

点群画像を用いた移動計測データからのメッシュ生成手法

Mesh generation method from data of Mobile Mapping System using point-cloud image

小平 圭祐[†], 増田 宏[†]

Keisuke KOHIRA[†] and Hiroshi MASUDA[†]

[†]: 電気通信大学大学院情報理工学研究科, h.masuda@uec.ac.jp

概要: 移動計測データからの高速なメッシュ生成手法として, GPS 時刻とレーザスキャナの回転周波数を用いる手法が提案されている. しかしながら, この手法ではスキャンラインに欠落がある場合に接続関係を検出できないため, メッシュ生成に失敗するという問題がある. そこで本研究では, GPS 時刻, レーザスキャナの繰り返し周波数, 回転周波数に着目して点群を 2 次元に構造化することで, 点群の接続関係を安定して導出する手法を示す.

1. 緒言

近年, 日本の道路周辺のインフラ設備が老朽化を迎えている. 効率的にインフラ設備を保守管理するための技術として, 移動計測装置(Mobile Mapping System, 以後 MMS)の利用が期待されている. MMS は車両の上にレーザスキャナ, カメラ, GPS, IMUなどを搭載した装置で, 道路周辺の地物情報を点群として取得することができる.

インフラ設備の現状を把握するには, 点群に対してセグメンテーションを行い, 管理対象の物体ごとの点群に分割する必要がある. 点群がメッシュモデルに変換できれば, 個々の地物へのセグメンテーションは比較的容易である.

これまでに, 我々は MMS で取得した点群から高速にメッシュモデルを生成する手法を示した[1]. この手法は, スキャンラインに欠落がある場合には, 接続関係を検出できないため, メッシュ生成に失敗するという問題があった. そのため, スキャンライン抜けが頻発する電線などの細い物体において, 接続関係を検出できないケースが多く見られた.

一方, Bruno らは, 点群をセンサ空間に写像することで, 移動計測によって得られた点群を2次元化する手法[2]を提案し, 点群のセグメンテーションに利用した. 本研究では, Bruno らの提案した点群画像を応用して, 移動計測で得られた点群から, 細い電線などのメッシュモデルを生成する方法について考える. Bruno らは議論していなかったが, 後述するように, 隣接関係を正しく保存する点群画像を生成するためには, 回転周波数を適切な値に設定する必要がある.

そこで, 本研究では, 点群画像を生成するために必要なセンサパラメータとして, レーザスキャナの回転周波数を計測された点群から算出し, 補正する方法についても示す. 本手法を用いることで, スキャンラインに欠落がある場合でも, 安定してメッシュを生成できることを示す.

点群画像は回転周波数, レーザパルス繰り返し周波数を用いて, GPS 時刻から生成される. 点群画像に欠落が生じた場合には, 局所的にドロネ三角形分割を施し, 欠落部分のメッシュモデルを生成する.

以下において, 点群画像の生成手法とメッシュ生成法, また評価実験について示す.

2. 本手法の概要

2.1. MMS (Mobile Mapping System)

MMS は, カメラやレーザスキャナなどのセンサを車両に搭載したシステムで, 道路周辺の 3 次元情報を短時間で広範囲に計測することができる. MMS の外観を図 1 に示す. 一般的に, MMS には 2D レーザスキャナが搭載されており, 車両が移動することで 3



図 1 MMS の外観

次元計測を可能にしている。

はじめに、スキャナ固有の座標系において 3 次元座標を取得し、その後、車両の自己位置、レーザスキャナの原点、それらの相対位置を用いて、大域的な座標系に変換する。大域的な座標系としては、平面直角座標系や緯度経度座標系が用いられる。MMS の自己位置や姿勢の推定には、基本的に GPS の情報を用いる。しかし、高層ビルに囲まれた状況などにおいては、自己位置を推定するのに必要な十分数の GPS 衛星を捕捉できないため、IMU、オドメータを用いて補正を行う。

