

橋梁におけるドローンと3Dデータ活用の最前線

BATTLE FRONT OF DRONE AND 3D DATA UTILIZATION IN THE BRIDGE

渡辺豊*

Yutaka WATANABE

ABSTRACT This paper presents the drone which carried LiDAR-SLAM system is effective for the bridge inspection in the non-GNSS environment. The image data and the point clouds which are acquired by that drone, are utilized as 3D data extensively in the engineering works field.

KEYWORDS: ドローン, LiDAR-SLAM, 非GNSS環境, 橋梁点検, 3Dデータ活用

Drone, LiDAR-SLAM, Non-GNSS environment, bridge inspection, 3D data utilization

1. まえがき

社会インフラとして維持すべき施設には、道路関係では橋梁・トンネル・道路附属物、河川関係では堤防・樋門・樋管・水門、砂防関係では砂防設備、この他にも海岸堤防、下水道管路、港湾設備、空港設備などがあり、長期間供用していくためには何れも効果的かつ効率的な維持管理が必要であると言われている。この中でも橋梁は、建設後50年を経過したものが飛躍的に増加する中で、維持管理の方針を事後保全から予防保全に転換しようとしている。国内にある橋梁は、5年に1回の近接目視による定期点検が平成26年に義務づけられ、一回りが終了した。この結果によると、約72万橋のうち10%程度の約7万橋に不具合が生じる可能性が高い状態にあり、これらに対してまず早期に措置する必要があるとの報告がある¹⁾。

このような点検は高所作業車や橋梁点検車を用いての作業となるため、ともすれば危険をとまなうことがあり、安全面への配慮と今後予想される労働力不足への対処のために、ロボットによる支援が求められてきた。当社はドローンを活用したロボット点検の実現に向けて、国土交通省の現場検証に参画し、また経済産業省のロボット開発事業に公募に採択され、機器・手法の改良に努めてきた²⁾。

本稿では、まずロボット支援による橋梁点検を実現するために、官民学がどのように取り組んできたかを述べ、現状ではどこまでロボットによる方法が採用されているかを説明する。次に、当社がドローンによる点検システムの開発を進める中で、鋼構造物およびコンクリート構造物の点検に具体的に適用した成果を紹介する。さらに、立地条件として非GNSS環境にある橋梁点検する場合、通常のドローンでは自動飛行が出来ず、操縦者の技能に依存するという課題に触れ、これを克服するために開発したLiDAR-SLAM機構を搭載したドローンの機能の特徴および得られる成果を説明する。土木分野を対象に、このドローン計測で得られる3Dデータの活用例として、橋梁点検と災害調査を紹介する。さらに、土木構造物の3D資産管理への適用を提案する。

* ルーチェサーチ(株) 代表取締役 (〒731-0152 広島市安佐南区毘沙門台四丁目16番21号)

2. ロボットによる橋梁点検の現状

国土交通省及び経済産業省では、社会インフラの維持管理及び災害対応に関して、安全面への配慮と今後予想される労働力不足に鑑み、効果・効率の一層の向上のため「点検ロボット」及び「災害調査ロボット」、「応急復旧ロボット」の技術開発・導入を推進すべく、平成25年に「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野」を策定した。当社は平成25年から小型無人ヘリを用いた構造物点検手法の開発に取組み、実存する橋梁で点検を試みるのみならず、公的機関での評価を受けるために、国土交通省が公募する橋梁点検の現場検証に参画してきた²⁾。図一1は平成28年度幸久橋（茨城県）、図一2は平成29年度湯里高架橋（島根県）で、いずれもコンクリート橋脚と桁の現場検証の状況を示す。



図一1 幸久橋現場検証



図一2 湯里高架橋現場検証

また、平成28年度からは、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト/インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」の助成事業に採択され、システムの改善を加えた^{3) 4)}。

