様式第11 別紙2

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

(1) 課 題 名:標定点無しの高精度測量を可能にするドローン測量技術の開発

(2) 研 究 期 間: 平成 29 年度~30 年度

(3) 交 付 申 請 者 名:西山 哲(国立大学法人 岡山大学・教授)

(4) 研究代表者名:西山哲(国立大学法人 岡山大学・教授)

(5) 共同研究者名:藤木三智成(国際航業(株)・技術サービス本部アセット推進部長)

井上浩一 (国際航業(株)・技術サービス本部社会インフラ部課長)

島田徹 (国際航業(株)・技術サービス本部防災部部長)

名草一成 (国際航業(株)・技術サービス本部地理空間技術部部長)

(6) 補助金交付総額:16,218,000円

(7) 技術研究開発の目的

これまでのドローン写真測量の公共測量マニュアルでは、測量の基準となる標定点(グ ランドコントロールポイント:GCP あるいは基準点と称する)を高密度に配置しなけば ±50mm の測量を実施することが出来ない。これはシステムの低コスト化が優先された結 果、測量時の機体の自己位置を正確に求めるための GNSS (全地球測位衛星システム: Global Navigation Satellite System) および IMU(慣性計測装置:inertial measurement unit) に関して、高精度の測位を可能とする高価な機器を搭載していないことに起因する。その 結果、人の出入りが困難な広域を対象にする災害地では、標定点の設置作業が制約となり、 ドローンを活用できない。その一方で、災害地対応用としてドローン測量機器を高度化す ることによって、標定点の設置が不要にるのかどうかの検証ができておらず、ドローン機 器に搭載する GNSS や IMU を高コスト化する価値があるのか不明である。本研究では、 GCP の設置が不要になる GNSS と IMU の性能を検討し、それらを搭載したドローンが GCP の設置無しでも±50mm の測量が可能になることを実証する。またその成果を活用し て、ドローンを飛行させるだけで、リアルタイムかつ高精度の測量技術を実現することを 目標とする。また強風および雨中でも飛行できる全天候型ドローンに測量機器を搭載した ドローン測量技術は実現されていない。本研究では、前記の高精度測量を実現する技術と 全天候飛行機体技術の融合を図り、災害時の悪天候下でもリアルタイムで測量できるドロ ーン技術を開発する。さらに本ドローン測量技術の普及を図るため、これら高精度測量と 安全運航技能を持った技術者を育成する教育システムの構築も同時に実現させ、汎用的技 術として本研究成果を広めていく。

(8) 技術研究開発の内容と成果

- 【① 標定点設置作業無しでの高精度ドローン測量技術の実現】
- ① -1 現場実証実験を通してのドローン測量技術の完成

GCP を不要にする GNSS および IMU の性能検討は平成 29 年度で完了している。平成 30 年度は、開発した技術の有用性を現場実験により検証する工程をさらに実施すると共に、災害地対応により適するドローン測量として長距離飛行を可能にするための技術も加えて、本開発項目を完成させることを目指した。具体的な成果は次の通り。

・ハード開発の成果として、高性能 GNSS と IMU と一体化させた総重量 2kg 以下 (バッテリー6個を搭載時は 10kg) という軽量のレーザスキャナをドローンによるレーザ測量を実現した. 仕様を右図に示す。これにより、1 回あたり 25 分間の飛行が可能になり、長距離および広範囲の領域を効率よく測量することが可能になった。以下、本機器を使用したレーザ測量を実施した結果を示す。

・高精度測量を実現するため、ドローンの自己位置を測定する技術の開発 に取り組んだ。自己位置を測位する



レーザ照射数	6万点/秒		
スキャン回転数	30回転/秒		
FOV	90度(±45度)		
測距精度	4mm/50m, 20mm/150m (1σ)		
レーザ拡散角	0.3mrad		
測位精度	水平±10mm、高さ±20mm		
姿勢測定性能	ピッチ・ロール±0.01度、ヘディング±0.02度		

GNSS が受信する衛星からの電波は、 L1(1575MHz)および L2(1228MHz)の 2 つの周波数を 搬送波とした電波信号が送られてくる。この二つの周波数を用いれば、測量した瞬間の時間 に応じて、誤差の要因となる電離層による速度遅延を定量的に求めることができる。この原 理を利用するのが 2 周波 GNSS である。平成 29 年度は、この 2 周波 GNSS および IMU を 搭載したドローンおよび精度検証を実施し、i-Construction に要求される±50mmの高精度写 真測量およびレーザ測量が可能なことを実証した。しかし、GNSS はさまざまな影響でズレ が発生する、あるいは山間部や都心部では山や建造物の影響で電波の受信が困難な場所があ るなど、ドローン測量利用をする際に課題となっていた。そこで、平成30年度は、RTKシ ステムを活用したドローン測量の高精度化に取り組んだ。ドローンは GNSS の電波を常に 受信することで自己の位置を測位するが、RTK 搭載の機体はさらに飛行場所の周辺にある 電子基準点からの補正情報を組み合わせて、ドローンの自己測位をリアルタイムで決定する。 この技術は、ネットワーク型 RTK 測量として移動局を使った GNSS 測量で活用されてきた ものであり、利用者が現場で取得した衛星データと、周辺の電子基準点の観測データから作 成された補正情報を組み合わせ、リアルタイムで cm レベルの測量をリアルタイムで実施す るものである。これにより現場で標定点を利用した補正を行う必要がない測量が可能になる。 しかしながら、測量現場と利用する電子基準点の距離は測量での基線長に相当し、その基線 長が長くなると測量精度が劣化すると言われていた。そこで本研究開発では、まず基線長と 測量精度の関係を求め、次に、基線長が大きい場合でも高精度測量が可能な技術を検証する。 後者の技術を具体的に述べると、VRS を活用したドローン測量の効果を検証するものであ る。これは仮想基準点方式と呼ばれ、複数の電子基準点の観測データから、測量現場のごく 近傍にあたかも基準点があるかのような状態を作り出す技術であり、GNSS 測量ではその効 果は検証されてきたが、RTK 測量機器を搭載したドローン 1 台で高精度な測量を行うこと ができるかどうかは確認されていない。

