

既設道路橋の点群計測データを用いた 3次元モデル作成方法の検討

郭 栄珠・西村 徹

1. はじめに

国土交通省では、小規模を除くすべての公共工事においてBIM/CIM（Building / Construction Information Modeling and Management）を2023年度から原則適用するため、発注業務・工事において段階的にその適用拡大を図っている¹⁾。

国土技術政策総合研究所では、設計初期段階での負担が大きくても建設プロセス全体では負担の軽減されるフロントローディングと呼ばれるBIM/CIMの活用効果について検討してきた²⁾。これまで、設計初期段階でBIM/CIMを活用して点検の容易性や確実性、安全性などのインフラ維持管理での配慮事項を反映させることにより、日常・災害時の点検作業及び補修設計時の手戻り防止を通じた業務効率の向上につながる効果があることを確認した。

また、インフラの深刻な老朽化や人手不足等が急速に進行する中、建設現場の生産性及び安全性向上が急務であり、インフラ維持管理におけるBIM/CIM活用に向けて既設構造物の3次元モデルを簡易に作成できる技術の開発が必要である。3次元モデルを作成するには、一般図や完成図等の2次元図面等から数値化して変換・作成する方法と、各種レーザスキャナ（距離センサー）等の計測機器によるICT活用工事（現地測量業務等）の成果品（3次元測量・点群データ等）を用いて作成する方法がある。

本研究では、既設道路橋における3次元モデル作成の考え方を設定し（2章）、新技術であるSLAM技術を活用した遠隔計測方法により既設道路橋の外形形状の点群データを取得して計測精度を評価するとともに（3章）、取得した点群データを用いた簡易な3次元モデルの作成手法を検討した（4章）。

2. 維持管理でのBIM/CIM活用に向けた3次元モデル作成の考え方

図-1に、インフラの維持管理でのBIM/CIM活用業務（点検データ等）及びBIM/CIM活用工事（橋梁補修・補強等）を想定して、2次元図面等がない既設道路橋の3次元モデルを新規作成する方法の概念図を示す。本稿では、図-1に示す既設道路橋の3次元モデル作成イメージのうち、現地作業の省力化・効率化が期待できる無人航空機を活用して、既設道路橋の桁下空間や長径間などのアクセスが困難な点検箇所、危険な現場、複雑な部位でもレーザスキャナの死角の部分がなく遠隔計測が可能な「3次元点群データの計測技術」（3章）と「簡易な3次元モデルの作成方法」（4章）について検討結果を紹介する。

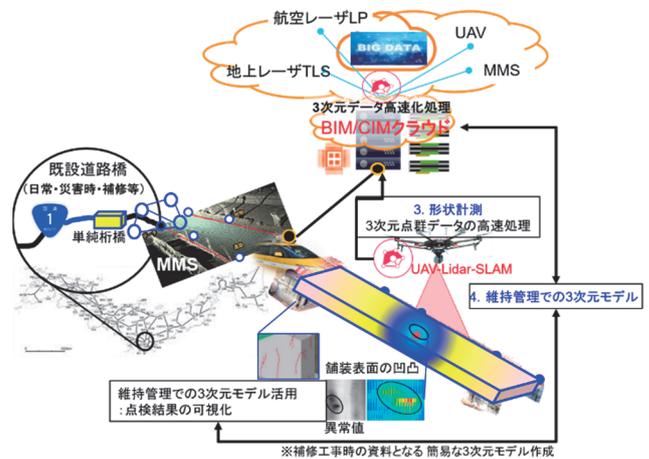


図-1 維持管理でのBIM/CIM活用を考慮した既設道路橋の3次元モデル作成方法のイメージ

3. 遠隔計測機器を用いた既設道路橋の形状計測

3.1 無人航空機搭載型LiDARによる遠隔計測

インフラの建設・維持管理の現場では、計測業務の生産性及び安全性向上の観点から、無人航空機を用いた遠隔計測が普及しつつある。

本研究では新技術活用の観点から、移動体の自己位置推定と環境地図作成を同時に行うSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術を活用してGNSSが受信できない現場(橋梁の桁下等)や方位センサーが効かない場所(地下や室内等)等でも遠隔計測可能なUAV(Unmanned Aerial Vehicle:無人航空機)レーザ測量3次元計測システムを採択した(以下「UAV-LiDAR SLAM」という。)^{3),4)}。従来の計測手法と比べて、UAV-LiDAR SLAM(表-1の左側)は、橋梁の周りを飛行しながらSLAMレーザスキャナで全方位計測可能な3次元計測システムである。

