

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1) 課題名：河川土工の施工管理のためのレーザスキャナ搭載 UAV を用いた計測データの利活用技術に関する研究開発
- (2) 研究期間：平成 28～29 年度
- (3) 交付申請者名：田中 成典（関西大学・教授）
- (4) 研究代表者名：田中 成典（関西大学・教授）
- (5) 共同研究者名：窪田 諭（関西大学・准教授）
今井 龍一（東京都市大学・准教授）
中村 健二（大阪経済大学・准教授）
山本 雄平（関西大学・特別任命助教）
塚田 義典（岩手県立大学・講師）
谷口 寿俊（青山学院大学・助手）
織田 和夫（アジア航測株式会社・総合研究所所長）
深田 雅之（株式会社ゼンリン・係長）
山本 耕平（株式会社パスコ・主任技師）
佐藤 隆一（株式会社フォーラムエイト）
平 謙二（三菱電機エンジニアリング株式会社・副事業所長）
藤原 利弘（株式会社関西総合情報研究所・代表取締役）
- (6) 補助金交付総額：24,562,000 円

(7) 技術研究開発の目的

本研究では、市販の小型レーザスキャナ、GNSS（Global Navigation Satellite System）、IMU（Inertial Measurement Unit）やデジタルカメラ等のセンサ機器を組み合わせ、UAV（Unmanned Aerial Vehicle）に搭載可能な大きさや重さの計測ユニットのプロトタイプを製作する。そして、機器間の計測データの連携技術や同期処理、補正技術及び日照が乏しい時間帯やリアルタイムでの計測を支援する技術を研究開発する。本計測ユニットでは、レーザスキャナを用いた公共測量作業規程の基準である 5.0cm 以内の精度を目指し、300 万円程度で実現することを目標とする。

この計測ユニットを用いた高所からの計測実験や、日照が乏しい早朝、夕方及び夜間での計測実験を通じ、開発機器の有用性の評価と空間データの利活用技術について検討する。検討結果は、計測ユニットと点群データ解析・処理ソフトウェアの機能及び性能要件としてとりまとめ、「i-Construction」の 15 の基準に反映することを目指す。

本研究の発展として、開発した計測ユニットを搭載した UAV を用いて河川土工（1 万平米）を半時間で計測し、かつ 6 時間程度で解析・検査する技術の開発を通じて、低コストの上、短時間で高精度な空間計測を実現し、建設分野への導入を促進することを目指す。

(8) 技術研究開発の内容と成果

本研究の全体概要と本研究開発プロジェクトの個別の研究開発の概要を図 1 に示す。

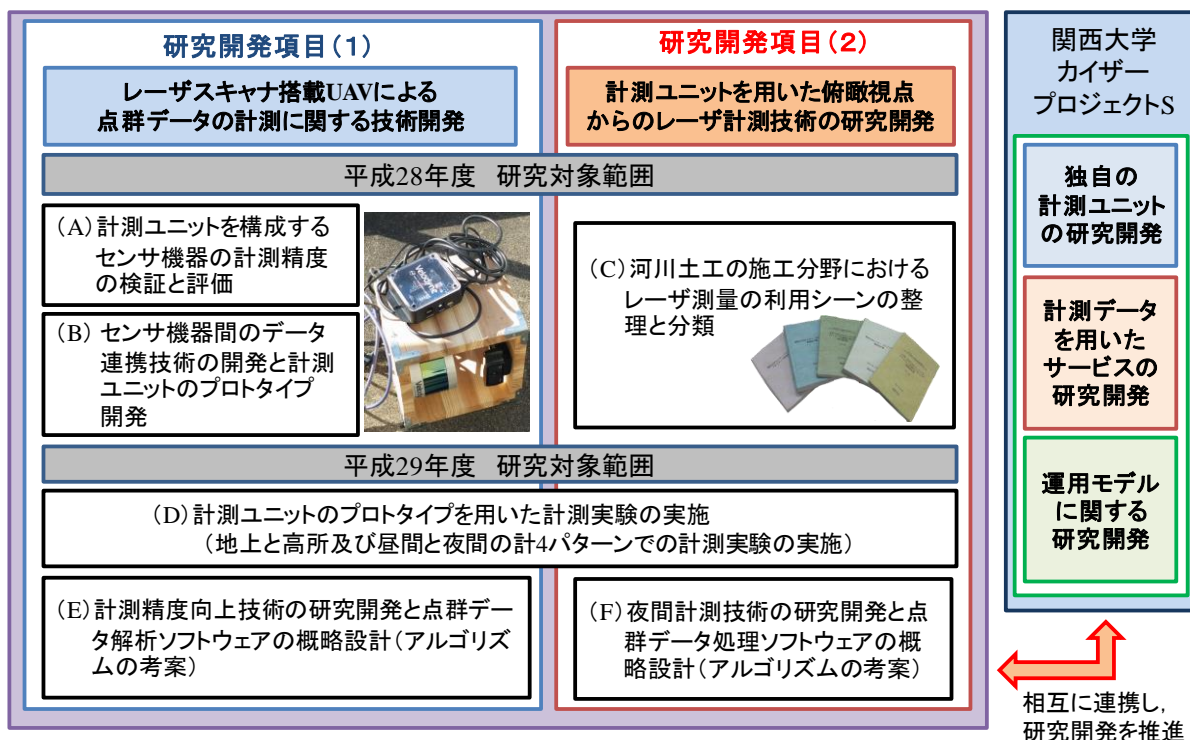


図 1 研究開発の概要

図 1 に示すとおり、本研究プロジェクトの具体的な研究開発目標は、以下の 2 項目である。

1) レーザスキャナ搭載 UAV による点群データの計測に関する技術開発

市販のセンサ機器を組み合わせ、UAV に搭載可能なサイズと重量の計測ユニットのプロトタイプを開発する。そして、様々な実験を通じて計測データを収集し、計測ユニットを構成するセンサ機器間のデータ連携技術やその補正技術について検討する。その上で、計測ユニットにより高精度な点群データを計測するための課題の抽出と必要な技術を検討する。最終的には、レーザスキャナを用いた公共測量作業規程の基準である 5.0cm 以内の計測精度を担保する技術の研究開発を目標とする。これらの検討成果は、計測ユニットの機能要件の定義及び点群データの解析ソフトウェアの概略設計書として整理する。

