

(17) 構造物の三次元データ計測に用いる 可搬型レーザスキャナの調査研究

窪田 諭¹・塚田 義典²・田中 成典³・梅原 喜政⁴・
中原 匡哉⁵・飯田 拓馬⁶

¹正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

E-mail: skubota@kansai-u.ac.jp

²正会員 摂南大学講師 経営学部 (〒572-0074 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

E-mail: yoshinori.tsukada@kjo.setsunan.ac.jp

³正会員 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)

E-mail: tanaka@res.kutc.kansai-u.ac.jp

⁴正会員 関西大学特別任命助教 先端科学技術推進機構 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

E-mail: y.umeha@kansai-u.ac.jp

⁵学生会員 関西大学大学院 総合情報学研究科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1) /

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

E-mail: k732803@kansai-u.ac.jp

⁶非会員 関西大学 総合情報学部 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)

E-mail: k050510@kansai-u.ac.jp

我が国では、社会全体でインフラメンテナンスに取り組む機運を高め、産学官民が有する技術や知恵を総動員するためのプラットフォームとして、インフラメンテナンス国民会議が発足された。この会議は、革新的技術の発掘と社会実装を目的の一つに掲げており、ロボットやセンサー、AI等を用いた研究を推進している。これらの研究では、LiDAR、GNSS、IMU等のセンサ機器を用いて、構造物の三次元データを計測する作業が欠かせない。従来より、道路空間においてはMMSが利用されてきたが、MMSは、衛星測位が困難な場所や車両が進入できない場所の計測に適さない。そのため、近年は、橋梁下部や山間部、屋内でも利用可能な可搬型レーザスキャナの製品開発が盛んである。しかし、その製品形態は多様であり、搭載するセンサ機器の設置角度、解析方法、精度、価格等も異なる。そこで、本研究では、独自の可搬型レーザスキャナの開発に向けて既存製品を調査し、それぞれに適した利用場面や運用上の留意点を整理する。

Key Words : *infrastructure maintenance, three-dimensional data, mobile laser scanner*

1. はじめに

我が国では、社会全体でインフラメンテナンスに取り組む機運を高め、未来世代によりよいインフラを引き継ぐべく、産学官民が有する技術や知恵を総動員するためのプラットフォームとして、インフラメンテナンス国民会議が発足された¹⁾。この会議は、革新的技術の発掘と社会実装を目的の一つに掲げており、ロボットやセンサー、AI等を用いた構造物の点検の高度化や、調書作成過程の効率化を目指す研究を推進している²⁾。これらの研究では、LiDAR (Light Detection and Ranging) やカメラ、GNSS (Global Navigation Satellite System) , IMU (Inertial Measurement Unit) 等のセンサ機器を用いて、構造物の三

次元データや画像データを計測する作業が欠かせない。

従来より、道路空間においては、MMS (Mobile Mapping System) を用いて、路面のひび割れや轍ぼれ調査、道路標示や道路附属物の点検、道路台帳付図の整備等が行われてきた^{3,4)}。MMSでは、GNSSデータ、IMUデータ、オドメトリデータから車両の位置と姿勢を算出し、LiDARデータを補正することにより、グローバル座標系を基準とした広域の三次元データを生成する。しかし、MMSは、衛星測位が困難な場所や車両が進入できない場所の計測には適さない。

そこで、近年は、橋梁下部や山間部、屋内でも利用可能な可搬型レーザスキャナ^{5,11)}の製品開発が盛んである。これらの製品の多くは、LiDARやカメラ、IMUを搭載し

ており、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) や SFM (Structure from Motion) 等の技術を用いて、自己位置を推定すると共に、三次元データを生成する。しかし、可搬型の形態は多様であり、バックパック型やハンディ型、手押しカート型が存在するだけでなく、搭載するセンサ機器の設置角度や解析方法、精度、価格等が異なる。そのため、可搬型の機器によって運用方法と高精度に計測可能な適用場面が異なり、未だ実環境で広く活用されているとは言い難い。

そこで、本研究では、独自の可搬型レーザスキャナの開発に向けて既存製品を調査し、それぞれに適した利用場面や運用上の留意点を整理する。そして、上記の課題を解決する新しい可搬型レーザスキャナに要求される製品仕様について考察する。

