

軌跡可視化のための断面図に適した Line Simplification

村上 司¹ 藤田 秀之¹ 大森 匡¹ 新谷 隆彦¹

概要：軌跡データは、移動する物体の位置を定期的に収集することで生成されるため、非常に大きなサイズになりやすい。そのため、もとの軌跡の形状を保ちながら点の数を削減する Line Simplification(LS) が重要である。また、軌跡データの可視化手法には、軌跡平面図と軌跡断面図の2種類がある。課題として、既存の LS 手法はすべて軌跡平面図を対象に提案されているため、軌跡断面図に既存の LS 手法を適用すると、顕著な極値が残されないことがある。本研究では、顕著な極値を残すという新しい性質を持つ、軌跡断面図に特化した LS 手法を提案を行う。また、定性的評価と定量的評価により、提案する手法が重みの調整により、形状を保持する性質と極値を保持する性質を持つことを明らかにした。

1. 序論

1.1 背景

サイクリングのような移動を伴うアクティビティでの移動ログなど、物体の移動経路を表す軌跡データは身近なものになってきている。軌跡データは、移動する物体の位置を定期的に収集することで生成されるため、非常に大きなサイズになりやすい。そのため、もとの軌跡の形状を保ちながら点の数を削減する Line Simplification(LS) により、軌跡データを単純化することが重要である。

軌跡データは、3次元空間の位置のリストで構成されている。単なる位置のリストを人間が理解できるようにするためには、情報可視化が必要になる。一般的な軌跡データの可視化では、緯度と経度の2次元平面に軌跡を表示する軌跡平面図と、高度と累積距離の2次元平面に軌跡を表示する軌跡断面図の2つの図が用いられる。ここで累積距離とは、軌跡の最初の位置からの物体の移動距離を表す。

図1と図2は、東京都檜原村から東京都奥多摩町までを結ぶ全長19.7kmの奥多摩周遊道路の軌跡データを軌跡平面図と軌跡断面図それぞれで可視化したものである。図1からは、直線がほとんどなく急カーブが連続しているという道路の形状を読み取ることができる。図2からは、0km地点から5km地点までは断続的な上り坂の区間があることや最高標高地点が7km付近にあるといった道路の起伏を読み取ることができる。

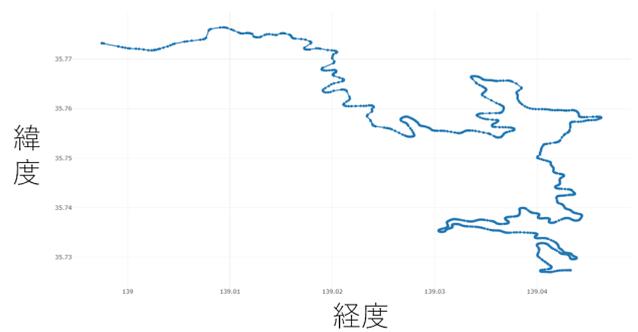


図1 軌跡平面図

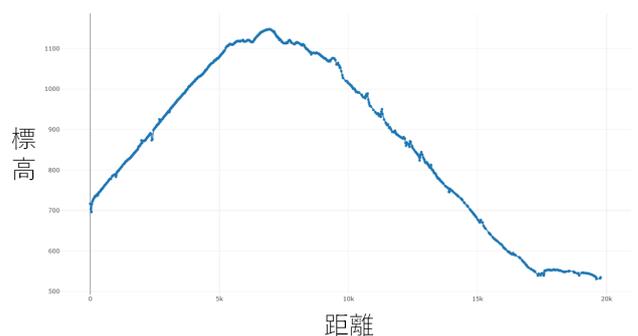


図2 軌跡断面図

1.2 課題

既存のすべての LS 手法は、軌跡平面図を対象に提案されており、顕著なカーブほど残す性質を持つ。そのため、既存の LS 手法を軌跡断面図に適用すると、顕著な極値が残されないという問題が生じることがある。

図3と図4は、図2の軌跡断面図に既存の LS 手法を適用

¹ 電気通信大学大学院情報理工学研究所

したときの結果である。図4は図3の赤枠部分を拡大したものであり、青色の線はLS適用前の軌跡、橙色の線はLS適用後の軌跡を表す。図3では大きな違いが見られないが、図4では7km付近にある最高標高地点(極値)が残されていないのが見られる。