GNSS 測位を行う場合、衛星からの信号は地上の受信機に届くまでに、自然条件(対流圏・電離層)の影響や衛星自体(時間同期・軌道誤差)の問題により「遅れ」や「乱れ」が生じ、地上での観測データに「誤差」が発生する。VRS は、この誤差を補正するための方式である。電子基準点の座標は正確に求められているが、さまざまな誤差要因により、リアルタイムで取得した電子基準点の座標値は、電子基準点の正規座標値と異なる。VRS は、電子基準点で取得しているリアルタイムデータと正規座標値とを 24 時間比較解析し、その誤差を解消した補正データの送信を行なうシステムである。電子基準点に囲まれたエリア内であれば、携帯電話網を使って、全国どこの現場でも補正データのサービスの提供を受けることが可能であり、この技術の効果が実証されれば、平成 29 年度の成果と合わせて、GNSS 受信状況に関わらず標定点の設置を必要としないドローン測量を実現することが可能になる。

図-1 は精度検証用に用いたドローンとフィールドの概要である。フィールド内には 2 級

基準点を与点にして座標値を取得した標定点と検証点が設置されている。図-2 には、当フィールドと周囲の電子基準点との距離を示すとともに、それらの電子基準点とフィールド内に VRS 仮想基準点を設けた場合の測量精度を示す。



図-1 精度検証を実施したフィールドの概要



図-2 精度検証実験結果の概要

図-2に示すように、ドローン測量は基線長が 1km レベルでも±50mm 以上の精度のなってしまう。これでは、RTK を活用した測量の高精度化は困難であるが、VRS 方式を活用すれば、i-Constructionで要求される±50mm の測量を実現することが実証された。図-2は、高度50m からのレーザ測量の結果であるが、図-2 は一つの検証点での結果であるが、他、高度75m からのドローンレーザ測量の精度検証結果を図-3 に示す。高度が75m になっても、VRS方式により i-Construction で要求される±50 mmの測量が実現できることが分かる。また図-2 および図-3 では往路と復路の測量結果を示しており、これは再現性が良好であることを実証するものである。このように、GNSSの受信状況が良好でない場合でも、高精度のドローンレーザ測量を可能にする技術を構築することが実証できた。

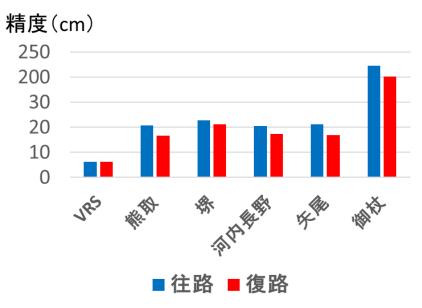


図-3 高度 75m でのドローンレーザ測量における VRS 方式の効果検証結果

① -2 リアルタイム測量を実現するソフト開発および計測技術のマニュアル化

計測の技本技術は、①-1「現場実証実験を通してのドローン測量技術の完成」において、完成している。平成 30 年度は、汎用化して普及させる計測技術を、同じく現場実験を通して整理する。それにより、計測から解析までの一連の工程のマニュアルを完成させることを目指した。具体的な成果として、まずリアルタイム測量のソフト開発に関しては、自動車両運転技術における自己位置推定と地図作成を同時に行う自律走行技術として開発されている SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術を導入することで実現させた。ドローンレーザ測量は、高密度のレーザ点群を取得することが可能である。しかしその一方で、取得されたデータはビッグデータとなり、解析には人的労力を要し、特にi-Construction に適用するには、ヒートマップの作成など複数の時期に計測されたデータから、計測対象の座標値の差分量を定量化する処理を自動化しなければ、ドローン測量の汎用化は困難である。そこで、本研究開発で、SLAM 技術の中でも対象物の形状や位置合わせの手法として汎用化している ICP(Iterative Closest Point Algorithm)技術を導入することにより、データの入力から数時間以内に出来方管理図や数量を算出するためのソフト技術を構築した。

ICP 解析技術の理論の概要を記述すると次の通り。ICP はドローン測量によって実施された 2 時期のレーザ測量のデータからリアルタイムに各点の座標値の差分量を定量化するもので、技術者の労力を削除し、解析プロセスの低コスト化に寄与するものである。特に ICP 解析技術は、計測された 2 時期の点群を直接扱うことが出来るので、ドローンレーザ測量実施後に、誰でも簡単にビッグデータである計測データを重ね合わせ、ヒートマップを作成す