2) 計測ユニットを用いた俯瞰視点からのレーザ計測技術の研究開発

計測の結果得られた点群データを用いて、建設現場の生産性向上を実現する技術の研究開発する。まず、本研究で開発した計測ユニットの河川土工における適用対象分野について調査する。その上で、写真測量では実現が困難で、かつ今後のニーズが高まるであろう夜間における測量技術について、計測ユニットを用いた実験を通じて研究開発する。実験では、日没後の夜間に、高層建築物の屋外階段等を使って、UAV と同じ高所からの計測環境を再現し、地上の計測精度を評価する。これらの調査と実験を通じて、市販の機器を組み合わせて開発する計測ユニットによる俯瞰視点からのレーザ計測技術の適用可能範囲の特定と夜間測量技術に関する研究開発を行うことを目標とする。

以上の 2 つの研究開発項目から得られた研究成果と、関西大学カイザー・プロジェクト S の成果を連携することにより、市場変化に追従した研究開発を推進する体制を構築している。

【平成 28 年度の研究成果】

本研究プロジェクトを実施するにあたり、平成 28 年度は、3 回の産学官テーマ推進委員会を含め計 9 回の打ち合わせを通じて、研究開発を実施した。

1) レーザスキャナ搭載 UAV による点群データの計測に関する技術開発

平成 28 年度は、レーザスキャナ、デジタルカメラ、IMU と GNSS アンテナを組み合わせた計測ユニットの開発を想定し、研究開発を実施した。本研究プロジェクトで開発する計測ユニットの UAV への搭載イメージを図 2 に示す。