こうしたロボット開発での各社・各機関の成果が認められ、平成31年道路橋定期点検要領の改定の際、新技術（ロボット活用）による効率的な点検が可能となった。点検の基本は近接目視ではあるものの、点検者自らが近接目視と同等の健全性診断を行うことができると判断した場合には、ロボットによる方法を用いてもよいことになった。また道路管理者がロボットによる点検支援技術を円滑に活用できるように、「新技術利用のガイドライン（案）」および「点検支援技術性能カタログ（案）」が公表された。この中で、橋梁等（画像計測技術）に関しては新技術として7技術が「性能カタログ」に掲載され、さらに令和2年に13技術が追加された⁵⁾。現在各ロボットの得意分野や特徴を生かして、道路橋点検の場で活躍の範囲を広げている。

3. ロボット点検の成果

3.1 鋼構造

鋼桁や鋼橋脚を対象と鋼構造物点検では、「橋梁定期点検要領」に規定されている、腐食、亀裂、ゆるみ・脱落、破断、防食機能の劣化が損傷の種類として重要な着目点で、これらの損傷の種類と損傷程度を評価し、損傷の位置を明確にする。当社がドローンを用いて鋼構造を点検した事例を写真で紹介する。図一3は、リベット接合の時代に建設されたトラス橋である。ドローンの撮影画像から、リベットの抜け落ち、土埃などの堆積、塗装膜の劣化状態などを判定するのに必要な情報が得られている。道路橋や鉄道橋のみならず、河川上で上水道・ガスなどのインフラ機能を繋ぐ配管橋もまた、ロボット点検の対象となりつつある（図一4）。こうした橋梁には点検通路や下部工検査路が設置しているものの、トラス部材の外側や上面を点検するには、追加足場や梯子が必要となり、ドローンの撮影画像が役にたつ。また、コンクリート橋脚表面に赤茶けた筋が散見されることから、鋼構造物部分の塗装の劣化も推定される。



図一3 トラス橋の添接部



図一4 配管橋の点検

さらに、橋梁以外にも建設後数十年が経過した鋼構造物での点検例がある。図一5に示す鋼製煙突は、上空でブロックに切断しながら、解体・撤去することになった。建設時の図面は2次元データであり、切断位置を計画するにあたり、3次元データの方が望ましいため、ドローンで画像データを取得、その後に3Dモデルを構築した。建設当時の図面が十分な形で保管されていない場合や、追加で取り付けられた設備が図面に反映されていないことも多く、現状の姿を客観的にとらえる媒体があると撤去計画に有効であると考えられる。



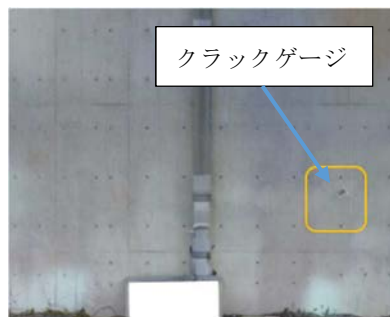
図一5 鋼製煙突の撮影

3.2 コンクリート構造

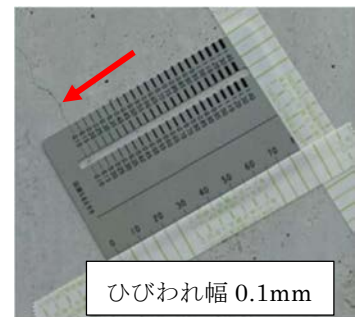
コンクリート橋やコンクリート橋脚のみならず、鋼橋のコンクリート床版で注目すべき損傷の種類は、同様に「橋梁定期点検要領」に規定されている、ひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰などで、点検により損傷の種類と損傷程度が評価され、これらの損傷位置が明確化される。図一6, 7は、ドローンが撮影したコンクリート脚の撮影単体画像の例である。橋脚基部にあるひびわれにクラックゲージを貼付（図一8参照）し、確認のためにドローンで撮影、この画像をCAD上でスケールアップすることでひびわれ幅を0.1mmまで識別した。