ることができる。

ICP は Iterative Closest Points の略称で、SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)と よばれる自己位置推定と地図構築を同時に行う技術を用いたスキャンマッチングのアルゴリズムの 1 つである. スキャンマッチングとは、2 つのスキャン(点群)の形状が合致する ように位置合わせをする技術のことで、ICP は 2 つのスキャン(現在スキャンと 3 照スキャン)の間で、スキャン点の対応付けと位置の最適化を交互に繰り返すことで、点群のマッチングを行う方法である. まず初めに ICP アルゴリズムによる点群マッチングの過程について述べる. その際、ICP は繰り返し計算であるため、そのくり返し数を k で表し、k 回目の くり返しにおいて最適化した位置を x_t^k で表すこととする。

・手順1:データの対応付け

k-1回目のくり返しでの位置 x_t^{k-1} において、スキャン S_t の点とスキャン S_{t-1} の点を対応付ける。まず、k回目の位置 x_t^k が得られたとして、その位置での現在の各スキャン点 p_t^k は次の式(1)で計算される.

 R^k は x_t^k の回転ベクトルであり、 t^k は x_t^k の並進ベクトルである。

$$p_i^k = R^k p_i + t^k \tag{1}$$

次に、 p_i^k から最も近い参照スキャン S_{t-1} の点 q_i^k を式(2)で求める。ICP のデータ対応付けの基準は多くの場合、ユークリッド距離を用いる。すなわち、ユークリッド距離が最も近い点同士を近づけている。argmin=f(x)はf(x)を最小にするxを表す関数である。この式から、 p_i^k からのユークリッド距離が最も小さくなる点を探して $q_{j_i}^k$ とする。ここで、 j_i はスキャン S_t の点番号iに対応するスキャン S_{t-1} の点番号jを表す。対応付けの結果は、 S_t と S_{t-1} の各点番号のペアの集合 $C_k=\{(1,j_1),...,(N,j_N)\}$ で表す。ただし、Nは点の個数である。

$$q_{i_i}^{\ k} = argmin \| p_i^{\ k} - q_i^{\ k} \| \tag{2}$$

・手順2:最適化位置の推定

手順1で求めた対応付けにおいて、コスト関数が最小となる x_t^k を求める.式(3)により、各点間の距離の二乗平均を求める.コスト関数とは、その入力値がよい値かどうかを評価する関数で、コスト関数が最小(極小)となる入力が最も良いと判断されるようにする. ICPにおけるコスト関数は、位置 x_t を入力して、対応付けされた転換の位置誤差の平均を返す関数 $G_1(x_t^k)$ である。つまり、2つのスキャン間のずれ(各店の位置誤差)が小さいほど、もっともらしい位置だと判定する.位置の推定では、 $G_1(x_t^k)$ が最小となる x_t^k を求める。

$$G_1(x_t^k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left\| (R^k p_i + t^k) - q_{j_1}^{k-1} \right\|^2$$
 (3)

・手順3:くり返し

位置合わせのスコアが変化しなくなるまで、手順 1 と手順 2 を繰り返す。k回目の $G_1(x_t^k)$ の最小値とk-1回目の $G_1(x_t^{k-1})$ の最小値の差が閾値以下になったらくり返しを終了する。次に、ICP アルゴリズムによる変位量抽出について述べる。ICP のアルゴリズムは近傍点を対応付けから最適化を行う過程で、点の移動が回転と平行移動の行列で算出されるため、

点の移動をベクトルで表すことができる。この状況を図-4 に示す。この点を応用し、ALBで計測した 2 時期の点群データに対して ICP アルゴリズムを適応すると、2 時期で動いていない点については移動量が算出されないが、動いた点については点の移動を向きと量で算出することができるため、図-5 に示すように、この移動量を変位量とみなすことができる。

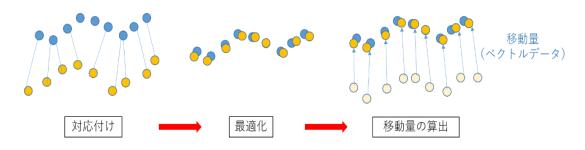


図-4 ICPによる移動量算出

点群に対して ICP で変位量抽出を行う際、全点群に対して点群マッチングを行うのではなく、図 2-2.3 に示すように、正方形の範囲に区切ったメッシュごとに解析を行い、変位ベクトルを表現している.この変位ベクトルは、メッシュ内の点群の移動量と向きの平均値を用いる.このメッシュの大きさをメッシュサイズと定義する.また、メッシュについて点群マッチング行う際、どの範囲の点群までをマッチングの対象とするか決める必要があり、図-5 に示す、この範囲のことをブロックレンジと定義する.

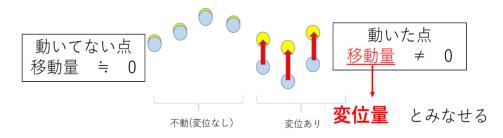


図-5 ICP解析における変位量

点群に対して ICP で変位量抽出を行う際、全点群に対して点群マッチングを行うのではなく、図-6 に示すように、正方形の範囲に区切ったメッシュごとに解析を行い、変位ベクトルを表現している。

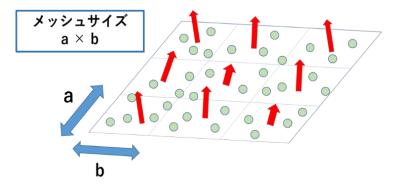


図-6 ICP解析におけるメッシュサイズ

この変位ベクトルは、メッシュ内の点群の移動量と向きの平均値を用いる.このメッシュの大きさをメッシュサイズと定義する.また、メッシュについて点群マッチング行う際、どの範囲の点群までをマッチングの対象とするか決める必要があり図-7に示す、この範囲のことをブロックレンジと定義する。