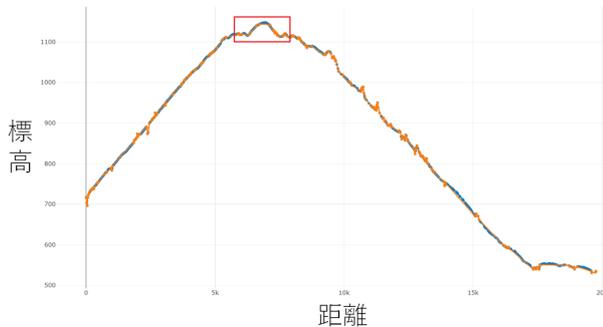


図3 軌跡断面図のLS

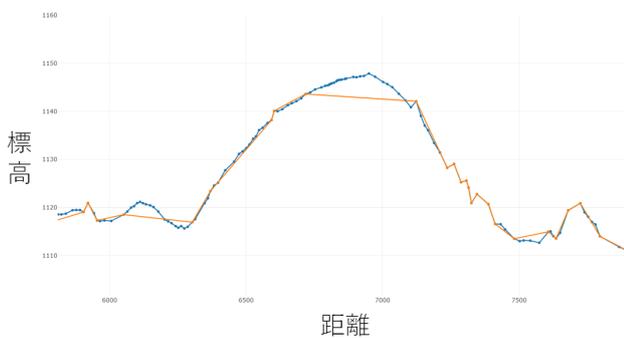


図4 図3の赤枠拡大図

1.3 目的

軌跡断面図に適したLS手法は、もとの軌跡の形状を保つというLS本来の性質に加えて、顕著な極値を残すという新しい性質が必要である。本研究は、そのような性質を持つ軌跡断面図に特化したLS手法を提案する。

2. Line Simplification(LS)

軌跡 T は、位置 p の順序付きのリストと定義する。軌跡 T のサイズは、軌跡 T を構成する位置の個数とする。位置 p は経度 x 、緯度 y 、高度 z を持つ。また、位置 p_i における累積距離 d_i とは、緯度経度による2次元平面での位置 p_1 から位置 p_i までの軌跡上の距離である。

$$p = (x, y, z, d) \quad (1)$$

$$T = (p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (2)$$

LSは、与えられた軌跡 T と閾値 ϵ に対して、 $E(T, T') \leq \epsilon$ を満たす最小サイズの軌跡 T' を返す関数と定義できる。ただし、軌跡 T' のサイズは軌跡 T のサイズ以下であり、軌跡

T' の位置の順序は、軌跡 T の位置の順序と同じである。誤差測定手法 E は、軌跡 T と軌跡 T' の誤差を返す関数であり、定義の仕方により多数のアルゴリズムが存在する。

3. 提案するLS手法

3.1 方針

形状を保持する性質と極値を保持する性質の両方を持たせるため、形状を保持するLS手法と極値を保持するLS手法を組み合わせる。

形状を保持するLS手法は、方向に基づくLS手法のSP(Shortest Path)アルゴリズム [1] を用いる。SPアルゴリズムでは、誤差 E に単純化前の軌跡と単純化後の軌跡との最大角度差を用いる。軌跡断面図のLSでは、斜度(角度)の誤差を最小限に抑えたいため、角度ベースの指標を用いるSPアルゴリズムを用いる。

極値を保持するLS手法は、軌跡上の各位置の起伏の顕著さを表す指標である極値重要度を導入し、誤差 E に単純化により消失した各位置の極値重要度の最大値を用いる。極値重要度は、尾根谷度 [2] の絶対値を2倍したものと定義し、0に近いほど平坦、 π に近いほど起伏があることを表す。尾根谷度とは、起伏の顕著さを表す指標であり、 $-\frac{\pi}{2}$ に近いほど谷、 $\frac{\pi}{2}$ に近いほど尾根の特徴を持つ。

提案するLS手法では、誤差 E に形状を保持するLS手法と極値を保持するLS手法の各誤差 E の重み付き線形和を用いる。重みを導入することで、形状の保持の程度と極値の保持の程度を柔軟に変えることが可能になる。

3.2 手法

方向に基づくLS手法のSPアルゴリズムは、誤差 E にセグメント方向エラー $\epsilon_d(\overline{p_i p_j})$ を用いる。セグメント $\overline{p_i p_j}$ とは、位置 p_i, p_j で構成される線分である。セグメント方向エラー $\epsilon_d(\overline{p_i p_j})$ とは、セグメント $\overline{p_i p_j}$ と、単純化により消失してしまう各セグメント $\overline{p_i p_{i+1}}, \overline{p_{i+1} p_{i+2}}, \dots, \overline{p_{j-1} p_j}$ との角度差のうち最大の値であり、次式で表される。なお、 Δ は与えられた2つのセグメントの角度差を返す関数である。

$$\epsilon_d(\overline{p_i p_j}) = \max_{i \leq h < j} \Delta(\overline{p_i p_j}, \overline{p_h p_{h+1}}) \quad (3)$$

