_i} が真値と一致するとき、 $t_{c_k}^p$ の解も真値と一致する。したがって、平面上の並進運動の推定は、視点 c_0-c_i 間における並進角度 ψ_{c_i} のみを推定パラメータとする 1 自由度探索問題に帰着する。

なお、並進運動の 2 つの推定ステップにおいても回転運動と全く同様の考え方、すなわち直線の位置と視線ベクトルの幾何学的整合性に基づいて探索範囲を限定することができる。回転運動の推定の際と異なる点としては、並進運動の推定時にはすでに回転運動が分かっているため、並進運動の正常範囲を算出するだけで良いということである。また、入力として用いる情報は、平面上の並進運動では平行線の法線ベクトルであり、消失点方向に沿った並進運動の推定では平行線以外の法線ベクトルである。

5.2.2 消失点方向に沿った並進 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。特徴点から作成した擬似的な直線もこれに含まれる。5.2.1 項と同様に、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大域的最適解が得られる。具体的には以下に示す (19) 式が最小となるときに視点 c_i の並進量 ω_{c_i} を推定する。

$$E_T(\omega_{c_i}) = \sum_i^{n_c} e_T(\omega_{c_k}) \quad (20)$$

$$e_T(\omega_{c_k}) = \sum_j^{n_l} \left| 1 - (l_j - t_{c_k} + \mu_{c_k,j} d_j)^T g_{c_k,j} \right|^2, \quad (21)$$

$$t_{c_k} = t_{c_k}^p + \omega_{c_k} v \quad (22)$$

$$\mu_{c_k,j} = \frac{(t_{c_k} - l_j)^T d_j}{d_j^T d_j}, \quad (23)$$

ここで、 $g_{c_k,j}$ は、ここでは直線の視線ベクトルであり、 $g_{c_k,j} \perp d_j$ かつ $g_{c_k,j} \perp R_{c_i}^T n_{c_i,j}$ を満たす単位ベクトルである。

提案手法では、視点数によらず 1 自由度探索問題を 3 回解くだけでカメラの 3 次元運動を推定できる。提案手法では直線に加え特徴点を併用すること、および信頼性の高い推定結果に高い評価を与えることで、カメラ運動推定のロバスト性を向上させる。幾何学的な拘束条件により解の探索範囲を限定する手法を組み合わせることで、解の探索時の安定性を損なわずに効率化を実現する。

6. 3 次元計測

6.1 直線の 3 次元計測 5 章では、カメラ運動と同時に、平行線も含めた直線の 3 次元方向と 3 次元位



Fig. 6 Environment.

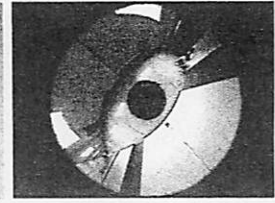


Fig. 7 Input image.

置も最適化される。提案手法では、直線は最終的に点の集合として表現する。直線を構成する 3 次元点群の算出手法の詳細は文献⁽⁹⁾を参照されたい。ここで、特徴点から作成した直線は実在しないため、復元処理の対象外とする。

6.2 エッジ点の 3 次元計測 検出された直線の計測結果だけでは、環境を密に復元することは困難である。そこで、文献⁽¹²⁾のエッジ点復元手法を全方位画像に適用し、直線として得られなかったエッジ点の 3 次元計測も同時に行う。ここで、全方位画像からそのままマッチングウインドウを切り出すと、隣り合ったフレーム間でも歪みや回転の影響を強く受ける。そこで、フレーム間のマッチングには全方位画像をパノラマ展開した画像を用いることでこの問題を軽減する。

7. 実験

実験では、図 2 に示す全方位カメラ搭載移動ロボットを走行させながら取得した全方位画像列を用いる。いずれの実験でも画像サイズは 800×600 pixel である。

7.1 回転運動推定時の重み付け 5.1.2 項の (8) 式で導入した、回転運動推定の重み係数の導入の効果を検証した。実験は図 6 に示すような特徴が少ないテクスチャレス環境で行った。入力画像は 150 枚の全方位画像である。推定したカメラ視点数は、画像枚数と等しい。実際の移動距離はおおよそ 80cm で、平坦な床面上を旋回運動をしている。入力画像のうちの 1 枚を図 7 に示す。特徴が極めて少なく、ビジョンベースの自己位置推定が困難な環境であることが分かる。

