原著論文

MMS 点群データを用いた高架道路橋の 線形の自動生成に関する研究[†]

田中 成典^{*1}・中村 健二^{*2}・山本 雄平^{*3}

今井 龍一^{*4}・窪田 諭^{*5}・姜 文淵^{*6}

高度経済成長期に建設された多くの高架道路橋は老朽化を迎えているため維持管理が必要である。しかし、これらの高架道路橋は、設計時や竣工時の図面が紙媒体であり、廃棄されているケースが多く維持管理業務に支障をきたしている。そこで、MMS の点群データから高架道路橋の維持管理用の SXF 図面を自動生成する研究がなされている。既研究では、高架道路橋の継ぎ手の位置で点列を分割しスパンごとに道路橋の線形を生成している。しかし、継ぎ手を抽出できない場合や設計図に記載された線形の起終点が継ぎ手の位置から離れている場合、生成したクロソイド曲線と直線や円弧との連続性が失われる問題がある。そこで、本研究では、平面の直線、クロソイド曲線、円弧と縦断面の直線と 2 次曲線の起終点を算出し、各線形を連続に接続する解析手法を提案する。それにより、継ぎ手の情報なしで、高架道路橋上部工の SXF 図面を高精度に生成することを実現する。

キーワード：MMS, 点群データ, 高架道路橋, 路線形状, クロソイド曲線

1. はじめに

我が国では、多くの高架道路橋が高度経済成長期に集中整備された後、一斉に老朽化を迎えていることから、適切な維持管理が求められている^{1)~3)}。高架道路橋の維持管理には、建設当時の設計図や竣工図が必要であるが、高度経済成長期に作成された図面は紙媒体であり、保存期間の 30 年を経過した後に廃棄されている場合がある。そのため、高架道路橋の現況を計測し、図面を再生する技術が求められている。道路法施行規則第二条⁴⁾によると、道路関連の平面図の縮尺は 1000 分の 1 以上と規定されており、0.33 m 以内の精

度が望まれている状況である。

道路橋の図面の再生に関する既研究^{5)~7)}では、点群データを解析して道路形状の線形を抽出し、自動的に図面を再生することで、省力化を図っている。これらの研究では、生成した図面を市販の CAD ソフトで取り扱えるようにするため、ポリラインやベジェ曲線などを使用し、道路線形の形状を再現している。しかし、一般的に、道路橋の図面では、直線、クロソイド曲線、円弧を組み合わせて形状を表現する。クロソイド曲線は、急ハンドルを避けるための緩和曲線であり、直線から円弧への曲率変化の連続性を実現している。そのため、クロソイド曲線と前後の線形をスムーズに接続することは、道路の維持管理のみならず、自動運転などの分野でも、非常に重要⁸⁾である。また、国土交通省が 2001 年から提唱する電子納品の標準形式である SXF 図面^{9),10)}においても、クロソイド曲線が定義されていることから、正確な道路線形を図面で表現するには、ポリラインやベジェ曲線などではなくクロソイド曲線を用いる必要がある。

そこで、道路設計時に使用される直線、クロソイド曲線と円弧を認識し、それぞれの近似線を生成する手法^{11),12)}が提案されている。既研究¹¹⁾では、MMS (Mobile Mapping System) で高架道路橋を走行して取得した点群データの色情報を利用し、高架道路橋の継ぎ手を抽出することで、直線、クロソイド曲線と円弧の区間を特定している。そして、各区間の線形を解析し、

[†] Research for Generating Road Alignment of Highway Bridges with Point Cloud Data using MMS
Shigenori TANAKA, Kenji NAKAMURA, Yuhei YAMAMOTO, Ryuichi IMAI, Satoshi KUBOTA and Wenyan JIANG

^{*1} 関西大学総合情報学部

Faculty of Informatics, Kansai University

^{*2} 大阪経済大学情報社会学部

Faculty of Information Technology and Social Sciences,
Osaka University of Economics

^{*3} 関西大学先端科学技術推進機構

Organization for Research and Development of Innovative Science and Technology, Kansai University

^{*4} 東京都市大学工学部

Faculty of Engineering, Tokyo City University

^{*5} 関西大学環境都市工学部

Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

^{*6} 関西大学大学院総合情報学研究科

Graduate School of Informatics, Kansai University

それぞれの接続パターンを確認しながら、近似線形を生成する。しかし、この手法では、高架道路橋の継ぎ手の色が路面に近い場合や設計した線形の起終点と継ぎ手の位置が対応していない場合に幾何情報の判定精度が低下する課題がある。さらに、設計された線形の起終点が継ぎ手の位置と一致しない場合には、算出されたクロソイド曲線と前後の線形との曲率変化の連続性が失われ、正しく接続できない課題が発生する。既研究¹²⁾では、線形の曲率変化の連続性を考慮して各点の曲率を算出することで、直線、クロソイド曲線と円弧の区間を特定し、それぞれの数式のパラメータを算出している。しかし、この手法は、あらかじめ線形の起終点を推定した後に、その区間に適切な幾何情報を選択するため、生成したクロソイド曲線と、前後の直線や円弧などの線形との接続が不適切となり、正しく接続できない課題がある。また、当該手法には、曲率による区間の起終点の推定精度が点の位置誤差に影響される問題がある。クロソイド曲線には、入力点群データのわずかな誤差により生成した線形が大きく変化する特性¹³⁾がある。そのため、この問題を解消するには、曲率による区間の推定を用いないクロソイド曲線の生成手法の考案が有効であると考えられる。

そのため、本研究では、既研究^{11), 12)}の共通の課題であるクロソイド曲線と前後の線形との接続が不適切となり、正しく接続できない点への対応を試みる。

本研究では、MMSによる複数回の計測結果から、平面における直線、クロソイド曲線、円弧と縦断面における直線、2次曲線の起終点とを算出し、各線形を適切に接続する手法を提案する。これにより、継ぎ手などの補足情報を必要とせずに、高精度な高架道路橋の道路線形の生成が可能となる。また、本研究では、MMSを使用するため、計測時に通行止めなどの措置が必要なく、交通量が多い高速道路などの高架道路橋の現況データを取得でき、低コストで図面を生成できる。実験では、起終点と幾何情報が明確な線形から生成した点群データとMMSにより計測した現況の点群データの2種類を用いて、提案手法の有用性を評価する。

本論文では、まず、第2章にて平面と縦断面における各線形を生成する時の課題点を明らかにし、それを解決するための手法を提案する。第3章では、点群データから道路形状を表す特徴点を抽出する手法について詳述する。第4章では、道路形状を表す特徴点から道路線形を生成する手法について説明する。そして、第5章では、提案手法の有用性を確認するための実証実験を行い、第6章でその結果を考察する。最後に、第7章にて本研究を総括する。

2. 研究概要

2.1 研究課題

本研究では、MMSによる複数回の計測結果から、線形の幾何情報を解析し、直線、クロソイド曲線と円弧を適切に接続した高精度な道路線形を生成する。本研究では、既研究で課題となっている「高架道路橋の継ぎ手に着目して線形の変化する区間を推定している点」と「あらかじめ線形の起終点を推定した後に幾何情報を選定するためクロソイド曲線と他の幾何情報とが適切に接続できない点」を解消した手法を提案する。前者の課題へは、特徴点列に適合する幾何情報を自動推定することで対応する。後者の課題へは、クロソイド曲線の数式パラメータを動的に変化させ、適切に接続可能な曲線を自動生成することで対応する。この手法を実現する時の技術的課題を次に示す。

一つ目は、点群密度が低く、抽出した特徴点の位置誤差が大きい場合、近似線の生成精度が低下する課題である。MMSは、レーザスキャナの種類により性能が異なり、また、計測車両からの距離に応じて点群密度が低下する。その場合、対向車線を含めた高架道路橋の横断形状の把握が困難となり、特徴点の抽出精度が低下する。そこで、本研究では、道路形状の近似線の生成精度を向上させるため、特徴点の抽出後に位置誤差を考慮して高精度な特徴点のみを選出する手法を考案する。

