

UAV搭載LiDARを用いた橋梁の3次元計測と精度評価

3D scanning and accuracy evaluation using UAV-mounted LiDAR

○小林亜里紗, 溝口知広

○Arisa Kobayashi, Tomohiro Mizoguchi

日本大学

Nihon University

キーワード: 精度評価(accuracy evaluation), モバイルレーザスキャナ(MLS), 無人航空機(UAV), CIM(Construction Information Model), 橋梁調査(bridge inspection)

連絡先: 〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1 日本大学工学部情報工学科
小林亜里紗, Tel.: 024-956-8825, E-mail: cear23014@g.nihon-u.ac.jp

1. はじめに

高度経済成長期に建設された橋梁の老朽化に伴い, その維持管理の必要性が高まっている。2014年からは, 国土交通省による道路橋定期点検要領に基づき, 5年に1回の点検が始まった。この点検要領では, 専門知識と技術を有する点検者が, 近接目視にて部材ごとに健全性を診断し, その結果を適切な方法で長期的に記録, 蓄積することが定められている。また, この点検要領は2019年に改定が行われ, 近接目視と同等の健全性の診断ができる情報を得られる支援技術を用いることが可能となり, ドローンを用いた橋梁点検の事例が増えてきている。それに伴い, 点検結果の記録, 蓄積にも3Dモデルを用いたデジタル管理が推進されている。そこで現在では, 橋梁の3DモデルであるCIM (Construction Information Model)を作成し, 劣化や損傷を撮影した画像や文書など, 点検に関するあらゆる情報をCIM上の該当箇所に関連付けて保存することが一般的な手段として確立されつつある。橋梁の維持管理に3Dモデルを利用

することで, 損傷の位置やその連続性, 橋梁全体の損傷を確認しやすいといった利点がある²⁾。しかしながら点検の対象となる橋梁ではCIMや3DCADなどの3Dデータが存在することはほとんどなく, 実際の橋梁を3D計測し, 取得した点群データよりCIMを作成する必要がある^{3,4,5)}。特に劣化や損傷位置を正確に記録するためには, 記録媒体であるCIMを高精度に作成する必要がある。

橋梁の3D計測のためには, 足場のない箇所が存在することから, UAV (Unmanned Aerial Vehicle)の利用は不可欠である。UAVを利用して3D計測する方法として, まず, Structure from Motion (SfM)と呼ばれる, 複数枚の画像から3Dモデルを再構成する方法がある^{4,5,6)}。この方法では, 安価に3D作成が可能であり, 撮影画像を点検に利用することも可能である。しかしながら, 橋梁全体を網羅するには数百~数千枚の画像が必要となり, その撮影には数時間もの時間を要し, さらに後の再構成処理に数十時間を要してしまうといった問題がある⁷⁾。もう1つの方法として, LiDAR (Light Detection and Ranging)を利用する方法があ

る。この方法では、機材は高価であり、画像は別途取得する必要があるが、計測と後処理は数十分程度で極めて効率的に行える利点がある。またSfMと比べ、天候に左右されにくく計測が行える利点もある。これまでに、前者のSfMについては、品質と幾何学的精度という観点から生成した計測点群を評価する研究例がある^{5,6)}。一方、後者のLiDARについては十分な報告が少ないのが現状である。

そこで本研究では、UAV搭載LiDARによる橋梁の3D計測を行い、取得した点群の精度評価を行うことを目的とする。

2. 使用するデータ

本研究では、Fig.1に示す福島県郡山市にある阿久津橋（橋長251m、幅員7.4m）の1径間（約50m）の範囲を対象とした。3D計測にはFig.2(a)に示すEmesent社のモバイルレーザスキャナ (MLS) Hovermapを使用した。このHovermapには、Velodyne社の円柱型スキャナVLP-16が搭載されており、 $360^{\circ} \times 30^{\circ}$ の範囲にレーザを照射できる。最大計測距離は100m、計測精度は $\pm 30\text{mm}$ である。さらにこのスキャナ自体を回転させることで、全周 $360^{\circ} \times 360^{\circ}$ の範囲にレーザをまんべんなく照射することが可能である。そのため、従来型では計測が困難であった点検で重要な床板も、橋梁下を飛行しながら計測できる。Fig.3(a)に計測時の飛行経路を示す。主桁に平行に速度1m/秒程度で2往復飛行した。飛行時間は10分程度であった。

