

北海道開発局における TEC-FORCE活動の高度化について

事業振興部 防災課 ○佐々木優太
三浦 之裕
五日市達也

南海トラフ巨大地震や首都直下地震をはじめ、大規模自然災害の発生が懸念される中、TEC-FORCEへの期待は高まっている。その一方で、派遣される隊員の負担は大きく、課題が存在する。北海道開発局では、その課題を解決するために、隊員が「早く・安全に・正確に・楽に」TEC-FORCE活動を実施できるよう、ドローン等のICT機器を導入している。

本論文は、そのICT機器の有効な活用法について検証を行い、その結果や課題について報告する。

キーワード：TEC-FORCE¹⁾、ドローン、ICT、活動の高度化

1. はじめに

我が国は、複雑な地殻構造の上に位置し、世界的に見ても地震の発生が多い国であり、頻繁に大きな被害をもたらす地震に見舞われてきた。ここ数十年以内に発生する可能性がある巨大地震として、道内においては日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震、道外では首都直下地震や南海トラフ巨大地震が想定されている。

日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震²⁾については、日本海溝モデルの場合、最大震度7、最大津波高は30 m弱と推計されている(図-1・2)。地震発生による被害想定は、冬季の発災を仮定すると、日本海溝モデルの場合、最大死者数は約19.9万人、経済的被害額は約31.3兆円、千島海溝モデルの場合、最大死者数は約10万人、経済的被害額は約16.7兆円に上るとみられている。

首都直下地震³⁾は、首都及びその周辺地域を直撃するM7クラスの地震と想定されており、中央防災会議ではその発生確率が30年以内に約70%と推定されている。地震発生による被害想定は、最大死者数が約1.1万人、経済的被害額は約95兆円に上るとみられている。

南海トラフ巨大地震⁴⁾は、南海トラフ沿い地域において、M8～M9の地震発生確率が30年以内に70～80%と推定されている。東海地方、近畿地方、四国地方及び九州地方が被災するものと想定されているが、特に東海地方が大きく被災するケースが最も甚大な被害を受けると想定されており、その被害想定は、最大死者数が約32.3万人、経済的被害額は約200兆円に上るとみられている。

これらの巨大地震等については、先述のとおり甚大な被害が想定されており、東日本大震災や熊本地震などと同様にTEC-FORCEの活躍が期待されている。その一方で、広大な北海道で大規模災害が発生した際には、限ら

れた職員で、広範囲の被災状況を把握する必要があり、より効率的な調査が要求される。これを受け北海道開発局では、巨大地震に対応できる体制づくりとして、少ない職員でかつ広範囲に調査が可能な無人航空機(以下、ドローン)や、写真撮影のみで任意の2点間距離が測定可能なステレオカメラなど、各種ICT技術の導入し、活動の高度化を図ることで、隊員の安全確保や負担軽減、さらには調査活動の効率化を推進するものとしている⁵⁾。

本論文は、その活用が期待されているドローンやステレオカメラ等のICT技術について、TEC-FORCE活動の各種制約の中で活用する上で生じる課題について検討するため、①ドローンを活用した各種検証、②ステレオカメラの測定精度に関する検証、③三次元点群復元処理ソフトの検証を行い、その結果や考察について報告する。

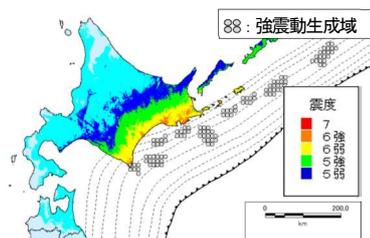


図-1 千島海溝モデルの推計震度分布(引用:内閣府)

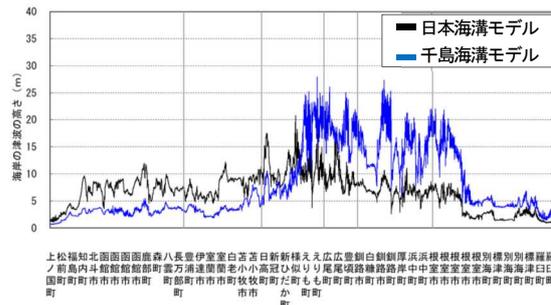


図-2 日本海溝・千島海溝沿いの推計津波高(引用:内閣府)