二つ目は、高架道路橋の分岐部において、正確な線形を生成できない課題である。高架道路橋全体の図面を生成する場合、分岐部の正確な線形の生成手法が必要となる。そこで、本研究では、各特徴点がどの路線に属するかを認識して特徴点列を分割することで、正確な分岐部の線形を生成する点列分割の手法を考案する。

三つ目は、クロソイド曲線の計算コストが膨大となる課題である。近似線形の数式を算出する手法には、最小二乗法やハフ変換などがある。しかし、クロソイド曲線は、数式のパラメータ数が多いため、近似線形の計算コストが膨大になる。そこで、本研究では、既研究¹¹⁾と同様にクロソイド曲線に隣接する線形の情報を利用することで、計算コストを抑えて適切な線形を生成するクロソイド曲線生成の手法を考案する。

四つ目は、道路のカーブ区間における線形を生成する時、直線、クロソイド曲線、円弧のパターンで対応できない場合に、線形の種別が認識できず途切れる課題である。線形を接続させるには、適切な補間手法が必要である。そこで、本研究では、道路構造令の解説と運用¹⁴⁾に記載された次の3つの要件を考慮し、線形補間する手法を考案する。道路構造令の解説と運用で

は、次に示す要件が定義されている。

- 1) 急ハンドルを避けるため、直線と円弧との間にクロソイド曲線を挿入する。
- 2) クロソイド曲線を使うことにより生じた移程量 S が十分小さい場合、直線と円弧とを直接接続させることが可能である。移程量 S の計算式を式(1)に示す。

$$S = \frac{1}{24} \cdot \frac{L^2}{R} \quad (1)$$

ここで、 L はクロソイド曲線長、 R は曲率半径を表している。

- 3) クロソイド曲線の定数パラメータ A は、式(2)を満たすことが望ましい。

$$\frac{R}{3} \leq A \leq R \quad (2)$$

2.2 提案システム

本研究では、第2.1節で示した課題を解消し、高精度な高架道路橋のSXF図面を生成するシステムを提案する。本提案システムの流れを図1に示す。本システムでは、MMSにより取得した点群データとGPSから取得した走行軌跡（以下、GPS履歴ポイント）を入力データとする。ここで、点群データは、標定点により位置を調整したものとする。また、同じ場所を2回走行した場合、それぞれの点群データを同一の標定点により調整する。そして、調整した両方のデータをレジストレーションしたものを入力データとする。本システムは、点群解析機能、線形解析機能とSXF図面生成機能により構成される。

点群解析機能では、一つ目と二つ目の課題を解消し、大量な点群データから、線形解析機能に必要な路線ごとの点列を生成する。まず、ノイズ除去を行い、高架道路橋の形状を示す点群データのみを抽出する。次に、

GPS履歴ポイントを利用し横断面を生成する。そして、横断面から高架道路橋の特徴点を抽出する。さらに、特徴点列から精度が良いものを選出し、各点が道路の形状を現す線形に近い点列を生成する。これにより、点群密度が低い場合でも生成した線形の精度を保つことが可能である。最後に特徴点列を解析し路線ごとに分割する。

線形解析機能では、三つ目と四つ目の課題を解消し、点列から道路形状の近似線形を生成する。また、線形解析機能は、平面図と縦断面に分けて処理を行う。平面図の処理では、まず、図2に示すように点列から直線を抽出する。次に、直線抽出の後に残った点群データから円弧を抽出する。そして、直線と円弧間にクロソイド曲線を生成する。最後に、線形補間処理により、対応できない区間に線形を生成する。また、縦断面の処理では、まず、平面図の処理と同様に点列から直線を抽出する。そして、直線間を接続する2次曲線を生成する。最後に、2次曲線を生成できない区間に対して線形補間を行う。

SXF図面生成機能では、線形解析機能で生成した各線形の幾何情報を用いて、SXF図面における幾何情報のパラメータを算出し、SXF図面を出力する。SXF図面生成機能の詳細は既研究¹¹⁾を参照されたい。

本研究での点群データは、3次元データであるが、処理の目的や結果に応じて2次元と3次元を適切に使い分けて使用する。

3. 点群解析機能

3.1 ノイズ除去処理

3.1.1 手法の検討

MMSから取得した点群データは密度が高いため、現況を計測したデータの量も膨大である。特に、到達距離の長いレーザスキャナを用いた場合、両側の構造物を示す点群データの量が、対象となる高架道路橋より数倍多いことが考えられる。このことは、計算コスト

図1 システムの流れ

図2 平面図の線形解析

トの増大や特徴点の認識精度が低下する原因となる。そのため、本研究では、対象の高架道路橋以外の構造物の点群データをノイズとして除去する。

既研究では、両側のビルなどのノイズとなる点群領域より高架道路橋の点群領域のほうが大きい特徴を利用して、平面の格子に点群データをプロットすることで、点数を抑えたノイズ除去手法⁵⁾が提案されている。この手法を用いることで、対象の高架道路橋が長い場合や点群密度が高い場合において、処理対象の点数が数十億点から1億点以下に減少し、計算コストを大幅に抑えることができる。しかし、到達距離の長いレーザスキャナを用いた場合、両側のビルなどの点群領域が高架道路橋本体より大きくなり、正確にノイズ除去

できない。そのため、本処理では、MMS 走行線から一定範囲外点群データを事前に除去して、既研究の課題を解消したノイズ除去手法を提案する。

3.1.2 処理の詳細

本処理では、まず、図3に示すように入力データのGPS履歴ポイントから上下と左右において一定距離を指定してラベリング処理の領域を生成し、領域以外の点群データを除去する。領域の左右の距離を対象の高架道路橋における最も広い場所の幅以上の値に設定することで、道路の端を走行しても、高架道路橋の路面および両側の壁を含めた領域を取得できる。次に、既研究⁵⁾と同様にラベリング領域内の点群データを格子状の平面に投影（図4）する。民法第二百三十四条によると、建物の壁と道路の境界線は0.5 m以上の距離を保つ必要がある。そのため、ラベリングの処理の格子サイズを0.25 mとすることで、高架道路橋の両側の構造物を除去する。最後に、点群データが存在する格子に対して、領域のラベリングを行い、その内最も大きい領域を本研究対象の高架道路橋とし、それ以外の領域に存在する点をノイズとして除去する。

3.2 横断面生成処理

3.2.1 手法の検討

本処理では、線形解析機能に用いられる特徴点を抽出するための横断面を生成する。横断面を生成するには、道路の横断方向を把握する必要がある。道路の横断方向を取得する既存手法^{11), 15), 16)}には、レーザスキャナの設置角度に依存した手法^{11), 15)}とGPS履歴ポイントに基づく手法¹⁶⁾がある。レーザスキャナの設置角度に依存した手法では、レーザスキャナのラインスキャ

図3 横断面のラベリング処理領域

図4 ラベリングによるノイズ除去

ン方向が道路の横断方向に近似する特徴を利用している。しかし、MMSは、レーザの設置角度によりラインスキャンの方向が道路の横断方向と異なる場合がある。そのため、本研究では、様々なMMSに対応できるように、ラインスキャンの方向に依存しないGPS履歴ポイントに基づく手法を利用する。

横断面を生成するには、投影法、バッファ法とTIN法が提案¹⁷⁾されている。バッファ法とTIN法では、既存の点の情報により生成した新しい点や線を横断面としている。しかし、これらの点や線には、生成の元の高精度な点の位置から離れる問題がある。そこで、本研究では、高精度な図面を生成するため、点群データ自体の座標値を利用する投影法を使用する。