精度検証のために、Fig.2(b)に示すFARO社の地上設置型レーザスキャナFocus Laser Scanner (TLS)を用いた計測を行い、取得した点群を実証値として使用する。このスキャナの最大計測距離は150m、計測精度は $\pm 1\text{mm}$ である。Fig.3(b)に示す8か所から計測を行い、計測時間は約1時間程度を要した。

Table1に使用したスキャナの主なスペックを示す。検証の対象は、Fig.4に示す1径間分の点群である。総点数はMLSでは30,625,947点、TLSは25,416,605点である。



Fig. 1 実際の橋梁



(a) UAV搭載LiDAR (MLS)



(b) 地上設置型LiDAR (TLS)

Fig. 2 使用した機器

Table 1 使用した機器の仕様

| | MLS | TLS |
|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| 名称 | Hovermap (Emesent 社) | Focus Laser Scanner (FARO 社) |
| 重量 | 1.8kg | 4.2kg |
| 最大 計測距離 | 100m | 150m |
| 計測精度 | ±30mm | ±1mm |
| 視野 | 360°×360° | 360°×300° |
| データ取得 レート | 300,000 点/秒 | 500,000 点/秒 |

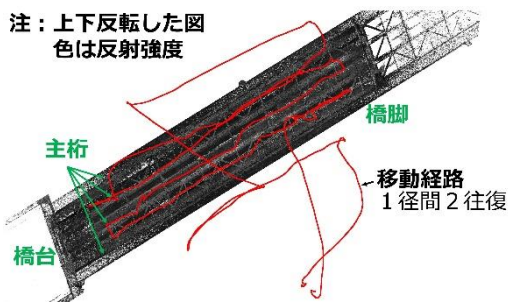


(a) MLS

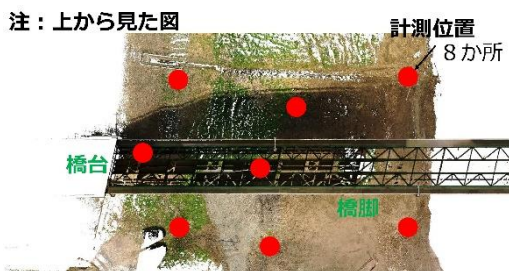


(b) TLS

Fig. 4 使用したデータ



(a) MLSの飛行経路



(b) TLSの計測位置

Fig. 3 3D計測の概要

3. 精度評価のための処理手順

本研究での処理手順をFig.5に示す. まず前処理として, 2つの点群データのレジストレーションを行う. 次に, 視覚的な点群欠損の評価を行う. その後, 点密度評価, 平面フィッティングによる局所的な精度評価, 点群間距離評価による大局的な精度評価の3項目を定量的に行う.

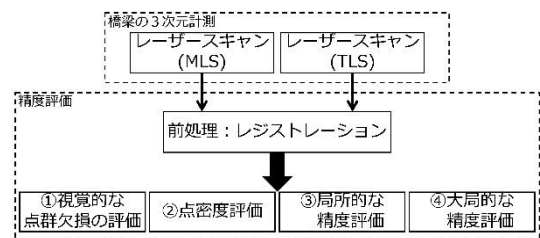


Fig. 5 処理手順

4. 実験方法と結果

4.1. レジストレーション

取得した点群データは異なる位置・機器で計測したものであるため、精度評価を行う前にICP法を用いた3D点群同士のレジストレーションを行う。このICP法では、互いの点群距離の総和が最小となるよう、一方を他方に対して整列させる。Fig.6にレジストレーション後の点群を示す。