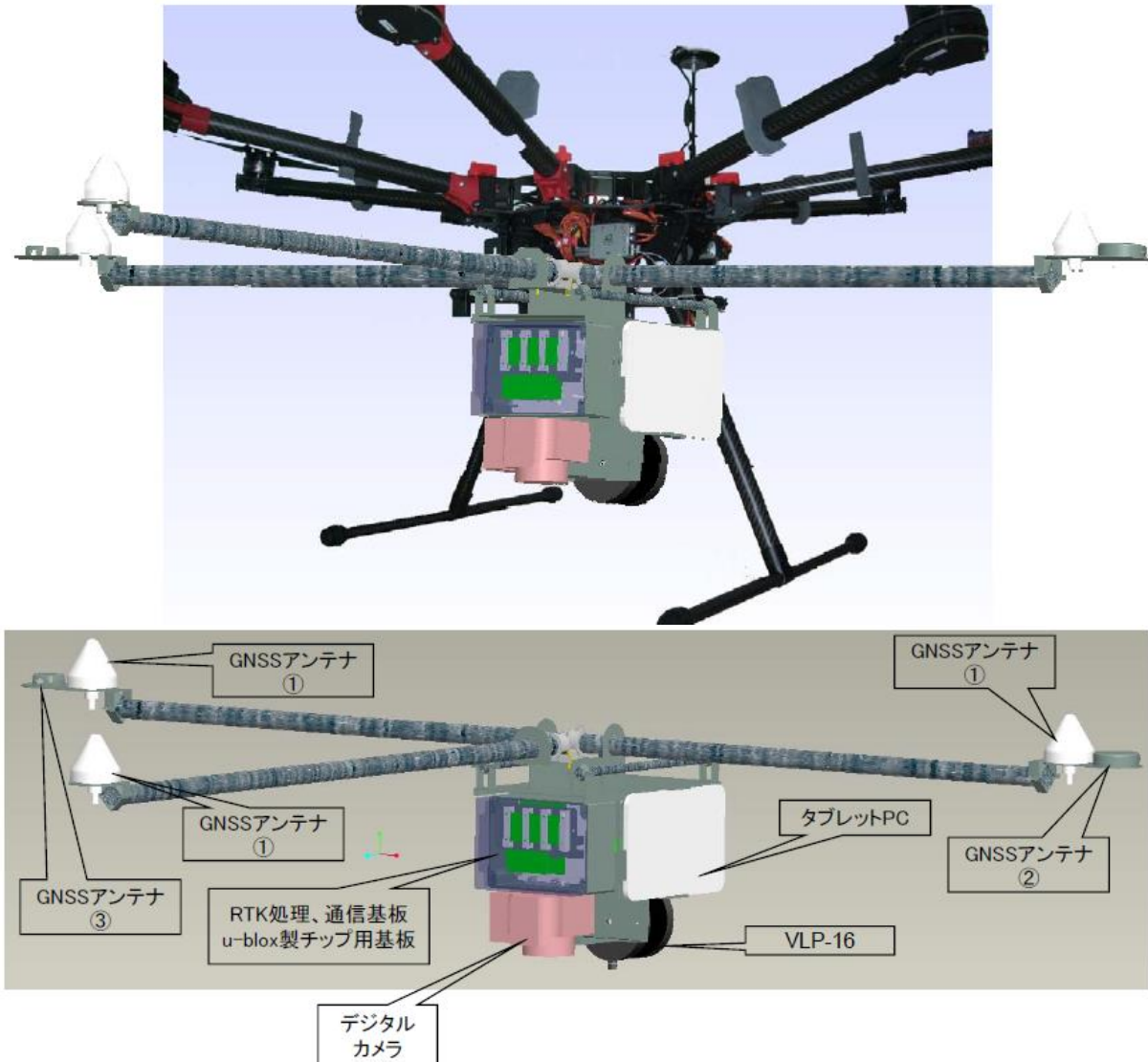


図 2 計測ユニットの UAV への搭載イメージ

図 2 に示すとおり、本研究プロジェクトにて開発する計測ユニットは、UAV の本体下部、本体上部と翼端の 3 カ所にアタッチメントとして搭載する機器で構成される。本体下部には、地上の計測に用いるレーザスキャナとデジタルカメラ及びそれらの向きを計測する IMU とを組み合わせた計測ユニット本体を搭載する。本体上部に搭載する GNSS アンテナは、UAV の計測位置を取得すると同時に、GPS (Global Positioning System) 時刻を取得するために用いる。翼端には、GNSS アンテナを 3 基、正三角形もしくは二等辺三角形を構成するよう搭載し、姿勢 (ヨー角) を高精度に取得する GPS ジャイロとして活用する。平成 28 年度の開発で使用した計測ユニットの構成機器を表 1 に示す。

表 1 計測ユニットの構成機器

種類	レーザスキャナ	デジタルカメラ	IMU	GNSS
製品名	VLP-16	α6000	AMU-LITE	Ublox M8P with SOI
製造会社	Velodyne 社	Sony 社	シリコンセンシング社	i システムリサーチ社
ファイル形式	pcap (バイナリデータ, NMEA 込)	jpg, png, mp4 (Ublox 社製 LEA-M8T にて GPS 時刻を付与)	csv (付属ソフトから出力)	dat (RTK 処理済位置情報, NMEA フォーマット: GNGGA)
データ取得間隔	10Hz (360 度) 約 29 万 Hz (1 点)	写真モード: 秒間 11 連写 動画モード: 30fps	50Hz	5Hz
個数	1 基	1 基	1 基	3 基

表 1 のセンサ機器を対象に、機器特性や計測精度を検証するための事前実験を行い、建設分野で利用できる精度を有していることを確認した。しかし、各センサ機器の計測間隔は一律ではないため、計測データを同期するための手法が必要である。そこで、レーザスキャナから取得した点群データ、デジタルカメラから取得した画像や動画、GNSS から取得した座標情報及び IMU と 3 基の GNSS アンテナから取得した角速度情報を GPS 時刻を基準に同期する手法を検討した。センサ機器間における計測データの同期技術の処理フローを図 3 に示す。

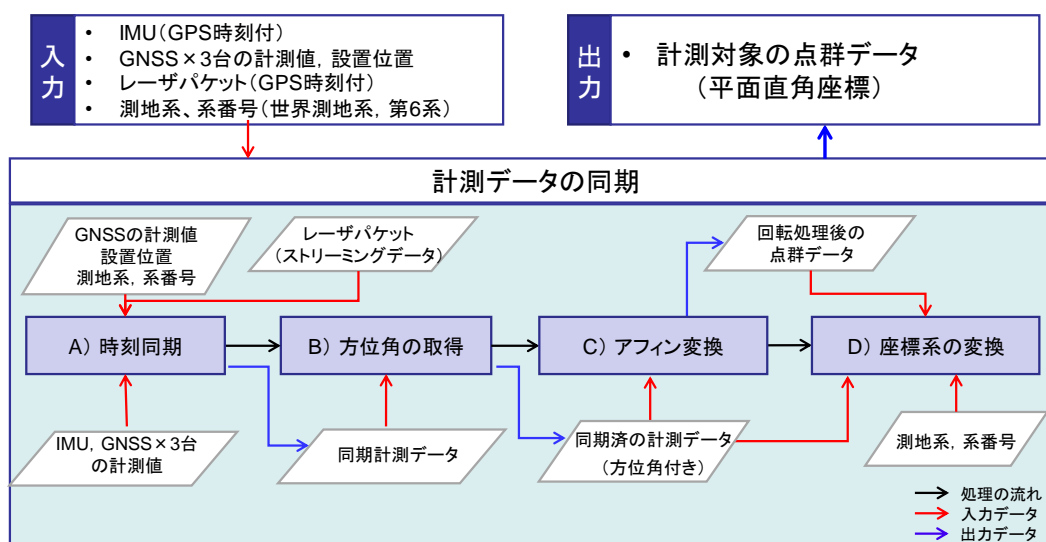


図 3 計測データの同期技術の処理フロー

図 3 に示すとおり、計測データの同期技術は、A) 時刻同期、B) 方位角の取得、C) アフィン変換と D) 座標系の変換の 4 つの処理で構成される。これらの処理を通じて、計測データの時刻と座標系を同期する手法を検討し、プロトタイプを用いた計測実験を通じてその有用性を検証した。平成 28 年度に開発した計測ユニットのプロトタイプを図 4 に示す。

図 4 (A) に示すとおり、平成 28 年度は、計測ユニットのプロトタイプ (図 4 (C)) を台車に搭載し、手押しによる移動時の計測実験を行った。実験では、計測ユニットのレーザスキャナを約 1.0 m の高さから斜め下に向けて、前方の地面が計測されるように設置した。IMU は、レーザスキャナの照射方向と垂直となるように設置 (図 4 (B)) した。3 基の GNSS アンテナは三角形となるように、図 4 (A) の黄色の丸枠で示す箇所に設置した。本プロトタイプを用いた実験を通じて、計測ユニットにより取得した計測データを後処理にて時刻同期する技術を開発した。