図一6 橋脚撮影画像（単独）



図一7 橋脚基部画像（単独）

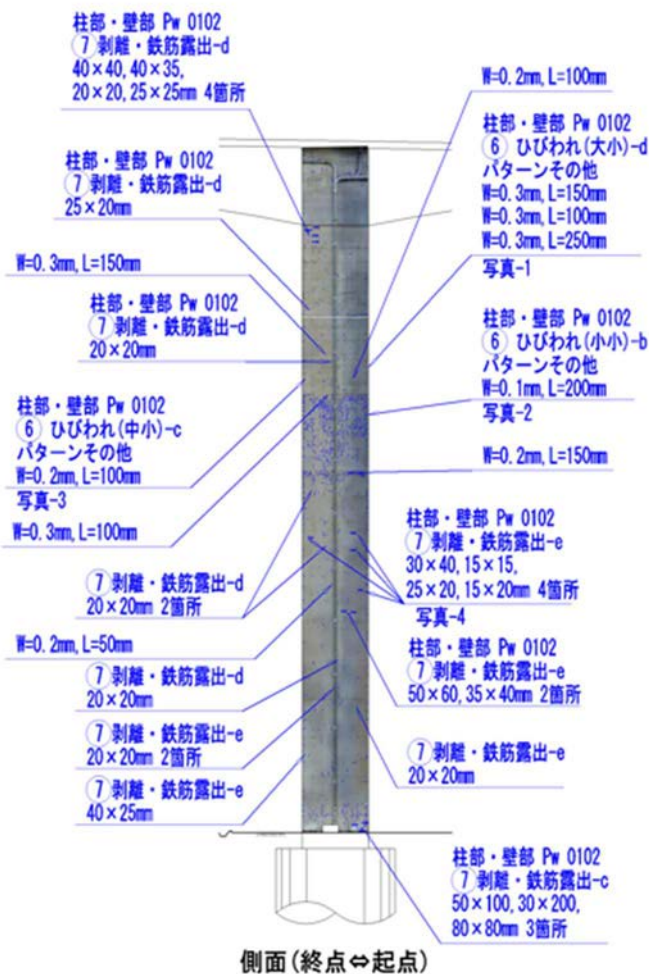


図一8 クラックゲージ

風速 10m/s 未満の条件下でドローンを飛行させ、搭載したデジタルカメラ（Sony α7R, レンズ 55mm）で撮影した。損傷の程度を写真から判定するが、それらの損傷位置を特定し、構造物全体の位置図にプロットすることも重要となる。高さ 40m の鋼橋脚では、撮影画像が脚 1 面だけでも 2000 枚となるため全体配置を示すオルソ合成画像を作成するために、SfM (Structure from motion) と呼ば

れる手法を取っている。この手法は、元々空中写真測量の分野で実績があるバンドル調整の手法を応用したもので、取得した大量の画像データから特徴点を抽出し、全体を繋ぎ合わせて合成画像を自動的に作成するものである。コンクリート橋脚平面では型枠の痕跡を示す線や損傷などが特徴点になるものの、色彩の差異と変化が少ないため、自動生成された画像を手修正後に最終的な合成画像としている。なお、SfMでのオルソ合成画像作成の過程で、解像度の低下が生じる場合があるため、個々の単独画像との照合、また過去の定期点検調書なども参照することが重要である。

この合成画像を CAD 上で設計図面と重ね合わせ、損傷場所と損傷サイズを正確に把握することができる。画像から計測・確認できる最小サイズは幅 0.1mm であり、コンクリートのひびわれも検出可能である⁶⁾。なお、現場検証でのひび割れ幅の検出結果は、前述の「性能カタログ」に記載がある⁵⁾。これら損傷抽出結果を図示した橋脚の損傷図(図—9)は、現場検証の際に共同開発に従事した(株)建設技術研究所が作成したものである。この中に、ひびわれの幅と長さ、ひびわれのパターン、剥離・鉄筋露出が損傷として抽出されている。この損傷判定結果は、定期点検の際に提出する調書(その5)としてまとめられる。