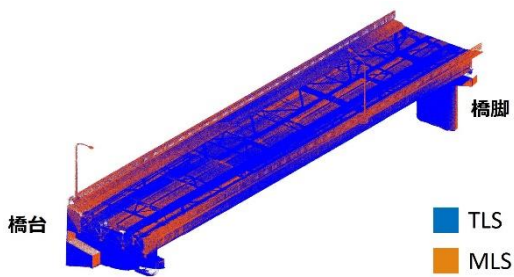
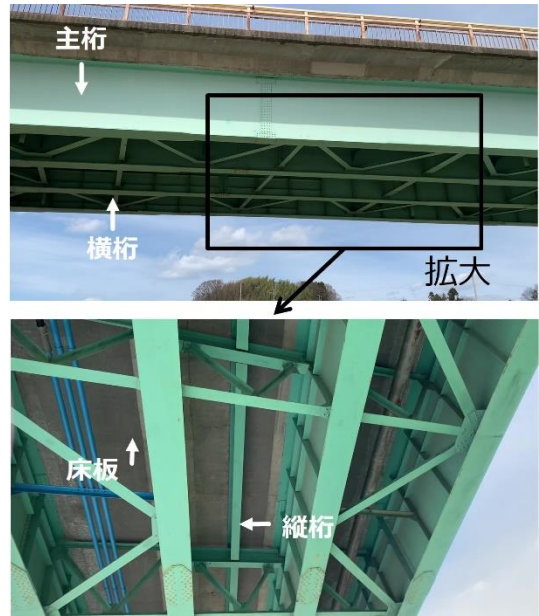


Fig. 6 レジストレーション後の点群

4.2. 視覚的な点群欠損の評価

橋梁は、大きく分けて上部構造、下部構造に分けられる。上部構造とは、歩行者や自動車などを直接支持する部分のことであり、主桁、横桁、床板などで構成される。下部構造は、上部構造を支持する部分のことであり、橋台、橋脚、基礎で構成される。また、上部構造と下部構造は支承によって結合されている。特に主桁、横桁、床板、支承が点検対象として重要視されているため、3Dモデル上でも詳細に部材を識別できなければならない。