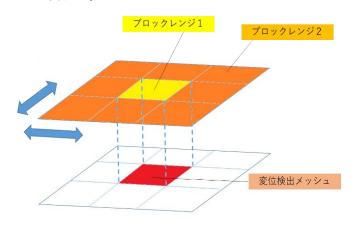


図-7 ICP解析におけるブロックレンジ

図-8 は i-Construction での使用を想定して、法面を計測した 2 時期のレーザ点群から ICP 解析により変位分布を算出した結果である。対象法面には変位が発生していなかったので、

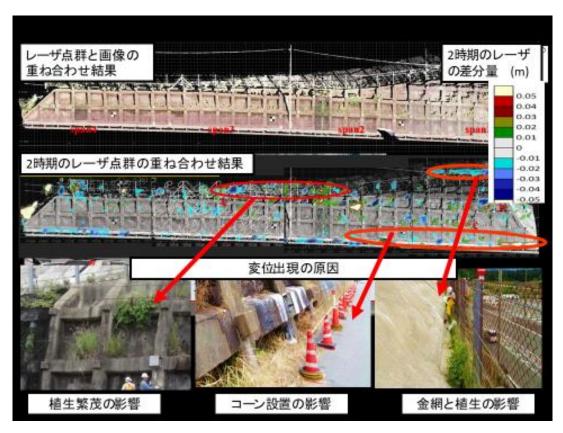


図-8 ICP解析によるレーザ点群の自動重ね合わせ結果事例

実際、法面上には変位が生じていない結果が得られたが、図中、凡例で変位が発生していると考える青色あるいは赤色で示される箇所が見られた。現位置にて、その対象個所を搭載した結果、青色および赤色などの変位が発生していると見られた個所で表現されているのは、法面上の金網等により影響を受けたノイズ(誤差)の他、植生の繁茂状態の相違あるいはコーンが2時期目の計測時に設置されたことに因るものであった。ICP解析手法は、レーザ点群からグリッドデータなどを作成する工程を経ることなく、各座標値を直接比較して変位を定量化するのでリアルタイム処理が可能である。このように、植生などの状況などを高精度に定量化するリアルタイム処理のソフト化を実現させ、レーザ点群処理の経験の無い技術者でもi-Constructionへ適用できる解析工程を実施することを可能にした。なお、ドローンの飛行からソフト開発まで一連の処理のマニュアル化は、次に記述する②-2「技術者育成機関での講習の実施などによる汎用化技術としての完成」の開発項目と連携した講習会あるいはセミナーにおいて、資料としてまとめたものを配布する等の活動を通して、本技術を普及させるための技術としてまとめた。

【② 災害発生時環境下での測量技術の完成および安全かつ高精度測量技能の育成】

② -1 全天候型高精度ドローンを用いた高精度測量技術の完成 左図は、平成 29 年度に完成させた 2 重反転 8 枚羽根構造を有するドローンの飛行試行 の状況を示すものである。地上での風速約 8m/s、雨天 (時間雨量 5mm) 下の飛行であり、





図-11 強風下を想定した精度検証実験状況

実績より約 10m/s の強風下でも飛行可能である。この全天候型ドローンによって、強風下でも出来形計測として±50mm 以下、数量計測として±100mm 以下の測量を実現するために必要な姿勢制御技術を検討し、強風下での高精度測量の可能性を取りまとめた。

図-10 は強風下でのドローン測量 を想定して、ドローン機体の姿勢角 度を変化させながら測量精度検証実 験を行った状況を示すものである。

図-11 および図-12 は、±50 mmの測量精度を得るために必要な姿勢制御を定量化したものである。図-11 は高度 50m、図-12 は高度 75m でのドローンレーザ測量の精度検証結果である。強風下でのドローンの姿勢角が大きくなっても理論的にとか分かる。理論式は図-13 にてり出されたものである。また図-11 および図-12 の赤点は図-1 のフィールドにおける実験結果である。このように、全天候ドローンによる高精度測量が実施可能であることを実証した。

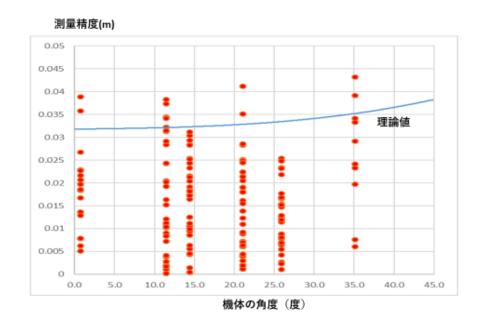


図-11 ドローン機体の角度に対して機体直下の測量精度検証結果:高度 50m

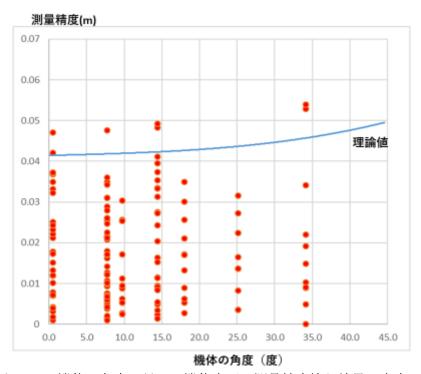


図-12 ドローン機体の角度に対して機体直下の測量精度検証結果:高度75m

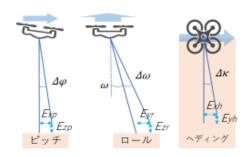
②-2 技術者育成機関での講習の実施などによる汎用化技術としての完成

平成 29 年度に準備した教育研究機構等での講習を実現させ、本技術の普及に向けた体制の整備を行うことで本研究開発による高精度測量技術の汎用化を実現させた。具体的には、既存のスクール事業のカリキュラムと本研究の計測マニュアルを連携させ、その内容を講習会およびセミナーにて公開して普及させた。