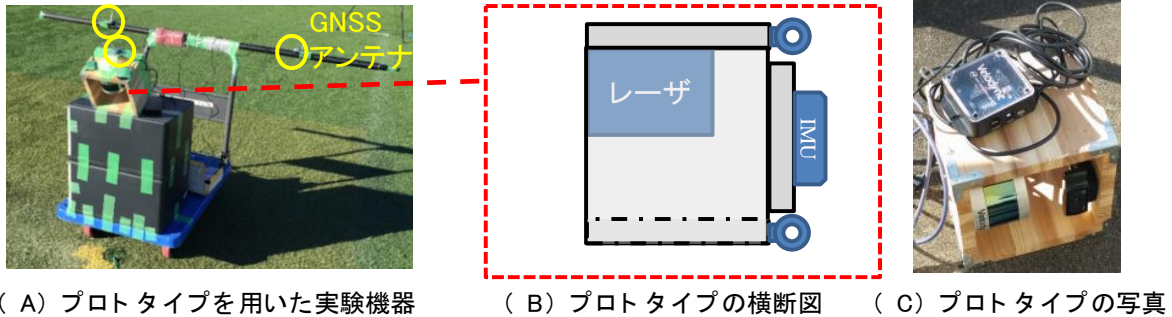


図4 計測ユニットのプロトタイプ

2) 計測ユニットを用いた俯瞰視点からのレーザ計測技術の研究開発

本研究項目では、図1(C) 河川土工の施工分野におけるレーザスキャナと UAV の利用シーンの整理と分類を目的に、国内外の学術論文や Web サイト等の既存文献 185 件の調査及び国土交通省国土技術政策総合研究所、国土地理院や建設関連企業 3 社を対象としたヒアリングを実施した。

調査の結果、本研究の開発対象であるレーザスキャナ搭載 UAV を用いた計測技術は、2015 年頃から研究成果が公表され始め、2016 年には活用事例が報告され始めていることが分かった。しかし、レーザスキャナ搭載 UAV を河川土工の施工管理に適用している事例は見あたらなかった。このことから、本採択課題の実験を通じて、事例の蓄積と運用モデルの考案を並行して進めていく必要があると考える。

一方、UAV を用いた空中写真測量技術を河川の維持管理に適用した事例は 4 件報告されていた。しかし、当該計測技術を河川土工の施工管理に特化して適用した事例は見あたらなかった。UAV を用いた空中写真測量技術は、国土交通省東北地方整備局東北技術事務所が公表した「UAV による河川調査・管理への活用の手引き(案)」等の要領にて整理されている。今後の研究開発では、これらの要領の更新を追跡し、本採択課題の開発技術に反映していく必要があると考える。

本研究開発項目では、さらに、i-Construction における基準を調査し、レーザスキャナ搭載 UAV を運用するために必要な基準の改訂を検討した。UAV を用いた公共測量マニュアル(案)では、空中写真測量を対象としているため、UAV によるレーザ計測を導入する場合に追加すべき項目がある。空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)の現行の目次、レーザスキャナを用いた出来形管理要領(土工編)(案)の現行の目次、新たに作成する UAV によるレーザ計測を用いた出来形管理要領の目次案、改訂内容(案)を独自に示した。

以上の調査及び検討を通じ、俯瞰視点からのレーザ計測技術の実用化に向けた今後の取り組みについて具体化した。

【平成29年度の研究成果】

平成29年度には、28年度の研究を継続し、レーザスキャナ搭載 UAV による点群データの計測に関する技術開発及び計測ユニットを用いた俯瞰視点からのレーザ計測技術の研究開発を進展し、計測ユニットのプロトタイプを用いた昼間と日照が乏しい時間帯の計測実験の実施、精度向上技術の研究開発と点群データ処理ソフトウェアの概略設計、及び、夜間計測技術の研究開発と点群データ解析ソフトウェアの概略設計を実施した。

1) レーザスキャナ搭載 UAV による点群データの計測に関する技術開発

本技術開発項目では、平成28年度に検討した計測データの同期技術の実装と実利用による検証を実施した。これと並行して、後処理ではなくリアルタイムな計測データの同期技術の検討と開発を進めた。これらの検討成果を計測ユニットのプロトタイプに実装し、計測実験を通じてその有用性を確認した。平成29年度の実験では、地上での計測だけでなく、UAV による俯瞰視点からのレーザ計測を実施した。本研究では、平成28年度の搭載機器構成を見直し、図5と表2に示す機器構成とした。レーザスキャナ、IMU、GNSS データ記憶用のタブレット PC、バッテリー含めて、本研究の目標価格である300万円以内を達成した。

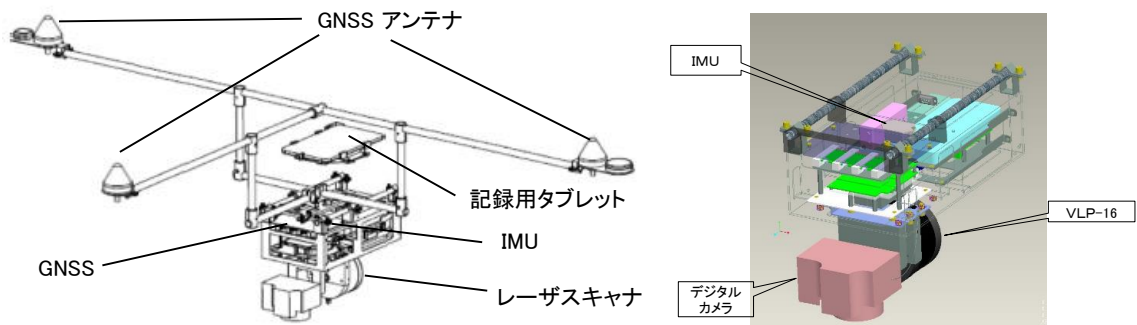

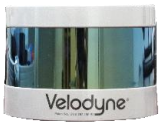




図5 レーザ計測ユニットの搭載機器構成

表2 再設計した計測ユニットの機器構成

	IMU	レーザスキャナ	GNSS	カメラ
機材				
メーカー名 製品名	東京航空計器 CSM-MG200	Velodyne VLP-16 Lite	u-blox M8P	Sony A 6000
搭載数	一基	一基	三基	一基
詳細	<ul style="list-style-type: none"> 分解能: 0.01° 未滿 Roll, Pitch精度: 0.5° 未滿 重量: 36g 	<ul style="list-style-type: none"> 測定間隔: 5~20Hz 測定点数: 約300,000点/秒 レーザ種別: Class 1 測定距離: 約100m 計測精度: 3cm 重量: 590g 	<ul style="list-style-type: none"> 搭載数: 3機 通信: SOI (※) 使用衛星: GPS, Beiou, QZSS (内部RTK処理により位置を補正) 	<ul style="list-style-type: none"> 2430万画素(有効画素) 写真モード: 秒間11連写 動画モード: 30fps jpg, RAW (Ublox社製LEA-M8TIにてGPS時刻を付与)