3.2.2 手法の詳細

まず、図5に示すようにMMSで走行時の各GPS履歴ポイントを結んだ線分を走行線とする。次に、図6に示すように、走行線のそれぞれの線分に対して、直角に引いた垂線方向を横断方向とする。そして、図7に示すように走行線において一定間隔Dごとに横断

図5 GPS履歴ポイントと走行線のイメージ

図6 横断方向の算出

図7 横断面の生成

方向を算出し、各点から各横断との距離を算出する。最後に、各横断への距離がD/2以下の点群データで断面を生成する。

高架道路橋の線形は、直線、緩やかなクロソイド曲線と円弧により構成されている。そのため、道路に沿って車両が走行した場合、GPS履歴ポイントは急激な角度変化がなく、緩やかな線形になると考える。また、本研究に使用するGPS履歴ポイントは、GPSで取得した位置情報をIMU(慣性計測装置)による加速度と角速度によって補間されたものとする。これにより、GPS履歴ポイントは、2つのポイントの間隔が約0.04mである。以上のことから、本手法により生成した各横断面は、カーブにおける大幅な空き間隔がなく、連続する特徴点の抽出が可能と考えられる。

3.3 特徴点抽出処理

3.3.1 手法の検討

本処理では、路面と両側壁の交差部を表す特徴点を抽出する。既研究^{15), 16)}では、点群データの標高値を用いる手法¹⁵⁾と縁石と路面を認識して抽出する手法¹⁶⁾が提案されている。既研究¹⁵⁾では、特徴点の標高値と走行線に近い点の標高値の差が0に近いという特徴を用いて特徴点の抽出を試みている。しかし、路面の排水勾配を考慮していないため、水平でない路面では特徴点を抽出できない課題がある。一方、既研究¹⁶⁾では、各点の法線ベクトルに基づきk-means法¹⁸⁾でクラスタリングすることで縁石と路面とを抽出し、縁石の最下点を特徴点としている。しかし、縁石の有無やその他道路付帯施設の有無などが区間ごとで大きく異なり、これらの制約条件を検討する必要があるため高架道路橋での適用が難しい。そこで、本研究では、高架道路橋の両側に存在するコンクリート壁に着目し、走行線に近い点および壁の頂点の横断面上における位置情報を利用した計算手法を提案する。

3.3.2 処理の詳細

本処理では、まず、横断面から、平面上の走行線に最も近い点を抽出する。次に、図8に示すように抽出した点と両側の壁面の頂点とをそれぞれ直線で結ぶ。高架道路橋において、壁面の頂点は、基本的に両側の最も高い位置にある。そのため、本手法では、走行線

図8 特徴点の抽出

図9 点列の各点から交差点との距離のばらつきが大きい点列

の両側の z 座標値が最も大きい点を壁面の頂点とする。そして、横断面の各点から直線との垂直距離を計算する。最後に、垂直距離が最も長い点を交差点の特徴点として抽出する。垂直距離を計算する時に2次元横断面上の最も長い直線は、3次元上で他の点の垂直距離より短い場合がある。それにより、路面と壁面の交差点から離れる点が抽出されることが考えられる。そのため、本処理では、横断面上の2次元情報を使用する。

3.4 特徴点選出処理

3.4.1 手法の検討

レーザスキャナの性能が低い場合や壁面が計測車両から遠い位置に存在する場合、点群データの密度が低下するため、路面と壁面の交差点の特徴点を取得できないことがある。この場合、抽出した特徴点が路面と壁面の交差点とは一致しないため、各点と実際の交差点との距離にばらつき（図9）が発生する。これらの点列を用いて近似線形を発生させた場合、線形が交差点から離れ、図面精度が地図情報レベル1000の許容誤差に収まらない状況となる。そこで、本処理では、抽出した特徴点から、路面と壁面の交差点に近い特徴点を選出することにより、道路形状の線形を生成する。そして、選出した特徴点から、道路の中心位置を表す点群データを生成する。

防護柵設置要綱¹⁰⁾によると、高度経済成長期に建設された多くの高架道路橋は、基本的に直壁型のコンクリート防護柵を利用している。この場合、第3.3節の提案手法により抽出した特徴点は、図10に示すように、走行線から遠いほど路面と壁面の交差点に近いという特徴がある。本処理では、この特徴を利用し、一定間隔ごとに精度の良い特徴点を選出する。これにより、図9に示すようなばらつきを抑えることができると考えられる。

3.4.2 手法の詳細

本処理では、まず、図11に示すように、一定数の横断ごとに処理の区間を生成する。次に各特徴点から

図10 抽出された特徴点の性質

図11 特徴点の選出方法

走行線までの水平距離を計算する。そして、各区间の中で水平距離が最も長い特徴点を選出し、それ以外の特徴点を除去する。ここで、その距離を計算する場合、第3.3節同様の理由で、横断面の2次元情報を使用する。最後に、選出した両側の特徴点の間の中心点を取得し、道路の中心線とする。ただし、この手法は、斜めの壁を処理する場合、交差点より外側の点を選出される。

3.5 点列分割処理

3.5.1 手法の検討

高架道路橋の両側の路面と壁面の交差点の線形を生成するには、全体の特徴点列を左右に分割する必要がある。しかし、複数本の路線が交差する分岐部において特徴点列が連続する場合（図12）や、異なる路線の壁が近い場所において特徴点が混在する場合（図13）などがあるため、各路線の点列を正しく認識でき

図12 分岐部の点列

図13 異なる路線の壁が近い場所の点列

ない。そこで、本処理では、特徴点列と走行線との位置関係を利用し、分岐部と路線間が近い場合のそれぞれの事例（図14a、図15a）に対応して、路線ごとの点列に分割する。

分岐部では、点群データをユークリッド距離に基づきクラスタリングすることで、路線ごとの点列（図14b、図15b）を作成する。ユークリッド距離に基づく階層型クラスタ分析手法では、クラスタ間の距離の算出時に最短距離法²⁰⁾、最長距離法²⁰⁾、群平均法²¹⁾、ウォード法²²⁾などが一般的に使用されている。本研究では、連続する点列を可能な限り一つのクラスタに含めることを目的とするため、最短距離法を採用する。

路線間が近い場合、路線ごとに連続または混在する点列を分割する必要があるため、それぞれの点列と走行線との対応関係（図14c、図15c）を用いて分離する。ここで、分岐部の2本の走行線に属するそれぞれの特徴点は、走行線に対する左側か右側かの情報（図14c）が必ず異なる。また、異なる路線の壁が近い場所の2本の走行線に属するそれぞれの特徴点は、走行線に対する方位角（図15c）が必ず異なる。方位角とは、ある特徴点が存在する横断の中心から特徴点に向かう横断方向の直角座標系における水平角度である。これらの特徴から、近隣の2つの特徴点は、走行線に対する左側か右側かの情報と方位角が大きく異なる場合、必ず異なる路線に属することが分かる。そのため、本処理では、路線ごとの点列への分割に走行線に対する左側か右側かの情報と方位角を利用する。なお、本処理では、点列が立体交差する場合を考慮し、点群データの3次元情報を利用して分割する。

3.5.2 処理の詳細

まず、最短距離法を用いて、離れている点列を分割する。次に、分割された各点列の中の全ての特徴点に、

図14 分岐部における点列の分割

図15 異なる路線の壁が近い場所の点列の分割

走行線の左側か右側かの情報と走行線からの方位角の情報を付与する。そして、隣接する2つの特徴点に対して、間の距離が短く、さらに左右情報が同様に方位角が近似する場合、それらを同じ路線の近傍点同士とし、1つの路線点列に加える。一方、間の距離が短い、左右情報や方位角が異なる2点を異なる路線の点とみなし、それぞれの路線点列に加える。また、左右