図—9 橋脚の損傷図

4. ドローンで橋梁点検する場合の課題

ロボットによる橋梁点検の新技术としてドローンが最も特徴を発揮する場面は、図—10 に示す高架橋の脚である。コンクリート脚の高さが 40m 以上あるため、近接目視点検を実施する際、橋脚基部からの高所作業車では届かない部分がある。また、高架橋の路面に橋梁点検車を配置しても、橋脚中間部で点検作業をカバーできない部分が生じる。高架部の走行車線数によっては、長時間車線占有することが不可能となり、こうした場合には作業が夜間に限定されることにもなる。このため、ロープアクセス工法(図—11)が用いられている。

構造物へのアクセスが容易であるという利点を活かせるが、ドローンでは別の課題もある。ドローンを飛行させる作業では、計画ルートに忠実な飛行、構造物との衝突回避、安全配慮などから自動(自律)飛行を基本としている。この場合、平面位置座標を定義する基本は、全地球測位システム GPS (Global Positioning System) などの衛星測位システム GNSS (Global Navigational Satellite System) の位置情報であり、高度位置座標は気圧センサによる気圧変化情報である。ところが、構造物そのものや隣接する山岳・建造物などに遮られるために GPS 衛星電波の個数が数個と少なく、自動飛行に設定できない場所が殆どである。

従って、こうした非 GNSS 環境では手動飛行となり、もっぱら操縦者の飛行操作技能に依存することになる。また、高品質・高画質の撮影画像を取得するためには、構造物とカメラとの距離や相対角度も担当者の操作技量に左右されることとなる。こうした背景から非 GNSS 環境でも自動飛行可能な機能を有するドローンを開発することにした。



図-10 高架橋の脚

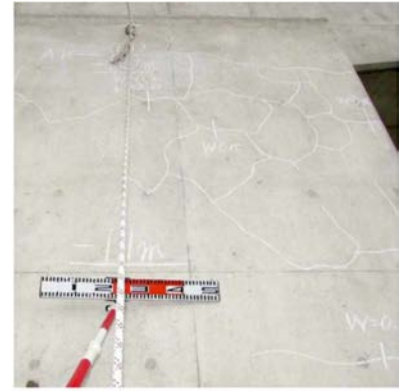


図-11 ロープアクセス工法

5. LiDAR-SLAM 機構を搭載したドローンの開発

5.1 機体とシステム

非 GNSS 環境でも自動飛行を実現させるため、様々な制御技術を比較検討した後、自己位置推定と環境地図作成を同時に行うことができる SLAM 機構を導入した⁷⁾。ここで採用した SLAM は、Visual SLAM ではなく LiDAR-SLAM(Light Detection and Ranging-Simultaneous Localization and Mapping) である。身の回りにある製品で、前者を代表するものの一つが、「ロボット掃除機」である。ロボットに内蔵するカメラで撮影した画像から、物体の点や角などを周囲と比べて特徴的な点として抽出し、カメラの移動前後の特徴点の動きを基に自己位置推定と地図作成を行っている⁸⁾。周囲がのっぺりとした環境であると特徴点が掴みにくい欠点もあるが、部屋の中であれば容易にこれらが抽出できる。また、暗すぎたり、極端に明るい場所では画像が黒潰れしたり、白飛びしていると抽出できないこともあるが、室内であればそこまでのことはなく、成果を上げている。

一方 LiDAR-SLAM ではレーザーセンサにより、周辺の物体の形状情報を得て、自己位置推定と地図作成を行う。また、前方だけでなく周囲の様子も同時に判断できる強みもある。さらに利点として、得られる点群間隔が狭いため高密度なデータが取得できるため、3次元形状が鮮明となり、判断がしやすくなる。周囲の明るさに影響されることなく、夜間や暗い室内でも計測ができる。また、高密度 3D 地図情報が生成される点も優れている。

当社は図-12 に示す 8 枚ロータのドローン SPIDER-ST の機体に、LiDAR-SLAM センサ(図-13)を搭載して、非 GNSS 環境での自動飛行を実現させた。各仕様を表-1 に示す。なお、この機体には対象用途に応じて、高解像度カメラやサーモカメラ、照明装置などの機器が搭載可能である。



