

ステレオカメラを用いた広域3次元形状マップ生成法

佐藤 大† 岩男 悠真† 後藤 敏行† 若井 秀之‡

横浜国立大学 大学院環境情報学府/研究院†

(株)小松製作所開発本部‡

1. はじめに

鉱山などの構内走行用の大型車両は運転者からの死角が大きく、天候や夜間照明状態により、運転者が路肩などの危険場所を把握しにくいという問題がある。作業にともなって変化する構内走行路の3次元形状マップを構築できれば、DGPSの位置情報と併用することで、転落・脱輪や衝突などの事故を回避できる可能性がある。

距離画像から3次元形状マップを生成する方法はフレーム間の距離画像の統合とモデリングの2つの段階に大別できる。このうち、前者については、複数フレームの距離画像の誤差を最小となるように統合する方法などが検討されている[1]。また、3次元計測により得られた3次元点群からのモデル生成については、動的輪郭法を用いた手法[2]や陰関数表現を用いた方法[3]などが報告されているが、メモリの消費量や処理時間の問題がある。

本研究では、車載のセンサおよびシステムを想定し、ステレオカメラから得られる距離画像のフレーム間対応情報から複数フレームを統合するとともに、広域の3次元形状マップを生成する方法について検討する。特に、統合された距離画像データを部分領域に分割し、その各々の部分領域がすべての距離データを内包する直方体の集合として、環境を記述することによって、少ないデータ量でかつ指定した精度で環境を高速に表現する方法について報告する。

2. アルゴリズムの概要

本研究では3次元距離画像センサで観測した濃淡画像と距離画像を元に広域の3次元形状マップを生成する。図1に示すように本手法はカメラ位置算出、距離画像データ統合、フレームモデル生成などの処理で構成されている。具体的には、まず濃淡画像から特徴点を抽出し、連続するフレーム間で特徴点の対応付けを行い、その対応関係を用いてフレーム間の相対位置を算出する。ただし、フレーム間で発生する誤差はフレームを重ねるごとに累積されるためDGPSの位置情報を用いて補正を行う。次に、求められたカメラ位置を元に連続

する距離画像のフレームを統合するとともに、走行路座標に変換する。さらに、この結果をもとに3次元形状マップを生成する。3次元形状マップの生成に当たっては、各部分領域においてすべての距離データを内包する直方体の集合として、環境を記述することにより、あらかじめ指定された精度で環境全体を表現可能な構造をとっている。

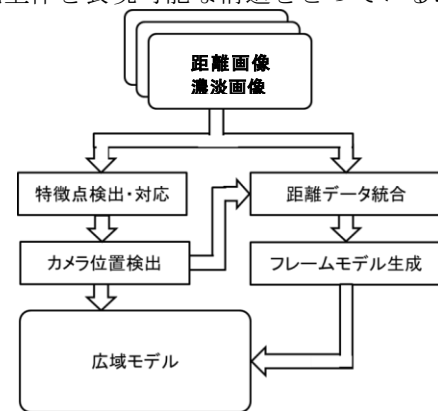


図1 アルゴリズムの概要

3. カメラ位置算出方法

入力した距離画像に対して、メディアンフィルタにより雑音を除去した後に、特徴点抽出・対応付け、座標変換、カメラ位置推定を行う。

本研究では特徴点追跡手法としてSURF[4]を用いた。SURFでは64次元の局所特徴量を用いてフレーム間の画像の類似度を計算してマッチングを行う。次に、抽出された特徴点の組から、フレーム間の相対カメラ位置を推定する。移動前のカメラ座標系を $\mathbf{X}=(X,Y,Z)^T$ 、移動後のカメラ座標系を $\mathbf{X}'=(X',Y',Z')^T$ とすると、これらの座標の関係は同次座標を用いて次式のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{X}' \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、 \mathbf{R} は回転行列、 \mathbf{T} は並進ベクトルである。ここから、測定された距離データを座標変換した3次元座標点の組と特徴点追跡の結果からカメラの回転と移動量を表す同次変換行列を推定する。

ここで、 k フレーム目における n 個の特徴点 $\mathbf{X}_{k,i}$ ($i=1 \dots n$)に対する $k+1$ フレーム目で観測された対応点を $\mathbf{X}'_{k+1,i}$ ($i=1 \dots n$)とすると、それぞれの座標点は空間上では同一の場所に存在する。そこで、 $k+1$ フレーム目のカメラ位置で観測された特徴点 $\mathbf{X}'_{k+1,i}$ を k フレーム目のカメラ位置に座標変換

Three-Dimensional Map Modeling Haul Road Environment using Stereo Sensor

Dai Sato † Yuma Iwao † Toshiyuki Gotoh †: Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501

Hideyuki Wakai ‡: Komatsu Ltd. 3-25-1 Shinomiya Hiratsuka-shi, Kanagawa, 254-8555 Japan