情報が一致し、しかも方位角が近似する近傍点が2つ以上かつ異なる路線点列に存在する場合、それぞれの路線点列を1つにまとめる。この処理を繰り返すと、路線ごとに、道路分岐部や点列混在部における点列の再分割が可能となる。

4. 線形解析機能

道路の平面設計には、直線、クロソイド曲線と円弧が用いられる。既研究^{11),12)}では、直線、クロソイド曲線と円弧の区間を特定することで近似線形を生成している。しかし、その線形には不自然な接続が生じる問題がある。そこで、本機能では、起終点を用いずにクロソイド曲線の数式に基づく反復の探索処理を利用し、自然に接続するクロソイド曲線を生成する。反復の探索処理で使用する直線と円弧の情報は、最小二乗法やハフ変換²³⁾などの手法により容易に抽出できる。

一方、道路の縦断設計には、直線と2次曲線が用いられる。2次曲線は、両側の接線と接点の情報からその方程式を用いて容易に計算できる。そのため、縦断では、直線を抽出しその間に2次曲線の方程式により線形を生成する。対応できない例外に対して、線形補間手法を提案し、自然に接続する平面と縦断の線形を実現する。

ここで、平面上では直線で設計されるが、縦断上では直線でない場合が想定される。そのため、各処理では、それぞれの面における線形を認識できるように、点群データの2次元情報を使用する。

本機能は、直線抽出処理、円弧抽出処理、クロソイド曲線生成処理、2次曲線生成処理と線形補間処理により構成される。各処理の詳細を次に示す。

4.1 直線抽出処理

直線抽出の方法には、前後点との方位角の比較や最小二乗法などをはじめ、多くの手法がある。その中で、ハフ変換²³⁾は、計算コストがわずかに大きい代わりに抽出精度が高く、多くの研究で取り扱われている。そのため、パラメータ数が少ない直線に対してハフ変換を用いることで、高精度に直線を抽出できる。本処理では、入力された特徴点列から、それぞれの x, y 座標値を用いてハフ変換を行い、直線を示す複数の点列を抽出し、それぞれの直線勾配と仮起終点を取得する。

4.2 円弧抽出処理

本処理では、直線を抽出した後に残った点群データに対して、円弧を示す点列を抽出し、円弧の中心、曲率半径と仮起終点を取得する。円の数式パラメータが

直線より多いため、ハフ変換を用いた場合、計算コストが高くなり、特に曲率半径が大きい円弧に対して、抽出できない可能性がある。そのため、本処理では、計算コストが比較的低いRANSAC法²⁴⁾を用いる。RANSAC法は、一部のデータのみを取り出して線形の数式を計算し、パラメータの投票を行う。そして、この処理を複数回繰り返し、投票数が最も多いパラメータを採用する。これにより、曲率半径が大きい円弧でも抽出できる。本研究は、特徴点の x, y 座標値を用いて、RANSAC法を適用し、円弧を示す点列のパラメータを取得する。

4.3 クロソイド曲線生成処理

4.3.1 手法の検討

クロソイド曲線は、パラメータ数が多いためハフ変換などを用いた場合、計算コストにより計算できない問題がある。一方、クロソイド曲線の前方の直線の終点と後方の円弧の起点により計算する方法もあるが、接続が不適切となる問題がある。この問題の解決策として、クロソイド曲線の形状が終点における接線の角度、スケールが終点の曲率により決定される特徴を利用し、曲線を生成する手法²⁵⁾がある。この手法では、曲線の基点から終点までの水平距離と終点における接線を利用し、曲線長を計算することにより曲線の他のパラメータを算出する。しかし、計測した現況データから、クロソイド曲線の起終点を正確に特定できないため、既知の情報により改良した手法が必要である。

そこで、本研究では、直線と円弧の抽出結果から得られた直線の平面上の勾配、円弧の中心の x, y 座標値と曲率半径を利用し、自然に接続可能なクロソイド曲線を生成する。そして、クロソイド曲線を生成した後、直線の終点と円弧の起点を調整し、連続する線形を生成する。

4.3.2 処理の詳細

本処理では、まず、次の手順により、クロソイド曲線の生成の反復処理に使用するデフォルト値を算出する。
STEP 1 : 抽出した直線と円弧の点列上の位置を取得する。
STEP 2 : 直線と円弧と間の区間を仮クロソイド曲線部とする。
STEP 3 : 円弧の円中心から直線に垂線をおろし、垂線の方角と距離をデフォルト値として算出する。

次に、円中心から直線におろした垂線の方角を開始方向とし、図16に示すように円中心から円弧上の任意の点 P_c への方向と開始方向との間の夾角を τ として、次の反復処理によりクロソイド曲線を生成する。

$$a = \frac{k}{2x} \quad (8)$$

式(8)において、 x は接点の座標、 k は接線の勾配とする。

4.5 線形補間処理

直線と円弧の抽出結果において、次の場合により線形が不連続(図18)になることが考えられる。

- 1) 円弧抽出処理で、曲率半径が非常に大きく、RANSAC法²⁴⁾の閾値を超える円弧が抽出できない場合。
- 2) 分岐部において、連続する曲率半径が非常に大きい2つの円弧を同時に抽出できない場合。
- 3) 長いクロソイド曲線において、曲線の一部が円弧または直線と認識され、クロソイド曲線を正確に生成できない場合。
- 4) 2つの2次曲線が連続し、2次曲線を正確に生成できない場合。

線形補間処理は、直線で補間する方法と前後の線形の形状を考慮した曲線を用いた補間がある。しかし、直線での補間は容易に実現できるが、補間された線形が自然に接続していない問題がある。また曲線での補間は自然に接続することが可能であるが、道路に使用される幾何要素でない場合がある。そこで、本処理では、道路構造令の解説と運用¹⁴⁾を考慮し、これら4つの場合に対して、既存の数式を利用し、点列の形状を保つようにそれぞれの線形の補間処理を提案する。道路構造令の解説と運用では、クロソイド曲線の移程量が0.2m未満で曲率半径が非常に大きい円弧(表1)を使用する場合、クロソイド曲線を省略することができる。そのため、1)と2)では、2本の直線を円弧で接続し、3)では、抽出された円弧と直線がクロソイド曲線かどうかの判定を行う。4)では、2本の直線間をス

図18 線形が切れる4つの場合

表1 クロソイド曲線が省略可能な曲率半径

設計速度 (km/h)	120	100	80	60
計算値(m)	2,100	1,450	930	520
ラウンド値(m)	2,100	1,500	900	500

ムーズに接続させるような2つの2次曲線を計算する。

4.5.1 曲率半径が非常に大きい円弧を抽出できない場合

本処理では、図19に示すように平面上の2本の直線の交点が直線間にあれば、直線間に1つの円弧があると判断して補間する。線形を補間する場合、生成した線形は、区間内の点列の形状に近似するほど高精度となる。そのため、本処理では、点列の各点の x, y 座標値で算出した近似円弧の曲率半径を用いて補間を行う。まず、抽出された2本の直線間の全ての特徴点を抽出する。次に、既存の最小二乗法を用いて、特徴点群の近似円弧の曲率半径 r を算出する。そして、図20に示すように交点から2本の直線の夾角 α を2等分する線を引き、 α と r を利用し交点から円中心までの距離 l を算出する。最後に円中心と r を利用し、2本の直線と接する円弧を生成する。これにより、曲率半径が非常に大きい円弧の補間が可能となる。

4.5.2 連続する2つの円弧を抽出できない場合

本処理では、図21に示すように2本の線分を延長した直線として想定し、線分上に交点がある場合と線分の外に交点がある場合、直線間に2つの円弧があると判断して補間を行う。本処理では、第4.5.1項と同様に2つの円弧の形状を近似させるように、点列の各点の x, y 座標値で算出したそれぞれの近似円弧の曲率半径を用いて補間する。具体的には、図22に示すように抽出された2本の直線の間の全ての特徴点を抽出する。次に、抽出した特徴点列から、最小二乗法により2つの近似円弧の曲率半径 r_1 と r_2 を算出する。そして、直線の端点を接点とし、 r_1 と r_2 を用いて、2