本研究では、移動計測システム MMS-X 500ZL (三菱電機) で計測された点群を扱う。この MMS は、レーザスキャナとして Z+F Profiler 9012 を搭載しており、走査範囲は 360° 、毎秒 100 万点を計測できる。

2.2. 本手法の流れ

本研究の流れを図 2 に示す。はじめに、点群画像を生成するために必要なパラメータとして、レーザスキャナの回転周波数を点群から算出し、補正する。次に、GPS 時刻、レーザスキャナの回転周波数、繰り返し周波数を用いて点群を構造化し、隣接関係を保存した点群画像を生成する。次に、点群画像上で三角形分割を行い、2 次元メッシュを生成する。最後に、2 次元メッシュの接続関係を用いて 3 次元のメッシュ生成を行う。

3. 点群画像の生成

3.1. 回転周波数の補正

はじめに、点群からレーザスキャナの回転周波数 f を算出する。ここでは、回転周波数を 100Hz のモードで計測した点群を用いた。各点は計測された時刻を示す GPS 時刻を保持する。MMS は、図 3 に示すように、螺旋を描くようにレーザ光を照射しながら走行する。レーザスキャナのスピンドルは一定速度で回転するため、ある点と隣り合うスキャンライン上の近傍点は $1/f$ 秒後付近に計測されると考えられる。これを確認するために、周期ごとに点群を色付けした(図 4)。なお、図中の黒丸は $1/f$ 秒後ごとの計測点を表す。ここで、黒丸の位置は互いに隣り合うスキャンライン間の最近傍点とは離れている。よって、計測時に設定した $f(=100\text{Hz})$ は実際の値と異なると考えられる。

そこで、点群が持つ GPS 時刻から f を算出して補正する。はじめに、各点と隣り合うスキャンライン間で最近傍点を求め、その点との GPS 時刻の差 ΔT を算出する。図 5 に ΔT に関するヒストグラムを示す。グラフの横軸は、GPS 時刻の差の階級、縦軸は度数を表