した $\mathbf{X}_{k+1,i}$ と実際に k フレーム目に観測された $\mathbf{x}_{k,i}$ の誤差の二乗和,

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\mathbf{X}_{k,i} - \mathbf{X}'_{k+1,i})^T \cdot (\mathbf{X}_{k,i} - \mathbf{X}'_{k+1,i}) \rightarrow \min \quad (2)$$

が最小になるようなパラメータ \mathbf{R} , \mathbf{T} を決定することによって、カメラ間の関係を求める。求めるパラメータの自由度は回転と並進の 6 になる。本手法では、カメラ位置の推定においては特徴点追跡における誤対応の影響を回避するために、投票を用いた RANSAC 法をベースとしたロバスト推定を行った[5]。RANSAC 法では M 個の対応関係候補に対して、正しい対応関係を選別しながら、以下の手順により推定を行う。

- 1) M 個のデータから N 個をランダムに選択
- 2) N 個のデータを用いてパラメータ候補を推定
- 3) パラメータ候補を用いて、 M 個のデータとの誤差を計算する。誤差が閾値以下のデータ数を数え、そのパラメータの適合度とする
- 4) 1) から 3) の処理を繰り返しかえし、適合度が一番高いパラメータを求める

本手法では、RANSAC 法におけるパラメータ候補の推定時に、パラメータの線形推定を行ったのちに R の直交条件を評価することによって、不要な投票操作の削減する。

さらに、特徴点追跡による移動量検出やカメラ移動推定における誤差の累積の影響を回避するために、走行車に設置した DGPS で検出した走行軌跡と、カメラ位置検出により求めたカメラの移動軌跡を最小二乗法を用いた対応付けによって高精度化を図っている。

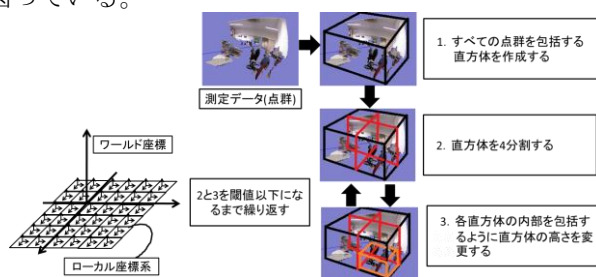


図2 ワールド座標系とローカル座標系

4. 3次元モデルの生成法

本研究では、前章で述べたカメラ位置推定結果に基づいて、連続したフレームの距離画像を統合する。一方、データ量や計算量の観点から、すべての時系列距離画像をそのまま保持することは現実的でない。そこで、図2に示すように、広域モデル全体を複数のローカルマップに分割し、各ローカルマップには、ローカル座標系の情報、ローカルマップの範囲、形状情報などを持たせる。さらに、形状情報はローカルマップの全体形状を四分木構造で部分領域に分割し、すべての距離データを内包する直方体の集合として、形状を表現す

ることで、少ないデータ量で指定した精度での環境表現ができるようにした。これによって、平面に近い点群は面積が広く薄い直方体で表現できるので、誤差の保証とデータ量の削減が可能になる。また、このモデルは分割数が少ないほど平面に近く、分割数が多いほど高さを持っているため、崖や壁などの判定も容易になる。

5. 実験結果

実験データとして、車載のステレオカメラを用いて大学構内で時系列データの収集を行った。図3に実験で用いた画像の一例を示す。図4左に、推定されたカメラ位置の軌跡と、そのカメラ位置を用いて、前後20フレームの距離画像を統合した結果を示す。また、右図はカメラ位置推定結果とDGPS位置情報とマッチングした結果を示す。



図3 追跡画像の一例

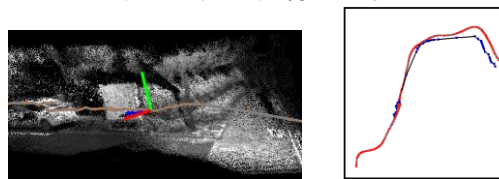


図4 環境復元の結果

6. まとめ

距離画像センサで観測した濃淡画像と距離画像をもとに広域の3次元形状マップを生成する手法について述べた。本手法では、濃淡画像から特徴点の対応関係を検出し、フレーム間のカメラの相対位置を推定し、距離画像のフレームを統合する。さらに、この距離データをもとに、各部分領域がその中のすべての距離データを内包する直方体の集合として、環境を記述することによって、少ないデータ量でかつ指定した精度で環境全体を表現する方法について検討した。

文 献

- [1]加賀, "ステレオカメラからのオンライン3次元SLAM", 日本ロボット学会誌, 25, 4, pp.10-13, 2008.
- [2] H. Win, et.al., "A Novel Modeling Algorithm for Shape Recovery of Unknown Topology", Proc. IEEE Conf. on Computer Vision, 1, pp.402-409, 2001.
- [3] 佐川, 他, "大規模探索対象のための幾何形状および光学情報統合システム", MIRU, 1, pp.11-20, 2002.
- [4] H. Bay, et.al., "SURF: Speeded Up Robust Features", CVIU, 110, 3, pp.346-359, 2008.
- [5] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Commun. ACM, 24, 6, pp.381-395, 1981.