

# UAV を用いたトンネル地表面のリモートセンシングにおける プロセス自動化・データ活用高度化の試行

## A Trial of Process Automation and Advanced Data Utilization in Remote Sensing on the Tunnel Ground Surface Using UAV

勝部 峻太郎 <sup>*1</sup> Shuntarou Katsube	松田 浩朗 <sup>*1</sup> Hiroaki Matsuda	藤本 克郎 <sup>*2</sup> Katsuroou Fujimoto
古宮 正勝 <sup>*3</sup> Masakatsu Komiya	武田 光汰 <sup>*3</sup> Kouta Takeda	貴島 康二 <sup>*4</sup> Kouji Kijima
及川 典生 <sup>*5</sup> Norio Oikawa	高橋 元気 <sup>*5</sup> Genki Takahashi	佐藤 匠 <sup>*5</sup> Takumi Satou

### 【要旨】

UAV による空撮とそのデータ利用においては、空撮の労力や航空法などの法規制、データ連携の困難さ等によりプロセス全体が非効率であり、日々の施工管理や監視・巡視といった高頻度な活用が困難であった。

そこで筆者らは、遠隔・無人運用可能な全自動 UAV の採用と UAV のレベル 3 飛行の承認取得による画像データ取得の自動化を試行した。同時に、LTE 通信モジュール搭載の UAV の採用と API を活用したシステム連携・システム構築により、取得データの通信・蓄積・分析・可視化の自動化を試行した。その結果、UAV によるトンネル地表面の観察・計測におけるプロセス自動化および、生成した 3D モデルに基づく地表面変位の面的評価や GNSS 計測結果との融合表示といったデータ活用高度化を実現した。

【キーワード】 UAV レベル 3 飛行 API SfM GNSS

### 1. はじめに

日本の建設業は、就業者数の減少と高齢化の進行による担い手不足や、長時間労働や過酷な労働環境といった問題に直面している<sup>1)</sup>。また労働生産性は他産業に比べて数十年にわたり低い状態が続いている<sup>2)</sup>。そのような中、国土交通省は 2025 年までに生産性を 2 割向上させる i-Construction 施策を打ち出しており、リモートセンシング手法としての UAV への注目が高まっている<sup>3)</sup>。

UAV は、建設現場やインフラ構造物といった広域・大規模・高低差がある計測対象に対して、3 次元方向に自在に移動し、搭載カメラによって広域あるいは近接画像の取得が可能な技術である。UAV の活用により、いわゆる 4D 労働 (dull: 退屈, dirty: 汚い, distant: 遠い, dangerous: 危険) を代替でき<sup>4)</sup>、従来手法と比較して短時間・低コスト・低リスクでデータを収集できる<sup>5)</sup>ことから、建設・測量・点検分野における UAV の活用は増加しており<sup>6)</sup>、今後さらなる増加が見込まれている<sup>7)</sup>。

本報では、当社が施工するトンネル工事において、UAV を用いたトンネル地表面センシングの一連のフローを自動化・高度化することによる生産性向上の取り組み結果

について報告する。

### 2. UAV センシングにおける課題と解決方法

施工管理における観察・計測の目的は、当初の設計・施工方法を適切に修正し、工事の安全性と経済性を図ることである<sup>8)</sup>。データセンシングは、図-1 に示したように計測・通信・蓄積・分析・可視化のフローからなる。可視化された情報は人間が解釈し判断を行うものであるから、センシングにおいて「工事に関する重要な情報を自

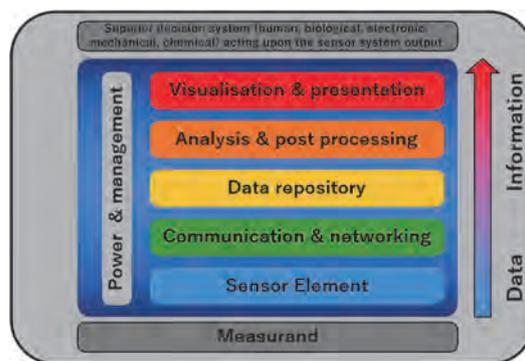


図-1 センサシステムの 5 層スタックモデル  
(参考文献<sup>9)</sup> を基に作成)

1. 技術研究所 研究開発 G 2. 土木本部 土木 FSC 3. 名古屋支店 坂部トンネル作業所 4. KDDI スマートドローン株式会社 5. 国際航業株式会社