(a) 上部構造



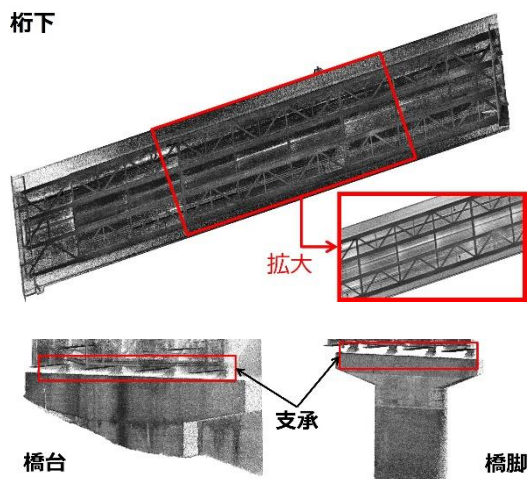
(b) 下部構造



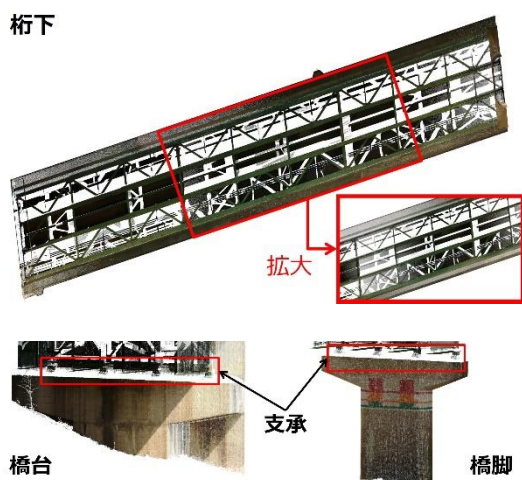
(c) 支承

Fig. 7 橋梁の構造

ここでは、点群全体を対象に、点群中のデータ欠損の有無を目視で確認することで、視覚的な点群欠損の評価を行った。Fig.8は、この評価結果を示したものである。MLSでは、橋台、橋脚、支承はもちろん、上部構造を構成する主桁、横桁、床板などの点検対象となる部材がしっかりと計測できている。一方でTLSは、橋台、橋脚、支承はしっかりと計測できているが、上部構造はデータ欠損が多く、重要な部材が十分に計測できていないことが分かる。MLSは点検対象となる部材を抜け漏れなく3D計測できるため、3Dモデリングの際のデータ取得に適した手段である。



(a) MLS



(b) TLS

Fig. 8 視覚的評価

4.3. 点密度評価

ここでは、橋台、橋脚、床版の表面を対象に、物体表面の単位面積当たりの点数である点密度を求めることで、点密度評価を行った。Table2は、この評価結果を示したものである。まず、TLSの点密度と比較すると、MLSは部材間のばらつきが大きいのに対し、TLSは部材間のばらつきが小さいことがわかる。3つの部材の比較を行うと、レーザが水平方向に照射される橋台と橋脚では密度が高く、鉛直上向きにある床板では低いことがわかる。これは、MLSの進行方向に存在する橋台、橋脚はドローンが移動している間もレーザが照射され続けていたため、取得点数が多くなり、高密度な点群が得られたと考えられる。一方で床板は、使用した機器Hovermapではスキャナそのものがおよそ2Hz/秒で回転しており、鉛直上方向を向く時間帯しか床板にはレーザが照射されない。また、Hovermapをドローン下に装着して計測を行うため、橋梁下からの計測では鉛直上方向に位置する床板はドローンの陰になり、レーザが届きにくい位置に存在する。よって、水平方向に比べて取得点数が少なくなり、低密度な点群であったと考えられる。このことから、MLSは水平方向の計測は得意であるが、鉛直上方向の計測では点密度が低くなる傾向にあることが確認できる。

次に、低密度であった床板を、主桁と横桁で区切られる面積のほぼ等しい9領域に分割し、領域ごとの点密度評価を行った。Table3は、この評価結果を示したものである。MLSは平均9,965.43点/m²、標準偏差が2,944.31点/m²と非常にばらつきが小さく、およそ均一であった。一方でTLSは、平均29,229.34点/m²、標準偏差43,599.27点/m²と大きかった。以上から、MLSは点密度は低いものの、点密度のばらつきが小さいことから、3Dモデリングにおいても、領域間の差異が小さく、一定品質を保つことができる。

Table 2 部材毎の点密度評価

| 表面 | 面積(m ²) | 密度(点/m ²) | |
|----|---------------------|-----------------------|-----------|
| | | MLS | TLS |
| 橋台 | 26.69 | 65,471.56 | 32,078.10 |
| 橋脚 | 38.77 | 81,056.65 | 14,127.80 |
| 床板 | 138.52 | 10,839.76 | 25,247.85 |

Table 3 領域毎の点密度評価

| 表面 | 面積(m ²) | 密度(点/m ²) | |
|------|---------------------|-----------------------|------------|
| | | MLS | MLS |
| 領域① | 3.26 | 5,477.71 | 15,696.74 |
| 領域② | 4.29 | 14,023.18 | 139,741.61 |
| 領域③ | 4.25 | 14,057.52 | 29,226.24 |
| 領域④ | 4.13 | 12,565.18 | 3,663.44 |
| 領域⑤ | 4.24 | 8,741.76 | 14,006.01 |
| 領域⑥ | 3.89 | 9,540.08 | 43,489.89 |
| 領域⑦ | 3.89 | 8,156.12 | 12,309.41 |
| 領域⑧ | 3.16 | 8,988.53 | 3,777.86 |
| 領域⑨ | 3.29 | 8,138.76 | 1,152.90 |
| 最大 | | 14,057.52 | 139,741.61 |
| 最小 | | 5,477.71 | 1,152.90 |
| 平均 | | 9,965.43 | 29,229.34 |
| 標準偏差 | | 2,944.31 | 43,599.27 |

