

全方位カメラを用いた特徴点と直線エッジの計測による 3次元環境モデル構築

静岡大学 ○川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透

Three-dimensional Environment Modeling with Measurement of Feature Point and Straight-line by Using Omnidirectional Camera

Ryosuke Kawanishi, Atsushi Yamashita and Toru Kaneko, Shizuoka University

Map information is important for path planning and self-localization when mobile robots execute autonomous tasks. In unknown environments, mobile robots should measure environments and construct their maps by themselves. Then, we propose a modeling method of three-dimensional environment. To realize wide-ranging environment measurement, we use an omnidirectional camera. Our method is based on structure from motion. The method uses straight-line edges together with feature points. These two kinds of features make it possible to measure environment densely. Experimental results show the effectiveness of our proposed method.

1 序論

移動ロボットが未知環境で自律的に活動する際には、ロボット自身が周囲環境を計測できる機能を持つことが重要である。環境計測を行うためのセンサとして、広い視野を持つ全方位カメラが考えられる。全方位カメラは、周囲 360 度を 1 枚の画像に撮像できるという特性により、環境計測に有効であることが示されている[1]。本研究は、1 台の全方位カメラを用いた Structure from Motion の枠組みで環境計測を行い、環境の 3 次元モデルを構築する手法を提案する。

我々は全方位カメラを用いた Structure from Motion による環境モデリング手法を提案した[2]。しかし我々の従来研究では、環境に対して疎な計測点群しか得られなかったため、周囲環境をモデル化するための十分な情報量が得られない場合があった。その原因の 1 つとして、計測のために画像中から抽出する情報が、特徴点のみであったことが挙げられる。

そこで本研究では、直線エッジを利用した計測手法を提案する。直線エッジを利用した計測の従来手法としては、ピルの直線形状と消失点を利用した手法[3]や、線分を利用した単眼カメラによる SLAM [4]などが挙げられる。これらの従来研究は全方位カメラに直接適用することが困難であり、また限定された環境のみにしか適用できない[3]、直線エッジを抽出するためにエッジの両端が常に見えている必要がある[4]などの問題がある。

そこで本研究では、エッジ端点の情報なしに全方位画像から直線エッジを抽出する手法を提案する。また、エッジの端点や 3 次元方向・位置が未知である前提で計測が可能な原理[5]を適用することにより前述の問題を解決する。さらに、直線エッジに加えて特徴点の計測を併用することで、より効率的に密な 3 次元計測を実現する手法を提案する。

2 計測手法

提案手法では、カメラに双曲面ミラーを取り付けた全方位カメラ(図 1)を使用する。以下に述べる処理では、カメラを移動させながら撮影を行って取得した全方位画像列を用いる。

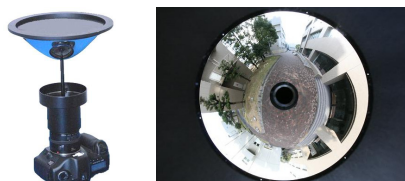


図 1 全方位カメラ(左)と取得画像(右)

2.1 特徴点を用いたカメラ運動推定

KLT 法により全方位画像列で特徴点の抽出・追跡を行うことで、画像間の対応点を得る。画像間における対応点の位置関係からカメラ運動を推定する。推定されたカメラ運動は、2.3 節で述べる直線エッジを用いたカメラ運動推定において、初期値として利用される。この特徴点ベースのカメラ運動推定手法には、我々の従来手法[2]を用いる。

2.2 直線エッジの抽出・追跡

Canny のオペレータによって全方位画像中からエッジ点を検出する(図 2(a))。検出したエッジ点の中からコーナー点とみなされた点を除去し、エッジを分離する(図 2(b))。