図19 交点が線分間にある場合

図20 円弧を用いた補間

図 21 交点が線分上か外にある場合のイメージ

図 23 2次曲線の補間

図 22 2つの円弧を用いた補間

つの近似円弧を生成する。しかし、算出した2つの近似円弧が自然に接続せずにズレが発生する。そこで、2つの円弧を互いに接するように、 r_1 と r_2 を調整する。ただし、近似線形の形状を保つには、2つの円弧の曲率半径 r_1 と r_2 の比率を維持する必要がある。これにより、連続する2つの円弧の補間が可能となる。

4.5.3 クロソイド曲線の一部が直線または円弧として抽出された場合

本処理では、平面図において、抽出された円弧が連続する場合、または円弧に隣接する直線が短い場合、線形の誤認識と判定して補正を行う。クロソイド曲線の曲率半径の平均は、隣接する円弧の曲率半径より必ず大きいという特徴がある。この特徴を利用し、円弧抽出処理で抽出した連続する円弧の中から曲率半径が最も小さいものを円弧とし、それ以外のものをクロソイド曲線の一部とする。そして、円弧に隣接する直線が短く、さらにこの短い直線に長い直線が隣接する場

合、短い直線をクロソイド曲線の一部とする。このように判定した後の円弧や直線の情報を利用し、第4.3節で提案した手法を用いてクロソイド曲線を生成する。これにより、一部が誤抽出されたクロソイド曲線の補間が可能となる。

4.5.4 縦断勾配が連続的に変化する場合

本処理では、第4.3.2項と同様に、2本の線分を延長した直線として想定し、線分上に交点がある場合と線分の外に交点がある場合、直線間に2つの2次曲線があると判定し補間を行う。道路に使用する2次曲線は、円弧に非常に近似し、円曲率半径で表示¹⁴⁾することがある。そのため、2つの2次曲線の近似線形の精度を高くするには、第4.5.2項と同様にそれぞれに近似する円弧の曲率半径を利用し、2次曲線を生成する。まず、第4.5.2項の手法により、接する2つの円とそれらの接線 L_c を算出する。次に、図23に示すように、1本の直線 L_1 の端点を接点とし、 L_c 上のもう1つの接点を算出する。そして、第4.2節と同様に、2つの接点で2本の直線と接するように2次曲線を生成する。最後に、もう1本の直線 L_2 に対しても同様に2次曲線を生成する。これにより、 L_1 と L_2 と互いに接する2つの2次曲線の生成が可能となる。ただし、 L_1 と L_c の交点 C_1 から L_1 上の接点までの距離が2つの交点 C_1 と C_2 間の距離の半分より大きい場合、 C_1 と C_2 の線分の中心点を接点とし、 L_1 における接点を再計算する必要がある。これにより、2つの2次曲線の補間が可能となる。

5. 提案手法の評価実験

5.1 実験計画

本提案手法の有用性を確認するため、事前に用意した線形から生成した点群データとMMSにより計測した現況の点群データの2種類を用いて、特徴点抽出精度、線形生成精度と高架道路橋外観精度の3項目について評価実験を行う。本研究の実験計画を図24に示す。これは、評価実験により検証する項目を明確化するため、図1のシステムの流れとの対応関係を図示したものである。特徴点抽出精度の確認実験では、点群

図 24 実験計画

解析機能により生成した特徴点列の位置精度を検証する。線形生成精度の確認実験では、線形解析機能により生成した線形の幾何情報の精度を検証する。高架道路橋外観精度の評価実験では、実際の高架道路橋の現況データから、生成したSXF図面の再現精度を検証する。

5.2 本システムのパラメータの設定

実験時の各処理の定数パラメータを次に示す。

ノイズ除去処理では、高架道路橋における道路の幅や壁の高さを考慮し、GPS履歴ポイントから左右30m、上下5m以内の領域をラベリング処理の領域とする。また、現況の点群密度と民法二百三十四条の規定を考慮し、平面投影の格子のサイズを0.25m×0.25mとする。

横断面生成処理では、点群密度と計算可能なコストを考慮し、横断の間隔Dを0.10mに設定する。

特徴点選出処理では、点列を確認し、十分な精度を確保できるように、3横断ごとに特徴点を選出する。

点列分割処理では、分割した点列の起点から延長した線分と終点から延長した線分のなす角が90度以内であれば処理可能であり、道路構造令の第15条の曲率半径に定義されている通り、高架道路橋では短い区間で急激な変化のある設計がなされないことから、本研究では、3m以内の点を近傍点とする。

直線抽出処理における平面の直線抽出のハフ変換では、計算コストと抽出精度がトレードオフであることを考慮し、最大限細分化できる0.03m×0.03mの格子に点群データを投影する。角度の変化量は、十分な精度を取得可能な0.1度に設定する。抽出可能な直線の長さの最小値は、高架道路橋のスパンの長さを考慮し、20mに設定する。ただし、抽出された1本の直線上には、30m以上離れる間隔が存在する場合、その間隔により直線を2本に分けることとする。また、点群

密度を考慮し、抽出された直線は、構成する点数が30点以下の場合、ノイズとして除去する。

直線抽出処理における縦断面の直線抽出のハフ変換では、縦断における特徴点選出処理がなく、点列の標高変化がなめらかでないことが想定される。そのため、点群データを0.07m×0.07mの格子に投影する。それ以外のパラメータは平面と同様である。

円弧抽出処理のRANSAC法では、高架道路橋のカーブの最小値とクロソイド曲線を省略可能な半径を考慮し、抽出可能な半径の最小値と最大値を20mと1,000mに設定する。反復回数は、十分な精度を取得できるように2,000回に設定する。

クロソイド曲線生成処理では、計算コストを最大に利用するように、0.01度ずつの角度変化量に設定する。

線形補間処理における連続する2つの円弧の補間処理では、実験により、計算コストが高くならないように、2つの円弧の曲率半径の調整量を最初に算出した r_1 と r_2 に設定する。ただし、曲率半径を短縮させるたびに、調整量を半分にする。

5.3 特徴点抽出精度の確認実験

本実験では、横断面における特徴点間の距離を計測し、特徴点抽出手法の有用性を確認する。

5.3.1 実験データ

本実験では、MMSから取得した高架道路橋の点群データを利用する。計測対象の高架道路橋は阪神高速1号環状線(図25)である。阪神高速1号環状線は全路線の壁が垂直なものになっている。点群データは、取得した後トータルステーションにより計測した複数個の標定点で補正したものを使用する。使用するMMSは、StreetMapper 360を用い、詳細仕様を表2に示す。GPS受信機は0.5秒間隔で位置を取得している。その位置情報は、IMUにより補間され、2点間

図 25 MMS の計測対象
(出典：国土地理院，電子国土 Web)

図 26 特徴点抽出精度の確認箇所
(出典：国土地理院，電子国土 Web)

表 2 StreetMapper 360 の仕様

絶対精度	10mm
相対精度	5mm
最大取得点数	約 300,000 点/秒 (1 台)
最大到達距離	500m

の平均間隔が約 0.04 m となっている。本実験では、計算コストを下げるために、平均間隔が約 2 m となるまで点を間引いたデータを用いる。正解データは、現況の CAD 図面とする。

5.3.2 実験内容

本実験では、特徴点抽出手法の有用性を確認するため、正解データの CAD 図面と本システムにより生成した SXF 図面とを比較する。まず、正解データに記載されている横断の計測箇所の内、実験の計測範囲に含まれる 20 箇所 (図 26) を対象とする。次に、正解データに記載されている計測箇所の横断幅員と本システムにより生成した横断幅員とを比較し、その誤差にて評価する。