(※) i-システムリサーチ社にて開発したデータ通信ユニット。SOIにて基地局、移動局間でデータを通信

俯瞰視点での実験では、地表面に高さが異なる様々なオブジェクトを配置し、その高さ

情報をどの程度正確に計測できるかについて調査した。これらの調査を通じて得られた知見を基に、レーザスキャナ搭載 UAV による点群データ計測を実現するための点群データ解析ソフトウェアの概略設計を行い、概略設計書を作成した。

2) 計測ユニットを用いた俯瞰視点からのレーザ計測技術の研究開発

本技術開発項目では、レーザスキャナ搭載 UAV による点群データの計測に関する技術開発の実現場での活用可能性を評価し、計測ユニットのプロトタイプによる俯瞰視点からのレーザ計測技術を確立した。そのために、計測ユニットを用いて、日照が乏しい時間帯やリアルタイム計測を実施し、河川土工現場を対象に効果検証を行った。また、実験に際しては、デジタルカメラを用いた写真測量も同時に行い、得られる計測データの特徴を明らかにした。これらの比較を通じて、夜間測量におけるレーザ計測技術の優位性を実証した。そして、昼間の計測結果と比較しながら、レーザスキャナによる夜間計測技術の研究開発を実施した。そこでは、計測精度に大きな影響を与える要因を明らかにし、その結果に基づき作成した評価式を用いて、高精度な計測点のみを取捨選択する技術を開発した(図6)。

表 3 計測精度に影響を与える要因

要因	結論・検討事項
計測距離(位置)	計測対象から見て、最も近い位置から計測した点を採用
入射角	入射角が低い計測点(照射角度 16° 以上)を使用しない
飛行状態	等速で飛行している区間以外での計測データは使用しない
同期の時刻幅	計測位置をそのまま使わず、補間した計測位置を使用
Fix / Float	位置情報はFix解のみを使用

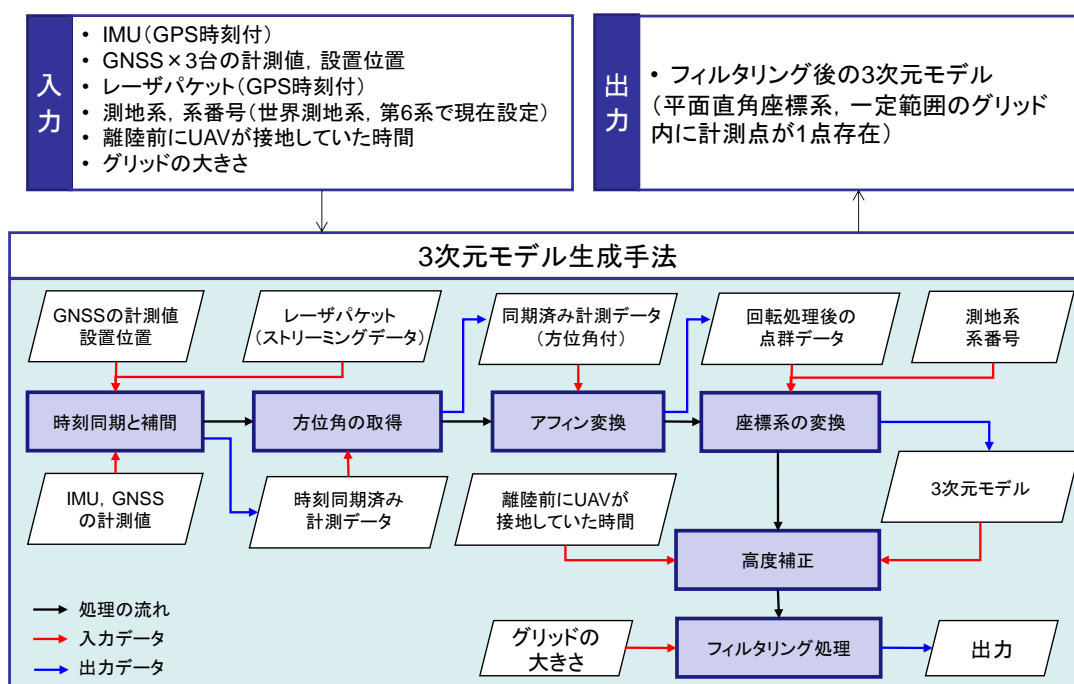


図 6 高精度な 3 次元データの生成手法

調整面を用いた I MU とレーザスキャナの計測軸のズレ補正技術を図 7 に示す。調整点を用いた計測データの高度補正技術を図 8 と図 9n 示す。補正前後でそれぞれ円内の点数が一定数以上でかつ、全点の高さの標準偏差が一定値以下であれば、計測範囲がラップする範囲の中の平坦部の点群データと判定する。