2. ドローンを活用した各種検証

(1) ドローンについて

TEC-FORCE活動において、被災地方公共団体等に手交する資料となっている調査報告書の様式については、被災箇所の平面図及び標準断面図を記載する必要がある。しかしながら、この作業は派遣職員が手書きもしくはExcelのオートシェイプ機能を用いてポンチ絵を描く必要があり、その作成に時間を要している状況である。

そこで近年、多分野で活用されているドローンを用い、上空から被災現場を空撮し、調査報告書のポンチ絵をドローンの空撮写真で代用することにより、ポンチ絵を描く手間を省力化し、隊員の負担軽減を図ることが可能になると考えられる。

また、調査報告書を作成するにあたり、被災延長、被災幅員、概算被害額等を算定する必要があるが、その上で、空撮写真から任意の2点間距離を求める作業が必要になることから、本章ではドローン画像から2点間距離を算出する方法について検証を行う。

なお、使用するドローンについては、令和2年度にTEC-FORCE派遣用として本局及び各部局に導入した、AUTEL Robotics製のEvoIIである。

(2) ドローンの空撮写真を活用した寸法の計測方法

空撮写真からの2点間距離の計測方法について、次の3手法(図-3)を検証するため、旭川市内で過去に災害復旧を行った現場(図-4)において、ドローンにて空撮を行った。本検証では、次式(1)により相対誤差を各手法において算出し、各手法の測定精度について検証を行うこととする。なお、ここで算定した計測値については、概算工事費算定のために使用するものであり、その最小単位は百万円である。よって本検証では、数%程度の相対誤差については許容されるものとして扱うこととする。

$$\text{相対誤差(\%)} = \frac{(\text{計測値} - \text{測量(実測)値})}{\text{測量(実測)値}} \times 100 \quad (1)$$

a) GPS情報の座標値を用いた計測

ドローンのGPS情報を用いることで、そのドローンの位置(X、Y、Z座標)を確認することができるため、この機能を活用して、検証箇所の延長を計測し、寸法計測の精度を検証する。検証にあたっては、検証箇所の延長起終点及び折れ点の直上において、ドローンにより画像撮影を行い、その撮影画像のExif情報に付与されるGPS情報を基に、2点間距離を算出する。その後、既往の測量図面と照合し、先述した方法で算出した延長の精度を検証する。