図-12 SPIDER-ST 全景



図-13 LiDAR-SLAM センサ

LiDAR-SLAM 機構を備えた機体は、対象構造物周辺を飛行する際、同時に LiDAR から周辺の物体の形状情報を得て、自己位置を明確に把握するとともに地図を作成する。この結果、非 GNSS 環境下で 3

表一 機体と LiDAR-SLAM センサの仕様

【機体】 SPIDER-ST (ルーチェサーチ社)	総重量	11.2kg (レーザ, バッテリ含む)
	モータ軸間	80cmx80cm
	飛行可能時間	15分
	非 GNSS 環境下自動飛行機能	有り
【LiDAR-SLAM センサ】 Topaz (NEAR EARTH 社)	大きさ	17cmx12cmx14cm
	総重量	1.4kg
	レーザ本体	VLP-16 (Velodyne 社)
	計測距離	0.5~100m
	レーザスキャナ角	水平 : 360° , 垂直 : 30° (±15°)
	測定ポイント数	300,000 ポイント/秒
	測定精度	±3cm (1σ @25m)
	レーザクラス	Class 1 Eye Safe

次元空間が形成され、この中で飛行ルートを定義することができるため、以降は自動飛行が実現することになる。加えて、その飛行ルート上に障害物を検知すると、衝突を回避すべく自動的にルートを変更し、その後は当初計画したルートに戻り、自動飛行を継続する。このような機構により、操縦者の負担は大幅に減少することにつながる。

5.2 橋梁点検の実施事例

コンクリート桁やコンクリート脚に使用する場合、図一14 に示すように SPIDER-ST の機体上部に画像撮影用カメラを装着する。このカメラはジンバル装置を介して、水平 360 度、上下 180 度回転可能である。図一15 の高架橋は、道路線形が曲線となっているため、桁下空間は非 GNSS 環境であるだけでなく、上り線と下り線の各橋脚も変化するなど、ドローンの自動飛行には障害物感知・回避機能が必須となる。



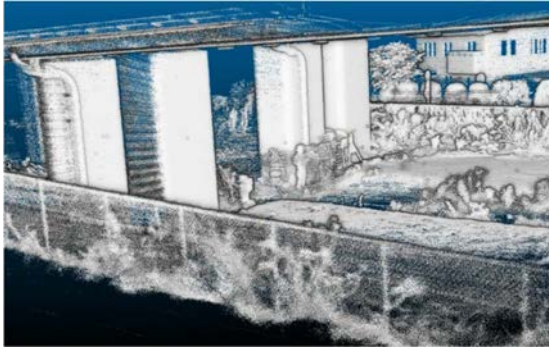
図一14 撮影用カメラ装着



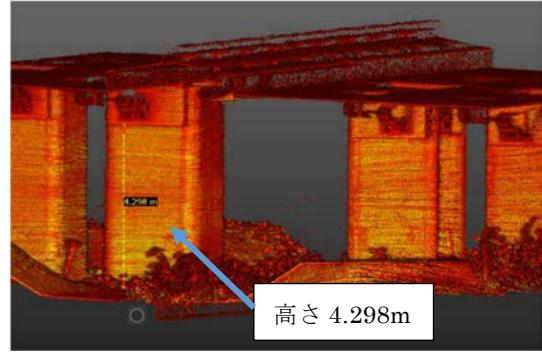
図一15 曲線橋の桁下飛行

画像撮影と同時に、飛行中にリアルタイムで機体下部の LiDAR-SLAM センサで点群を取得している。図一16 に示す点群から、橋脚・桁・桁下の地形・フェンス・隣接する建物などが形成されている。この点群データを解析ソフトで処理することで、3次元モデル(図一17)を作成するとともに、図中に示すように寸法(例えば、指定された2点間の高さ4.298m)を確認することもできる。

このような業務を通して、機体飛行中に統合解析(マッチング)が自動的に行われるため、無駄なデータが蓄積されず、また連続面から逸脱した点群をノイズと判断し自動的に消去することから、デ