2. 既存の計測機器の調査

(1) 調査方針

本調査では、市場に流通している可搬型レーザスキャナ、及び、それらに搭載されているLiDAR、IMU、GNSSの仕様を収集し整理する。調査対象とする機器は、検索エンジン¹²⁾の検索結果上位100件以内で、かつ、可搬な機器とする。調査キーワードは、「可搬型レーザスキャナ」と「LiDAR」、「GNSS」、「IMU」のそれぞれとする。なお、本章における価格に関する記述は、本稿執筆時点の調査結果であり、価格改定やオプション構成次第で変動するため、あくまで参考情報として留意されたい。

(2) 既存のセンサ機器の調査結果

a) LiDAR

本調査の結果、LiDARとして、RIEGL社のVUX-1HAやHesai Photonics Technology社のPandar40、Pandar40PとPandar64、Velodyne社のVLP-16、VLP-16-LITE、VLP-16-HiRes、VLP-32CとVLS-128、OUSTER社のOS-1 16、OS-1 64、OS-1 128とOS-2 64を収集した。これらの中から代表機種を調査した結果を表-1に示す。

VUX-1HAは、他社よりも非常に高価であるが、100万点の点群データをmm精度で計測できる特徴がある。VLP-16は、Google社が導入したことで注目され、既に様々な企業で導入実績がある。Pandar40は、Velodyne社と比較して、垂直方向の計測範囲が狭いため、非常に高密度な点群データを計測できる特徴がある。OS-1 16は、Velodyne社のLiDARを参考に開発されているため、各仕様値が比較的向上している特徴がある。価格は、降順でVUX-1HA、Pandar40、VLP-16、OS-1 16となる。

b) IMU

本調査の結果、IMUとして、東京航空計器社のCSM-MG100、CSM-MG200、LORD MicroStrain社の3DM-GX5-45、SILICON SENSING社のAMU-lite 3002B Liteを収集した。これらの中から代表機種を調査した結果を表-2に示す。

CSM-MG100はRollとPitchの精度が0.20度、3DM-GX5-45は0.25度、AMU-lite 3002B Liteは2.00度であった。価格は、精度の高い製品ほど高価であり、降順でCSM-MG100、3DM-GX5-45、AMU-lite 3002B Liteとなる。

c) GNSS

本調査の結果、GNSSとして、日立造船社のNetSurv RE、SOKKIA社のGCX3、Septentrio社のAsteRX m2a UAS、マゼランシステムズジャパン社のMJ-3008-GM4-QZS、u-blox社のZED-F9Pを収集した。これらの調査結果を表-3に示す。

表-1 LiDARの調査結果

社名	機器名	計測周期 (Hz)	計測点数 (秒)	最大測定可能距離 (m)	計測範囲 水平/垂直 (度)	計測精度 (cm)	測線数	分解能 水平/垂直 (度)
RIEGL	VUX-1HA	-	1,000,000	420	360.0/-	0.3	-	0.001/0.001
Hesai Photonics Technology	Pandar40	10/20	720,000	200	360.0/23.0	2.0	40	0.200/0.330
Velodyne	VLP-16	5~20	300,000	100	360.0/30.0	3.0	16	0.100/2.000
OUSTER	OS-1 16	10~20	327,680	150	360.0/33.2	3.0	16	0.180/0.520

表-2 IMUの調査結果

社名	機器名	計測周期(Hz)	検出可能範囲 Roll(度)	検出可能範囲 Pitch(度)	計測精度 Roll(度)	計測精度 Pitch(度)
東京航空計器	CSM-MG100	400	-180~180	-90~90	±0.20	±0.20
LOAD MicroStrain	3DM-GX5-45	500	-75~75	-150~150	±0.25	±0.25
SILICON SENSING	AMU-lite 3002B Lite	1~50	-180~180	-85~85	±2.00	±2.00