5.4 線形生成精度の確認実験

本実験では、点列から生成した各線形の種類と起終点を確認することにより、線形の抽出手法と生成手法の有用性を確認する。

5.4.1 実験データ

本実験では、起終点と幾何情報がわかる複数の線形で生成したものを正解データ (図 27) とし、各線形から等間隔に 100 個の点を選定し実験データとする。

本実験の平面の正解データは、合計 20 個の直線、クロソイド曲線と円弧で構成し、縦断面の正解データは、合計 10 個の直線と 2 次曲線で構成した。それぞれの線形は、高架道路橋の支間長と同様に概ね等間隔のものとする。

なお、本研究では、図 9 のようなばらつきを考慮するため、表 3 に示すパターンの変位量を選定した各点に付与し、各パターンで生成した図面を確認することで、提案手法のロバスト性を評価する。

5.4.2 実験内容

本実験では、システムにより出力した線形の幾何情報と正解データとを比較し、正確な幾何情報を抽出した割合を算出することで、線形抽出手法の有用性を評価する。ただし、抽出した線分の数が正解データと一

図 27 線形生成精度の確認実験の正解データ

表 3 3 パターンの変位量

	座標の x 値の変位量	座標の y 値の変位量
パターン 1	0cm	0cm
パターン 2	-1~1cm	-1~1cm
パターン 3	-10~10cm	-10~10cm

致しない場合を考慮するため、本実験では、正解データの数を基準とし評価を行う。従って、図 27 に示す連続する直線は、4 本としてカウントする。また、本実験では、生成した線形と正解データとの相関係数および平均二乗誤差を算出することで、線形生成手法と線形補間手法の有用性を確認する。

5.5 高架道路橋外觀精度の評価実験

本実験では、高架道路橋全体を正確に生成できているかどうかを確認することにより、提案システムの有用性を評価する。

5.5.1 実験データ

本実験では、特徴点の抽出精度の確認実験で用いた阪神高速 1 号環状線の補正済の計測結果を使用する。ただし、MMS で複数回走行し、取得した点群データを使用する。

5.5.2 実験内容

本実験では、正確な線形ベクトル情報が復元されたかどうかを判定するため、本システムにより出力した平面図と縦断面図の近似線と正解データとの近似率を算出する。具体的には、生成した各線形から 1 m 間隔で評価点を取得する。そして、評価点を用いて特徴点列および正解データとの相関係数と平均二乗誤差により評価を行う。

6. 実験結果と考察

6.1 特徴点抽出精度の確認実験

本システムにより抽出した横断面の特徴点間の距離と正解データとの比較結果を表 4 に示す。表 4 では、

表 4 特徴点の抽出精度の確認実験結果

計測箇所	正解データ	SXF 図面	誤差
P14	15.00m	15.07m	0.07m
P26	15.00m	15.07m	0.07m
P35	18.95m	18.99m	0.04m
P60	15.00m	15.09m	0.09m
P71	15.41m	15.47m	0.05m
P96	18.93m	18.93m	0.00m
P108	15.00m	15.02m	0.02m
P126	15.00m	14.99m	0.01m
P138	15.69m	15.79m	0.10m
P165	16.38m	16.40m	0.02m
P175	15.68m	15.75m	0.07m
P187	15.00m	15.07m	0.07m
P208	8.50m	8.59m	0.09m
P246	8.50m	8.58m	0.08m
P291	8.50m	8.58m	0.08m
P323	9.34m	9.48m	0.13m
P337	9.44m	9.52m	0.08m
P373	8.49m	8.70m	0.21m
P397	8.54m	8.58m	0.03m
P412	8.50m	8.61m	0.11m

図 28 路面と壁面の境界を判定しにくい箇所

誤差の絶対値が最小 0.00 m、最大 0.21 m、平均 0.07 m、標準偏差が 0.05 m であった。また、点群データを詳細に確認した結果、誤差が大きい P 323 と P 373 では、図 28 に示すように路面と壁面の境界が垂直ではなく斜めであるため、明確な交差部がないことにより、特徴点が見いだせないことが原因であると考えられる。それ以外の箇所では、全ての誤差が 0.1 m 程度に収まった。走行線から取得した横断方向と正解データとのズレにより 2 点間の距離が少し長いことを考慮すると、生成した横断幅員は現況に非常に近いことが分かった。また、これらの誤差は地図情報レベル 1000 の水平位置および標高の許容誤差の 0.33 m を満たしている。そのため、本システムにより抽出された特徴点は、道路工事完成図等作成要領²⁶⁾で期待されている維持管理業務に十分に利用できると考えられる。

一方、全体の横断面を確認した結果、約 90% の横断面の壁頂点を正確に抽出できることが分かった。正確に抽出できない場所は、高架道路橋の付属物、分岐部の隣接する壁、車などのノイズが原因となっている。

表5 幾何情報種類の比較結果

			正解数	正確に抽出された数	誤抽出数	再現率
パターン1	平面	直	6	6	2	0.75
		円	5	5	0	1.00
		ク	9	9	0	1.00
	縦断面	直	5	5	1	0.83
		二	5	5	0	1.00
パターン2	平面	直	6	6	2	0.75
		円	5	5	0	1.00
		ク	9	9	0	1.00
	縦断面	直	5	5	1	0.83
		二	5	5	0	1.00
パターン3	平面	直	6	6	3	0.67
		円	5	5	0	1.00
		ク	9	9	0	1.00
	縦断面	直	5	5	1	0.83
		二	5	5	0	1.00

（直：直線 円：円弧 ク：クロソイド曲線 二：2次曲線）

ここで、高架道路橋の付属物や分岐部の隣接する壁の頂点が抽出された場合、特徴点の抽出に第3.3節で説明した特徴を適用できる。そのため、これらの場合でも、路面と壁面との特徴点を正確に取得し高精度な図面を生成できる。一方、車などのノイズがある場合、データ欠損が発生するため特徴点を抽出できない。しかし、複数回の走行により欠損部を補間することで、提案手法で特徴点の抽出が可能と考えられる。

また、生成した特徴点列を確認した結果から、全ての点列が路線ごとに分割できたことが分かった。これにより、提案した分割手法の有用性を確認した。

6.2 線形生成精度の確認実験

本システムにより生成した各線形の幾何情報の種類と正解データとの比較を表5に示す。また、生成した近似線と正解データとの相関係数および平均二乗誤差を表6に示す。

表5では、幾何情報の種類の再現率は、最低0.67で、全体平均約0.91となった。また、抽出した円弧と2次曲線の数と種類が完全に一致した。そのため、本提案手法により、高精度に幾何情報の種類と数を抽出できることが分かった。一方、パターン1とパターン2の平面図では、直線が2本、パターン3の平面図では、直線が3本誤抽出された。これは、連続するクロソイド曲線の基点付近が直線に近似していることが原因である。また、全てのパターンの縦断面図では、直線が1本ずつ誤抽出された。これは、2つの2次曲線をスムーズに接続させるため、線形補間処理により短い直線を追加したためである。表3に示した変位量の増大により、多くの点が線形から大きく離れ、幾何情報の抽出精度が低下する場合が考えられる。これは、点群密度が非常に低い場合に相当する。そのため、密

表6 線形生成精度の確認実験結果

		相関係数	平均二乗誤差
パターン1	平面	1.00	0.03m
	縦断面	1.00	0.20m
パターン2	平面	1.00	0.02m
	縦断面	1.00	0.25m
パターン3	平面	1.00	0.03m
	縦断面	1.00	0.06m