形状計測は、「UAV搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル」⁵⁾に準じて遠隔計測を行った。特に、点検項目に則った主部材単位の外形形状の詳細度(LOD)は200を基本とし、主部材の点検結果を紐付ける外形形状の3次元モデル(外形形状を正確に表現したLOD300)を念頭に外形計測を行った。

3.2 地上レーザスキャナによる測定精度検証

地上レーザスキャナ(Terrestrial laser scanner、以下「TLS」という)は、高精度な遠隔計測機器であり(表-1の右側)、3次元点群データの測定精度及び作成モデルの整合性を確認するために採択した。計測時に設置した標定点を基準とし、UAV-LiDAR SLAM方式とTLS方式の測定精度を比較した。表-2は標定点の一覧例であり、図-2は標定点の配置を示す。

計測結果を比較したところ、国土地理院の公共測量マニュアルの要求仕様⁶⁾にある標準値(測定精度)の±10cm以内(X,Y,Zの各成分:表-3の標定点誤差)かつグリッド化の要求点密度100点

表-1 レーザスキャナ計測機器仕様の詳細

	UAV- LiDAR SLAM	TLS
重量	2.0 Kg	7.3 Kg
測定距離	1~100m	0.3~365m
測定精度	±3cm	1mm以下
測定点数	約30万点/秒	約100万点/秒
センサー	Velodyne VLP16	Z+F Imager5016
		

以上/m²を満たすことを確認した。

一方、3次元計測技術を用いた出来形管理要領(構造物工編の試行案)では、標定点に対して最大±16mm以内の測定精度かつ1点以上/0.0025m²の計測密度を求めている⁶⁾。UAV-LiDAR SLAM方式では、水平及び垂直方向の計測結果は出来形管理要領(構造物工編)の測定精度を満たしていない。UAV-LiDAR SLAM方式の計測結果は計測作業及び解析作業の効率が総合的に高い反面、TLS方式(水平方向誤差9mmと垂直方向誤差3mmあり)に対して計測誤差が3倍以上大きいことを確認した。表-3は、UAV-LiDAR SLAM方式とTLS方式による計測結果及び標定点との比較結果を示す。

図-3は計測した道路橋の点群データより代表的な断面形状を選択し(赤矢印)、橋台の横断方向の幅員を確認した状況を表す。

表-2 標定点16点の一覧例

標定点ID	x (m)	y (m)	z(m)
201	13468.098	21427.354	28.291
202	13516.468	21431.38	28.243
203	13516.876	21450.024	27.231
...

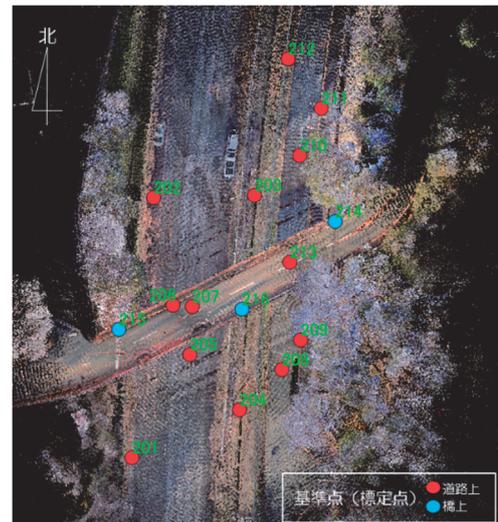
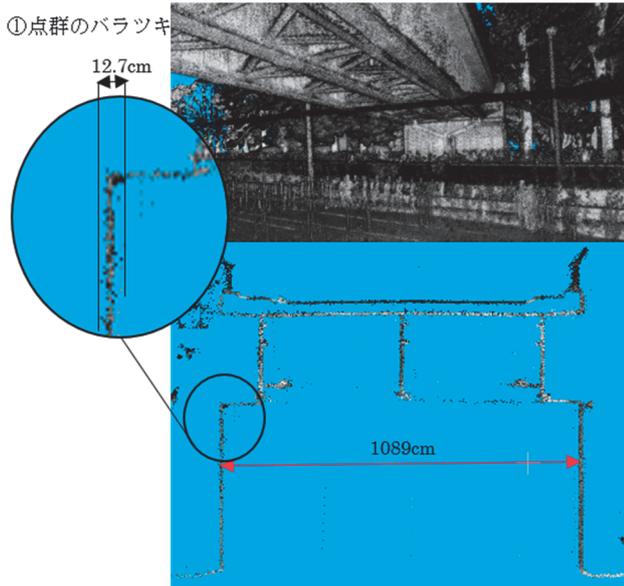


