

[11]

氏名	姜 文淵 (きょう ぶんえん)
博士の専攻分野の名称	博士 (情報学)
学位記番号	情博第 56 号
学位授与の日付	平成 29 年 3 月 31 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	MMS を用いた高架橋の道路線形の自動生成に関する研究
論文審査委員	主査 教授 田中 成典 副査 教授 辻 光宏 副査 教授 伊藤 俊秀

論文内容の要旨

近年、レーザスキャナや GPS (Global Positioning System) などの計測データの解析技術やビデオカメラを用いた画像データによる機械学習技術の発展により、自動運転の実用化が目前に迫っている。内閣府は、平成 28 年 6 月に「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 自動走行システム研究開発計画」を策定し、自動運転のための走行環境の認識技術、周辺の状況の判断技術と車両の制御技術の開発を推進している。これらの技術開発においては、現況に即した高精度な電子地図データが不可欠である。ただし、電子地図データは、地物を面的な情報として管理しているが、道路に関しては、道路中心線形 (平面線形と縦断線形)、道路の境界線形 (以下、道路線形)、車線毎の線形、交差点や分岐点の線形などの重要な情報が付加されていない。そのため、自動運転の実現には、設計図や完成図の CAD 図面から点 (接合点) や線 (線形) 情報を読み取り、新たに電子地図に追加する必要がある。ただし、CAD 図面においても代表的な箇所や断面変化がある特定断面のみが図面化されているために、最も重要な線形情報が欠落していることが殆どである。

一方、高度経済成長期に建設された多くの道路構造物は、50 年を経て一斉に老朽化に向かっている。そのため、内閣府や国土交通省などの関係省庁は、平成 25 年 11 月に「インフラ長寿命化基本計画」を策定し、道路構造物などのインフラの新設から撤去までのライフサイクルの延長を目的に中長期的な維持管理政策を推進している。しかし、過去に建設された多くの道路構造物の図面は紙媒体で保管されている。また、保存期間を超過したものは破棄されている場合もある。さらに、経年劣化による補修工事や改修工事の際に図面が更新されず、現況の形状と一致しない問題が発生している。そのため、完成時の道路構造物の図面化が求められている。通常、道路の設計では、道路構造令に準拠しながら、直線、円弧、クロソイド曲線の幾何情報を用いて道路中心線形を決定し、この平面線形と縦断線形を用いて横断形状を決定する。この作業をあらためて既設の構

造物に対して行うための予算化は現状では難しい。そのため、道路構造物の最も基本となる道路中心線形さえも入手することは困難である。

したがって、前述のように、自動運転の実現においても、構造物の延命のための維持管理業務においても、現況の道路構造物の道路中心線形を再生させることは喫緊の課題である。

そのため、最近では、レーザスキャナ、GPS、カメラ、IMU (Inertial Measurement Unit) などの機器を搭載した MMS (Mobile Mapping System) を用いて、3次元的に道路構造物を復元することが注目されている。例えば、車両の走行軌跡を示す点列（以下、GPS 履歴ポイント）から道路中心線形を生成する手法が研究されている。しかし、この方法では、計算式が複雑なクロソイド曲線をポリラインやベジェ曲線で代用しているため道路構造令に準拠していない。また、GPS 履歴ポイントから算出した曲率を用いて、線形の区分けとその幾何要素を推定する手法が研究されている。しかし、この方法では、MMS の走行中に車線変更などによって GPS 履歴ポイントにばらつきが発生すると、適切な幾何要素を算出できないため、道路としての連続性に欠ける線形が再生される課題がある。両手法とも、MMS の GPS 測位データをベースにしたもので、MMS に搭載されたレーザスキャナの点群データを活用していない。

そこで、本研究では、高架道路橋を対象に MMS より取得した点群データを用いて、直線、円弧、クロソイド曲線からなる道路中心線形を自動生成する手法を提案する。MMS の点群データは、レーザの照射方向が進行方向に対して垂直となる場合と、45 度傾斜する場合の 2 つに大別できる。本研究では、この 2 種類の照射方法にも対応可能な汎用的な技術を開発する。

本研究では、第一段階として、MMS の進行方向に対してレーザの照射方向が垂直の場合に取得された点群データから、道路幅員境界を算出して横断面を生成し、その中心を橋軸方向の点列として管理する。そして、この情報と高架道路橋の継ぎ手の位置情報を用いて、道路構造令に準拠した道路線形を生成できるかを議論する。

第二段階として、前述の方法の汎用性を向上させるために、分岐・合流部を含む高架道路橋を対象に、MMS の点群データと GPS 履歴ポイントとを用いて、継ぎ手の位置情報を参照せずに道路線形を生成する手法を提案する。また、MMS の進行方向に対してレーザの照射方向が 45 度傾斜した場合について検討する。

最後に、MMS を構成する機材により、GPS、IMU とレーザスキャナの精度が異なることや、計測状況やレーザ照射方法に応じて点群データの密度が異なる点を考慮したロバーストで汎用的な方法を確立する。そして、実証実験を通じて提案技術の信頼性を評価する。

以上、第 1 章では、自動運転に関する技術動向と電子地図データの必要性和、道路構造物の 3 次元化及び維持管理業務における現況図面の必要性について述べる。第 2 章では、GPS 履歴ポイントから道路線形を生成する既存手法について調査し、それらを適用した場合の課題を洗い出し、研究の着眼点と構想について論じる。第 3 章では、継ぎ手の位置情報を利用し、道路構造令に規定されている幾何情報を用いて道路線形を自動生成する手法を提案し、その有用性を議論する。第 4 章では、MMS 点群データの特性の違いを考慮した上で、継ぎ手の位置情報を用いずに分岐・合流部を含めた広範囲な高架橋の道路線形の生成手法を提案し、その有用性を検証する。第 5 章では、様々な MMS から

