

レーザスキャナと UAV 等の計測機器を用いた 社会基盤施設の 3 次元データの計測と活用に関する研究

田中成典^{†1} 辻 光宏^{†1} 伊藤俊秀^{†1} 窪田 諭^{†2} 今井龍一^{†3} 中村健二^{†4}

概要：建設事業においては、国土交通省が生産性向上を目的に i-Construction 政策を推進し、社会基盤施設の 3 次元データを測量、設計、施工、維持管理で活用するための施策を実施している。社会基盤施設の 3 次元データは、航空レーザ、地上設置型レーザスキャナ、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 等によって計測されるが、現場の特性を踏まえた計測とデータ処理が必要である。本研究では、計測機器により道路、橋梁および河川等の 3 次元データを取得し、活用のために必要な処理を行う工夫と、3 次元データを情報システムに適用した事例を報告する。

Surveying and Utilization of Three-dimensional Data on Civil Infrastructures Using Terrestrial Laser Scanner and Unmanned Aerial Vehicle

SHIGENORI TANAKA^{†1} MITSUHIRO TSUJI^{†1} TOSHIHIDE ITO^{†1}
SATOSHI KUBOTA^{†2} RYUICHI IMAI^{†3} KENJI NAKAMURA^{†4}

1. はじめに

社会基盤施設においては、公共事業投資の減少と熟練技術者の不足という制約の中で、高度経済成長期に整備された施設が更新期を迎えつつあり、限られた予算で増大する維持管理需要を賄いつつ、公共サービスの水準を維持するという厳しい課題に直面している。特に、施設の老朽化対応、頻発する災害対策、災害発生時の応急・復旧対策の輸送経路の役割を担う等の理由から、維持管理が重要視されている。これらの解決のために、建設事業の生産性向上を目指す CALS/EC (公共事業支援統合情報システム: Continuous Acquisition and Lifecycle Support/ Electronic Commerce) [1][2]が推進され、これに関連して情報化施工 [3]や 3 次元データの活用に関する取り組み [4]が実施されてきた。国土交通省は、BIM (Building Information Modeling) の概念に基づく Construction Information Modeling (CIM) [5]の導入を提唱し、設計段階で生成される 3 次元データを用いて施工・維持管理の高度化と効率化を目指している。BIM は、建築物の 3 次元データをコンピュータ上に作成し、それにコストや仕上げ、管理情報などの属性情報を追加したデータベースを設計、施工、維持管理の工程で活用するものである。CIM は、BIM の対象を社会基盤施設に拡大し、建設生産プロセスの高度化を図ろうとするものである。さらに、国土交通省は、i-Construction [6]の方針を発表し、情報通信技術の全面的な活用、全体最適の導入、施工時期の平準化のための施策を推進している。CIM、情報化施工や

i-Construction を有効に実現するためには、計画や設計段階で計測および作成された 3 次元データを設計、施工および維持管理段階に流通し、建設事業関係者が利用できる環境が必要である。

社会基盤施設の 3 次元データを作成するためには、様々な計測機器が利用される。それには、航空レーザ測量 (Laser Profiler: LP)、モービルマッピングシステム (Mobile Mapping System: MMS) や地上設置型レーザスキャナ (Terrestrial Laser Scanner: TLS) のレーザ計測機器と、無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) による空中写真測量で用いられるデジタルカメラがある。これらの機器を単独または複数で利用し、対象の構造物や状況に適した計測技術を組み合わせることにより、屋内外の様々な場面において 3 次元データを取得することができる。複数の計測機器を組み合わせるとして社会基盤施設の 3 次元データを取得し活用するためには、計測機器の特性を理解して計測するとともに、その特性に基づき計測データの取捨選択やデータ融合を行うことが必要である。

本稿では、様々な計測機器によって社会基盤施設の 3 次元データを取得し、それを維持管理に利用することを目的として、それらの事例を紹介する。

2. 3 次元データの計測手法と特性の分析

2.1 計測に用いられる機器

社会基盤施設の 3 次元データを計測するために、LP、MMS、TLS が多く利用され、その結果、利用者は点群デー

^{†1} 関西大学 総合情報学部
Faculty of Informatics, Kansai University

^{†2} 関西大学 環境都市工学部
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

^{†3} 東京都市大学 工学部
Faculty of Engineering, Tokyo City University

^{†4} 大阪経済大学 情報社会学部
Faculty of Information Technology and Social Sciences, Osaka University of Economics