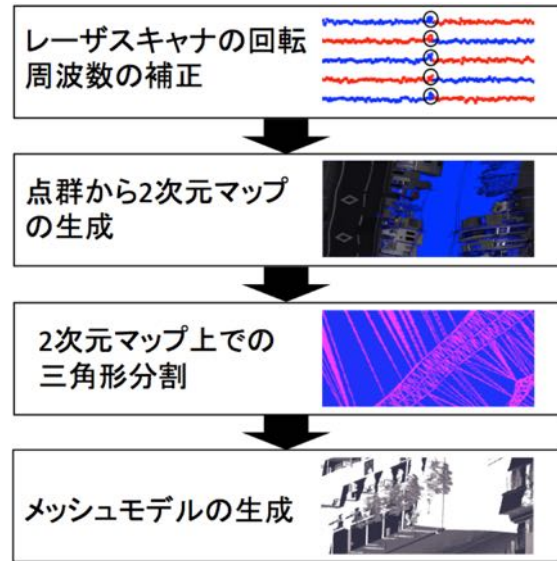


図 2 提案手法の流れ

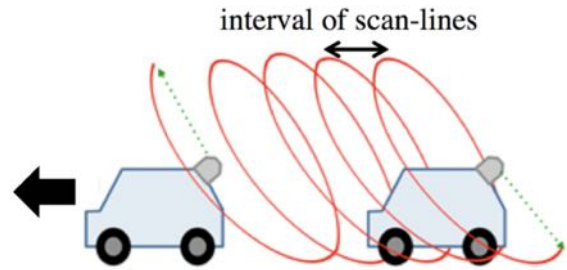


図 3 レーザ光線の軌跡

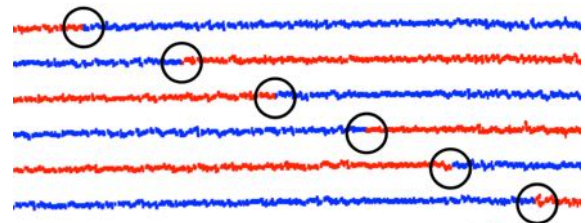


図 4 回転周期後の計測点の位置

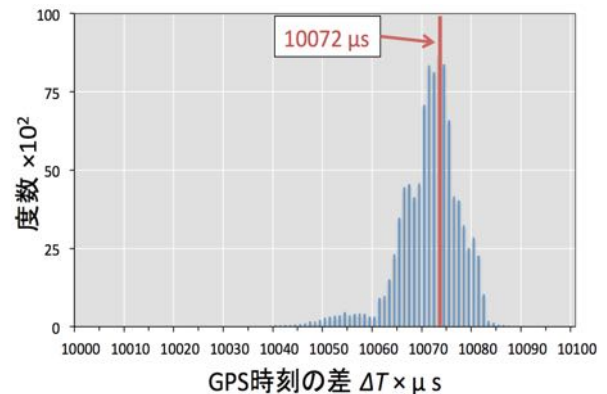


図 5 ΔT に関するヒストグラム

している. ここでは, 度数が最大となる ΔT をレーザスキャナの回転周期 T として用いる. この例では $T (= 1/f) = 10072 \mu s$ となる.

補正した回転周波数 f を用いて, 再び周期ごとに点群を色付けした(図 6). 補正前と比較して, 黒丸が隣り合うスキャンライン間の最近傍点により近くなったことが確認できる.

3.2. GPS 時刻に基づく点群の 2 次元化

Bruno らが提案した点群画像を生成するために, レーザスキャナの回転周波数 f [回転/秒], パルス繰り返し周波数 ω [点/秒] を用いて点が持つ GPS 時刻から回転数 r , 点番号 n を算出する. r は計測を開始してからレーザスキャナが回転した回数, n はレーザが 1 周するときに, ある点を基準にして, 何番目に計測されたかを示す. 点が保持する GPS 時刻を t_i ($i = 0, \dots, N$), 開始時刻からの GPS 時刻の差を $\Delta t_i = t_i - t_0$, 浮動小数点剰余を fmod とすると, r と n は以下の式で算出できる.

$$r = \Delta t_i \cdot f$$

$$n = \text{fmod}(\Delta t_i, 1/f) \cdot \omega$$

各点で算出した r と n に基づいて, 点群を 2 次元マップ上に写像する. 図 7 に生成した点群画像を示す. この点群画像では, 各点が持つ反射強度から明暗値を定めている. また, 点が格納されていないピクセルは, 青色で示した.

次に, レーザスキャナの回転周波数を補正せずに点群画像を生成した例を図 7 に示す. この例では, 計測時に設定した回転周波数 f (100Hz) を用いた. 図より, f を補正しないと隣接関係を正しく保存した点群画像が生成できないことが分かる.

4. メッシュモデルの生成

生成した点群画像には, 点群の隣接関係が保存されているため, 高速にかつ簡単に近傍点を探索することができる. ここでは, はじめに点群画像上で 2 次元メッシュを生成し, その接続関係を用いて 3 次元のメッシュ生成を行う.

2 次元メッシュの生成は 2 段階に分けて行われる. 図 9 に, 比較的大きい物体と小さく細い物体の点群画像を示す. 大きい物体は点が隙間なく詰まっているのに対し, 細く小さい物体は点間に空のピクセルが多く存在している. そこで, 点が詰まっている領域と隙間が存在する領域を分けて三角形分割を行う.