図一16 取得した点群



図一17 3次元モデル

ータサイズを最小限に留めることができる。さらに、機体着陸後、現地で直ちに3次元データをチェックし、データの抜けや漏れ、欠損部がないことを確認するため、後日取り直しとなることが大幅に減少する。管理面では、3次元データ解析に必要なソフトウェアの維持、技術力の高い技術者の確保、社内での解析時間が不要となる点も含め、業務改善につながる。

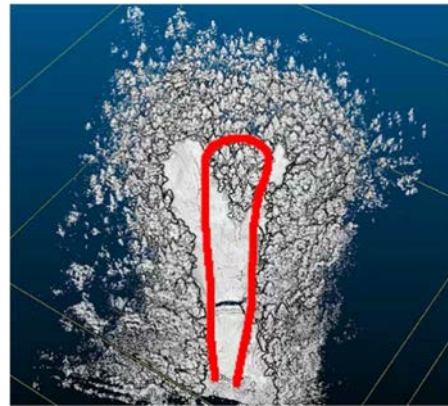
6. LiDAR-SLAM 機構を用いて取得したその他の成果

6.1 災害現場の調査

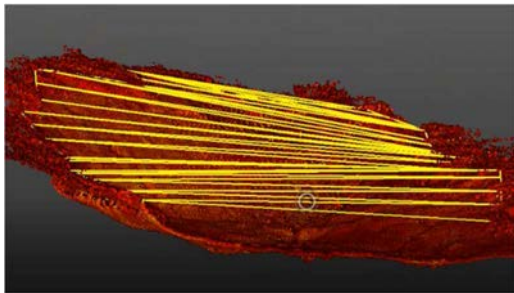
LiDAR-SLAM 機構を搭載したドローンを用い、橋梁点検以外の業務で、3次元データをリアルタイムに取得した。図一18は、2018年7月の西日本豪雨での崩落斜面をブルーシートで応急対策した現場で、ドローンのカメラで撮影したものである。飛行中に生成された3次元点群データを図一19に示す。崩落した斜面と周囲の樹木の差異が明確に示されている。赤色の線は飛行ルートで、この飛行で100mx70mの範囲の点群が取得されている。飛行中、手元のPCでリアルタイムにこれら点群をモニターすることができる。



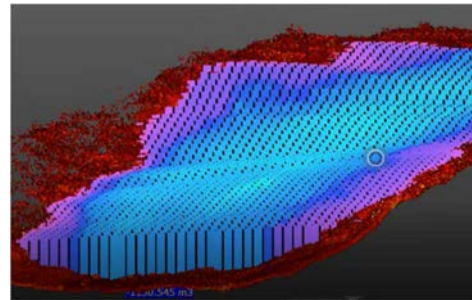
図一18 崩落斜面



図一19 取得点群と飛行ルート



図一20 災害前の標高と崩落面の位置関係



図一21 土砂量計算のためのメッシュ

取得した3次元点群データを利用すれば、崩落した土砂量を算出することができる。崩落斜面の災害前後の標高の位置関係は図-20のようになる。崩落後の地表面を赤色、崩落前の標高を黄色で示している。次に対象エリアをメッシュに切り(図-21)、崩落前後の差分から土砂量を算出することができた。

SPIDER-STシステムによる3次元点群データの精度検証のために、図-18の土砂崩落斜面で、地上基準点座標による測量(VRS)結果と比較した。座標値の比較結果を表-2に示すが、6測点のRMS誤差は、水平方向で1.9cm、鉛直方向で3.0cmとなった。

表-2 精度検証結果

(単位:m)

	VRS			レーザ計測測量			較差		
	X	y	Z	X	y	Z	X	y	Z
T1	63667.238	-174348.615	208.173	63667.219	-174348.641	208.111	-0.019	-0.026	-0.062
T2	63646.640	-174325.450	198.833	63646.673	-174325.431	198.833	0.033	0.019	0
T3	63632.778	-174341.792	198.736	63632.784	-174341.797	198.770	0.006	-0.005	0.034
K1	63679.662	-174348.637	210.889	63679.662	-174358.620	210.892	0	0.017	0.003
K2	63701.436	-174351.591	217.437	63701.444	-174351.564	217.462	0.008	0.027	0.025
K3	63674.730	-174344.703	209.122	63674.701	-174344.736	209.121	-0.029	-0.033	-0.001