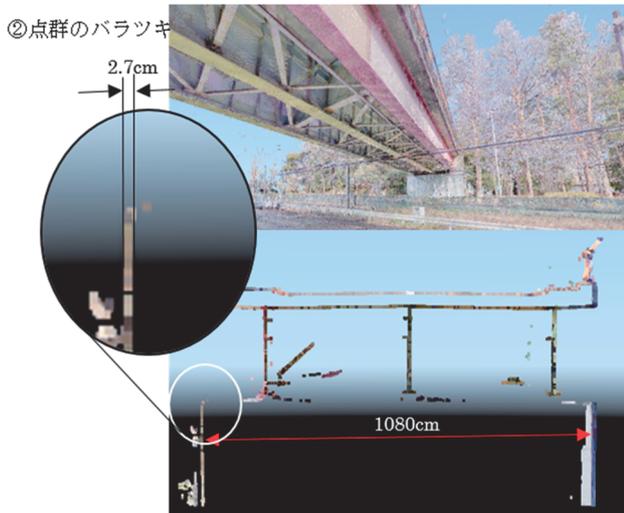
図-2 対象域(既設道路橋)の標定点配置図

表-3 レーザスキャナの計測結果と標定点との比較

	UAV-LiDAR SLAM	TLS
計測時間	約14分	約2時間
解析時間	約20分	約3時間
下部構造(橋台幅員)	1089cm	1080cm
点群のバラツキ	12.7cm	2.7cm
標定点誤差(二乗平均平方根誤差)	水平 29mm 垂直 101mm	水平 9mm 垂直 3mm



(a) UAV-LiDAR SLAM計測図及び下部構造の断面図



(b) TLS計測図及び下部構造の断面図

図-3 遠隔計測結果及び下部構造の横断面（幅約10m、赤矢印）

橋台の側面を計測した点群データについて面に対する奥行方向のバラツキを確認すると、UAV-LiDAR SLAM計測では図-3(a)の拡大図①に示すとおり12.7cmであり、そのバラツキの中心間で計測した橋台の幅員は1,089cmである。TLS計測では図-3(b)の拡大図②に示すように2.7cmとなり、同じく計測した橋台幅員は1,080cmである。その結果、UAV-LiDAR SLAM方式の計測寸法は、比較対象であるTLS方式と比べて9cm大きいことが確認できる。その理由として、LiDAR機器の計測誤差、SLAMの推定アルゴリズムの推定誤差、UAVの姿勢制御等の影響が複合して発生していると考えられる。

このような誤差を低減するためには、安定した飛行を優先に低速・停止飛行を実施しながら遠隔計測すること、複数飛行ルートを検討した最適飛行による遠隔計測方法が重要である。また、BIM/CIM活用ガイドライン共通編¹⁾においては、形状の詳細度（LOD）200は構造形式が確認できる程度の形状を有すると定義されていることを踏まえると、リアルタイムマッピングかつ高速処理・解析が可能な特徴をもつ遠隔計測 UAV-LiDAR SLAM技術を使用して取得した外形形状データは、LOD300としては形状の精度に注意を要するものの、LOD200程度の3次元モデル作成の元データとしては十分に利用可能であると考えられる。