b) カメラセンサーサイズ・撮影高度等を用いた計測

カメラの焦点距離とセンサーサイズ及び撮影高度から、任意の2点間距離を計算により算出する方法について、その精度を検証する。算出は次の方法で行った。

① 撮影画像の縮尺1/Sを次式(2)により算出する。

$$1/S = \frac{H}{f} \quad (2)$$

ここで、 f : 焦点距離、 H : 撮影高度である。

② 次式(3)により、画素ピッチ Δp を算出する。

$$\Delta p = \sqrt{\frac{w \cdot h}{\Sigma p}} \quad (3)$$

ここで、 Σp : 総画素数、 w : センサーの幅、 h : センサーの高さである。

③ PCのペイントソフトで2点間距離を求めたい画像を開き、各点のピクセル座標を求める。

④ ③のピクセル座標を用い、次式(4)より2点間距離 d を算出する。

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4)$$

⑤ ④で算出した2点間距離 d に画素ピッチ Δp を掛け、単位をpixelからmmに変換する。

⑥ ⑤で算出した値に、①で求めた縮尺1/Sを掛けることによって、実際の2点間距離を算出する。

c) 測量テープを用いた縮尺設定による計測

地面にあらかじめ設置しておいた測量テープ(図-5)と一緒に空撮を行い、測量テープから縮尺を算出し、任意の2点間距離を算出する。算出は次の方法で行った。

① PCのペイントソフトで測量テープの写った空撮画像を開き、測量テープの両端のピクセル座標を求める。

② 式(4)により、測量テープの両端の2点間距離 d_1 を求める。

③ 求めたい2点も同様にピクセル座標を求め、式(4)により2点間距離 d_2 を求める。

④ 使用した測量テープの実際の長さを、2点間距離 d_1 で割り、1ピクセルあたりの長さを算出する。

⑤ 求めたい2点間距離 d_2 に、④の1ピクセルあたりの長さを掛け、実際の2点間距離を算出する。



図-3 寸法の各種計測方法



図-4 検証箇所



図-5 測量テープ設置状況

(3) 各計測方法による測定結果及びその精度

a) GPS情報の座標値を用いた計測

座標値を用いた計測について、国土地理院の測量計算サイトに公開されている「距離と方位角の計算」を用いて、2点間距離を算出した。表-1の結果より、計測値と測量値との相対誤差が7.8%であったことから、被災延長や幅員を算出する上で、本手法が有効であるといえる。特に本手法は、現場に大量の土砂が堆積している現場や被災箇所の大部分がえぐられている現場など、起点から終点までの移動が困難な場所等において、安全確保の観点から、非常に有効な方法と考えられる。

b) カメラセンサーサイズ・撮影高度等を用いた計測

前節b)の方法により、2点間距離を算出する。表-2の結果より、本手法を用いた場合の相対誤差は1%未満であり、非常に良好な測定精度を得ることができた。以上のことから本手法についても、GPS情報の座標値を用いた手法と同様に、有効な手法であるといえる。なお本手法を用いる場合の画像は、真俯瞰からの撮影が、測定精度の観点から望ましいと考えられる。

c) 測量テープを用いた縮尺設定による計測

前節c)の方法により、2点間距離を算出した。表-3の結果より、相対誤差は-7.1%と算出され、比較的精度良く2点間距離を計測できた。以上より、先述の2つの手法同様に有効な手法であることが確認された。

表-1 座標値を用いた計測結果

No	場所	Exif情報		距離
		X座標	Y座標	
1	起点	434258.57	1424025.09	61.53m
2	折点	434258.69	1424027.84	
3	終点	434259.01	1424029.01	27.94m
計測値				89.47m
測量値 (No.1~3)				83.00m
相対誤差				7.8%

表-2 カメラセンサーサイズ等を用いた計測結果

焦点距離 f	5mm
撮影高度 H	70m
縮尺 S	1:14000
総画素数 Σp	1200万画素
センサーの幅 w × センサーの高さ h	64mm × 4.8mm
画素ピッチ Δp	0.0016mm
2点間距離 d	5.899mm
計測値	82.59m
測量値 (No.1~3)	83.00m
相対誤差	-0.5%

表-3 測量テープを用いた計測結果

No	場所	ピクセル座標		2点間距離 d_t	実際の距離
1	起点	509 px	2117 px	1843 px	49.66 m
2	折点	2349 px	2229 px		
3	終点	3341 px	1997 px	1019 px	27.44 m
計測値				77.10m	
測量値 (No.1~3)				83.00m	
相対誤差				-7.1%	

3. ステレオカメラの測定精度に関する検証

(1) ステレオカメラについて

ステレオカメラは、三脚上に固定された2台のカメラで被写体を撮影することで、その視差から三角測量の原理を用いて、撮影された写真の任意の2点間距離などを計測できる装置である(表-4・図-6)。撮影した写真は、専用の解析ソフト「ジオショット3D」を用いることで、三次元データを持たせた画像を作成でき、任意の2点間距離を計測できる。この機能をTEC-FORCE活動に活用することで、現場における作業は、ステレオカメラによる画像撮影と、北海道開発局応援対策本部などの道内の解析可能なPCへの画像転送のみとなるため、隊員の負担軽減に繋がる。

本章では、TEC-FORCE活動において、ステレオカメラが有効的に活用できるか検証するため、「対象物・カメラ間の離隔距離による測定精度の関係」について検証を行う。また、携行品のスリム化を図る観点から、三脚を用いずに本装置のみで計測できることが理想であるため、図-7のようにステレオカメラを手持ちした際の、「手持ち撮影における測定精度の関係」について検証を行うこととする。

