

全方位画像を用いた Structure from Motion による 特徴点と直線エッジの3次元計測と環境モデリング

川西 亮輔 (静岡大) 山下 淳 (静岡大) 金子 透 (静岡大)

Three-dimensional Environment Measurement and Modeling with Feature Point and Straight-line in Omnidirectional Image Sequence

*Ryosuke Kawanishi, Atsushi Yamashita and Toru Kaneko

Abstract— 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.

Key Words: Omnidirectional Camera, Structure from Motion, Straight-line Edge

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。環境計測にはカメラ画像を用いるアプローチがあり、様々な手法が提案されている。広範囲の環境計測を効率的に行うためには、広い視野を持つ全方位カメラを利用することが考えられる [1]。周囲 360 度を 1 枚の画像に撮像できる全方位カメラは、環境計測に有効であることが示されている [2]。本研究では、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。

我々はすでに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 [3]。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、計測に利用するのが画像中の特徴点 (物体のコーナー点など) のみであったことが挙げられる。

そこで本研究では、特徴点と直線エッジの両方を利用した計測手法を提案する。直線エッジは、特徴点の抽出が困難である平坦な形状の物体 (ビルや机など) が有していることが多い特徴であり、特徴点よりも密な計測が可能であることが示されている [4]。直線エッジを利用した計測の従来手法としては、ビルの直線形状と消失点を利用した手法 [5]、線分を利用した Structure from Motion [6] や単眼 SLAM [7] などが挙げられる。しかしこれらの従来手法は、全方位カメラに直接適用することが困難である。また、限定された環境のみにしか適用できない [5]、直線エッジを抽出・計測するために、画像列中で常に直線エッジの両端が見えている必要がある [6] [7] などの問題がある。

上記の問題を解決するために、本研究では、直線エッジの端点を必要としない全方位画像からの直線エッジ抽出の手法を提案する。また、直線エッジの端点や 3

次元方向および位置が未知である前提で計測が可能な原理 [8] を適用する。さらに、直線エッジだけでなく特徴点の計測を同時に行うことで、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. 処理の概要

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(a)) を使用する。このカメラで撮影した画像を図 1(b) に示す。

提案手法の処理手順を図 2 に示す。まず、動画像から抽出した特徴点の対応関係を用いた計測手法 [3] によりカメラ運動を推定する。この推定結果は直線エッジの対応関係を用いた計測における初期値として利用する。

次に、動画像中から直線エッジを抽出し、追跡を行う。特徴点の対応関係を用いた手法で得られたカメラ運動を初期値とし、カメラの回転運動と直線エッジの方向、およびカメラの並進運動と直線エッジの位置の関係をそれぞれ最適化する。計測された直線を任意間隔でサンプリングし、エッジ点群として直線エッジの

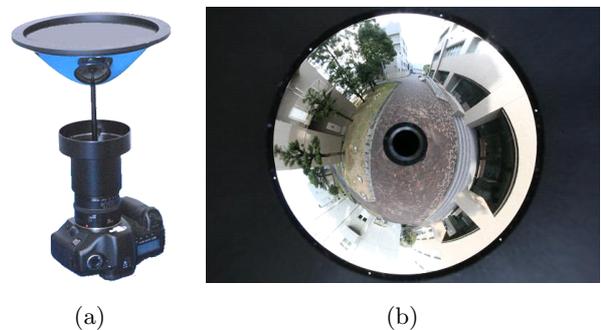


Fig.1 Omnidirectional Camera. (a) Camera Equipped with Hyperboloid Mirror. (b) Acquired Image.

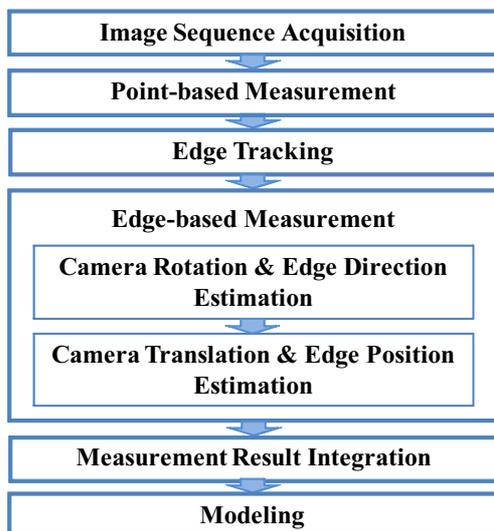


Fig.2 Process.