重み付けを含めすべての処理を行って推定したカメラ運動と、5.1.2 項の重み付け以外の処理をすべて行って推定したカメラ運動とで比較した。それぞれの条件で 1000 回ずつカメラ運動推定を行った際の評価値を図 8 に示す。縦軸は並進運動の評価値、横軸は回転運動の評価値であり、それぞれ小さいほど良い評価である。推定結果のばらつきは乱数を利用した RANSAC によるアウトライア除去が原因である。× は重み付けを行わなかった場合、+ は重み付けを行った場合の推定結果をプロットしたものである。重み付けを行った場合の推定結果は、重み付けをしない場合と比べ明らか

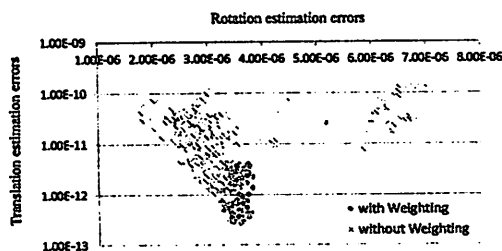


Fig. 8 Comparison of estimation results of camera movement.

かにばらつきが少なく良好な値で安定しており、最終的に3次元復元精度に大きな影響を及ぼす並進運動推定の評価も良いことが分かる。

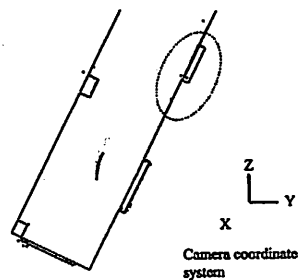
ここで注目すべきは、重み付けをしない方が回転運動推定は全体的に良い評価になっているにもかかわらず、並進運動の評価が悪いことである。これは、視点間の視差が小さく、かつ誤差を含んだ直線がインライアとして多数選択されたことによるものであると思われる。

回転運動推定に用いられる平行線以外の直線は、全体的な数としては特徴点から作成された擬似直線が支配的である。擬似直線は特徴点の対応誤差を含んでおり、多数のエッジ点から検出される直線と比べ画像間の対応精度が悪いものが多い。しかし、精度の悪い擬似直線でも視点間の見た目の傾きの変化が小さければ回転推定時の誤差の絶対値も小さくなるため、インライアとして選択されることがある。擬似直線は少ない特徴点からでも多数生成が可能のため、このような直線が選択される可能性は決して低くない。その結果として、回転推定時の評価値が小さくとも並進推定時の精度が悪い結果となる問題が発生する。

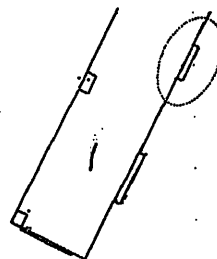
これは、特徴点の併用と、回転と並進を分離して推定することによる弊害であり、提案手法の欠点といえる。しかし、今回提案した、見え方の違いの大きい直線を選択した推定結果に良い評価を与える重み付けによって、この欠点を克服できていることが、この結果から分かる。したがって提案手法は、有用な特徴を選択し、回転と並進を分離してカメラ運動推定を効率化する利点を最大限に活かせる手法であるといえる。

7.2 特徴点の併用 次に、特徴点を併用した場合としない場合とで比較した。いずれの条件でも5.1.2項の重み付けを行っている。用いた画像列は7.1節と同じである。

カメラ運動推定と直線の計測結果を図9に示す。これは廊下の計測結果を真上から見た図である。特徴点の併用を行わなかった結果が図9(a)、特徴点の併用を行った結果が図9(b)である。青色、黄色、緑色の3本



(a) Without lines created from a pair of feature points.



(b) With lines created from a pair of feature points.

Fig. 9 Comparison of measurement results of parallel lines.

の短い線はカメラの各視点における座標系を示しており、カメラ位置と姿勢を表わしている。ただし、推定された全ての視点を表示すると結果が見づらいため、10フレームおきに表示している。赤い点が平行線の3次元計測結果である。上視点の図であるため、カメラのZ軸および平行線は見た目上、点で表わされている。計測結果と、手動で作成した廊下の形状を重ねて表示している。

カメラとの距離が近い平行線に関してはいずれの結果も実際の廊下形状とよく一致しているが、カメラから離れた位置(図中の点線の円)では特徴点の併用を行わなかった場合は特徴点の併用を行った場合と比べ位置のずれが大きいことが分かる。平行線の3次元位置と、平行線の画像中での検出位置とのずれ、すなわち再投影誤差を算出したところ、併用を行わなかった場合は1.0pixel以下、併用を行った場合は0.3pixel以下という結果であった。特徴点との併用を行うことで、再投影誤差が3分の1以下に低減されており、提案手法の有効性が示された。