(2) 対象物・カメラ間の離隔距離による測定精度の関係

a) 検証内容及び方法

ステレオカメラのメーカーが保証している精度は、カメラから5~15mまでの垂直水平方向の標準偏差が4cm以内とされている。しかしながら、被災現場によっては、現場近くまで近寄ることが困難であったり、被災規模が大きく、15m以上離れなければ1枚の写真に収まらないことも考えられる。以上のことから、このステレオカメラにおける有効性を検証するため、図-8のようにカメラ~対象物間の離隔距離を変化させ、その距離と精度の関係性について検証を行う。検証は、次の手順で実施した。

- ① 実測値がわかっている橋脚を対象物とし、橋脚から10m、20m、30m、50m、100mのそれぞれ離れた地点を、巻き尺等を用いて実測する。
- ② 測定した5地点にステレオカメラをそれぞれ据付け、橋脚の画像を1~2枚撮影する。
- ③ 撮影後、専用の解析ソフトである「ジオショット3D」を用い、5地点それぞれから撮影した画像を用いて、橋脚の高さ及び幅を測定する。なお、誤差の影響を小さくするため、高さ、幅の測定は1画像につき3断面計測し、その平均値を採用することとする。また、同じ地点で写真を2枚撮影している場合は、それぞれの写真で測定作業を行い、その平均値を採用する。測定を行う橋脚の箇所は図-8のとおりであり、実測値は高さ $H=3,800$ mm、幅 $W=2,640$ mmである。
- ④ 実測値を真の値と考え、③により測定された値

表-4 使用するステレオカメラの仕様

機器(カメラ名)		RICOH G800
有効画素数		約1,600万画素
ステレオ 撮影モード	ズーム位置	広角端(35mm換算値28mm)
	フォーカス	∞(無限遠)
質量		ステレオ撮影時: 約1.2kg



図-6 ステレオカメラ全景



図-7 手持ちでの撮影状況



図-8 撮影位置のイメージと橋脚実測値

と、実測値を比較することにより、測定値と実測値との相対誤差を計算し、対象物からの離隔距離と測定精度の関係を算出する。

b) 検証結果

5地点におけるステレオカメラによる測定値の結果及び実測値との比較について、図-9に示す。結果より、離隔距離30 mの幅方向の測定において、測定値が実測値よりも約400 mm大きく算出されているが、離隔距離50 mまでは、高さ・幅方向ともに概ね良好な測定結果が得られた。一方、離隔距離100 mでは、高さ・幅方向ともに著しく測定精度が低くなっていることから、ステレオカメラの使用できる範囲は、離隔距離50 mまでと考えられる。

次に、各離隔距離におけるデータのばらつきを確認するため、標準偏差 σ を算出した。図-10より、離隔距離50 mの幅方向及び離隔距離100 mを除き、離隔距離に比例し、標準偏差 σ が大きくなる傾向にある。よって、対象物からの離隔距離が大きくなるにつれ、測定値のばらつきも増大することがわかる。

続いて、各離隔距離における相対誤差の平均値を算出した。図-11の結果より、離隔距離50 mまでは、相対誤差20%以下を推移しているが、離隔距離100 mに達すると、相対誤差は高さ・幅方向ともに50%を超えることがわかる。この結果の要因として、解析ソフトの「ジオショット3D」の解析可能最大距離が、50 mまでであるためと考えられる。また、離隔距離と相対誤差との関係性について確認するため、決定係数 R^2 を算出した。なお、離隔距離100 mより著しく相対誤差が増大していることを鑑み、近似曲線は指数近似とした。その結果、幅方向では決定係数 R^2 が0.5193とやや低い数値となったが、高さ方向では決定係数 R^2 が0.9635と高い関係性が得られた。

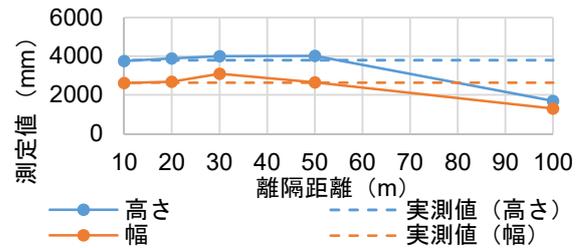


図-9 各離隔距離における測定値平均と実測値 (三脚据付時)