本研究の手法で生成した図面

既研究¹¹⁾の手法で生成した図面

図29 生成したクロソイド曲線の比較

度が非常に低い点群データを利用する場合、複数回の走行により点群密度を増加させることが望ましい。

表6の相関係数と平均二乗誤差から、3つのパターンとも、本提案システムにより高精度に平面線形を生成できることが分かった。また、全てのクロソイド曲線を確認した結果、既研究¹¹⁾のような不自然な接続(図29)がないことも分かった。しかし、縦断面の平均二乗誤差は平面より大きくなっている。これは、縦断面の勾配変化が緩やかで、直線が正解データより長く抽出されることが原因となっている。そのため、直線が短く抽出されたパターン3では、平均二乗誤差がパターン1とパターン2より小さい。

以上のことから、特徴点抽出精度の平均誤差が0.10m程度(表4)であるため、特徴点抽出機能を用いて、高精度に近似線形を生成可能であることが分かった。

6.3 高架道路橋外観精度の評価実験

高架道路橋の現況データから、本システムにより生成した平面図(図30)、縦断面図(図31)と正解データとの比較結果を表7に示す。表7の相関係数から、本システムにより高精度に高架道路橋の図面を生成できることが分かった。しかし、生成した図面と正解データとの平均二乗誤差が約0.90mで、地図情報レベル1000の水平位置および標高の許容誤差の0.33mを満たしていないことも分かった。一方、SXF図面と抽出した特徴点列との比較結果(表8)では、平均二乗

図 30 生成した高架道路橋の SXF 平面図

表 7 SXF 図面と正解データとの確認実験結果

	相関係数	平均二乗誤差
平面図	1.00	0.90m
縦断面図	1.00	0.55m

表 8 SXF 図面と特徴点列との比較実験結果

	相関係数	平均二乗誤差
平面図	1.00	0.54m
縦断面図	1.00	0.04m

図 31 生成した高架道路橋の SXF 縦断線形

誤差が約 0.54 m になっている。そこで、実際にトータルステーションにより計測した標定点座標を確認した結果、一部の標定点自体にも正解データから数十 cm から 3 m ほどのズレ（図 32）がある。このことから、生成した図面の多くの誤差は、正解データと実際の現況物との位置ズレが原因と考えられる。

また、生成された SXF 図面では、図 33 に示すようにクロソイド曲線と円弧の接続端点が離れている箇所が 3 箇所見られた。特徴点列を詳細に確認した結果、それらの箇所では、直線と円弧の間のクロソイド曲線区間が非常に長く、式(2)の条件を満たしていないことが分かった。これはクロソイド曲線が複数の円弧に分断されている例外的な事象であると考えられる。この場合、生成アルゴリズムではパラメータの計算ができず、直線、円弧とスムーズに接続可能なクロソイド曲線が存在しないと判定された。これを解決するには、クロソイド曲線区間の点群情報を利用した線形生成手法を考案する必要がある。

このようなクロソイド曲線を取り除いて、平均二乗誤差を再計算すると、表 9 に示すように約 0.08 m の誤差で、地図情報レベル 1000 の水平位置および標高の許容誤差の 0.33 m を満たしており、特徴点列と生成した線形が近似していることが分かった。そのため、特徴点列の各点から道路を表す線形までの距離のばらつきは、特徴点選出処理により抑えられていると考えられる。

他にも生成された図面には、次の 2 つの問題点を発見した。一つ目は、生成した道路線形が途中で切れている箇所があった。現況の点群データを確認した結果、原因は他の車両により発生したデータ欠損（図 34）であることが分かった。この問題を解決するには、計測時に同じ路線を複数回走行することで、欠損部を補間できると考えられる。

二つ目は、走行線の起終点と分岐部において、正解データより線形が短い箇所があった。これは、線形の

図 32 正解データから離れている標定点

図 33 クロソイド曲線を生成できなかった箇所

表 9 SXF 図面と特徴点列との再比較実験結果

	相関係数	平均二乗誤差
平面図	1.00	0.08m

開始部と終了部がクロソイド曲線であり隣接線形の情報がなく計算できないことや、短い直線であるため点数が少なくノイズとして除去されたことが原因となっている。このような問題は、起終点付近の再計測やノイズとした点群データの再利用により近似線を補間する手法を考案することで解消できると考えられる。

それ以外の区間では、線形が自然に接続していることを確認できた。そのため、提案したクロソイド曲線の生成手法や線形補間手法が有用であることが分かった。

7. おわりに

本研究では、高架道路橋を MMS で複数回計測することで、高架道路橋の特徴点を抽出し、継ぎ手などの補足情報なしで、路線ごとに近似線形を生成する手法を提案した。

提案の特徴点選出手法では、特徴点の中から、精度

図 34 切れている線形

図 35 短くなっている線形

が良いものを選出しているため、MMS の点群密度が低い場合でも高精度な図面の生成が可能になった。クロソイド曲線の生成手法では、前後の直線の勾配と円弧の中心と曲率半径を用いるため、低コストでの生成が可能になった。また、直線と円弧の端点位置を計算し、スムーズに接続するクロソイド曲線の生成を実現できた。線形補間の手法では、道路構造令の解説と運用を考慮し、線形が切れている区間を補正することで、連続線形の生成を実現した。

実験の結果から、点群データの位置誤差が 0.10 m 以内の場合、高精度に図面の生成が可能であることが分かった。さらに、生成した図面から、既研究^{11), 12)}での直線と円弧間にクロソイド曲線が不自然に接続する問題を解消できたことが分かった。このことにより、本システムで生成した SXF 図面は、高架道路橋の維持管理などへの利用に期待できる。