誤差の理論式

 $E_{xp} = (\sin(\varphi + \Delta\varphi) - \sin\varphi) \times L$, $E_{xp} = (\cos\varphi - \cos(\varphi + \Delta\varphi)) \times L$ $\begin{array}{l} E_{yz} = \left(\sin\left(\omega + \Delta\omega\right) - \sin\omega\right) \times L \quad , \quad E_{zz} = \left(\cos\omega - \cos\left(\omega + \Delta\omega\right)\right) \times L \\ E_{zh} = \left(\sin\left(\kappa + \Delta\kappa\right) - \sin\kappa\right) \times L \quad , \quad E_{yh} = \left(\cos\kappa - \cos\left(\kappa + \Delta\kappa\right)\right) \times L \end{array}$

$$\begin{split} E_{IMU} &= \sqrt{E_{xp}^2 + E_{zp}^2 + E_{yr}^2 + E_{zr}^2 + E_{xh}^2 + E_{yh}^2} \\ E_{xyz} &= \sqrt{E_{GNSS}^2 + E_{IMU}^2 + E_S^2} \end{split}$$



 E_{xp} : ビッチの傾きによる進行方向の誤差. E_{arphi} : ビッチの傾きによる鉛直方向の誤差 E_{arphi} : ロールの傾きによる鉛直方向の誤差 $\vec{E_v}$: ロールの傾きによる横断方向の誤差。 Exp: ヘディングの傾きによる進行方向の誤差。

 E_{ja} : ヘディングの傾きによる横断方向の誤差, ω : ロールの姿勢角, $\Delta\omega$: ロールの測 ⊿♥: ビッチの測定分解能. ロ ピッチの姿勢角。 Ao: ロールの測定分解能。

Δx: ヘディングの測定分解能。 L:レーザ照射距離。 κ: ヘディングの姿勢角。

起因する誤差。 E_S : レーザスキャナに起因する誤差(フットプリント)、 E_{GNSS} : GNSSによる自己位置の誤差 E_{IMU} : IMUによる自己姿勢誤差に起因する誤差。

E_{xx}: x,y,z全体の誤差,

強風下でのドローン機体の姿勢変化に対する理論的測量精度の考え方

平成 29 年度に準備した教育研究機構等での講習を実現させ、本技術の普及に向けた体制 の整備を行うことで高精度ドローン測量技術の汎用化を実現させた。具体的には、既存のス クール事業のカリキュラムと本研究の計測マニュアルを連携させ、次に講習会およびセミナ ーにて本研究開発の内容を公開し、汎用化させた。図-14には、一般社団法人ドローン測量 教育研究機構と連携して実施したセミナーのプログラム例を示す。



図-14 本成果の汎用化のために開催したセミナーのプログラム例

例えば、本セミナーで講習した高精度ドローンレーザ測量のマニュアルの一例を次に示す。 国土地理院では、公共測量でドローンレーザ測量を利用するうえでの標準的な作業マニュア ルとして、2018年3月に「ドローン搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案)」

(以降では、作業マニュアルと呼ぶ)を策定した。このマニュアルは、公共測量における航空レーザ測量と基本的に同じ品質管理方法が採用されている。しかし、定期的なキャリブレーションでは、多様な機器の組み合わせが存在する背景から具体的な方法が記されていない。そのため、頻繁な機器の取り付けにも対応できる作業効率性の高い標準的なキャリブレーション方法が求められることになる。ここでは、高精度のドローンレーザ測量を実現するための効率的で確実なキャリブレーション方法を提案する。本研究開発で提案する手法として、3つの項目を示すことができる。1つ目は、ドローンレーザ点群の特性である高精細な点群を利用したミスアライアメント調整方法を採用すること。2つ目は、確実な精度確保のために3次元解析による確認工程を導入すること。3つ目は、それらの調整・確認するための基準値を、機器性能から想定される計測誤差を用いて設定することである。

まずキャリブレーションの目標精度について検討する。ドローンレーザ測量は、利用目的が多岐に渡たり、目的によって要求精度が異なる。作業マニュアルが示す利用目的は、地形形状の把握、土工部の起工測量や出来形計測である。その主な位置精度の基準は、地形形状の把握で地上測量により取得した基準点と点群の較差が標準偏差で 0.1m 以内、起工測量で標高較差が 0.05m 以内と定められている。そこで本研究開発で提案するキャリブレーションの目標精度は、最も精度の高い基準となる基準点と点群の較差が 0.05m 以内とする。そこで、ドローンレーザ測量機器の計測特性を把握するとともに、キャリブレーションの評価基準値を設定するために、計測機器の性能が計測精度に及ぼす影響を把握する。計測精度に影響を及ぼす主な要因は、GNSS/INS により自己位置・姿勢の測定精度、レーザスキャナの測距精度である。図-15で示す機器性能から想定される計測誤差を、図-16~図-18に示す。