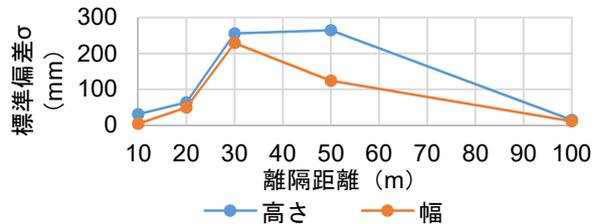


図-10 各離隔距離における標準偏差 σ (三脚据付時)

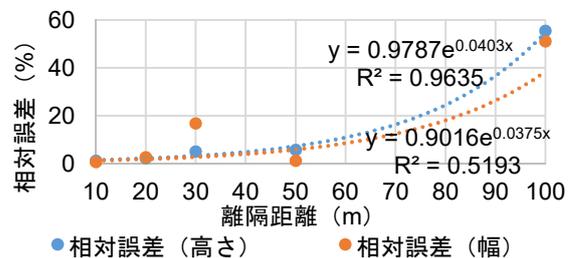


図-11 各離隔距離と相対誤差との関係性 (三脚据付時)

(3) 手持ち撮影における測定精度の関係

a) 検証内容及び方法

ステレオカメラは精度向上のために、三脚にセットして使用することがメーカーにより推奨されている。しかしながらTEC-FORCE活動においては、先述の通り、隊員の負担軽減のため、荷物は極力減らすことが望ましい。以上より本検証では、三脚を使用せず、図-7のように手持ちによりステレオカメラでの撮影を行い、測定精度について検証を行った。なお検証方法は、手持ちによる撮影を除いて、(2) a)に記載されている方法と同様である。

b) 検証結果

三脚据付時と同様に、5地点におけるステレオカメラによる測定値 (3~6個のデータの平均値) の結果及び実測値を比較した。図-12の結果より、離隔距離50 mまでの範囲においては、離隔距離50 mの高さ方向で測定値が実測値よりも約950 mm大きく算出されたが、それ以外では比較的良好な測定結果が得られた。なお、三脚据付時と同様に、離隔距離100 mでは高さ・幅方向ともに著しく測定精度が低くなることも確認された。

また三脚据付時と同様に、各離隔距離における標準偏差 σ を算出した。図-13の結果より、離隔距離30~50 mの高さ方向において標準偏差 σ が大きくなっている。またこの区間の高さ方向では、三脚据付時と比較して、手持ち撮影時の方が標準偏差 σ が大きい。このことから、離隔距離や測定する対象物によっては、手持ち撮影の方が測定データがばらつきやすいことが確認された。

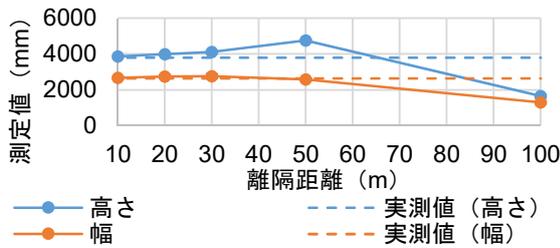


図-12 各離隔距離における測定値平均と実測値 (手持ち時)

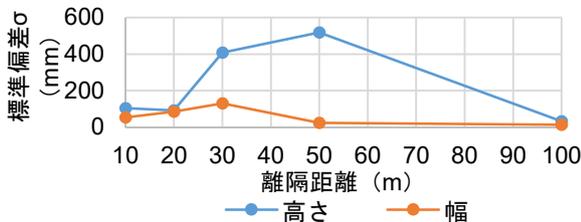


図-13 各離隔距離における標準偏差σ (手持ち時)

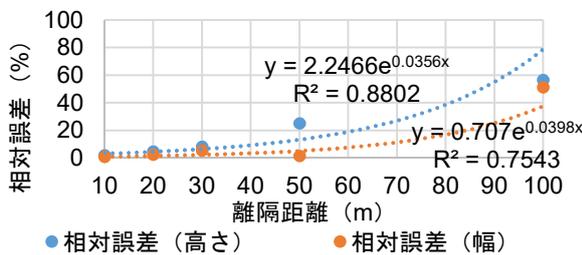


図-14 各離隔距離と相対誤差との関係性 (手持ち時)