分離されたエッジセグメントの中で、直線エッジでないものを除去する。ここで、双曲面ミラーを利用した全方位カメラでは、3 次元空間中の点は双曲面ミラーを反射して画像上に結像する。ミラー上の反射点と 3 次元点を結ぶベクトル(以下、光線ベクトル)は、すべて双曲面ミラーの焦点で交わる。したがって、3 次元空間中の直線が結像したエッジ点の光線ベクトルは、ミラー焦点と 3 次元空間中の直線を通る平面上に存在する。この性質を利用し、エッジセグメントの各エッジ点の光線ベクトルのなす最小二乗平面を算出し、算出された平面と各光線ベクトルとの誤差が大きいものを直線エッジでないとして判定し除去することで、直線エッジのみを抽出する(図 2(c))。このとき算出された最小二乗平面の法線ベクトル \mathbf{n} は、2.3 節以降の処理において、1 枚の画像から得られる直線エッジの情報である。提案手法は直線エッジの 3 次元情報を用いているため、全方位画像の歪みの影響を受けずに直線エッジを抽出できる。

次に、抽出された直線エッジを画像間で追跡する。前画像から検出されたエッジ上の点を一定間隔でサンプリングする。サンプリング点と対応する次画像での点(以下、対応点)を探索する。同時に次画像のエッジセグメントを抽出する。次画像中で対応点とのユークリッド距離が最も短いエッジセグメントを探索し、投票する。最多投票数の前画像のエッジセグメントを、次画像の対応する直線エッジであるとみなす。これを各画像間



(a) エッジ点 (b) コーナー点除去 (c) 直線エッジ

図 2 直線エッジ抽出(全方位画像の一部)

で繰り返すことで直線エッジを追跡する。

2.3 直線エッジを用いたカメラ運動推定

2.1節で得られたカメラ運動を初期値とし、カメラ運動の誤差を最小化する直線エッジの3次元方向および位置を算出する。提案手法では、直線エッジを端点のない3次元空間中の無限長の直線として扱うため、直線エッジはその3次元位置ベクトル \mathbf{p} と方向ベクトル \mathbf{d} を用いて(1)式で表わされる。

$$\alpha \mathbf{d} + \mathbf{p} \quad (1)$$

ここで、 α は定数である。提案手法が適用するカメラ運動推定の原理[5]では、カメラの回転行列 \mathbf{R} は2.2節で算出した各直線エッジを含む平面の法線ベクトル \mathbf{n} と直線エッジの方向 \mathbf{d} のみに依存する。そこでまず、(2)式を最小化するカメラ回転 \mathbf{R} と直線の方向 \mathbf{d} を推定する。

$$E_R = \sum_m \sum_i \left| (\mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{n}_{m,i})^T \mathbf{d}_i \right|^2 \quad (2)$$

ここで、 i は直線エッジの番号、 m は観測点（各画像におけるカメラ位置・姿勢）の番号である。次に(3)式を最小化するカメラの並進ベクトル \mathbf{t} と直線エッジの3次元位置 \mathbf{p} を推定する。

$$E_t = \sum_m \sum_i \left| (A_{m,i} \mathbf{g}_{m,i} + \mathbf{t}_m) - (B_{m,i} \mathbf{d}_i + \mathbf{p}_i) \right|^2 \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{g}_{m,i}$ はエッジ方向 $\mathbf{d}_{m,i}$ と法線ベクトル $\mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{n}_{m,i}$ に垂直なベクトルである。すなわち、観測点 m と直線エッジ i の最短距離を結ぶベクトルと同義である。この処理において、画像間の誤対応や視差が少ない直線エッジが含まれると誤差が大きくなるため、そのような直線エッジはRANSACにより除去する。

なお提案手法では、直線エッジの3次元方向・位置の事前知識を必要とせず、カメラの3次元運動を推定することができる。ただし、カメラ運動推定には少なくとも3枚の画像と、3本の直線（少なくとも1本は平行でない）が得られる必要がある。