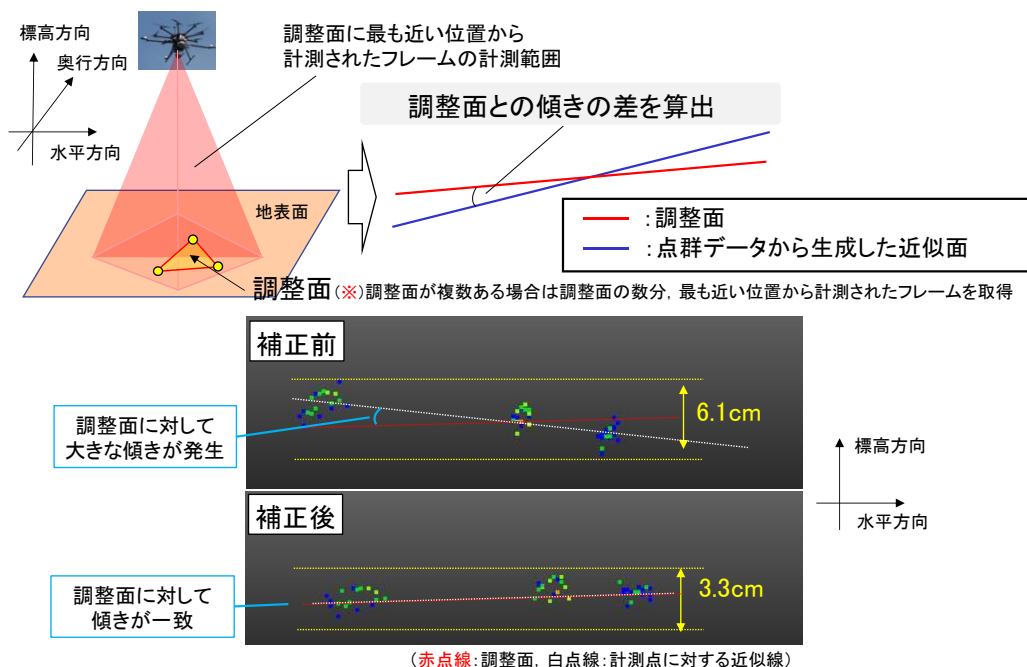


図 7 調整面を用いた I MU とレーザスキャナの計測軸のズレ補正

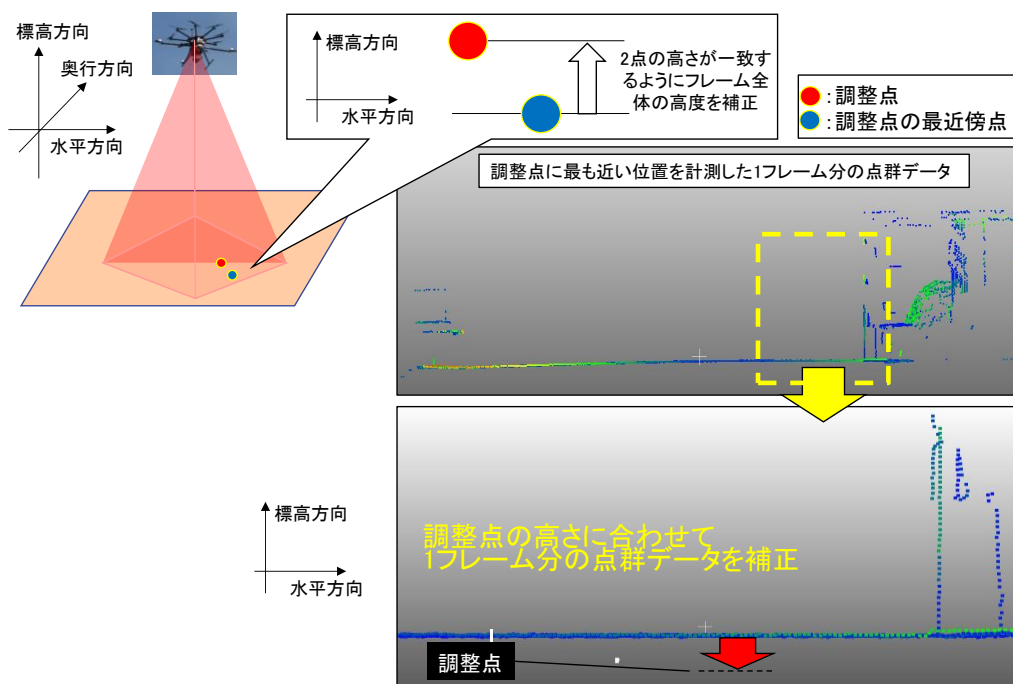


図 8 調整点を用いた計測データの高度補正

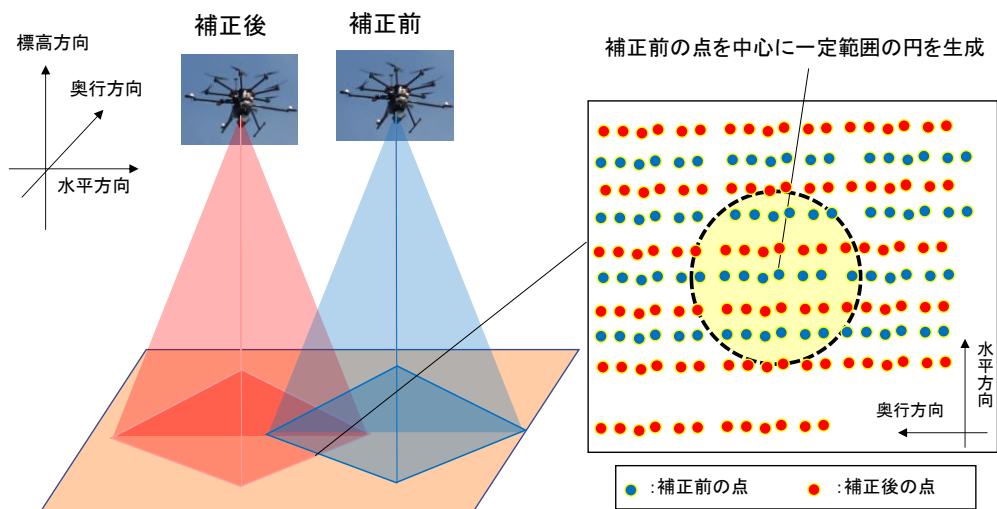


図 9 調整点を用いた計測データの高度補正技術

飛行ルートプロファイルを用いたフィルタリング技術を図 10 に示す。等速で安定して計測した軌跡を対象にクラスタリング処理を行い、グリッドから見てもっとも近いルートから計測された点群データを優先的に選択する。