6.2 ハンドヘルド方式とバックパック方式

このLiDAR-SLAM機構はドローンに搭載するだけでなく、手に携えて移動するハンドヘルド方式(図-22)や背中に背負うバックパック方式(図-23)でも同様な結果が得られる。従って、ドローン操縦者がいなくても、歩行できる環境が整っていれば可能となる。図-24は、後者の計測で得られた公園周辺の点群データを示す。



図-22 ハンドヘルド方式



図-23 バックパック方式

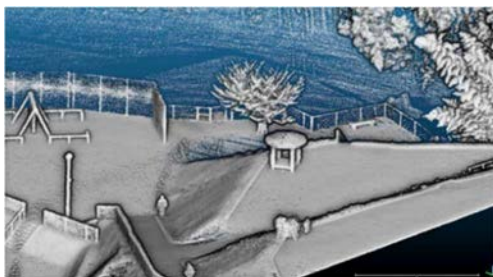


図-24 点群取得結果

7. 土木構造物の3D資産管理の提案

構造物を管理している組織では、適切な状態で構造物の図面が保存されていないことがある、各種図面があっても当初の構造物に付加された設備などが反映されておらず、統合的な情報が不明のため判断に時間を要する、3次元的に管理したいが知識が不十分で専門技術者も不在、3次元管理が良いことは理解するが手間と費用がかかる、現場の負担を考えると今の運用方法でも使えるようにしたい、PCセキュリティの関係でビューワを入れるだけでも大変、等々の悩みを耳にすることが多い。

各所に散在する資産情報を3次元で一元管理するための解決策として、図-25に示す資産管理概念を提案している。

- 1) LiDAR-SLAM センサを用いて、リアルタイム3次元計測を行うことで、手間なく即座に3次元データ(点群)を取得する。
- 2) 大量点群データを、高速でモデリングし、データ量を軽量化する。この結果取り扱いやすくなり、既存のPC機器でも画像を見ることができる。
- 3) 軽量の3次元データ上にて、各種の情報を連携して統合管理することができる。
- 4) 簡易3次元表示が可能となり、クラウド化といった手法で、誰でも即座に情報共有することができる。

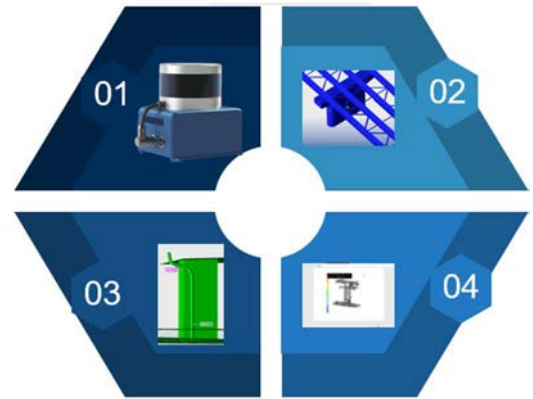


図-25 3Dモデルの資産管理概念図

橋脚を例に、具体的な説明を加える。LiDAR-SLAM センサにより、現場で点群を取得する。図-26はドローンでの取得を示すが、ハンドヘルド方式やバックパック方式でもよい。また、部分的に併用することも可能である。計測中にリアルタイムで点群が取得できるので、現場でその成果を認識し、目的に沿った出来栄であるかを確認する。取得した点群を図-27に示す。