2.4 直線エッジの3次元計測

推定された直線エッジの方向ベクトルと位置ベクトルから直線エッジの3次元計測を行う。前述の段階では、直線エッジは無限長であると仮定していたが、最終的な3次元計測結果はエッジ点群として表現される。

推定した直線エッジ上から任意のサンプリング間隔で3次元点を取り出し、取得画像列に投影する。画像中で対応するエッジセグメントと投影点との距離が十分に小さいサンプリング点を、直線エッジの3次元エッジ点とする。この処理をすべてのエッジとそのサンプリング点で行うことで、エッジ点群を得る。

2.3節で推定されたカメラ運動を用いて特徴点の3次元計測を行い、その計測結果を直線エッジの計測結果に重畳することで最終的な計測点群を得る。

2.5 モデリング

得られた計測点群を用い、3次元ドロネー分割によって三角メッシュモデルを生成する。各三角メッシュに、全方位画像から生成したテクスチャを貼り付けることで、色情報を含む3次元環境モデルを構築する。



図3 実際の環境(左)と入力画像(右)

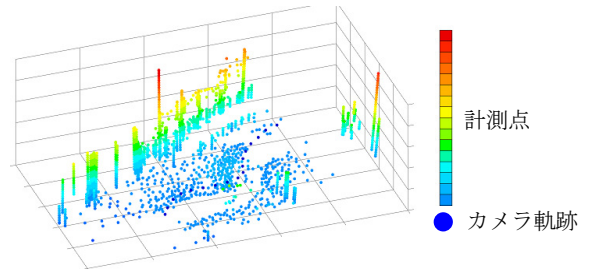


図4 計測結果

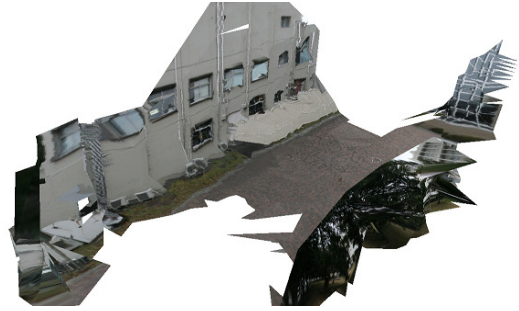


図5 構築された3次元環境モデル

3 実験

屋外環境において実験を行った(図3)。入力画像はカメラを移動させながら撮影した240枚の全方位画像である。カメラの移動距離は約16m、画像サイズは2496×1664 pixelである。

計測結果を図4に示す。建物から直線エッジが計測されており、その他のテクスチャが豊富な部分で特徴点が計測されていることが分かる。特徴点と直線エッジを併用したことにより、密な計測結果が得られた。構築された3次元環境モデルを図5に示す。環境の3次元構造と色情報を再現できている。

4 結論

本研究では、全方位画像中から直線エッジを抽出・追跡する手法を構築した。また、直線エッジを無限長の直線として利用する計測原理を適用することにより、直線エッジの計測を実現した。直線エッジに加え特徴点の計測を併用することによって、密な計測を実現できた。

今後の課題として、直線エッジ間の交差関係を考慮し、さらに密な計測を行う手法の構築や、生成した環境モデルを用いたロボットのナビゲーションへの発展が考えられる。

参考文献

- [1] J. Gluckman and S. K. Nayar: "Ego-motion and Omnidirectional Cameras", *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, pp. 999-1005, 1998.
- [2] R. Kawanishi, A. Yamashita and T. Kaneko: "Estimation of Camera Motion with Feature Flow Model for 3D Environment Modeling by Using Omni-Directional Camera", *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3089-3094, 2009.
- [3] 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.
- [4] P. Smith, I. Reid and A. Davison: "Real Time Monocular SLAM with Straight Lines", *Proceedings of the 17th British Machine Vision Conference*, pp. 17-26, 2006.
- [5] L. A. Spacek: "Edge Detection and Motion Detection", *Image and Vision Computing*, Vol. 4, Issue 1, pp. 43-56, 1986.