はじめに, 点が埋まっている領域の分割を行う. まず, 2 次元画像上のある点 (i, j) と隣り合う 3 ピクセル $(i+1, j)$, $(i, j+1)$, $(i+1, j+1)$ に点が格納されているか

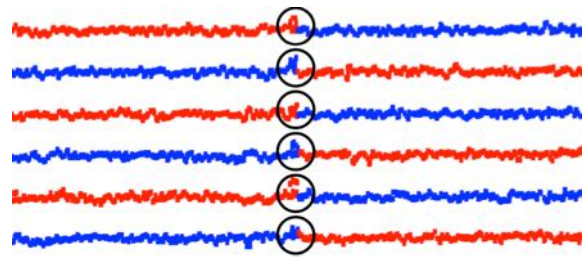


図 6 補正した回転周期後の計測点の位置
点番号 n

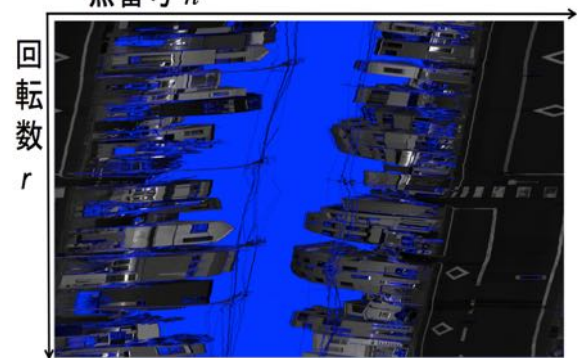


図 7 移動計測データから生成された点群画像
(回転周波数の補正あり)

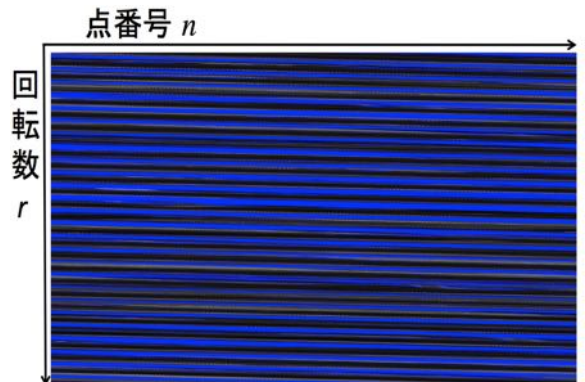


図 8 移動計測データから生成された点群画像
(回転周波数の補正なし)

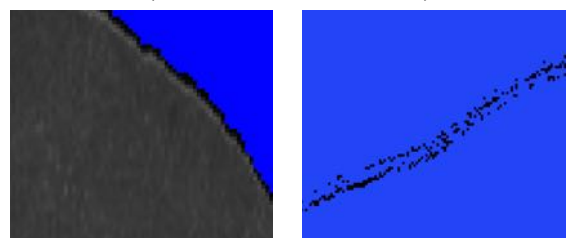


図 9 大きい物体(左)と細く小さい物体(右)の
点群画像

確認する. 全てのピクセルに点が格納されていれば, この 4 点から三角形の面を生成する. 次に, 面が生成できなかった点と, 連結成分の外周の点を抽出し, これらに関してドロネ三角形分割を施し, 三角形メッシュを生成する. スキャンラインの欠落が頻発する細い物体の多くは, この処理により三角形分割される.

最後に、2次元の接続関係を用いて3次元メッシュを生成する。まず、2次元の面に関して、面を構成する全ての辺の3次元距離を算出する。この距離が全て閾値以下ならば、3次元でもメッシュを生成する。この処理を全ての2次元メッシュに行い、3次元のメッシュを生成する。

5. 評価実験

本手法を用いて移動計測データからメッシュを生成した。図10に生成したメッシュモデルを示す。図より、点群を三角形に分割できていることが分かる。

次に、メッシュモデルの接続性に関して、従来手法と比較する。図11に、連結成分ごとに色分けした電線のメッシュモデルを示す。従来手法では、スキャンラインが抜けた箇所において接続性を検出できず、細かく分割された連結成分が生成された。一方で、本手法では、多くの電線を長い連結成分として検出することができた。ただし、計測点が少なく、三角形に分割できない箇所は、本手法でも接続関係を検出できないケースが見られた。