7.3 複数回の計測結果の統合 最後に、より長い距離でカメラ運動推定および直線とエッジ点の3次元計測を行った。実験環境は7.1節、7.2節と同様にテクスチャの少ない屋内環境(廊下)である。ロボットの移動距離は約10m、入力画像は501枚の全方位画像である。推定したカメラ視点数は、画像枚数と等し

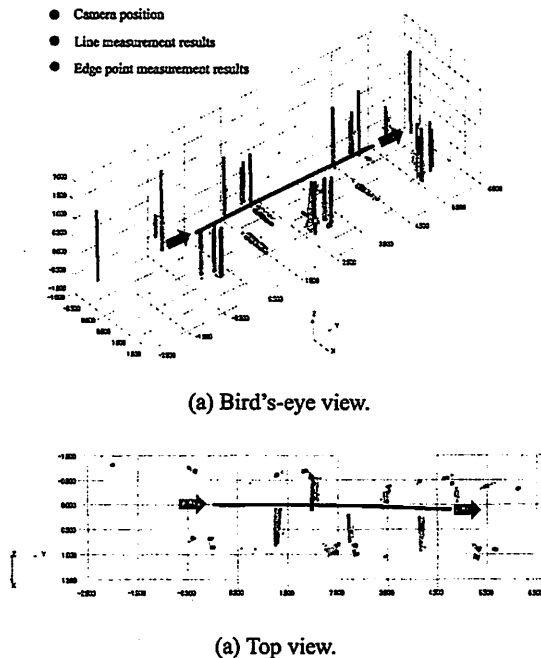


Fig. 10 Measurement result of lines and edge points.

い。この画像列では、最初の画像と最後の画像とで共通する特徴が得られない。そこで、100枚ごとに計5回、カメラ運動推定および3次元計測を行い、各計測結果のスケールを合わせることで、各推定結果を統合した。

直線の計測結果とエッジ点の計測結果を重畳した図を図10に示す。青色で示される点群が推定されたカメラ位置、赤色が直線の復元結果、緑色がエッジ点の復元結果である。直線として検出されなかった短い直線などが復元されている。

8. 結 言

本研究では、テクスチャレス環境において有効な、単眼全方位カメラを用いた Structure from Motion 手法を提案した。平行線の拘束条件を利用した著者らの従来研究の課題であった、解探索の効率化を実現した。また、特徴点との併用および推定時の適切な重み付けによってカメラ運動推定の精度およびロバスト性が向上した。

今後の課題としては、提案手法を利用した広範囲な屋内環境計測システムの構築、平行線を利用したクロージングループ手法の構築などがあげられる。

謝 辞

本研究の一部は、科研費若手研究(A)22680017の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- (1) J. Tardif, Y. Pavlidis and K. Daniilidis: "Monocular Visual Odometry in Urban Environments Using an Omnidirectional Camera", *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2531-2538, 2009.
- (2) P. H. S. Torr and A. Zisserman: "Robust Parameterization and Computation of the Trifocal Tensor", *Image and Vision Computing*, Vol. 15, Issue 8, pp. 591-605, 1997.
- (3) 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.
- (4) B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley and A. Fitzgibbon: "Bundle Adjustment - A Modern Synthesis", *Vision Algorithms: Theory and Practice, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1883, pp. 298-372, 2000.
- (5) M. Bosse, R. Rikoski, J. Leonard, S. Teller: "Vanishing Points and 3D Lines from Omnidirectional Video", *Proceedings of the 2002 International Conference on Image Processing*, Vol. 3, pp. 513-516, 2002.
- (6) 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.
- (7) 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: "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", 第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 312-5, pp. 1-4, 2011.
- (8) J. Shi and C. Tomasi: "Good Features to Track", *Proceedings of the 1994 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 593-600, 1994.
- (9) 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: "全方位画像列からの特徴点および直線エッジ情報を併用した Structure from Motion による3次元環境モデル生成", 電気学会論文誌C, Vol. 130-C, No. 9, pp. 1494-1503, 2010.
- (10) M. A. Fischler and R. C. Bolles: "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography", *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381-395, 1981.
- (11) 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.
- (12) M. Tomono: "Dense Object Modeling for 3-D Map Building Using Segment-based Surface Interpolation", *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2609-2614, 2006.