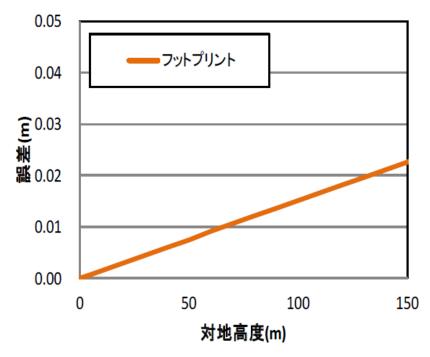


図-15 レーザ拡散角 0.3mrad におけるコース直下のフットプリントの大きさ

レーザの測距精度は、レーザが計測対象物に反射した際のレーザビーム系(フットプリント)の影響を受け、その大きさと同等な誤差が生じると想定される。図-15 は、レーザ拡散角の 0.3mrad における対地高度の伴うフットプリントの大きさを示す。フットプリントは対地高度に伴って大きくなり、対地高度 50m で 0.008m、100mで 0.015m となる。

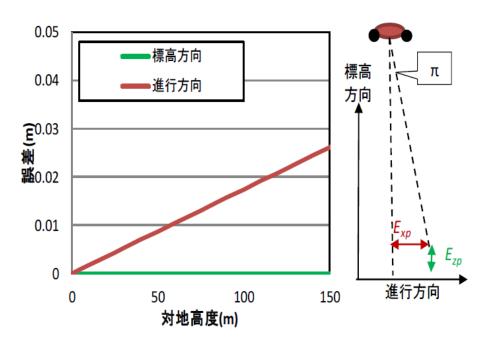


図-16 ピッチの 0.01° ズレが及ぼす計測誤差

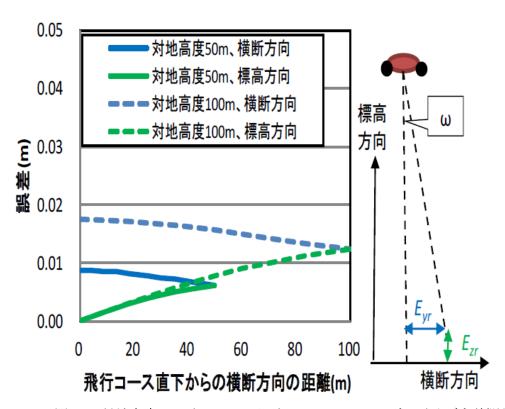


図-17 対地高度 50m と 100m におけるロール 0.01°のズレが及ぼす計測誤差

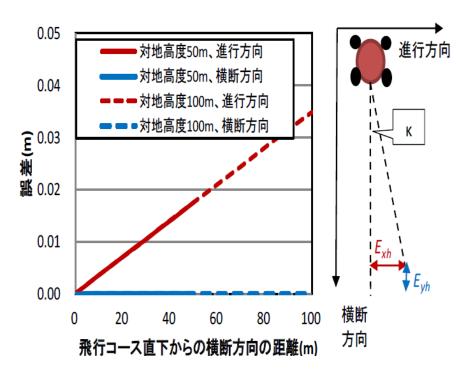


図-18 対地高度 50m と 100m におけるヘディング 0.01°のズレが及ぼす計測誤差

次に、姿勢測定精度が点群の位置精度に及ぼす影響を考察する。移動体の姿勢軸は、進行方向軸の角度をロール標高軸の角度をヘディング、それら2つの軸から横断方向に直行した軸の角度をピッチで表される。図-16には、式(1)に従い、ピッチ軸で最小測定性能である0.01°のズレが生じた場合の計測誤差を示した。ピッチ軸のズレは、標高方向と進行方向に計測誤差が生じるが、0.01°程度であれば、標高方向の影響が少なく、進行方向で数cm程度の誤差になる。またロール軸で最小測定性能である0.01°のズレが生じた場合の計測誤差を考察する。図-17では、式(2)に従い、対地高度50mと100mを例に、横軸に飛行直下から横断方向の水平距離、縦軸に計測誤差を示す。ロール軸のズレは、横断方向と標高方向に計測誤差が生じ、対地高度、飛行直下から離れるに伴い横断・標高方向の誤差は増加すること、その誤差が数cm程度に及ぶ。さらに図-18では、式(3)に従いヘディング軸で最小測定性能である0。02°のズレが生じた場合の計測誤差を示す。ヘディング軸のズレは、進行方向と横断方向に計測誤差が生じるが、0.01°程度のズレであれば、横断方向の誤差がほとんどなく、進行方向に数cm程度の誤差が生じることが確認できる。

$$E_{xp} = (\sin(\pi + \Delta\pi) - \sin(\pi)) \times L \quad , \quad E_{zp} = (\cos(\pi) - \cos(\pi + \Delta\pi)) \times L$$
 (1)

$$E_{yr} = (sin(\omega + \Delta\omega) - sin(\omega)) \times L \quad , \quad E_{zr} = (con(\omega) - con(\omega + \Delta\omega)) \times L \quad (2)$$

$$E_{xh} = (sin(\kappa + \Delta \kappa) - sin(\kappa)) \times L$$
 , $E_{yh} = (con(\kappa) - con(\kappa + \Delta \kappa)) \times L$ (3)

