

	[2]
氏 名	塚田 義典 <small>つかだ よしのり</small>
博士の専攻分野の名称	博士（情報学）
学位記番号	情博第 50 号
学位授与の日付	平成 27 年 9 月 20 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	レーザスキャナ及び画像からの点群データを用いた 3 次元モデルの生成に関する研究
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

レーザやカメラの技術革新に伴い、地物の形状を把握するための計測技術が多様化している。例えば、レーザを照射して対象物までの距離を計測するレーザスキャナや、赤外線を用いた距離画像センサがある。これらの機器を用いることで、遠隔地から対象物の形状を 3 次元の点群データで取得できる。最近では、デジタルカメラを搭載した小型の無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) の登場により、構造物の上面や側面を簡単に撮影でき、画像から写真測量技術を介して対象物の疑似点群データを取得できるようになった。これらの点群データは、地物の現況把握や情報化施工、出来高・出来形管理と言った建設業界の様々な用途で利用されている。

一方、我が国では、高度経済成長期に集中整備された社会インフラが老朽化している。国土交通省は、全国約 70 万橋の 4 割が 10 年後に築後 50 年以上となるため、早急なメンテナンス対策が必要であると提言している。ただし、適切な点検・補修計画の策定、および工法の選定には、対象物の形状を正確に把握する必要がある。しかし、1970 年代前後に建設された構造物の図面は紙媒体であることが多く、工事請負契約の履行期間を経過した後に廃棄されている。このような場合、現地での再測量が必須であるが、全ての構造物を対象に実施することはコスト面でも人的資源の面でも課題が多い。そこで、再測量の代替手段として点群データの活用が注目されている。安価で可搬性に優れた計測機器を用いて取得した点群データから、対象物を取り巻く実空間や対象物自体の 3 次元モデルを生成できれば、維持管理業務の省力化と効率化に期待できる。

点群データから 3 次元モデルを生成する上で解決すべき課題は、

- 一地点で計測できる範囲が限られるため、複数の地点で計測した点群データの重畳が必要であること
- 対象物以外のオブジェクトが混在する環境下では、3 次元モデルを構成する TIN (Triangulated Irregular Network) を正確に生成できないこと

- 計測機器の設置が困難な環境下では、対象物の 3 次元モデルを構成するための点群データを取得できないこと

の 3 点がある。

一つ目の課題では、異なる位置より計測した複数の点群データから対応点を指定し、それらに最も適した座標変換パラメータを用いて、全ての点群データを同一のローカル座標に変換することにより解消できる。そして、ローカル座標に緯度・経度・標高を指定することでグローバル座標にアフィン変換できる。しかし、対応点を手動で指定するには手間が掛かる。そのため、画像処理技術を用いて対応点を自動で検出し、異なるローカル座標系の点群データを重畳する研究がなされているが、画像の輝度値のみを考慮すると、輝度値の変化量が小さい箇所では対応点の検出精度が低下する課題がある。そこで、本研究では、距離画像センサを用いて輝度値と距離値を併用する対応点の検出手法を提案している。

二つ目の課題においては、オブジェクトの幾何的な特徴を加味することによって解消することが考えられる。しかし、幾何的な特徴を数式や境界条件で表わして TIN を発生させ、そして構成されたモデルの確からしさを検証しながらトライアンドエラーを繰り返す手順は、非常に効率が悪い。さらに、3 次元モデルを可視化するアプリケーションを用いて、実形と異なる面を削除することや、不足した点データを追加するなどの修正作業も伴う。この作業は、隣接する点との整合性を担保する必要があり容易ではない。そこで、本研究では、距離画像センサで取得した点群データを用いて 3 次元モデルの形状を確認し、実形と異なる箇所の局所修正を繰り返しながら最適な形状に近付ける手法について提案する。

三つ目の課題では、他の機器を用いることや対象物の幾何的特徴を考慮することで、取得できなかった点群データを補間する方法によって解消することを考える。既存研究では、MMS (Mobile Mapping System) で取得した点群データから道路橋上部工の 3 次元モデルを生成する上で、レーザによる測距方式がラインスキャンであることに着目し、計測できなかった箇所を隣接するライン上の点群データを参考にしながら補間する手法を提案している。この方法では、計測範囲内の一部の点群データが欠損した場合に有用であるが、大部分の点群データが計測できていない場合には適さない。そこで、本研究では、地上設置型のレーザスキャナだけではなく UAV を併用して点群データを取得することを考える。加えて、対象物の構造的な特徴を加味して不足している点を補間しながら 3 次元モデルを生成する手法を提案する。