表-3 GNSSの調査結果

社名	機器名	計測周期(Hz)	受信可能衛星	計測方式と測位精度(mm)
日立造船	NetSurv RE	-	GPS, GLONASS, QZSS, Galileo, MSAS	スタティック測位 水平: ±3, 垂直: ±5 RTK測位 水平: ±8, 垂直: ±15
SOKKIA	GCX3	10	GPS, GLONASS, Beidou, QZSS, Galileo, SBAS	スタティック測位 水平: ±3, 垂直: ±5 RTK測位 水平: ±10, 垂直: ±15
Septentrio	AsteRX m2a UAS	100	GPS, GLONASS, Beidou, QZSS, Galileo, SBAS	RTK測位 水平: ±6, 垂直: ±10
マゼランシステムズジャパン	MJ-3008-GM4-QZS	100	GPS, GLONASS, Beidou, QZSS, Galileo	RTK測位 水平: ±50, 垂直: ±50 PPP 水平: ±100以下, 垂直: ±100以下 PPP-RTK: 水平: ±69, 垂直: ±69
u-blox	ZED-F9P	20	GPS, GLONASS, Beidou, QZSS, Galileo	RTK測位 水平: ±10, 垂直: ±10

表-4 可搬型レーザスキャナの調査結果

社名	機器名	LiDAR搭載	IMU搭載	GNSS搭載	カメラ搭載	計測形態	計測範囲(m)	計測精度(cm)	カラー点群
Leica	Pegasus: Backpack	○ Velodyne社 VLP-16 2機	○	○	○	バックパック	~100	5.0	○
GEXCEL	HERON AC-2	○ Velodyne社 VLP-16 1機	○	×	○	バックパック	~100	5.0	○
Kaarta	Stencil2	○ Velodyne社 VLP-16 1機	○	×	○ (白黒)	ハンディ	~100	3.0	×
PARAC OSM	PX-80	○ 3D-LiDAR 1機	○	×	○	ハンディ	~100	3.0	○
Geo-SLAM	ZEB-HORIZON	○ 3D-LiDAR 1機	○	×	○	ハンディ	~100	3.0	○
NavVis	NavVis M6	○ Velodyne社 VLP-16 1機 2D-LiDAR 3機	×	×	○	手押しカート	~30	3.0	○
Applanix	TIMMS	○ FARO社 X-130 1機	○	×	○	手押しカート	~130	0.2	○

す。

MJ-3008-GM4-QZSは、基準局の設置が不要なPPP-RTKに対応している。精度は、69mm程度である。GCX3やAsteRX m2a UASは、基準局補正用の衛星であるSBASを利用し、約1cm以下と非常に高精度な計測を実現している。価格は、降順でNetSurv RE, GCX3, AsteRX m2a UAS, MJ-3008-GM4-QZS, ZED-F9Pとなる。

(3) 既存の可搬型レーザスキャナの調査結果

本調査の結果、可搬型レーザスキャナとして、Leica社のPegasus:Backpack⁹⁾、GEXCEL社のHERON AC-2⁹⁾、Kaarta社のStencil2⁷⁾、PARACOSM社のPX-80⁸⁾、Geo-SLAM社のZEB-HORIZON⁹⁾、NavVis社のNavVis M6¹⁰⁾、Applanix社のTIMMS¹¹⁾を収集した。これらの調査結果を表-4に示す。

Applanix社のTIMMSはFARO社のX-130を搭載しており、

その他の製品はすべて3D-LiDARを搭載している。3D-LiDARには、Velodyne社のVLP-16を採用しているものが多く、仕様が非公開のLiDARを採用しているものも見られた。NavVis社のNavVis M6は、3D-LiDARに加えて、2D-LiDARを3機搭載している。Leica社のPegasus:Backpackは、唯一GNSSを搭載し、水平向きと鉛直向きに2つの3D-LiDARを設置しているため、空間を隈なく計測できる点と、グローバル座標系の点群データを生成可能な点で優れている。ただし、価格が約3,000万円程度と極めて高い。GNSS非搭載の製品は、SLAMによる自己位置推定処理を基に3次元データを生成していると考えられる。そのため、時間経過に伴う累積誤差を補正するために、計測開始地点と計測終了地点を一致させる等の工夫が必要となる。

表-5 整理結果

社名	機器名	屋内		屋外		
		広大領域	狭小領域	道路	河川	橋梁
Leica	Pegasus Backpack	○	○	○	○	○
GEXCEL	HERON AC-2	△	×	△	△	×
Kaarta	Stencil2	○	×	△	△	×
PARACOSM	PX-80	○	×	△	△	×
GeoSLAM	ZEB-HORIZON	○	×	△	△	×
NavVis	NavVis M6	○	△	△	△	○
Applanix	TIMMS	○	△	△	△	○