最後に、処理時間について検証する。約530万点の移動計測データに本手法を適用した結果、処理時間は表1のようになった。従来手法では、メッシュ生成に5.98秒かかったが、本手法では4.05秒とさらに高速な処理時間を実現することができた。

6. 結論

本研究では、計測した点群から回転周波数を補正する手法を示した。また、レーザスキャナの回転周波数、パルス繰り返し周波数に着目した点群の構造化を行い、メッシュを生成する手法を示した。これにより、スキャンラインの欠落が頻発する細い物体でも、安定してメッシュモデルを生成することが可能になった。

今後は、生成したメッシュモデルに基づく地物のセグメンテーション手法を検討する予定である。

参考文献

- [1] H.masuda, et al.: TIN generation and point-cloud compression for vehicle-based mobile mapping system, Advanced Engineering Informatics, vol.29, no.4, pp.841-850, 2015
- [2] V.Bruno, et al.: TerraMobilita/iQmulus urban point cloud analysis benchmark, Computers & Graphics, vol.49, pp.126-133, 2015

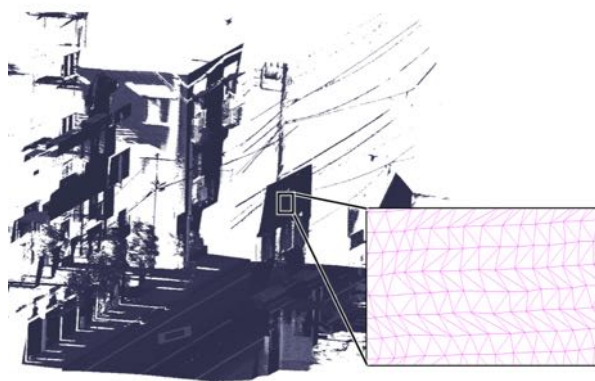


図10 生成したメッシュモデル

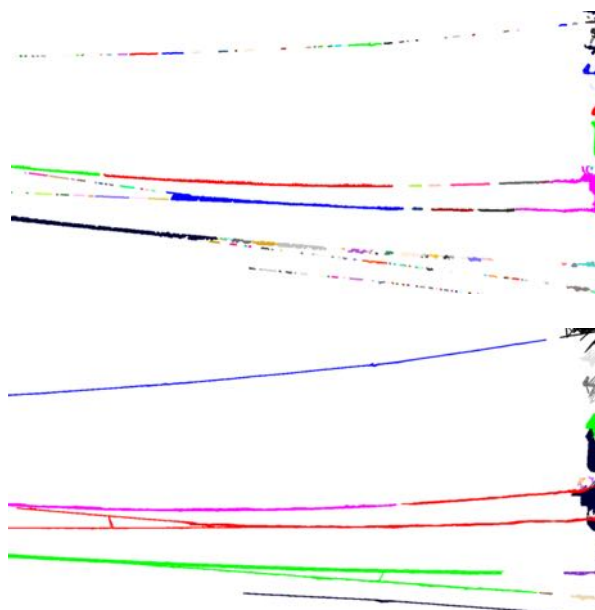


図12 電線のメッシュモデル
(上: 従来手法, 下: 本手法)

表1 メッシュ生成の処理時間

回転周波数	2次元化	三角形分割	合計
0.12sec	0.78sec	3.15sec	4.05sec

小平圭祐:2016年,電気通信大学情報理工学部知能機械工学科卒業。同年,同大学院情報理工学研究科修士課程在学中。3次元計測,コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。

増田宏:1985年,東京大学工学部精密機械工学科卒業。1987年,同大学院工学系研究科修士課程修了。同年,日本アイ・ビー・エム(株)入社,東京基礎研究所に勤務。1998年,東京大学大学院工学系研究科 准教授,2013年より電気通信大学大学院情報理工学研究科 教授。形状モデリング,3次元計測,コンピュータグラフィックス, CADに関する研究に従事。工学博士。