4.4. 平面フィッティングによる局所的な精度評価

ここでは、4.3節と同様に、橋台、橋脚、床版の表面を対象に、平面上に分布する点群に対して最小二乗法を用いた平面当てはめを行い、点群の平面との距離の分布を求めることで、局所的な精度評価を行った。

Table4にこの評価結果を、Fig.9に橋脚の誤差ヒストグラムを示す。二乗平均平方根誤差(RMSE)は、MLSでは17.39mm、TLSでは12.10 mmとなり、TLSのほうが計測精度が良い結果となった。しかし、高い計測精度を持つTLSのRMSE値がカタログスペックの±1mmに比べ全体的に大きい結果となった。これは、実際の構造物は設計通りに平にはできておらず、歪みが含まれると予想されるが、その結果を反映したものと考えられる。また、このことは同様に、MLSのRMSE値も歪みに影響を受けた結果を反映していると考えられる。歪みを考慮してもMLSにて取得した点群の精度は10~20mm程であり、一般的に3Dモデルは10mm程の精度があれば作成することは可能である⁵⁾ため、MLSは十分に3Dモデリングにも利用できると思われる。

Table 4 点と平面の距離評価

| 表面 | RMSE(mm) | |
|----|----------|-------|
| | MLS | TLS |
| 橋台 | 11.17 | 4.90 |
| 橋脚 | 10.93 | 7.21 |
| 床板 | 30.08 | 24.20 |
| 平均 | 17.39 | 12.10 |

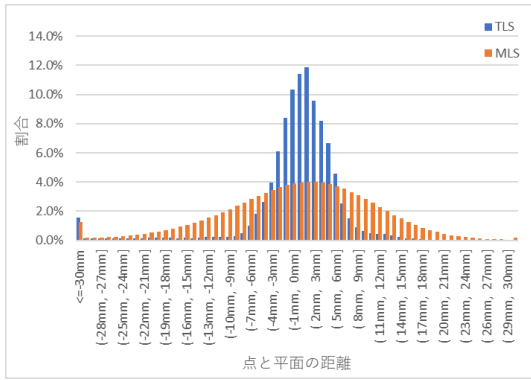


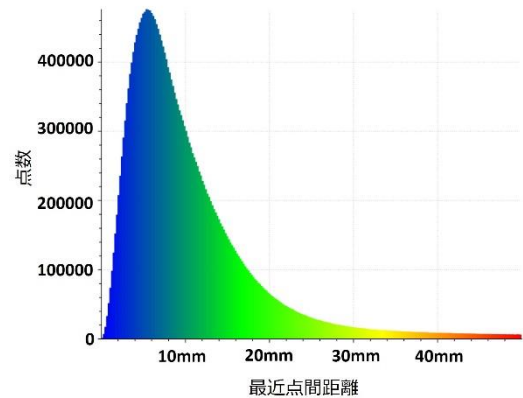
Fig. 9 橋脚の誤差ヒストグラム

Table 5 位置合わせ後の最近点間距離の評価

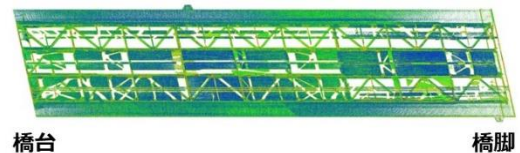
| | 点数 | 割合(%) |
|---------|------------|-------|
| 全体 | 30,625,947 | 100.0 |
| 50mm 以下 | 27,671,898 | 90.4 |
| 30mm 以下 | 26,709,822 | 87.2 |
| 10mm 以下 | 16,821,232 | 54.9 |