さらに離隔距離と相対誤差との関係性について、図-14の結果より、手持ち撮影時においても、相対誤差は離隔距離に比例して大きくなっていることが確認された。また、指数近似によって決定係数 R^2 を算出したところ、高さ・幅方向ともに0.7~0.9程度であり、比較的高い関係性が得られた。

(4) 三脚据付時と手持ち撮影時における比較

a) 検証内容及び方法

三脚据付時と手持ち撮影時の相対誤差について、両者間で比較を行い、測定精度に有意な差があるかについて、統計的手法である2標本t検定による有意差の判定を行う。

2標本t検定とは、2つの母集団から抽出した標本の平均値に差があるかどうかを検定する手法である。本検証では、測定結果は正規分布である仮定の下、離隔距離30m及び50mにおける三脚据付時・手持ち撮影時の相対誤差を用いて、表-5の条件にて2標本t検定を行った。

b) 検証結果

2標本t検定を行った結果について表-6に示す。この結果より、離隔距離30m、50mともにt値の絶対値がt境界値より小さく、棄却域に含まれていないため、帰無仮説は棄却されない。つまり、「三脚据付時の相対誤差と手持ち撮影時の相対誤差との間に差はない」ことがいえる。

以上より、ステレオカメラを手持ちにより撮影を行っても、三脚据付時と精度に差がないことが明らかとなったため、ステレオカメラを使用する場合、三脚を持参し

表-5 2標本t検定での設定条件

帰無仮説	三脚据付時の相対誤差と手持ち撮影時の相対誤差との間に差はない
対立仮説	三脚据付時の相対誤差と手持ち撮影時の相対誤差との間に差がある
有意水準	$\alpha = 0.05$
計算ツール	Excelデータ分析：等分散を仮定した2標本による検定

表-6 2標本t検定 結果

	離隔距離30m	離隔距離50m
t値	1.210223	-1.77396
t境界値	2.073873	

なくても、実際のTEC-FORCE活動において使用可能であることが確認された。

4. 三次元点群復元処理ソフト (SfMソフト) の検証

(1) 三次元点群復元処理ソフトについて

三次元点群復元処理ソフト (SfMソフト) については、現在、測量分野で広く活用されているが、TEC-FORCE活動の被災状況調査についても、被災状況の簡易的な測量が必要であることから、三次元点群処理技術の導入が期待されている。

三次元点群データに復元するためには、復元したい被写体をドローン等により空撮する必要がある。しかしながら、処理ソフトの解説書によれば、「ラップ率を75%以上にして撮影すること」「斜面を復元したい場合は、その斜面とドローンとの対地高度を一定にして撮影すること」等のドローンの高度な操縦技術を要求する記載があり、TEC-FORCE活動においては現実的ではないと考えられる。よって本検証では、ドローンの容易な操縦及び撮影方法による三次元点群データへの復元性について検証を行った。また、防災ヘリから撮影した動画を用いた際の三次元点群データへの復元性についても検証を行った。

(2) 三次元点群復元処理方法

a) 空撮方法

本検証では、2章での検証と同様の箇所の法面において、ドローンでインターバルによる真俯瞰撮影 (図-15) と、斜め方向からの撮影 (図-16) を行った。なお各画像のExif情報にはGPS位置情報が付与されている。

b) 三次元点群処理

本検証ではSfMソフトとして、PIX4D社のPix4Dmapperを用いた。また、写真枚数による処理時間及び復元性を比較するため、次の2パターンにて処理を行った。

- ・ 検証①：真俯瞰3枚+斜め1枚の計4枚にて処理
- ・ 検証②：全画像 (57枚) 使用

処理に使用したPCのスペックの概要を表-7に、SfMソフトの各種設定及び処理時間を表-8に示す。

表-7 使用したPCの仕様（概要）

CPU	インテル Core i7-8565Uプロセッサ (動作周波数1.80GHz、最大4.60GHz)
メインメモリ	8GB LPDDR3 SDRAM
ビデオメモリ	最大4130MB (メインメモリーと共用)