極値を保持する新しいLS手法は、誤差 E にセグメント極値エラー $\epsilon_p(\overline{p_i p_j})$ を用いる。セグメント極値エラー $\epsilon_p(\overline{p_i p_j})$ とは、単純化により消失してしまう各位置 $p_h (i < h < j)$ の極値重要度のうち最大の値であり、次式で表される。なお、PS(Peak Score) は与えられた位置の極値重要度を返す関数である。

$$\epsilon_p(\overline{p_i p_j}) = \max_{i < h < j} \text{PS}(p_h) \quad (4)$$

提案するLS手法では、誤差 E にセグメント方向エラー $\epsilon_d(\overline{p_i p_j})$ とセグメント極値エラー $\epsilon_p(\overline{p_i p_j})$ の重み $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ による重み付き線形和を用いる。

$$\epsilon(\overline{p_i p_j}) = \alpha * \epsilon_d(\overline{p_i p_j}) + (1 - \alpha) * \epsilon_p(\overline{p_i p_j}) \quad (5)$$

提案するLS手法は、与えられた軌跡 T 、閾値 ($0 \leq \epsilon \leq \pi$)、重み α ($0 \leq \alpha \leq 1$) について、以下の手順により最小サイズの軌跡 T' を返す。

Step1. グラフの構築

- 1-1. 位置 $p_i (1 \leq i \leq n)$ を頂点とするグラフを作成
- 1-2. 2つの位置 $p_i, p_j (i < j)$ について、 $\epsilon(\overline{p_i p_j}) \leq \epsilon$ であれば、 p_i と p_j を結ぶ辺をグラフに追加

Step2. 最短経路探索

- 2-1. p_1 から p_n までのグラフ上の最短パスを BFS(幅優先探索) により計算

Step3. 解の生成

- 3-1. 最短パスを構成する順序付きの頂点を軌跡 T' として返す

4. 評価

4.1 定性的評価

$d-z$ 座標で重み α を変えながら提案手法によるLSを適用し、軌跡断面図で可視化したものを目視で評価を行う。同一条件での比較を行うため、もとの軌跡データはすべて同一のものを使用し、LS適用後の軌跡はすべて同じサイズにそろえる。結果を以下の図5、図6、図7、図8に示す。

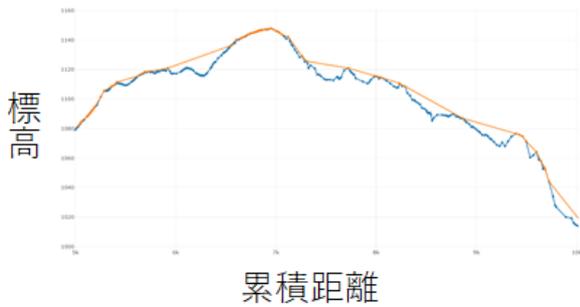


図5 $\alpha = 0$ (極値エラーのみ)

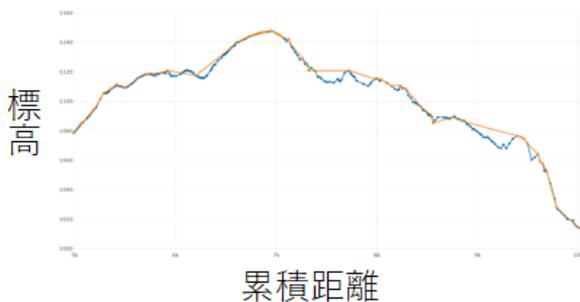


図6 $\alpha = 0.6$

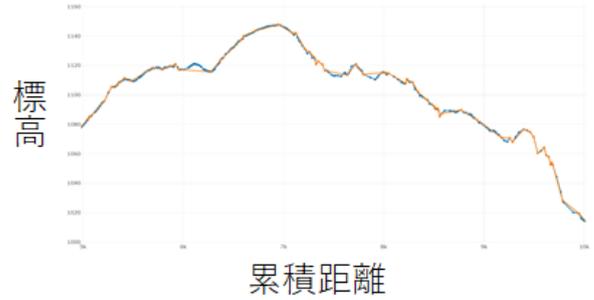


図7 $\alpha = 0.9$

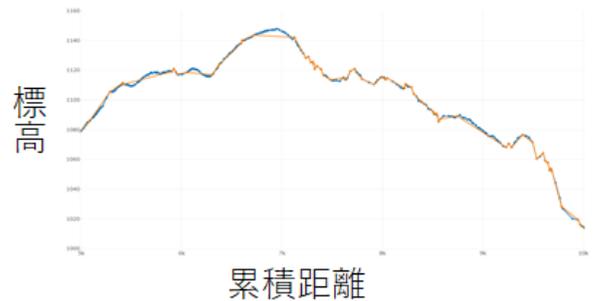


図8 $\alpha = 1$ (方向エラーのみ)

軌跡断面図の青色の線はもとの軌跡、橙色の線はLS適用後の軌跡を表す。軌跡データは、サイズが984の奥多摩周遊道路の軌跡データを使用し、LS適用後の各軌跡のサイズは243にそろえた。