本研究では、これらの 3 つの課題に着目し、点群データから実空間と対象物の 3 次元モデルを生成する手法について提案する。そして、実環境において各手法の有用性を評価する。これにより、現存する社会インフラの維持管理への貢献を目指すものである。

以上、第 1 章では、多様化する点群データの計測技術の現状と、その利用の用途や課題について述べている。第 2 章では、維持管理業務の省力化と効率化に寄与する点群データの活用事例について調査し、本研究の着眼点と構想について論じている。第 3 章では、距離画像センサを用いて取得した点群データから実空間の 3 次元モデルを生成する手法について提案し、実証実験を通じて有用性を議論している。第 4 章では、点群データを用いて 3 次元モデルの形状を確認し、実形と異なる箇所を局所修正する手法について提案し、実証実験を通じて有用性を議論している。第 5 章では、地上設置型のレーザスキャナと UAV を用いて取得した点群データから、対象物の 3 次元モデルを生成する手法について提案し、実証実験を通じて有用性を

議論している. 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ている.

論文審査結果の要旨

本研究は, 距離画像センサ, レーザスキャナとカメラを用いて取得した点群データから実空間と対象物の 3 次元モデルを生成する手法を提案し, 実証実験を通じて有用性を評価したものである. 以下に審査結果を詳述する.

(1) 点群データを重畳し実空間の 3 次元モデルを生成する技術の提案

点群データから実空間の 3 次元モデルを生成するには, 異なる複数の地点から計測した点群データがある座標系の下で重畳する処理が欠かせない. 一方向の計測だけでは, オブジェクトの位置関係によりオクルージョンが発生するためである. 点群データを高精度に重畳するためには, 正確に対応点を検出することが肝要である. 通常, 輝度値を手掛かりにした SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) 手法により対応点を推定するのが一般的であるが, 特徴量が類似するオブジェクトでは対応点の検出精度が低下する.

そこで, 本研究は, 輝度値と距離値を併用することで対応点を検出する手法を提案している. この手法では, まず, SIFT を用いて対応点の候補を検出する. 次に, その各点に対して, 計測位置とのユークリッド距離, 周囲の点とのユークリッド距離からなる特徴ベクトルを作成する. そして, 2 種類の特徴ベクトルを比較することで対応点の確からしさを判定し, 誤判定した対応点を消去する. 最終的に候補となる対応点を用いて, 逐次近似解法により点群データを重畳するための最適な座標変換パラメータを算出する. 本提案手法は, 候補となる対応点を高い精度で検出できることに利点があり, 本研究における新規性の一つである. なお, 本研究では距離画像センサの利用を想定しているが, 多くのレーザスキャナは輝度値と距離値を取得できることから, 提案手法はレーザ機器での応用が可能である.

実証実験では, 距離画像センサにより取得した点群データを用いて, 対応点の検出精度と 3 次元モデルの生成精度を評価した. その結果, 提案手法により対応点の検出精度が向上することを確認した. また, 3 次元モデルの任意点間の距離と実測値を比較したところ, その誤差が距離画像センサの機械誤差の範囲内に収まったことから, 実空間の 3 次元モデルを高い精度で生成できることを確認した. 以上より, 提案手法が有用であることを実証している.

(2) 点群データを用いて 3 次元モデルの形状を確認し局所修正する技術の提案

点群データから TIN で構成された 3 次元モデルを生成するには, 全ての点を包括する四面体を定義し, その内部に点が存在しなくなるまで領域分割を繰り返す 3 次元ドロネー分割法を用いて TIN を発生させるのが一般的である. しかし, 常に実形を正確に表現した面が生成できるとは限らない. また, オブジェクトの幾何的な特徴を数式や境界条件を用いてモデルの確からしさを検証しながらトライアンドエラーを繰り返す手順も考えられるが, 非常に効率が悪い.