4. 点群データを用いた効率的な3次元モデルの作成

現地で計測した3次元点群データを用いて既設道路橋の3次元モデルを新規作成する方法を検討した。

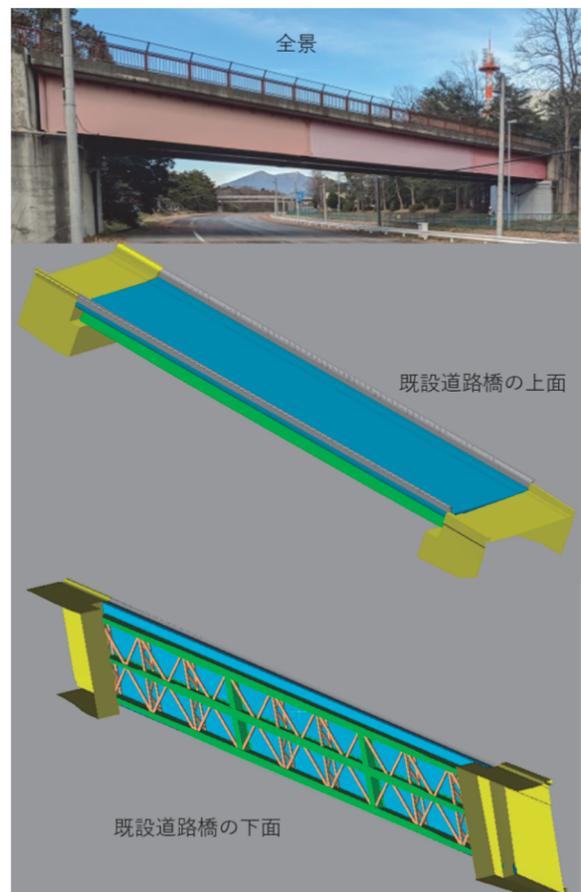


図-4 3次元モデル作成結果（L=44.4m、W=8.8m）

過年度の検討では、橋梁点検の対策区分判定の評価単位（下部構造一基単位や径間毎の桁単位等）で3次元モデルを作成し、3次元モデルを利用して点検が困難な箇所などに点検作業車や点検員を配置する方法で点検作業の確実性を確認する手法を示した⁷⁾。この知見を踏まえて、本研究では主要部材単位での対策区分や健全性の区分を属性情報として付与することを念頭に、主要部材の単位で分割した3次元モデルのオブジェクトを作成することとした。

一般的な3次元モデルの形状を作成・表現方法は、BIM/CIMソフトウェアを用いて建造物の立体形状を多面体で組み合わせるソリッド方式である（BIM/CIM活用ガイドラインより）¹⁾。しかし、現地で計測した点群データから3次元モデルを作成する際に、BIM/CIM技術者が判断して手動でモデルを作成・修正する必要がある。この手作業を部分的に自動化アルゴリズムに置き換えることで、3次元モデル作成作業の効率化を図った。具体的には、データ軽量化の観点からフィルタリング（間引きの前処理）手法を適用するとともに、フィルタリングしたデータを道路橋の上部構造の上面・下面と下部構造の橋台に手動で分類した上で自動エッジ抽出手法を利用して主部材単位のオブジェクトを作成した。作成した3次元モデルを図-4に示す。

5. おわりに

インフラ維持管理でのBIM/CIM活用に向けた既設道路橋の3次元モデル作成方法に関する研究として、2次元図面等がない既設道路橋を対象に、標定点を使わずに測定精度を確保しつつ省力かつ安全に外形形状を計測可能なUAV-LiDAR SLAM技術の利用可能性を検討した。その結果、測定精度をさらに向上させる必要はあるが、現地でリアルタイムに3次元点群データをマッピングしながらレーザスキャナの死角の部分も自動補完して迅速に遠隔計測可能な新技術の有効性を確認した。また、取得した点群計測データを用いて、橋梁点検情報の付与を想定した簡易な3次元モデルの作成方法を提案した。

今後、多様な現場条件を考慮した遠隔計測の位置精度検証や3次元モデルの自動作成方法について検討するとともに、標定点を使わずに既存の測量データ（例えば、車載写真レーザ測量システム Mobile Mapping System：車両に各種のセンサーを取り付け、移動しながら情報を収集するシステム等の3次元計測データ）を活用し現地計測結果との位置合わせ方法を検討する。

参考文献

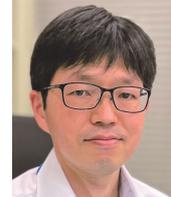
- 1) 国土交通省：BIM/CIM活用ガイドライン（案）、第1編 共通編、令和4年3月改正、2022
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所社会資本情報基盤研究室：維持管理でのBIM/CIM活用を目的とした3次元モデル作成仕様（案）、令和4年3月改正、2022
- 3) 郭 栄珠、井上 直、池田裕二、SLAM技術による既存建造物の簡易な3次元モデル作成方法に関する研究、第2回i-Constructionの推進に関するシンポジウムI-5-5、2020
- 4) 郭 栄珠、西村 徹、既存道路建造物の簡易な3次元点群データ計測方法に関する研究、第4回i-Constructionの推進に関するシンポジウム、2022
- 5) 国土交通省国土地理院：UAV搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）、令和2年3月改正、2022
- 6) 国土交通省、3次元計測技術を用いた出来形管理要領（構造物工編（橋梁上部工）編）（試行案）、令和4年3月版、2022
- 7) 郭 栄珠、青山憲明、西村 徹、BIM/CIMを活用した橋梁点検における3次元シミュレーション機能の開発、土木技術資料、第64巻、第3号、pp.16～19、2022

郭 栄珠



国土交通省国土技術政策
総合研究所社会資本マネ
ジメント研究センター社
会資本情報基盤研究室
研究官、博士（学術）
Dr. KWAK Young-Joo

西村 徹



国土交通省国土技術政策
総合研究所社会資本マネ
ジメント研究センター
社会資本情報基盤研究室
室長
NISHIMURA Toru