重み α が小さくなるにつれて、もとの軌跡とLS適用後の軌跡の一致の程度が悪くなっているのが見られる。一方で、7km付近にある最高標高地点をはじめとした顕著な極値を残しているのが見られる。以上から提案するLS手法が、セグメント方向エラーの重みの割合が増加するにつれて形状を保持し、セグメント極値エラーの重みの割合が増加するにつれて顕著な極値を保持する性質を持つことがわかる。

4.2 定量的評価

$d-z$ 座標で重み α を変えながら提案手法によるLSを適用し、適用後の軌跡から算出された各評価指標について評価を行う。同一条件での比較を行うため、もとの軌跡データはすべて同一のものを使用し、LS適用後の軌跡はすべて同じサイズにそろえる。評価指標には、形状の保持という観点から垂直距離エラー (Perpendicular Euclidean Distance: PED)[3]、同期距離エラー (Synchronized Euclidean Distance: SED)[3]、方向エラー (Direction-Aware Distance: DAD)[3] を用い、極値の保持という観点からプロミネンス [4] を用いる。垂直距離エラー、同期距離エラー、方向エ

ラーは、既存の LS 手法の評価で従来から用いられる誤差ベースの指標であり、小さいほど形状を保持していることを表す。プロミネンスは、極値において定義される、極値の相対的な突出度を表す指標であり、大きいほど顕著な極値であることを表す。結果を以下の図 9、図 10 に示す。

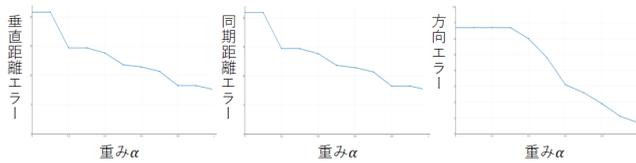


図 9 形状の保持に関する評価

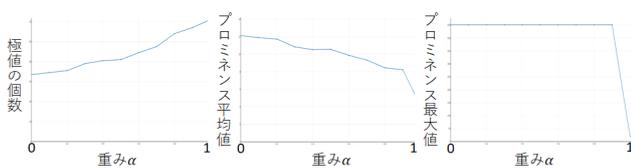


図 10 極値の保持に関する評価

軌跡データは、サイズが 984 の奥多摩周遊道路の軌跡データを使用し、LS 適用後の各軌跡のサイズは 243 にそろえた。

形状の保持に関する評価値を見ると、重み α が大きくなるにつれて、垂直距離エラー、同期距離エラー、方向エラーすべてにおいて数値が減少している。すなわち、提案する LS 手法が、セグメント方向エラーの重みの割合が増加するにつれて形状を保持する性質を持つことがわかる。

極値の保持に関する評価値を見ると、重み α が小さくなるにつれて、極値の個数は減少し、プロミネンスの平均値が増加している。すなわち、極値 1 つあたりのプロミネンスが増加していることから、顕著な極値を残していることがわかる。また、 $\alpha = 1$ 以外のプロミネンスの最大値が、もとの軌跡のプロミネンスの最大値に一致している。すなわち、 $\alpha = 1$ 以外では、もとの軌跡の最も顕著な極値を残していることがわかる。以上から提案する LS 手法が、セグメント極値エラー重みの割合が増加するにつれて顕著な極値を保持する性質を持つことがわかる。

5. 結論

本研究では、軌跡断面図に特化した LS 手法の提案を目的として、既存手法の SP アルゴリズムと極値を保持する LS 手法を組み合わせた、顕著な極値を残す性質を持つ LS 手法を提案した。また、既存の LS 手法との比較のために、もとの軌跡の形状がどれだけ保たれているかという観点と、顕著な極値がどれだけ残されているかという観点から、軌跡断面図での可視化結果による定性的評価と定量的評価を

行った。そして、提案手法が重み α の調整により、形状を保持するという性質と極値を保持するという性質の 2 つの相反する性質を持った、軌跡断面図に適した LS 手法であることを明らかにした。

参考文献

- [1] Cheng Long, Raymond Chi-Wing Wong, "Direction-Preserving Trajectory Simplification", Proceedings of the VLDB Endowment, 2013.
- [2] 千葉 達郎, 鈴木 雄介, "航空レーザ計測結果の可視化 - 赤色立体地図作成法とその発展 -", 先端測量技術, Number 96, pp.32-42, 2008.
- [3] Dongxiang Zhang, Mengting Ding, Dingyu Yang, Yi Liu, Heng Tao Shen, "Trajectory Simplification: An Experimental Study and Quality Analysis", Proceedings of the VLDB Endowment, 2018.
- [4] MathWorks, "プロミネンス - MATLAB & Simulink - MathWorks 日本", <https://jp.mathworks.com/help/signal/ug/prominence.html>, (参照 2021-01-26)