3次元計測結果を得る。

最適化されたカメラ運動を用いて特徴点の3次元計測を行う。特徴点と直線エッジの計測結果を統合し、統合後の計測結果から環境の多面体モデル(三角メッシュモデル)を構築する。構築されたモデルにテクスチャを貼り付けることで、テクスチャ情報を持った3次元環境モデルを生成する。

3. 環境モデリング手法

3.1 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、3.3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。この特徴点を用いたカメラ運動推定には、我々の従来手法[3]を用いる。

3.2 直線エッジ追跡

Cannyのオペレータ[9]によって全方位画像中からエッジ点を検出する(図4(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4(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(図3)。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判定し除去することで、直線エッジのみを抽出する(図4(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、3.3節以降の処

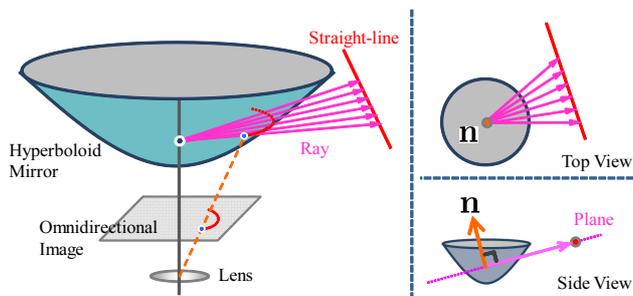


Fig.3 Omnidirectional Camera System and Straight-line Edge.

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。これを各画像間で繰り返すことで直線エッジを追跡する。

3.3 直線エッジを用いたカメラ運動推定

3.1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[8]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。

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

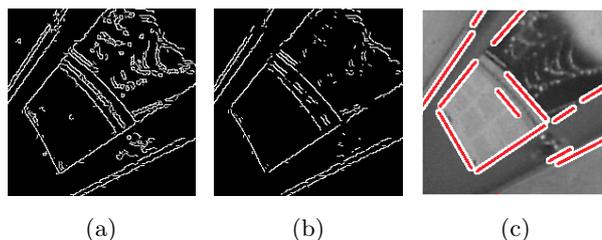


Fig.4 Straight-line Edge Detection. (a) Canny Edge Point. (b) Reject Result of Corner Point. (c) Detected Straight-line.

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。

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

ここで、 $\mathbf{g}_{m,i}$ はエッジ方向 \mathbf{d}_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 [10] 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）が必要である。

3.4 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、直線エッジは無窮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。

3.3 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。

3.5 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。

4. 実験

まず、本研究が提案する直線エッジの計測の精度評価を行った。入力画像は 2496×1664 pixel の全方位画像である。計測対象は壁面に互いに平行に配置した直線である（図 5(a)：縦方向の直線）。ただし提案手法では、抽出された直線がすべて平行である場合にはカメラ運動を決定することができない。そのため、計測対象に対して垂直な直線も適宜配置した（図 5(a)：横方向の直線）。計測は廊下の左右壁面に図 5(b) のように直線を配置した環境で行った。カメラの移動距離は約 180cm とし、移動中に取得した 60 枚の全方位画像を用いた。廊下の幅は約 200cm である。本実験では床面に垂直な直線の計測結果のみを評価対象とする。

計測結果を図 6 に示す。直線エッジの計測結果が廊下床面に対して高いほど赤く、低いほど青く表示されている。配置した各直線の両端のエッジが計測されて

いるため、廊下の各壁面に $4 \times 2 = 8$ 本、両壁面合わせて 16 本の直線エッジの計測結果が得られた。

計測結果の評価を表 1 に示す。評価するのは各直線エッジの方向の角度誤差、計測結果から算出された各壁面の最小二乗平面の法線ベクトルの角度誤差、および直線エッジの計測結果の壁面に対するばらつきである。角度誤差として、各直線エッジの方向ベクトルの平均値からの標準偏差および最大誤差を算出した。壁面に対するばらつきとして、各壁面上の 8 本のエッジの計測結果と算出した最小二乗平面との距離の標準偏差および最大誤差を算出した。ここで提案手法では、カメラ運動に対する相対的な距離が計測結果として得られるため、カメラの移動距離を 180cm としてスケールした結果を示している。実験結果から、提案手法は距離約 100cm 離れた直線エッジに対し奥行き誤差 7.5mm、角度誤差 1.2deg 以内で計測が可能である。

次に、屋外環境において実験を行った（図 7）。実験環境は、テクスチャに乏しい物体（建物など）とテクスチャの豊富な物体（樹木や床面のタイルなど）の両方を含んでいる。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 16 m である。

計測結果を図 8 に示す。建物や柵などのテクスチャに乏しい物体からは主に直線エッジが計測されている。また、その他のテクスチャが豊富な部分では主に特徴点が計測されている。この結果から、特徴点と直線エッジを併用することにより、特徴点のみ、もしくは直線エッジのみの計測よりも密な計測結果が得られることが示された。生成された 3 次元環境モデルを図 9 に示す。密な計測結果が得られたことにより、環境の 3 次元構造が復元できた。またテクスチャを貼り付けて色情報を付加することによって、実際の環境を再現したモデルが生成された。