最後に、図-19 において、対地高度 50m と 100m における自己位置と姿勢の測定精度、レーザスキャナの測距精度を加味した計測誤差を示す。この計測誤差は、式(4)に従って算出した。この図から、対地高度 50m では、飛行コース直下で 0.03m 弱、コース端で 0.04m 程度の計測誤差が想定され、直下とコース端の差が 0.01m 程度と僅かである。

また、対地高度 100m では、コース直下で 0。04m 程度、コース端で 0.06m 程度になることがわかる。以上の結果から、フットプリントやピッチ、ロール、及びヘディングといったミスアライアメント調整で生じる計測誤差の傾向と大きさを確認することができた。また、

対地高度が高くなるに伴い、ミスアライアメントによる計測誤差が現れやすい一方で、フットプリントが大きくなり点群で表現できる形状が不明瞭になる特性も把握できた。

$$E_{INS} = \sqrt{E_{xp}^2 + E_{zp}^2 + E_{yr}^2 + E_{zr}^2 + E_{xh}^2 + E_{yh}^2} , \quad E_S = E_{fp}$$

$$E_{xyz} = \sqrt{E_{GNSS}^2 + E_{INS}^2 + E_S^2}$$
(4)

ここで、 E_{xp} : ピッチのズレによる進行方向の誤差、 E_{zp} : ピッチのズレによる標高方向の誤差、 E_{yr} : ロールのズレによる横断方向の誤差、 E_{xh} : ヘディングのズレによる進行方向の誤差、 E_{xh} : ヘディングのズレによる進行方向の誤差、 E_{yh} : ヘディングのズレによる横断方向の誤差、 π : ピッチの姿勢角、 $\Delta\pi$: ピッチの測定分解能、 ω : ロールの姿勢角、 $\Delta\omega$: ロールの測定分解能、 κ : ヘディングの姿勢角、 $\Delta\kappa$: ヘディングの測定分解能、 E_{INS} : INS による自己姿勢誤差に起因する誤差、 E_{S} : レーザの性能に起因する誤差、 E_{fp} : フットプリントの大きさ、 E_{xyz} : E_{xyz}

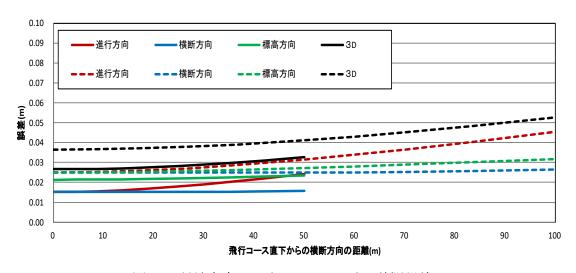


図-19 対地高度 50m と 100m における計測誤差

以上の理論を背景にして、ドローンレーザ測量のキャリブレーション方法を提案する。この方法は、これまでに考察したドローンレーザ測量の誤差傾向を踏まえたデータ取得、データ評価、更に品質の確実な確認をするための3次元解析による確認の工程、といった内容で構成される。図-20にキャリブレーション手法の工程を示す。はじめに、キャリブレーションの評価に適したデータ取得を行う。次に、GNSS/INSを用いた最適軌跡解析の解析結果を確認し、キャリブレーションに適さないデータをスクリーニングし、GNSS、INS、レーザスキャナのレバーアームを確認・調整する。そして、ドローンレーザ測量の特徴である高精細な点群を用いた断面表示を行い、輪郭決定法によりミスアライアメンを調整する。最後の確認として、複数の計測コースで取得された点群を用いた解析から3次元で点群間のズレの有無を面的に確認する。次に各工程の詳細を記述する。

1) データ取得:

データ取得の工程では、レバーアームやミスアライアメントを調整しやすくするために、 建物を基準に、図-21に示す飛行方向でドローンレーザ測量を行う。計測対象とする建物は、 3角形状の屋根を持つものとする。なお、ドローンレーザ測量の対地高度は、図-19で示す 計測誤差が目標精度である 0.05m を確保でき、更に点群の断面表示により形状を明確に再現できるフットプリントを確保できるように設定する。

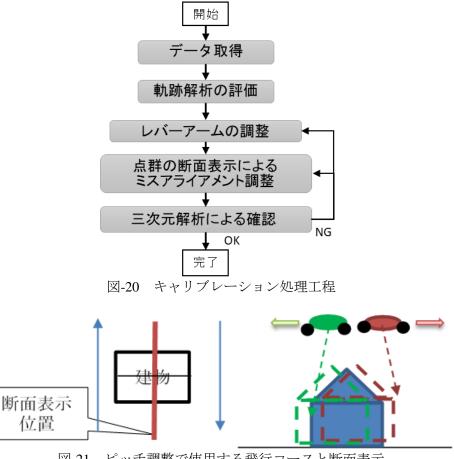


図-21 ピッチ調整で使用する飛行コースと断面表示 : 左図 飛行コースと断面表示位置 右図 横断方向の断面表示

2) 軌跡解析の評価

軌跡解析の評価では、最適軌跡解析で得られる GNSS 受信数や DOP(Dilution Of Precision) の情報から、評価に適さない不良計測箇所をスクリーニングする。この評価では、作業マニュアルにおける最適軌跡解析の評価方法に従って行う。

3) レバーアームの調整:

レバーアームは、INS、 GNSS 受信機、およびレーザスキャナの機器の取り付け位置を調整する。ドローンレーザ測量では、計測機器の取り付け位置が近く、機器の取り付け位置も設計上で確定していることが多い。そのためレバーアーム調整は、設計の取り付け位置の値を利用し、必要に応じて調整するものとする。