タを取得することができる。これらのレーザスキャナやモバイルマッピングシステムは、社会基盤施設を対象とする土木、建築、測量の分野に限らず、プラント、造船等の分野における大規模設備の設計、施工、検査、保守等においても急速に導入されている。点群データは、xyz 座標を持つ点の集合である。また、点群データには、座標 (x, y, z) に加え、反射強度を RGB カラーが付加されることもある。さらに、UAV の普及により、UAV に搭載されたカメラによる映像または写真を基に、写真測量技術により点群データを生成することも頻繁に行われ、土砂災害の状況把握[7]、河川点検[8]や橋梁[9]などの様々な利用シーンで有用性が評価されている。各計測機器には、設置場所の制約や測距距離、社会基盤施設を計測する際の点群データの密度、植生や移動体等によるノイズ等により取得できる点群データが異なるという特性がある。

2.2 計測機器の特性の分析

(1) 航空レーザ測量 (LP)

LP データは、航空機に搭載したレーザ計測機器から地上に向けてレーザ光を照射し、反射波との時間差から求まる距離と GNSS や慣性計測機器から得られる位置情報とを用いて取得できる点群データである。LP データは、上空から計測するため、植生や構造物等の地物があるとオクルージョンが発生し、地表面を計測できず、それら地物を計測結果とする特徴がある。そのため、航空レーザ測量では、計測結果の点検調整を行ったオリジナルデータと、作業規程の準則[10]に即してオリジナルデータから地表面以外の地物を取り除いたグラウンドデータの 2 つの LP データが作成される。

(2) モービルマッピングシステム (MMS)

MMS は、車両上部に自己位置と姿勢を計測する GNSS 受信機、慣性計測装置、車速・走行距離計および対象物を計測するためのセンサを搭載して、移動しながら道路や河川等の構造物を計測する技術である。計測センサとして、レーザ計測装置が主に用いられ、対象物を高精度かつ高密度に計測し、点群データを得ることができる。また、デジタルカメラに加えて、全周囲カメラ、熱赤外線カメラやハイパースペクトルカメラ等が搭載され、目的に応じて様々なデータを取得される。MMS は、高精度に点群データを計測できるが、レーザスキャナを車両上部に搭載するため、車両が進んでいけない災害現場等での活用には不向きであり、整備された道路表面や道路周辺施設を計測することが主な利用用途となる。

(3) 地上設置型レーザスキャナ (TLS)

TLS による計測 (図 1) では、地面に三脚を立ててスキャナを設置し、放射状にレーザを照射して、それを受光するまでの時間と光の速度から対象物までの距離を計測して周囲の点群データを取得する。そのため、対象物を俯瞰できる場所に機器を設置することが望ましい。



図 1 地上設置型レーザスキャナ (FARO Focus3D)

(4) カメラ搭載 UAV

デジタルカメラ等を搭載した UAV (図 2) による空中写真測量では、航空法を遵守した上で、UAV の飛行によって得る映像または画像データから写真測量技術の原理による SfM (Structure from Motion) 処理により点群データ (図 3) を得る。SfM は、対象とする物体をカメラの視点を変えながら撮影した複数の画像から対象物の 3 次元データを構築する技術である。SfM による 3 次元データの構築には、写実性が高く、現場を理解しやすい利点がある。一方、写真が元であるため植生が再現され、対象構造物や地形を正確に表現できないことや、天候や時間により刻々と変化する状況のある時点を表現するデータとなることに留意する必要がある。



図 2 カメラ搭載 UAV (DJI Inspire2)