今後は、本研究にて設定している「垂直な壁を対象とすること」や「中央分離帯がある道路は対象外であること」などの制約条件の解消や、分岐部にて線形が途切れる課題を解消しつつ、車線ごとに連続する中心線の生成手法を考察する予定である。これにより、車線中心線形を生成し、自動運転などへの利用にも期待できる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、阪神高速(株)と(株)アスコ大東には、本研究の実証実験で利用した 2 次元図面と MMS 点群データを提供して頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] 中村秀明, 鬼丸浩幸, 河村圭, 宮本文穂: Bridge Management System による複数橋梁の維持管理計画策定, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol. 23, No. 1, pp. 1219-1224, 2001.
- [2] 横山博司, 中村秀明, 河村圭, 宮本文穂: Bridge Management System における劣化要因を考慮した維持管理対策の選定, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol. 23, No. 1, pp. 1225-1230, 2001.
- [3] 国土交通省: 老朽化対策の取組み, <<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>>, (入手 2016. 6. 22).
- [4] 国土交通省: 道路法施行規則(1952).
- [5] 田中成典, 北川悦司, 姜文淵, 安彦智史, 川野浩平: 道路橋上部工の維持管理のための3次元現況図の自動生成に関する研究, 土木学会論文集F3(土木情報学), 土木学会, Vol. 68, No. 2, pp.I_181-I_189, 2012.
- [6] Wang, L., Miura, K., Nakamae, E., Yamamoto, T. and Wang, T.: An Approximation Approach of The Clothoid Curve Defined in The Interval $[0, \pi/2]$ and Its Offset by Free-Form Curves, *Computer-Aided Design*, Elsevier, Vol.33, No.14, pp.1049-1058, 2001.
- [7] Ahmad, A. and Ali, J.: G^3 Transition Curve Between Two Straight Lines, *Fifth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization*, IEEE, pp.154-159, 2008.
- [8] Jo, K. and Sunwoo, M.: Generation of a Precise Roadway Map for Autonomous Cars, *Intelligent Transportation Systems*, IEEE, Vol.15, No.3, pp.925-937, 2014.
- [9] 国土交通省電子納品ホームページ: SXFVer. 3.1仕様書(第2版), <http://www.cals-ed.go.jp/sxf_ver3-1_specification_draft/>, (入手 2016. 6. 22).
- [10] 国土交通省: CAD製図基準に関する運用ガイドライン(案), <<http://www.mlit.go.jp/tec/it/cals/050831/img/05.pdf>>, (入手 2016. 6. 22).
- [11] 姜文淵, 田中成典: 高架道路橋上部工の維持管理のためのSXF図面の自動生成に関する研究, 土木学会論文集F3(土木情報学), 土木学会, Vol. 70, No. 2, pp.I_319-I_327, 2014.
- [12] Gikas, V. and Stratakis, J.: A Novel Geodetic Engineering Method for Accurate and Automated Road/Railway Centerline Geometry Extraction Based on the Bearing Diagram and Fractal Behavior, *Intelligent Transportation Systems*, IEEE, Vol.13, No.1, pp.115-126, 2012.
- [13] Schwartz, D.: Clothoid Road Geometry Unsuitable for Sensor Fusion Clothoid Parameter Sloshing, *Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, pp.484-488, 2003.
- [14] 日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, 2004.
- [15] Lee, H., Park, J. and Chung, W.: Curb Feature based Localization of a Mobile Robot in Urban Road Environments, *International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, pp.2794-2799, 2015.
- [16] Wang, H., Luo, H., Wen, C., Cheng, J., Li, P., Chen, Y., Wang, C. and Li, J.: Road Boundaries Detection Based on Local Normal Saliency From Mobile Laser Scanning Data, *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, Vol.12, No.10, pp.2085-2089, 2015.
- [17] 大谷周: 航空レーザ測量活用による中小河川の治水安全度評価, 建設の施工企画, pp. 11-15, 2009.
- [18] Mackay, D.: Information Theory, Inference and Learning Algorithms, *Cambridge University Press*, pp. 284-292, 2003.
- [19] 日本道路協会: 防護柵設置要綱(1972).
- [20] 高田治, 宮本定明: ファジィデータに対するL1距離を用いたファジィクラスタリング, 日本ファジィ学会誌, ファジィ学会, Vol. 13, No. 6, pp. 689-698, 2001.
- [21] 宮本定明: ファジィグラフによる階層的クラスタリングについて, 日本ファジィ学会誌, ファジィ学会, Vol. 5, No. 6, pp. 1354-1371, 1993.
- [22] 岩田一貴, 林朗: クラスタリングにおけるクラスタ間の新しい非類似度について, 電子情報通信学会技術研究報告. NC, ニューロコンピューティング, 電子情報通信学会, Vol. 105, No. 658, pp. 79-84, 2006.
- [23] Duda, R. and Hart, P.: Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures, *Communications of the ACM*, ACM, Vol.15, No.1, pp. 11-15, 1972.
- [24] Fischler, M. and Bolles, R.: Random Sample Consensus a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, ACM, Vol.24, No.6, pp.381-395, 1981.
- [25] Wilde, D.: Computing Clothoid Segments for Trajectory Generation, *Intelligent Robots and Systems*, IEEE, pp.2440-2445, 2009.
- [26] 国土交通省: 道路工事完成図等作成要領(第2版), <http://www.nilim-cdrw.jp/dl_std.html>, (入手 2016. 6. 22).

(2015年12月16日 受付)

(2016年5月23日 採録)

[問い合わせ先]

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2丁目1番1号

関西大学大学院総合情報学研究科

姜 文淵

TEL: 072-690-3213

E-mail: k451719@kansai-u.ac.jp

著者紹介

田中 成典 [正会員]

1963年生. 1986年関西大学工学部土木工学科卒業. 1988年同大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了. 同年(株)東洋情報システム(現在, TIS)に入社. 1994年関西大学総合情報学部専任講師. 1997年助教授, 2004年教授, 2006年から学生センター副所長, 現在に至る. 2002年8月から1年間, カナダのUBCにて客員助教授. 博士(工学). 2000年(株)関西総合情報研究所を起業, 設立当初から現在まで取締役会長. 2016年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞「科学技術振興部門」受賞.

今井 龍一 [非会員]

1975年生. 1998年関西大学工学部土木工学科卒業. 2000年同大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了. 同年, 日本工営(株)入社. 2009年3月博士(工学)東京大学. 2010年8月から国土交通省国土技術政策総合研究所防災・メンテナンス基盤研究センターメンテナンス情報基盤研究室研究官. 2013年4月から2年間, 関西大学大学院総合情報学研究科連携大学院客員教授. 2015年4月から東京都市大学准教授, 現在に至る. 2016年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞「科学技術振興部門」受賞.

中村 健二 [正会員]

1981年生. 2004年関西大学総合情報学部卒業. 2006年関西大学大学院総合情報学研究科知識情報学専攻博士課程前期課程修了. 2009年関西大学大学院総合情報学研究科総合情報学専攻博士課程後期課程修了. 同年, 関西大学ポスト・ドクトラル・フェロー. 2010年立命館大学情報理工学部助手. 2012年大阪経済大学情報社会学部准教授, 現在に至る. 博士(情報学). 知識情報処理, Webマイニング, テキストマイニング等の研究に従事. 2002年から(株)関西総合情報研究所で活動. 2016年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞「科学技術振興部門」受賞.

窪田 諭 [非会員]

1975年生. 1998年関西大学工学部土木工学科卒業. 2000年同大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了. 同年, (株)オーグス総研入社. 2008年岩手県立大学ソフトウェア情報学部講師. 2013年関西大学環境都市工学部都市システム工学科准教授, 現在に至る. 地理情報システム, 社会基盤情報の研究に従事. 博士(工学). 2016年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞「科学技術振興部門」受賞.

山本 雄平 [非会員]

1986年生. 2009年関西大学総合情報学部総合情報学科卒業. 2011年関西大学大学院総合情報学研究科知識情報学専攻博士課程前期課程修了. 2015年関西大学大学院総合情報学研究科総合情報学専攻博士課程後期課程修了. 同年関西大学先端科学技術推進機構特別任命助教, 現在に至る. 博士(情報学). Webマイニング, 自然言語処理, Webソリューションビジネスに関連する研究に従事. 2007年(株)関西総合情報研究所入社. 現在に至る. システム設計等の研究開発に従事.

姜 文淵 [非会員]

1982年生. 2012年関西大学総合情報学部総合情報学科卒業. 2014年同大学大学院総合情報学研究科知識情報学専攻博士課程前期課程修了. 現在, 同大学大学院総合情報学研究科総合情報学専攻博士課程後期課程在学中. MMSの点群データ, 画像処理に関連する研究に従事.

Research for Generating Road Alignment of Highway Bridges with Point Cloud Data using MMS

by

**Shigenori TANAKA, Kenji NAKAMURA, Yuhei YAMAMOTO,
Ryuichi IMAI, Satoshi KUBOTA and Wenyuan JIANG****Abstract :**

Many highway bridges constructed during the high economic growth period have become deteriorated. So their maintenance is required. However, they are facing difficulties in maintenance because their drawings prepared at the time of design or completion were made in paper media, many of which have already been disposed. There is a research that attempts to automatically generate SXF (Scadec data eXchange Format) drawings of a highway bridge to use for its maintenance, using point cloud data obtained by MMS (Mobile Mapping System). In the previous research, the authors use positions of joints on a bridge to divide a point sequence into each span and generate their alignments of the highway bridge. However, when it is unable to extract a joint, or when the start and end points of the alignment are placed at a short distance from the positions of joints on a design drawing, the generated clothoid curve will lose continuity with straight line and circular arc. Thus, this research proposes an analysis method for calculating the start and end points of straight lines, clothoid curves, and circular arcs in a plane and straight lines and quadratic curves in a longitudinal section to allow each alignment to connect with each other naturally. This allows generating the SXF drawings of the superstructure on a highway bridge with high precision without considering the positions of joints.

Keywords : MMS, Point Cloud Data, Highway Bridge, Road Alignment, Clothoid CurveContact Address : **Wenyuan JIANG***Graduate School of Informatics, Kansai University*

Phone : 072-690-3213

E-mail : k451719@kansai-u.ac.jp