

移動計測データを用いた道路周辺地物の形状再構成（第4報）

東京大学 小栗昇悟, 電気通信大学 ○増田宏

Shape Reconstruction from Mobile Mapping Data (4th report)

The University of Electro-Communications: Sora Watanabe, Hiroshi Masuda, The University of Tokyo: Shogo Oguri

We discuss methods for reconstructing cable-like objects based on point-clouds captured by a MMS. In our previous work, we proposed a method for connecting points on each cable-like object. However, a set of segmented points often includes multiple cable-like objects, especially when two objects are closely located. In this research, we search for catenary curves using the RANSAC method, and reconstruct each cable-like object. In our experiments, our method worked well for segmenting points into each object.

1. はじめに

レーザスキャナ, CCD カメラ, GPS, IMU を自動車に搭載した移動計測装置 (Mobile Mapping System. 以下, MMS) を用いることで, 道路周辺の物体の点群を広範囲に取得することが可能となった. 移動計測データに基づいて補修を要する箇所が把握できれば, メンテナンス作業を大幅に効率化できる可能性がある.

本稿では, 線状物体の認識と形状再構成の問題について考える. 道路周辺の線状物体は, 送電線に限っても, 国内で 500 万 km 以上であり, 人手による保守には多大な時間とコストを要するので, 移動計測データを活用できれば, その労力を軽減できると考えられる.

前報までに, 移動計測データからの線状物体の形状再構成手法について示し, 線状物体が近接している場合を除けば, かなりの程度まで自動検出することが可能となった. ただし, 都市部においては線状物体が近接して入り組んでいることが多く, そのような場合に個々の線状物体を分離することは容易ではない. そこで本稿では, 近接している線状物体を分離する手法について検討する.

2. 線状物体のための点群処理

電線などの線状物体は細いため, その検出には, スキャンライン上の点間距離を小さくする必要がある. そこで本研究では, 毎秒約 100 万点を取得できるレーザスキャナを用い, 点間距離ができる限り小さくなるように計測を行った. スキャンライン上の点間隔は 10m 先で 3mm 程度となるので, 線状物体上の点群を安定して取得できる. その一方で, 図 1 に示すように, スキャンラインの間隔は大きくなる.

図 2 (a) に電線を計測して得られた点群を示す. 線状物体の点群はスキャンライン上では密に並ぶ. 図 2(b) は連続した点列を連結したものである. このような連結された点集合をセグメントと呼ぶ. 図 2(c) は, 隣り合ったセグメントの端点を連結したものである. ここでは, 連結されたセグメントをストリップと呼ぶことにする.

線状物体ではセグメントが小さくなるので, まず, 閾値以下の個数で構成されるセグメントのみを抽出する. ただし, 市街地では, 複数のケーブルを束ねて径が 10cm 程度になることもあるので, ここでは, 閾値を 60 個とした.

次に, セグメントを線状物体に沿って連結する. 連結には, レーザ計測の周期を利用した. セグメントの端点の GPS 時刻から 1 周期前後の点群を調べ, 他のセグメントの端点となっ

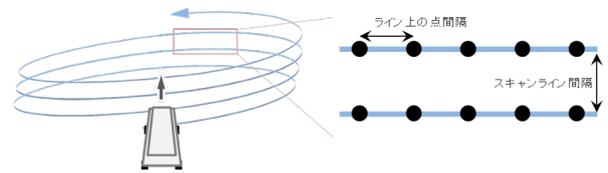


図 1 レーザスキャナのスキャンライン

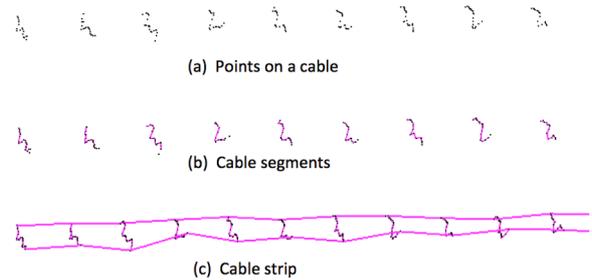


図 2 線状物体の点群処理

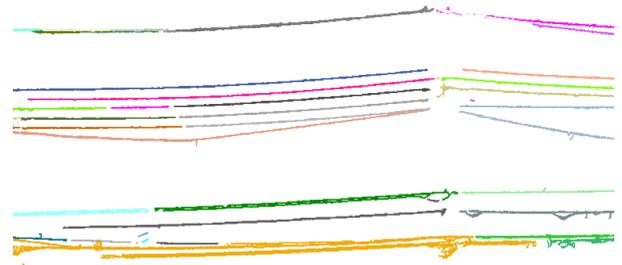


図 3 線状物体のセグメンテーション

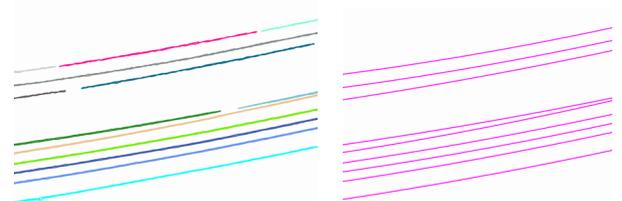


図 4 線状物体の連結

ている点の中で最も距離が近いものと連結する。最後に、生成されたストリップの主成分分析を行って固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ が $\lambda_1 \gg \lambda_2$ であれば、線状物体と看做す。