そこで、本研究は、実形と異なる箇所に対して 3 次元モデルを局所修正する新たな手法を提案している。まず、点群データと 3 次元モデルを重畳する。次に、点群データに含まれる点と 3 次元モデルを構成する点のユークリッド距離を算出し、その距離に基づき 3 次元モデルの修正に必要な点を抽出する。そして、その点と計測位置を結ぶ線分を生成し、3 次元モデルを構成する TIN との衝突を判定することで、実形に存在しない面を検出する。最後に、修正に必要な点と、その周辺にある 3 次元モデルの構成点を含めて階層的な手法によりクラスタリングし、クラスごとに 3 次元ドロネー分割法を適用して局所修正する。提案手法は、3 次元モデルの形状を簡単に確認できることと、部分的に修正できることに利点がある。これは、本研究の新規性の一つである。

実証実験では、距離画像センサにより取得した点群データを用いて 3 次元モデルの修正精度を評価している。その結果、提案手法により 3 次元モデルの実形に存在しない箇所を正しく検出できることと、その箇所を修正できることを確認した。以上より、提案手法が有用であることを実証している。

(3) 対象物の形状特徴から点群データを補間して 3 次元モデルを生成する技術の提案

点群データから対象物の 3 次元モデルを生成するには、対象物をあらゆる方向から計測することが理想的であるが、機器の設置が困難な現場も多いため計測できない箇所を補間する必要がある。そこで、近傍点の座標値を用いた最近傍補間 (Nearest Neighbor) 法や、複数の近傍点の座標値の平均値を用いる双一次補間 (Bilinear) 法で不足の点群データを導出することが考えられる。しかし、これらは、点群データの分布特徴のみを考慮して補間するため、オブジェクトの境界が曖昧になる課題がある。そこで、対象物の構造的な特徴を加味して点群データを補間する研究がなされている。例えば、MMS により取得した点群データから河川空間の 3 次元モデルを生成する上で、河川堤防が凸型の形状をとることに着目し、断面変化点を補間しながら 3 次元モデルを生成することを試みているものがある。また、MMS で取得した点群データから道路橋上部工の 3 次元モデルを生成する研究では、レーザによる測距方式がラインスキャンであることに着目し、計測できなかった箇所を隣接するライン上の点群データを参考にしながら補間する手法を提案している。これらの方法では、計測範囲内の一部の点群データが欠損した場合に有用であるが、大部分の点群データが計測できなかった場合には適さない。

そこで、本研究は、地上設置型レーザスキャナと UAV を併用して点群データを取得することを提案している。加えて、河川に架かる橋梁の多くが直線橋であり、道路中心線形に対して左右対称である構造的な特徴を加味して、不足している点を補間しながら 3 次元モデルを生成する手法も考案している。この手法では、まず、手動で指定した道路中心の位置を示す点群データを頼りに、道路中心線形を推定する。次に、バッファ法を用いて上部工と下部工の横断面を一定間隔で生成し、計測できなかった箇所の点群データを道路中心線形に対して左右反転することで補間する。そして、点群データから外形線を特定する凸包アルゴリズムを用いて、横断面に投影した点群データから横断形状を推定する。しかし、代表的な凸包アルゴリズムの一つである Graham 走査法では、凸部の頂点のみを抽出するため凹みを適切に検出できない。そのため、本研究では、生成する線分の最大長を設定し、それを超過する領域に対して外形線を再

探索する手法を考案している。これらの技術により、理想の計測条件が整わない環境下でも、実橋の3次元モデルを復元できる点において、新規性や萌芽性が高い。

実証実験では、地上設置型のレーザスキャナとUAVより取得した点群データを用いて、橋梁の3次元モデルの生成精度を評価している。その結果、提案手法により点群データから上部工と下部工を含む橋梁全体の3次元モデルを生成できることを確認した。そして、各部位の寸法値と設計図面の値とを比較したところ、その誤差平均がレーザスキャナの機械誤差の範囲内に収まることを確認した。以上より、提案手法が有用であることを実証している。

以上の内容によって、本論文は、点群データから実空間と対象物の3次元モデルの生成について、実社会における問題解決に寄与できる深遠な研究であり、実用面での有用性を証明した先駆的な論文と言える。したがって、本論文を博士論文として価値あるものと認める。