【凡例】

- ：適している，△：条件付きで適している，
×：適していない

3. 可搬型レーザスキャナの要求検討

本研究では、既存の計測機器の調査結果に基づいて、各可搬型レーザスキャナ⁵⁾¹¹⁾に適した利用場面や運用上の留意点を整理する。利用場面は、屋内における広大領域、狭小領域と屋外における道路、河川と橋梁とする。整理結果を表-5に示す。

室内に着目すると、GEXCEL社のレーザスキャナでは、バックパックに対してLiDARが水平に取り付けられている。そのため、LiDARを垂直に向けることができず、室内において、天井を計測することが困難である。ハンディ型のレーザスキャナは、水平に保持して使用し、垂直に傾けることを想定していないと考えられるため、天井の計測が困難な可能性が高い。一方、Leica社製レーザスキャナや手押しカート型のレーザスキャナは、垂直方向のレーザが搭載されているため、天井を含めた詳細な空間計測が可能である。しかし、手押しカート型については、狭小領域においては、その取り回しに課題があると考えられる。

屋外に着目すると、Leica社のレーザスキャナにはGNSSが搭載されており、計測範囲の広い道路や橋梁周辺において、正確に計測できる。しかし、それ以外のレーザスキャナは、SLAMを基本とするため、広域を対象とする場合にLoop Closing処理が必要となり、計測作業に制約が生じると考えられる。橋梁においては、屋内と同様の理由で、GEXCEL社とハンディ型のレーザスキャナは橋梁下部の計測が困難と考えられる。これらのことから、Leica社のレーザスキャナが様々な用途に適用できることがわかった。ただし、本製品は非常に高額であるため、維持管理現場への導入には敷居が高い。

以上のことから、可搬型レーザスキャナの独自開発にあたって要求される製品仕様には、GNSSとSLAMにより屋内外で計測できること、LiDARを水平方向のみならず垂直方向でも照射すること、そして、安価であることが欠かせない。

4. おわりに

本研究では、可搬型レーザスキャナの利用場面や運用上の留意点を整理し、独自開発するための要求仕様について考察した。今後は、要求仕様を満たす機器の研究開発を目指す予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省：インフラメンテナンス国民会議，<<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/im/index.html>>，（入手 2

- 019.6.17）．
2) 国土交通省：地方自治体の取組支援とインフラメンテナンス国民会議，<https://www.jst.go.jp/sip/event/k07/pdf/event20190124_2-3.pdf>，（入手 2019.6.17）．
3) 森石一志，富樫健司，中村博康，渡邊一弘：三次元点群データを用いた路面の面的評価および構造的健全性との関係性の検討，土木学会論文集 E1（舗装工学），土木学会，Vol.71，No.3，pp.I_127-I_133，2015．
4) 大伴真吾，鈴木清，土橋浩，永田佳文，菅野晶夫，安中智，平岡卓爾，乾義文：道路・構造物維持管理支援システムにおけるポイントクラウドの高度利活用について，写真測量とリモートセンシング，日本写真測量学会，Vol.55，No.1，pp.7-31，2016．
5) Leica：Pegasus Backpack，<<https://leica-geosystems.com/ja-jp/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus-backpack>>，（入手 2019.6.17）．
6) GEXCEL：HERON，<<https://gexcel.it/en/solutions/heron-mobile-mapping>>，（入手 2019.6.17）．
7) Kaarta：Stencil2，<<https://www.kaarta.com/products/stencil-2/>>，（入手 2019.6.17）．
8) PRASOCM：PX80，<<http://labs.paracosm.io/px-80-overview>>，（入手 2019.6.17）．
9) GeoSLAM：ZEB-HORIZON，<<https://geoslam.com/>>，（入手 2019.6.17）．
10) NavVis：NavVis M6，<<https://www.navvis.com/m6>>，（入手 2019.6.17）．
11) Applanix：TIMMS，<<https://www.applanix.com/products/timms-indoor-mapping.htm>>，（入手 2019.6.17）．
12) Google：Google，<<https://www.google.com>>，（入手 2019.6.17）．