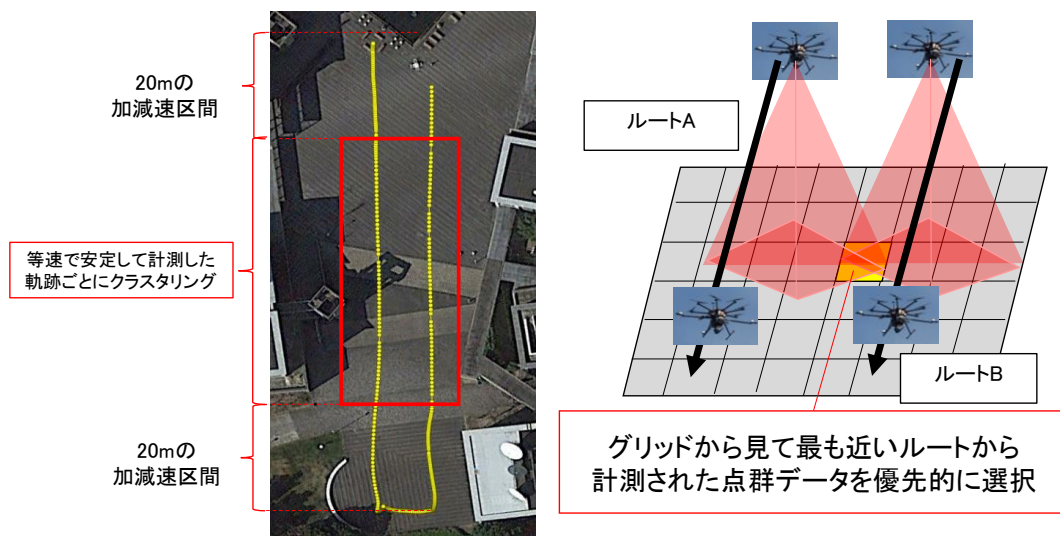


図 10 調整点を用いた計測データの高度補正技術

開発した計測ユニットを搭載した UAV による河川土工（1 万平米）を対象とした計測実験を実施し、研究開発目標の達成度を評価した。実験では、近畿地方整備局近畿技術事務所内（大阪府枚方市）にて河川土工の現場を想定し、堤防を模した小段等の構造物を対象（図 11）に計測した。地上設置型レーザスキャナにより計測した構造物の点群を正解データとして計測ユニットによる計測精度を評価した。UAV による計測方法（図 12）は、計測範囲がラップするように 2 往復で計測し、3 フライト分計測した。高度は 20m、飛行速度は 4m/s で固定した。高度は UAV にルートを設定するソフトウェア（Grand Station）上に設定された 45m（標高値）を基準に決定した。