3. 線状物体のセグメンテーション

3.1 地物点群のセグメンテーション

図 3 に線状物体ストリップを作成した例を示す。この例に示すように、線状物体ストリップを作成することで、十分離れた距離にある線状物体を分離できることがわかる。

分断した線状物体については、前報に示したように、複数の線状物体が単一の懸垂曲線に当てはまるかどうかを調べ、もし当てはまれば、図 4 に示すように曲線を統合する。

一方で、線状物体は近接して配置される場合には、セグメンテーションに失敗することが多い。図 5 にそのような例を示す。図 5(a) は、異なる線状物体上の点が単一セグメントとして得られてしまった場合、図 5(b) は欠落点があるために他の線状物体と連結してしまった場合を示している。線状物体が近接している場合には、このような状況は一般的に生じる。そこで本研究では、単一のストリップに複数の線状物体が含まれる場合に、個々の線状物体を懸垂曲線として検出する。

3.1 RANSAC 法による懸垂曲線の計算

懸垂曲線は平面曲線なので、点群に懸垂曲線を当てはめるためには、点群を平面上に投影することが必要である。投影面は、 z 軸と線状物体の第 1 主成分で張られる平面とし、 $(0,0,1)$ 方向が z 軸となるように座標系を定義する。

懸垂曲線は以下の式で記述する。

$$z = \frac{1}{2a} \{ e^{a(x-x_0)} + e^{-a(x-x_0)} \} + z_0$$

この式を点集合 $\{x_i, z_i\}$ ($i=1, \dots, n$) に最もよく当てはめるように決める。

点群からの懸垂曲線の検出においては、RANSAC 法を用いる。未知数は a, x_0, z_0 の 3 個なので、曲線上の 3 点が決まれば懸垂曲線は一意に決定する。ランダムに 3 点を選択して懸垂曲線を算出し、最も多くの点に乗っている曲線を解とする。懸垂曲線が検出されたら、曲線上の点を除去し、残った点に対して同様に RANSAC 法を適用することで複数の懸垂曲線を算出する。

3 点を通る懸垂曲線の算出では、ニュートンラプソン法を用いた。その際、初期値は、3 点を通る 2 次曲線 $z = ax^2 + bx + \gamma$ を算出し、以下のように計算される値を用いた。

$$a = \frac{1}{2\alpha}, \quad b = -\beta a, \quad c = \gamma - \frac{b^2}{a} - a$$

また、RANSAC 法によって懸垂曲線が算出できたら、最小 2 乗法を用いて曲線の再計算を行った。最小 2 乗法の計算は、ガウスニュートン法を用いた。

3.3 懸垂曲線当てはめによる線状物体の分離

懸垂曲線の当てはめにおいては、同一のストリップに属するすべてのセグメントの重心座標を計算し、それらに対して曲線検出を行った。図 6 に懸垂曲線を当てはめた例を示す。図 6(a) は計測された点群であり、二つのラインは近接して配置されている。これに対して線状物体ストリップを作成したものを図 6(b) に示す。複数の線状物体が同一のストリップに属している。このストリップに対して RANSAC 法を適用した結果を図 6(c) に示す。個々の線状物体が懸垂曲線として適



(a) Closely located objects



(b) Missing points

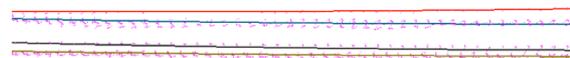
図 5 セグメンテーションに失敗した例



(a) Points



(b) Cable strip



(c) Catenary curves

図 6 懸垂曲線に当てはめ

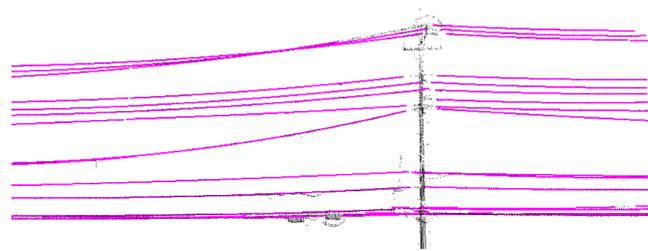


図 7 検出された線状物体

切に分離されている。図 7 は、検出された線状物体の全体図であり、目視で確認した限りでは良好な結果が得られた。

3.4 検出限界の考察

RANSAC 法では曲線からの距離が閾値 d 以下の点を数える。図 6(c) では $d=2\text{cm}$ としたが、この値について考察する。この例題では、間隔が最も狭い線状物体の平均距離は約 6.6cm である。これに対して、閾値を 0.5cm ずつ変えて検証した。実験の結果、 $d \leq 0.5\text{cm}$ では線状物体上の点群が 1 本の懸垂曲線上に乗らず、複数に分断した。一方、 $d \geq 3\text{cm}$ では懸垂曲線の分離に失敗した。閾値の下限値は計測ノイズの大きさに依存すると考えられる。上限値については、ノイズがない場合には閾値の 2 倍が分離可能な限界距離なので、理論値に近い結果となった。

4. まとめ

本報では RANSAC 法を用いた線状物体抽出について述べ、間隔が狭い場合でも検出可能なことを示した。

一方で、検出可能な線状物体は RANSAC 法の閾値に依存する。適切な閾値は、線状物体の径や距離などに依存すると考えるので、それについては今後検討する予定である。

[1] 小栗昇悟, 増田宏: 移動計測データを用いた道路周辺地物の形状再構成 (第 3 報), 平成 26 年度精密工学会春季大会講演論文集