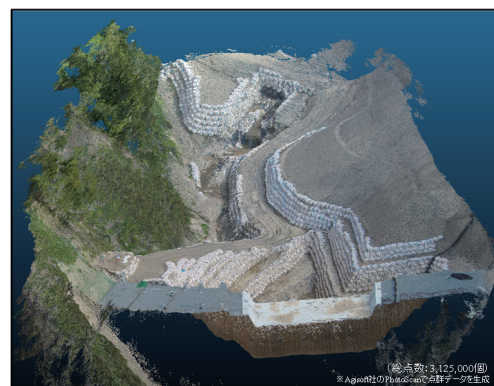


図 3 カメラ搭載 UAV による点群データ

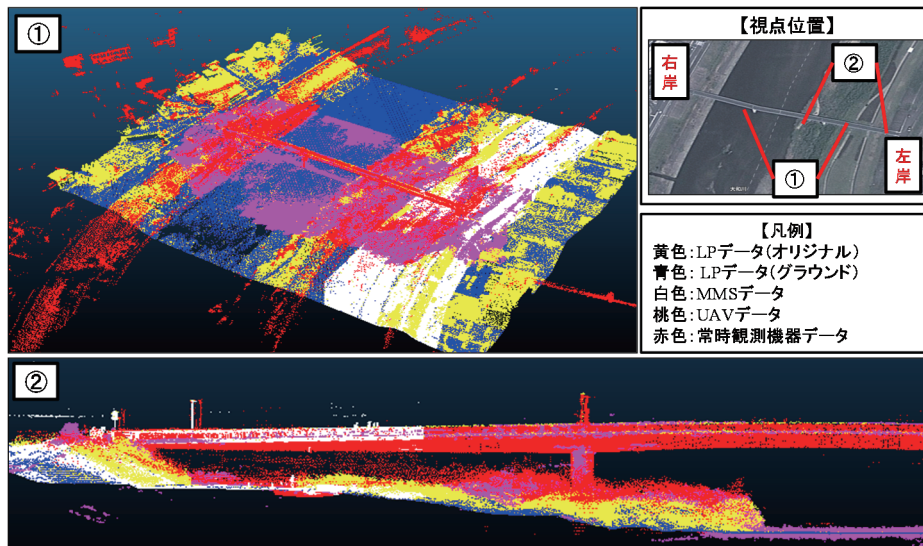


図 4 複数計測機器による計測結果を重ね合わせた点群データ

表 1 計測機器による点群データの特性

	LPデータ (オリジナル)	LPデータ (グラウンド)	地上設置型 レーザスキャナデータ	MMSデータ	UAVデータ (空中写真測量)
計測コスト (時間)	△ (大型. 飛行申請 等準備に手間)	× (人手によるノイズ 除去が必要)	○ (可搬の時間)	◎ (走行するだけで周囲を計測できる)	◎ (小型. ただし, 天候と風速 に考慮する必要)
測距範囲	○ (広域)	○ (広域)	× (狭域)	△ (やや広域)	△ (やや広域)
計測可能範囲 (可視領域)	○ (飛行可能なエリア全域を計測可能)	○ (飛行可能なエリア全域を計測可能)	△ (設置可能な箇所から可視化 できる範囲)	× (堤防周辺など限定的)	○ (飛行可能なエリア全域を 計測可能)
計測不可能範囲 (不可視領域)	△ オーバーハング箇所や構造物の 側面は計測できない	△ オーバーハング箇所や構造物の 側面は計測できない	△ 構造物の上面等の計測は困難	△ 構造物や看板の裏面など道路か ら見えない領域は計測できない	△ オーバーハング箇所は計 測できない
測距精度 (理論値)	垂直誤差: ±15cm 水平誤差: ±25cm	垂直誤差: ±15cm 水平誤差: ±25cm	誤差: 数mm	誤差: 約1~2cm	ソフトウェアに依存
点の密度	△ (普通)	△ (普通)	◎ (非常に高い)	◎ (非常に高い)	○ (高い)
測距点の分布	○ (一様)	○ (一様)	× (非一様分布. 近距離ほど密度 が高い)	△ (非一様分布. 対象物との角度 に応じて変化)	△ (ソフトウェアに依存)
地面に対する計 測角	90° 程度	90° 程度	10~90° 程度	20~90°	90° 程度
エッジの計測	○ (計測されている場合)	○ (計測されている場合)	○ (計測されている場合)	◎ (点群密度が高い)	× (エッジが曖昧になる)
地表面の計測	○ (ノイズを含む)	◎ (地表面のみ)	○ (ノイズを含む)	△ (走行可能な範囲から見える領 域に限定)	○ (ノイズを含む)
構造物の計測	△ (上面のみ)	× (手動で除去さ れている)	○ (側面を計測できる)	○ (路面のすべてを計測できる)	◎ (全てのエリアを計測できる)
構造物・植生・移 動体等のノイズ	× (有り)	◎ (地表面以外の 点群座標データ が無い)	× (有り)	× (有り)	× (有り)
取得可能な情報	△ (平面直角座標系のXYZ座標値)	△ (平面直角座標系のXYZ座標値)	○ (ローカル座標系のXYZ座標 値, 反射強度, 輝度値)	△ (平面直角座標系のXYZ座標値)	○ (基準点指定することで平 面直角座標系のXYZ座標 値, 輝度値)