4) 点群の断面表示によるミスアライアメント調整:

ミスアライアメント調整は、INSとレーザスキャナの機器の取り付け角度を調整する。ドローンレーザ測量は、建物形状を把握できる密な点群を取得できる。この特性を生かし、ミスアライアメント調整では、輪郭決定法を採用し、ロール、ピッチ、及びヘディングの角度調整に適した断面を表示しながら調整値を算出する。その際、作業効率性と調整の確実性を向上するために、多視点の断面表示で、調整値から点群形状をリアルタイムに反映できるものとする。次に角度成分ごとの調整方法を示す。

① ピッチの調整:並列した飛行コースを異なる方向から取得した点群を利用する。ピッチのズレによる点群への影響は、図-22 に示すように進行方向に現れやすい。そのため、図 2-1。10 にて示すような建物の屋根など傾斜がある平坦面を進行方向に表示した断面表示から、平坦部のズレがなくなるようにピッチを調整する。

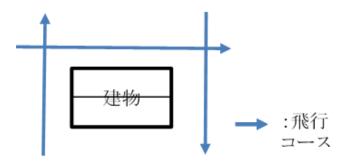


図-22 ピッチの調整のために考慮するデータ取得時の飛行方向

② ロールの調整:並走した飛行コースを異なる方向から取得した点群を使用する。ロールのズレによる点群への影響は、横断と標高方向ともに現れる。そのため、図-23 に示すような平坦部を横断方向に表示した断面から、平坦面のズレがなくなるロールを調整する

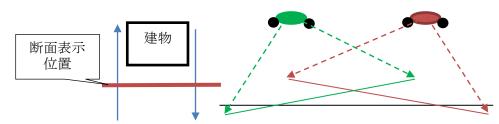


図-23 ロール調整で使用する飛行コースと断面表示 左図 飛行コースと断面表示位置 右図 横断方向の断面表示

③ ヘディングの調整: 明瞭な四角形状の建物に対して、壁沿いにクロス飛行して取得した点群を使用する。ヘディングのズレによる点群への影響は、主に進行方向に現れる。 図-24 に示す建物の壁を一定の標高値を取得した点群の上空表示により、建物の形状が 四角を再現するようにヘディングを調整する。

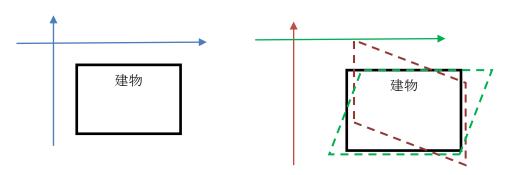


図-24 ヘディング調整で使用する飛行コースと断面表示:左図 飛行コース右図 建物の壁面をスライス表示

5)3次元解析による確認:

前工程のミスアライアメント調整は、断面による2次元的な評価であり、局所的な部分の

みを評価している可能性がある。そこで、点群全体の評価するために、点群を用いた解析から点群の較差の量と傾向を 3 次元的に確認する。ドローンレーザ測量で取得される点群には、標高方向に向いた面が多く認められる。この特性を生かした点群の品質評価手法である不規則 3 角形網(TIN: Triangulated Irregular Network)を用いた確認を行う。この確認では、2 つの飛行コースで取得された点群を用いる。一つの点群に対し TIN を生成し、もう一つの点群と重ね合わせ、計測点ごとに TIN から標高方向の較差を算出する。この較差の空間分布と頻度分布から、キャリブレーション結果を確認する。較差の空間分布では、較差の偏りの有無を確認する。また較差の頻度分布では、4 機器性能から想定される計測誤差に収まるか否かを確認する。

(9) 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
土木学会中国支部発表論文集 (VI-10)	R1.6.1	土木学会	坂田達法 西山哲
土木学会中国支部発表論文集 (VIII-23)	R1.6.1	土木学会	加藤哲 鈴木義美 西山哲

(10) 成果による知的財産権の出願・取得状況 ※無い場合も項目は消さず「なし」と記載

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
無し				

(11) 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

本研究で開発した標定点無しの高精度測量は、低コストで人的労力を省く測量作業を実現するものであり、その成果は国土交通省近畿地方整備局における i-Construction のモデル事業への適用が検討されるに至った。具体的には、紀南河川国道事務所管内の国道 42 号すさみ串本道路有田上第二トンネル終点側坑口付近、同じく国道 42 号すさみ串本道路中平見トンネル終点側坑口あるいは国道 42 号すさみ串本道路宇の平見トンネル終点側坑口付近といった複数の現場への適用が検討されており、2019 年度には、これらの現場を対象にした本研究開発の成果に基づくドローン測量を実施する予定である。

さらに本研究開発の成果の普及と汎用化を図るため、一般社団法人ドローン測量教育研究機構と連携し、平成31年1月に東京、平成31年4月に福岡における講習会およびセミナーを実施した。そこでは複数のドローン測量に関係する技術を導入した民会会社がその効果を披露することで、新たに本技術の導入を決定した民間会社が現れ、具体的には、株式会社アミューズワンセル、深空株式会社、アイサンテクノロジー株式会社といったドローンメーカーが本成果を導入するに至った。2019年度は前述の国土交通省での現場への適用が開始されることで、本成果の実用化がさらに広まると考える。

(12) その他 無 し。