4.5. 点群間距離による大局的な精度評価

ここでは、位置合わせ後の点群全体を対象に、MLSの各点から、TLS点群内での最近点を探索し、その距離分布を求めることで、大局的な精度評価を行った。Table5は、この評価結果を示したものである。ここから総点数の90%以上が50mm以下の最近点間距離にあることがわかり、計測精度 $\pm 30\text{mm}$ を考慮すると、非常に良好な結果が得られた。4.2節で示したように、TLSでは欠損が非常に多く、50mmを超えた点群の多くでは、この欠損のため最近点間距離が大きくなってしまっている。



(a) 最近点間距離のヒストグラム



(b) カラースケール図

次に、50mm以下の点群に対し、カラースケール分析を行い、最近点間距離の分布を確認した。Fig.10は、この評価結果を示したものである。MLSの誤差は局所的に集中することなく、形状全体でおよそ一様に分布することが確認できた。

Fig. 10 最近点間距離の評価

また、点群の断面プロファイルを用いて、形状の正確さを確認した。Fig.11は、この評価結果を示したものである。局所的にみると一定のばらつきはあるものの、直線部分は湾曲することなく、直線として計測できていることが確認できた。MLSは局所的な誤差がなく、直線もしっかりと計測できるため、直線や平面の多い橋梁の3Dモデリングに適している。

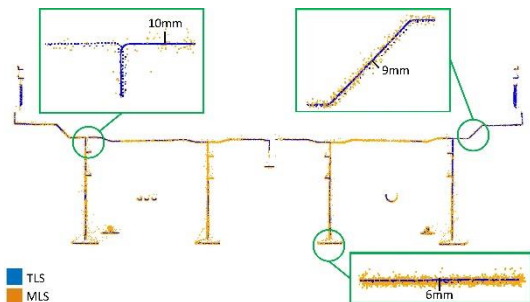


Fig. 11 断面プロファイル

5. おわりに

本研究では、UAV搭載LiDARによる橋梁の3D計測と精度評価を行い、その有効性を検証した。様々な検証により、取得したMLS点群の精度は一般に3Dモデリングに要求される10mm程度の誤差内に収まっていることを確認できた。したがって、UAV3D計測の主流であるSfMを用いた3Dモデル再構成で生成した点群と比べて、計測精度はほぼ同等であるものの、計測と後処理を極めて効率的に行えるため、MLSは3Dモデリングのデータ取得方法の1つとして有効な手段といえる。

今後の課題として、ドローン速度や飛行ルートを変更した場合の精度検証、取得した点群からの自動CIM構築手法の開発、実際の橋梁点検業務への展開などが挙げられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路橋定期点検要領，
https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf, (2023-9-28)
- 2) 関和彦，窪田諭：CIMモデルを用いた3D損傷図作成支援システムの開発と評価，AIデータサイエンス論文集，3巻，J2号，(2022)
- 3) 川野浩平，青山憲明，寺口敏生，関谷浩孝：土木分野における既存構造物の簡易な3次元モデル作成方法に関する研究，土木情報学シンポジウム講演集，Vol.43，No.16，pp.181-184，(2018)
- 4) 二宮建，榎本真美，下川光治，服部達也，新田恭士：橋梁3次元データを活用する橋梁点検手法の提案とプロトタイプを用いた効果検証の報告，土木学会論文集F4（建設マネジメント），76巻，2号，pp. I_32-

I_46，(2020)

- 5) 木本啓介，松田浩：中小橋梁の点検におけるSfMの活用方法の比較・検証，実験力学Vol.17，No.4，pp.290-297，(2017)
- 6) Masoud Mohammadi，Maria Rashidi，Vahid Mousavi，Ali Karami，Yang Yu，Bijan Samali：Quality Evaluation of Digital Twins Generated Based on UAV Photogrammetry and TLS: Bridge Case Study，Remote Sens.2021，vol.13，No.3499，(2021)

謝 辞

本研究は、福島県令和5年度産学連携ロボット研究開発支援事業の一部として行われました。