3. 複数機器による3次元データの計測

3.1 複数計測機器による3次元データの特性

筆者らは、LP、MMS、TLS およびカメラ搭載 UAV を用いて奈良県北葛城郡王寺町久度(大和川流域 KP27.6 地点)の多聞橋の計測を行った。これらの機器による計測結果を重ね合わせて作成した点群データを図 4 に示す。図中の①

と②は、TLS の設置位置を示す。図 4 より、計測機器毎の計測可能範囲(可視領域)および取得する点群データの精度と密度が異なることが分かる。筆者らの計測実績より、複数機器による点群データには次の特性がある。

- ・点群データには地表面、構造物、植生や移動体等のノイズが含まれる。
- ・点群データの精度は、個々の計測機器に係わる要因と計

測機器の設置位置等に係わる要因の影響を受ける。MMS, TLS とカメラ搭載 UAV のデータは点密度が高く、オブジェクトの形状を鮮明に捉えることができる一方、カメラ搭載 UAV のデータではエッジが曖昧になる。また、一方向からの計測では、対象物を限なく表現できる点群データを取得できない。

- ・ 構造物のデータが集中的に計測される。

計測機器の特性を表 1 に整理する。表では、計測時間、測距範囲、計測範囲（可視領域、不可視領域）、測距精度、点密度、測距点の分布、地面に対する計測角、エッジの計測、地表面の計測、構造物の計測、ノイズおよび取得可能な情報の観点で整理した。これらの特性に基づいて機器を適切に組み合わせて利用することにより、高精度な 3 次元データを構築することができる。

3.2 河川と橋梁の 3 次元データの構築

本節では、社会基盤施設の一つである河川と橋梁を複数の計測機器により計測し、その 3 次元データを構築する例を紹介する。河川においては、地表面のデータを取得する必要があるため、LP のグラウンドデータを用いる。一方、河川に架設される橋梁では、TLS とカメラ搭載 UAV による写真測量成果を用いる[9]。河川の 3 次元データを図 5 に、橋梁の 3 次元データを図 6 に示す。河川の 3 次元データでは、植生をノイズとして除去した。橋梁の 3 次元データでは、橋桁や下部工が 3 次元化され、上空からの航空レーザ測量のみでは作成不可能な、全方向からのデータを作成した。これらのデータを組み合わせることにより、計測対象箇所の 3 次元データを構築することができる。

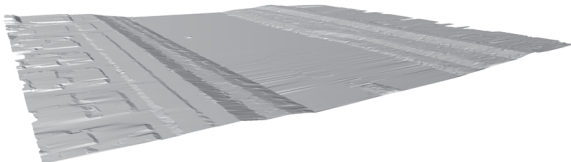


図 5 河川の地表面の 3 次元データ

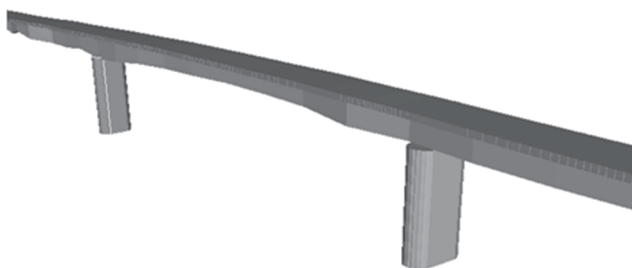


図 6 橋梁の 3 次元データ

4. 河川維持管理における 3 次元データの活用

4.1 3 次元データ活用の背景と目的

第 1 章で述べたように、社会基盤施設においては、その維持管理の高度化と効率化が喫緊の課題である。本章では、台風や豪雨災害時に重要な役割を担い、維持管理業務の多くが 2 次元地図を用いて実施される河川を対象として、3 次元データを用いた維持管理のための情報システムを提案する。

4.2 河川維持管理システム

河川維持管理システムにおいては、前章で述べた LP による河川の 3 次元データに加え、中小規模河川では LP データが存在しないため、カメラ搭載 UAV による写真測量成果の利用が考えられる。平常期においては、河川の管理担当者と点検者が、図 7 に示すシステム構成で利用する[11]。点検者は河川巡視点検の結果をシステムに登録し、参照することができる（図 8）。さらに、点検者が UAV 空中写真測量を行い、構築した 3 次元データに SfM ソフトウェアを用いて測地座標を付与し、UAV 計測を行った日時を記し、河川管理者がシステムに登録する。一級河川においては、河川カルテが整備されるため、河川カルテの情報と 3 次元データを関連付けて管理することが可能である。