表-8 SfMソフトの各種設定内容（ドローン画像）

	検証①	検証②
画像枚数	4	57
処理設定	標準3Dモデル (品質：高い、処理：遅い)	
SfM解析時間	1分	28分

表-9 三次元点群データの再現性

	検証①	検証②
解析値	13.27m	12.68m
測量値	12.30m	
相対誤差	7.9%	3.1%



図-15 真俯瞰による撮影



図-16 斜め方向からの撮影



図-17 検証①による復元結果



図-18 検証②による復元結果

(3) 復元結果

復元結果について、図-17及び図-18に示す。結果より、解析に使用した画像枚数が多い検証②のデータの方が、復元結果は欠損もなく精細であるが、画像枚数4枚の検証①のデータにおいても、データ欠損は多いものの、地形の起伏はよく再現されており、復元性は良好であった。特に、検証①の処理時間は1分と非常に短く、迅速性の求められるTEC-FORCE活動において、有用であると考えられる。

次に、復元データ上で1断面の法長を算出し、実際の測量値と比較した。表-9の結果より、検証②の方が相対誤差は小さいが、検証①においても相対誤差は7.9%であり、両者で比較的高い再現性が確認された。

(4) 防災ヘリからの動画を用いた三次元点群復元処理

a) 解析方法

Pix4Dmapperには、動画を自動で任意のフレーム数に切り出す機能がある。本節ではこの機能を活用し、防災ヘリから撮影した動画を活用して、三次元点群データに復元可能か否かを検証する。表-10にSfMソフトの設定及び処理時間を、図-19に切り出したフレームのうちの1画像を示す。

表-10 SfMソフトの各種設定内容（ヘリ画像）

動画時間/容量	2分13秒/340MB
切り出したフレーム数	100
処理設定	標準3Dモデル(品質：高い、処理：遅い)
SfM解析時間	12分



図-19 切り出された画像

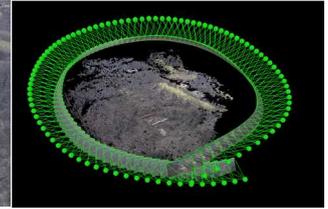


図-20 動画からの復元結果

b) 復元結果

上記方法により復元された三次元点群データについて、図-20に示す。結果より、動画データからでも三次元点群データに復元可能であったが、動画から切り出された画像は画素数が小さく、精細度はドローン画像に比べて、やや低くなった。また動画ファイルには位置情報が付与されておらず、復元された三次元点群データには縮尺が与えられていない。そのため、今後は、ヘリコプター内から位置情報を含む画像を撮影し、そのExif情報より縮尺設定を補完する方法について、検討する必要がある。

5. まとめ・今後の課題

本稿では、TEC-FORCE活動高度化のため、ICT機器の活用可能性について検討を行った。その結果、①ドローン空撮画像を用いた2点間距離の計測方法、②ステレオカメラの測定精度及び撮影方法、③三次元点群処理ソフトの再現性及びその有用性について明らかにした。

今後も引き続き、TEC-FORCEにおけるICT技術の活用可能性について検討や検証を行うことに加え、各種ICT機器がどのような災害種別に適しているかなど、具体的な活用方法について検討することにより活動の高度化を図り、隊員の安全確保や負担軽減を推進したい。

参考文献

- 1) 国交省水管理・国土保全局：TEC-FORCE（緊急災害対策派遣隊）、<https://www.mlit.go.jp/river/bousai/pch-tec/index.html>
- 2) 内閣府：日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震対策検討ワーキンググループ
http://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaiko_chishima/WG/
- 3) 内閣府：首都直下地震対策検討ワーキンググループ
http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/
- 4) 内閣府：南海トラフ地震対策
<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/>
- 5) 三村北斗、西塚岳浩、末吉拓磨：TEC-FORCE活動における高度化について、第63回北海道開発技術研究発表会論文、pp.625-629、2020.