生成された道路中心線形を比較し、提案技術の有用性を検証する。最後に、第 6 章では、研究成果の総括と本研究成果の今後の展開について述べる。

論文審査結果の要旨

本研究は、高架道路橋の MMS 点群データから道路中心線形の生成手法を検討し、その検討結果を踏まえたシステムを提案・実装して、その有用性を実環境にて評価したものである。以下に審査結果を詳述する。

(1) 道路構造令に規定されている幾何情報で線形を自動生成する技術の提案

MMS 点群データから直線、円弧とクロソイド曲線の幾何要素で線形を生成するためには、骨組みとなる橋軸方向の点列を抽出することが必要である。通常、GPS 履歴ポイントを手掛かりに処理する方法が提案されているが、MMS の走行軌跡により点列が変わってしまう課題がある。そのため、直線、円弧とクロソイド曲線の数式パラメータを探索して点列に最も近似した値を導出する方法では連続性に欠ける線形が生成される恐れがある。

そこで、本研究では、MMS (MMS Type-S) を用いて、高架道路橋の点群データから道路横断面の幅員境界を示す特徴点列を抽出した後に橋軸方向の点列を算出する手法と、継ぎ手の位置情報を手掛かりに連続性を維持した道路線形を生成する手法の 2 つを提案し、既存技術の課題を解決している。幅員境界の特徴点列の抽出においては、点の法線ベクトルを利用する手法が考えられるが、縁石の有無などを考慮する必要があり精度を担保できない。そこで、本研究では、路面勾配を考慮し、横断面における全体の特徴点列の高さの変化に着目した手法を提案している。そして、道路線形の生成では、高架橋がスパンごとに設計・建設される点に着目し、継ぎ手の位置情報に基づいて線形を判定・生成する手法を提案している。

本技術は、MMS 点群データから道路構造令に準拠した道路線形を生成する点に意義がある。これは、本研究の新規性の一つである。実証実験では、提案手法により生成された道路線形の精度を確認するため、CAD 図面に記載されている線形情報と比較した。その結果、既設の道路線形を比較的容易に復元できることを確認した。さらに、道路線形から横断面を生成し、その中心の点列を利用することで道路中心線形を取得できる可能性についても論じている。

(2) 継ぎ手の情報なしで広範囲な高架橋の道路線形を自動生成する技術の提案

高架道路橋の継ぎ手を手掛かりにした場合、線形の幾何要素の起終点と必ずしも一致しないことや、そもそも高規格道路には伸縮継ぎ手がないことから、将来の拡張を考えると継ぎ手の情報なしで線形を生成する必要がある。また、MMS のレーザスキャナの設

置場所や台数によっては、レーザの照射方向が進行方向に対して垂直な場合（MMS Type-S）と45度傾斜した場合（StreetMapper360）がある。さらに、提案手法（1）では、分岐・合流部を対象外としているため、汎用性の面で改良の余地がある。そこで、本研究では、MMS（StreetMapper360）を用いてこれらの課題を検討している。

まず、一つ目の継手情報を用いない処理では、道路全体の線形を捉えて、それを構成する最適な幾何情報の算出と起終点の位置調整の両方を反復処理しながら同定する手法を提案している。

二つ目のレーザの照射方向が異なる処理では、レーザスキャナの計測距離に応じて点群密度が異なることを考慮する必要がある。点群密度が低い箇所では、特徴点の抽出精度の低下により、特徴点列にばらつきが生じる。これにより、線形の生成精度も低下するため、特徴点列のノイズを除去する方法を考案する。本研究では、高架道路橋の形状特性を考慮して、横断及び欄干・防護柵がほぼ同一形状であることに着目して点列のノイズを除去する。これにより点群密度が低い箇所においても線形の生成精度の向上が期待できる。

三つ目の分岐・合流部に関しては、交差部における線形を正確に区別する手法が必要である。本線と支線の点群データに対してクラスタリング手法を用いて分割を試みたが、連続している2つの点列を精度良く分割できなかったため、本研究では、走行情報を用いて特徴点列に路線情報を付与することで特徴点列を明示的に分割した。このことで、高架道路橋の交差部において連続的な線形の生成を可能にした。分岐・合流部に対応したことにより、本線及び支線が連続する道路ネットワークを構築することが可能となる。これは、自動運転において有用で、本研究の新規性の一つである。

（3）道路線形の自動生成に関する実用性の評価検証

本研究では、先の提案手法（2）の汎用性を明確にするため、まず、前述（1）で用いたMMS（MMS Type-S）の点群データにおいても同様な処理を適用した。そしてMMS Type-SとStreetMapper360を用いた比較実験を行った。ここでは、2つの点群データの位置誤差の比較と、それぞれ抽出された特徴点と道路境界値との誤差の比較、それぞれ生成された道路線形と図面再生による比較、そして、最終の道路中心線形と実橋との比較検証を行った。この結果、同程度の精度で道路線形及び図面再生が可能であることを証明した。最終の道路中心線形についても、MMSのGPS履歴ポイントの精度に左右されることはあるが、同程度で生成できることが分かった。これにより、提案手法の汎用性を実証したと言える。将来的には、道路中心線形のみならず車線線形を抽出することにより、自動車の自動走行経路を生成することが可能となり、自動運転の実用化に寄与するものである。

以上より、本論文は、高架道路橋のMMS点群データから道路線形の生成技術について、社会の趨勢を加味した実践的な観点から研究に取り組み、提案技術の有用性と実用性を立証した先駆的な論文である。したがって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。