災害時には、増水に伴う異常洗掘によって河川施設の形状が変形する。変状箇所の 3 次元データを KML 形式に変換し、Google Earth 上に可視化した結果を図 9 に示す[12]。ここでは、河川流域の施工現場を被災地と仮定し、施工途中の二時期の点群データから変状箇所の 3 次元データを生成した。

5. おわりに

本稿では、航空レーザ測量、モバイルマッピングシステム、地上設置型レーザスキャナおよびカメラ搭載 UAV による空中写真測量を用いて社会基盤施設を計測し、その 3 次元データを活用することを目的として、計測機器の特性の整理、3 次元データの構築および河川維持管理を対象とする情報システムの事例を紹介した。複数の計測機器の組み合わせにより、社会基盤施設を様々な角度から高精度に 3 次元データ化することが可能となり、実務に適用可能なデータを構築できることを示した。

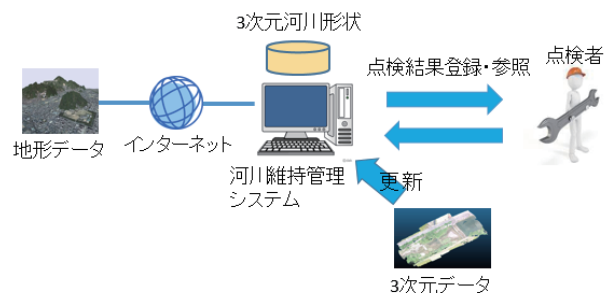


図 7 河川維持管理システムの構成



図 8 3次元データにおける情報管理

2015.

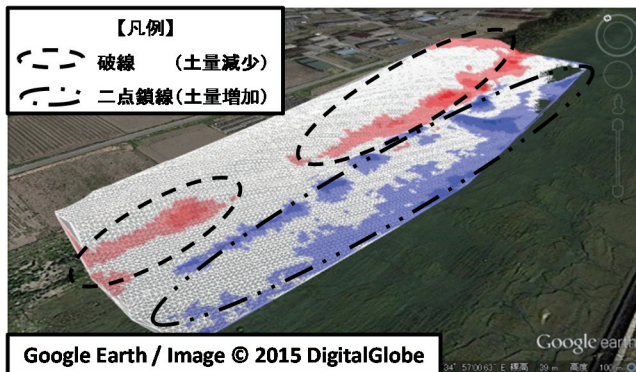


図 9 変状箇所の可視化例

謝辞 本研究の一部は、2015～2016 年度関西大学研究拠点形成支援経費において、研究課題「オープンスタンダードを核とするウェアネスサービスの創出拠点」として研究費を受け、その成果を公表するものである。

参考文献

- [1] 国土交通省:国土交通省 CALS/EC アクションプログラム 2005, 2006.
- [2] 国土交通省 CALS/EC 推進本部:国土交通省 CALS/EC アクションプログラム 2008, 2009.
- [3] 国土交通省情報化施工推進会議:情報化施工推進戦略, 2008.
- [4] 窪田論:道路事業を対象とした 3次元データの活用に関する検討, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 62, No. 1, pp. 43-48, 2012.
- [5] 佐藤直良: CIM ノススメ, JACIC 情報, Vol.27, No.2, p.1, 2012.
- [6] i-Construction 委員会: i-Construction～建設現場の生産性革命～, 国土交通省, 2016.
- [7] 渡辺豊: 2. 平成 26 年広島市豪雨災害での小型無人ヘリ被災地状況計測, 写真測量とリモートセンシング, 日本写真測量学会, Vol.54, No.2, pp.72-73, 2015.
- [8] 国土交通省東北地方整備局: UAV による河川調査・管理への活用の手引き (案), 2016.
- [9] 塚田義典, 田中成典, 窪田論, 中村健二, 岡中秀騎: 点群データを用いた橋梁の 3次元モデルの生成に関する研究, 知能と情報, 日本知能情報ファジィ学会, Vol.27, No.5, pp.796-812, 2015.
- [10] 国土交通省: 作業規程の準則, 2010.
- [11] 河合悠希, 窪田論: 3次元モデルを用いた河川管理施設の維持管理システムの提案, 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-IS-134, No. 4, pp. 1-6, 2015.
- [12] 田中成典, 窪田論, 今井龍一, 中村健二, 櫻井淳: 点群による 3次元データを用いた河川維持管理の可視化環境の提案, 土木情報学シンポジウム講演集, 土木学会, Vol. 40, pp. 91-94,