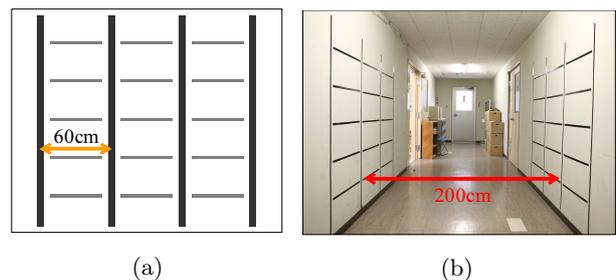


Fig.5 Measurement Object. (a) Object. (b) Environment.

Table 1 Evaluation of Measurement Accuracy.

	Angle (Direction) [deg]	Angle (Plane) [deg]	Depth [mm]
Standard Deviation	1.2	-	2.3
Maximum	1.9	1.5	7.5

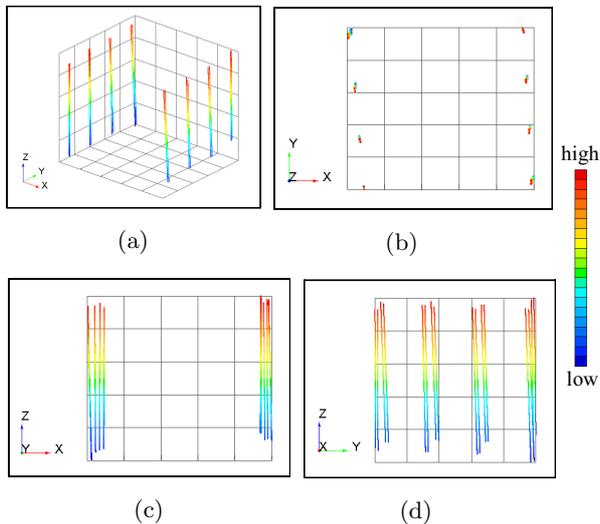


Fig.6 Results of Edge Measurement. (a) Bird's-eye. (b) Top. (c) Front. (d) Side View.

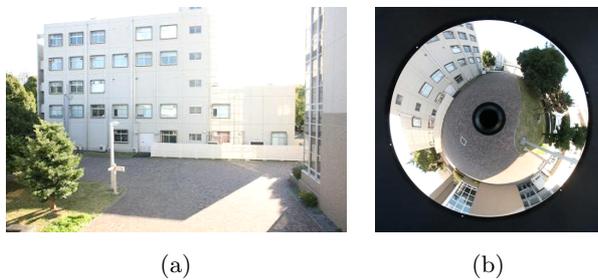


Fig.7 Outdoor Environment. (a) Measured Environment. (b) Input Image.

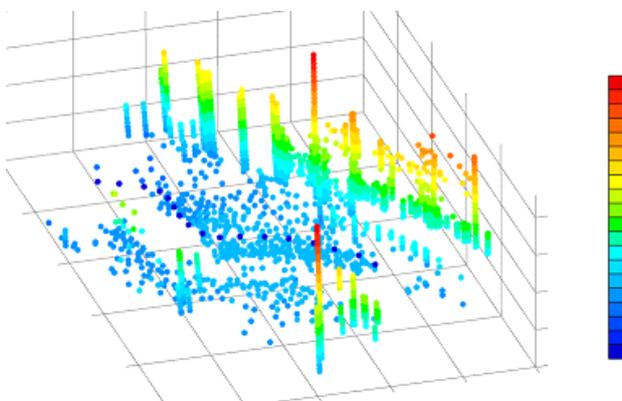


Fig.8 Measurement Result of Outdoor Environment.

5. 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。



Fig.9 Modeling Result of Outdoor Environment.

参考文献

- [1] C. Geyer and K. Daniilidis: "Omnidirectional Video", *The Visual Computer*, Vol. 19, No. 6, pp. 405-416, 2003.
- [2] J. Gluckman and S. K. Nayar: "Ego-motion and Omnidirectional Cameras", *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, pp. 999-1005, 1998.
- [3] 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.
- [4] M. Tomono: "3D Object Mapping by Integrating Stereo SLAM and Object Segmentation Using Edge Points", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 5875, pp. 690-699, 2009.
- [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] A. Bartoli and P. Sturm: "Multi-View Structure and Motion from Line Correspondences", *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 207-212, 2003.
- [7] 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. Vol. 1,
- [8] L. A. Spacek: "Edge Detection and Motion Detection", *Image and Vision Computing*, Vol. 4, Issue 1, pp. 43-56, 1986.
- [9] J. F. Canny: "A Computational Approach to Edge Detection", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, No. 6, pp. 679-698, 1986.
- [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.