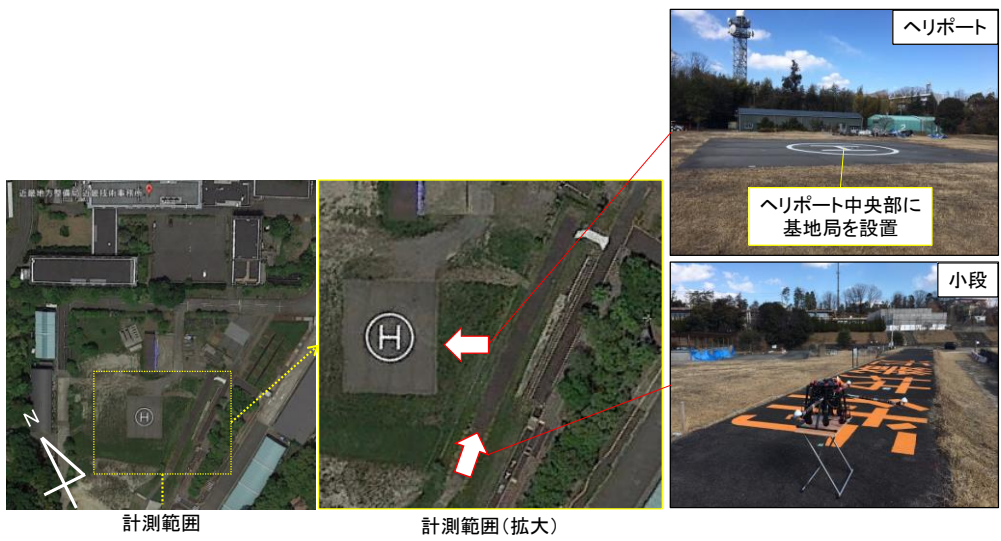


図 11 河川土工現場における計測実験

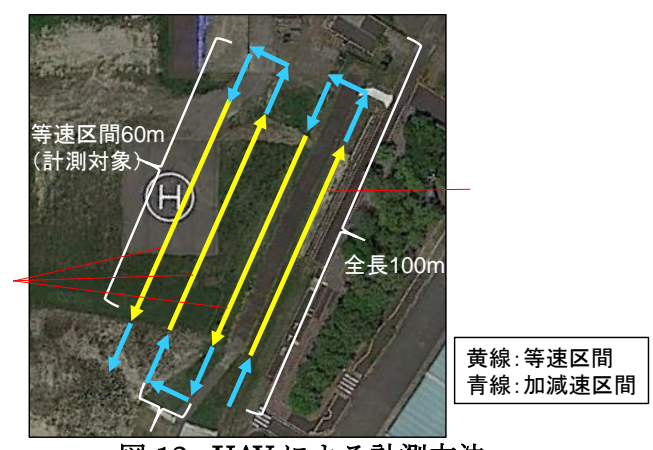


図 12 UAV による計測方法

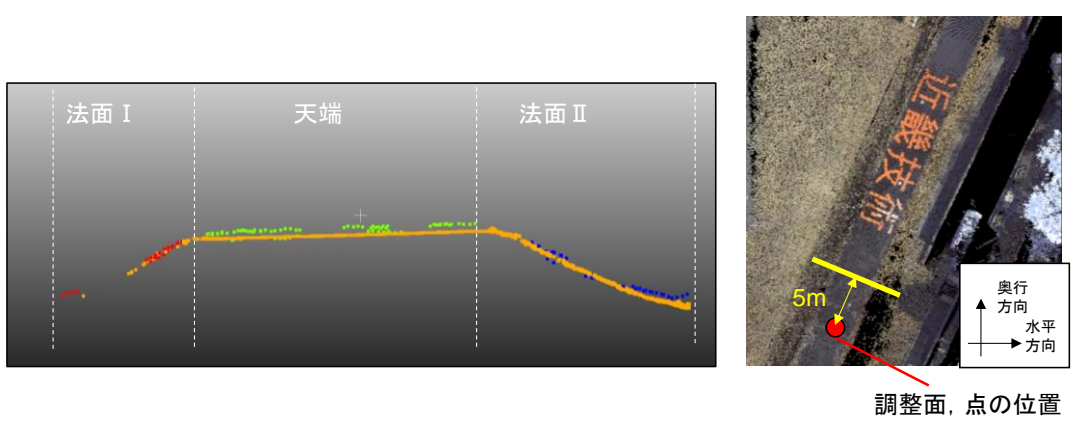


図 13 天端と法面の断面の可視化

実験において、天端と法面の断面の可視化を図 13 に示す。その点群データを絶対精度によって評価した結果を表 4 に示す。実験の結果、i-Construction における精度である 5cm を実現することを示した。

以上より、半時間で対象範囲を計測できるように航路を設定した場合の計測精度が 5 cm

以内であること、計測されたデータから点群データを生成して解析・検査までを6時間以内に完了することを示した。以上の研究開発を通じて得られた俯瞰視点からのレーザ測量や夜間測量を実現するための知見を点群データ処理ソフトウェアの概略設計として取りまとめた。

表4 天端と法面の点群の絶対精度による評価結果

評価対象	評価								標高差 (m)				
	A		B		C		D		全点数 (点)	最大値	最小値	平均値	標準偏差
	点数(点)	割合 (%)	点数(点)	割合 (%)	点数(点)	割合 (%)	点数(点)	割合 (%)					
法面Ⅰ	4	22.2	8	44.4	0	0.0	6	33.3	18	0.38	0.03	0.16	0.15
天端	50	83.3	8	13.3	2	3.3	0	0.0	60	0.10	-0.06	0.00	0.04
法面Ⅱ	2	6.3	26	81.3	4	12.5	0	0.0	32	-0.05	-0.13	-0.08	0.02
合計	56	50.9	42	38.2	6	5.5	6	5.5	110	0.38	-0.13	0.00	0.10

A評価: 5cm未満, B評価: 10cm未満, C評価: 15cm未満, D評価: 15cm以上

(3) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
土木学会論文集 F3 (土木情報学) (vol. 73 No. 2 P I_268-I_278、平常時と災害時における UAV 写真測量の解析パラメータの決定とその適用に関する研究)	H30. 3. 26	土木学会	櫻井 淳, 中村健二, 田中成典
土木情報学シンポジウム講演集 (vol. 42 P 99-100 施工管理のための UAV 写真測量の解析条件に関する検討)	H29. 9. 28	土木学会	櫻井 淳, 中村健二, 田中成典
土木学会論文集 F3 (土木情報学) (vol. 72 No. 2 P II_82-II_89、レーザスキャナ搭載 UAV 開発のための点群データ計測の利用場面と解析・処理技術に関する調査研究)	H29. 3. 24	土木学会	田中 成典, 窪田 諭, 今井 龍一, 中村 健二, 山本 雄平, 寺口 敏生, 櫻井 淳
土木学会論文集 F3 (土木情報学) (vol. 72 No. 2 P II_73-II_81、UAV の空中写真測量による施工管理のための計測手法の提案)	H29. 3. 24	土木学会	櫻井 淳, 田中成典, 中村健二, 窪田 諭, 今井龍一, 重高浩一
土木情報学シンポジウム講演集 (vol. 41 P177-180 点群データ計測の利用場面と解析・処理技術の調査研究)	H28. 9. 26	土木学会	田中成典, 窪田 諭, 今井龍一, 中村健二, 山本雄平, 寺口敏生, 櫻井 淳
土木情報学シンポジウム講演集 (vol. 41 P191-192、UAV の空中写真測量)	H28. 9. 26	土木学会	櫻井 淳, 田中成典,

による施工管理のための計測精度の検証)			中村健二, 窪田 諭, 今井龍一, 重高浩一
---------------------	--	--	---------------------------------

(4) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
三次元モデル生成システム	特願 2018-014248	H30.1.31	(出願中)	田中成典 窪田諭 今井龍一 中村健二 山本雄平 塚田義典 谷口寿俊 小川紀一郎 高山善司 古川顕一 伊藤裕二 吉永徹 藤原利弘

(5) 成果の実用化[※]の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

平成 31 年度の実用化を目指しており、平成 30 年度には同様の試作機を 5 台製作し、パイロットシステムとして共同開発者に配付して、様々な現場での活用を進める。このシステムを用いた計測実験を 5 箇所の建設現場にて実施する。これらの試行を通じて得られた計測データを基に精度検証し、トライアルアンドエラーを繰り返して実用化のためのマイナーチェンジを実施する。以上の取り組みを通じて、計測ユニットを実用化し平成 31 年度末にはプロジェクト外の第三者機関へと有償にて提供する予定である。

(12) その他