図 26—3次元計測



図 27—取得した3次元点群データ

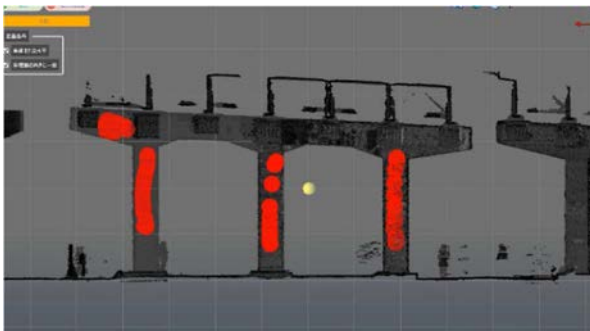


図 28—高速モデル化



図 29—橋脚モデル

解析ソフトを用い、構造物の形状をさらに明確にするために図—28 に示す高速モデル化を行い橋脚モデル（図—29）が作成されると同時に、データの軽量化が図られる。この結果、取扱いも容易になることから、図—30 に示すように橋脚本体以外の諸情報を加味することで情報の統合化が図れる。

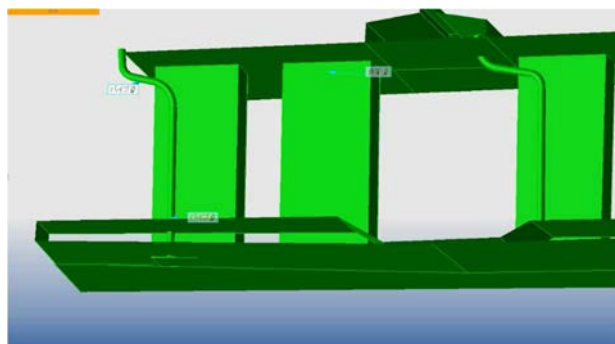


図 30—簡易 3 次元表示

今後 AI を活用する際にも便利となることから、結びつきが拡大していく。土木構造物の管理を 2D から 3D に進めるにあたり LiDAR-SLAM センサによる構造物の点群取得⇒3D モデル構築⇒管理

・判断に活用⇒管理情報として保管等、貢献できる分野・空間・範囲がまだまだ残されている。

8. おわりに

本稿では橋梁点検や災害調査への適用を中心に述べてきたが、ここ数年の間に、ドローンは飛躍的に技術が進歩し、様々な分野で社会に貢献できる段階に到達してきた。同時に、航空法も追加整備され、国土交通省航空局への飛行申請・飛行許可手続きが明確となった。操縦者育成のドローンスクールも開校され、万が一に備えた保険制度も定着するなど、社会の中でドローンの活躍の場が定まってきている。さらには今後の動きとして、5G、クラウド、AI などの時代が同時進行しており、例えばドローンとの間の通信や画像データ伝送面で飛躍と進展が見込め、安全な目視外飛行もさらに現実的になる。

当社はこれまで同様に、特徴あるドローンの更なる技術開発・計測技術の確立・システムの販売・レンタルへの進んでいくことにしている。

参考文献

- 1) 吉武竜馬：持続的・効率的なインフラメンテナンスの実現に向けて 予防保全の早期実現，土木施工，VOL. 61，No. 7，pp. 20-23，2020
- 2) 渡邊豊，福田信行，名取悦朗，小倉司：小型無人ヘリを用いた構造物点検技術開発，第 36 回日本ロボット学会学術講演会，3F2-03，2018
- 3) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発，2016，
<http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP-10081.html>
- 4) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発，インフラ維持管理用ロボット技術，2018，
http://www.nedo.go.jp/library/pamphlets/RB_201803_project.html
- 5) 国土交通省，点検支援技術性能カタログ（案），2020，
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/>
- 6) 石田辰英，小倉司，伊藤豊，金子拓史，中上宗之，山脇正嗣：ロボット・AI を活用したインフラ維持管理の高度化 橋梁点検・堤防点検への展開，土木施工，VOL. 61，No. 7，pp. 73-76，2020
- 7) 渡邊豊：3次元地理空間情報による自動飛行システム，建設マネジメント技術，5月号，pp34-38，2020
- 8) 齊藤弘幸，天野克重：SLAM 技術を搭載したロボット掃除機，Panasonic Technical Journal，VOL. 64，No. 2，pp. 34-36，2018