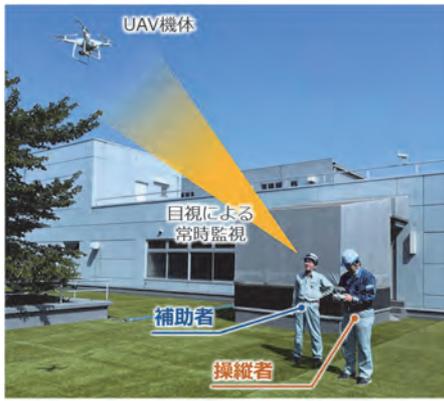


図-2 UAV空撮における操縦者と補助者

動的にユーザに提示する」までの一連のプロセスを自動化することができれば、プロセス全体の効率化に繋がり、生産性向上に資する<sup>10)</sup>。

ここで、UAVをIoTセンサと捉えたとき、センシングのプロセス自動化に関して以下2つの課題により、プロセス全体の効率化が困難であった。

①データ取得（計測）の自動化に関する課題: UAVによる空撮においては、航空法の規制により図-2に示すように操縦者および補助者の2名以上の配置が必要になるほか、空撮地点への移動・輸送、バッテリー充電といった保守作業などの労力を要し、自動化が困難であった。

②取得データの通信・蓄積・分析・可視化の自動化に関する課題: 空撮データの取り出しやクラウドストレージへのアップロードを手動で行っており、労力を要する。また、複数システム間のデータ連携ができない場合、蓄積されたデータの分析・可視化の自動化が困難であった。

以上の課題によりセンシングにおける労力が大きいことから、現状、UAVは現場写真の空撮や出来形検査における測量といった低頻度な活用に留まっており、日々の施工管理や監視・巡視といった高頻度な活用は困難であった。

そこで筆者らは、上記課題に対して、以下5つの方法に



図-4 現場位置図

よるUAVセンシングのプロセス自動化を試みた。

課題①の解決方法:

- ①-1. 自律飛行可能なUAV機体と建設現場内に常設可能なドローンポートからなる全自動UAVの遠隔・無人運用
- ①-2. UAVのレベル3飛行（無人地帯における補助者なし目視外飛行）の承認取得

課題②の解決方法:

- ②-1. LTE通信モジュールを搭載したUAVの採用（①-1と同一のUAV機体）による取得データのクラウドストレージへの自動アップロード
  - ②-2. API（Application Programming Interface: プログラムの機能を外部から利用できるようにするインタフェース）による複数システム間のデータ連携
  - ②-3. 専用システム開発によるデータ活用
- これらの方法をまとめ図-3に示す。

### 3. 工事概要

令和2年度北勢BP坂部トンネル工事（発注者：国土交通省中部地方整備局）（図-4）において、UAVによるトンネル地表面センシングのプロセス自動化およびデータ活用高度化を試行した。本工事は、トンネル直上に営業

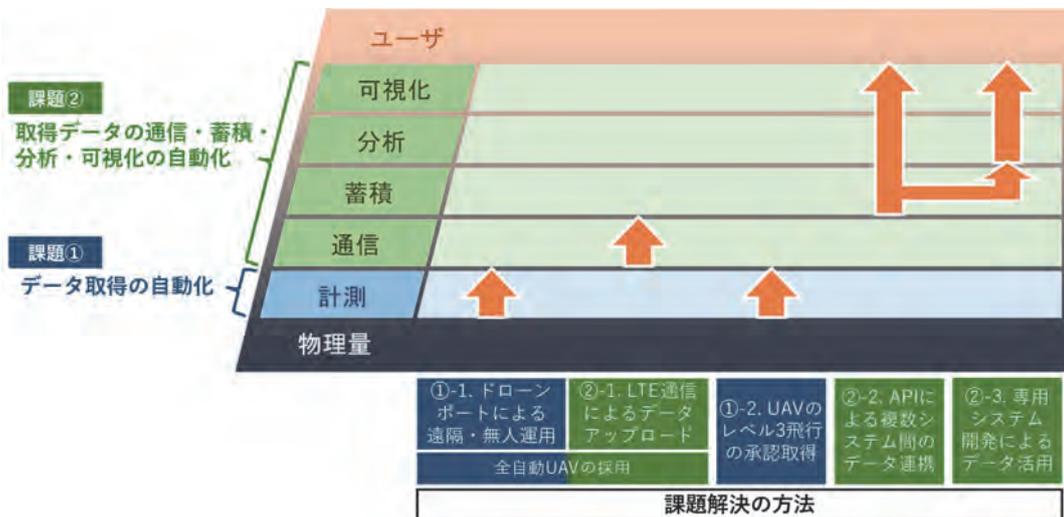


図-3 UAVセンシングにおける課題と解決方法

中のゴルフ場があり、かつ脆弱な未固結地山を最小土被り約3mで掘削する、厳しい条件下の工事である。本工事では、トンネル掘削に伴いトンネル直上地表面の変状が懸念されることから、地表面沈下対策の一つとしてパイプルーフ工法が採用されている。また、ゴルフ場の営業に支障がないよう、地表部にGNSSアンテナを埋設したGNSS地表面自動変位計測を採用し、安全性を確保しながら施工を行っている<sup>11)</sup>。

#### 4. UAVによる空撮方法

トンネル直上のゴルフコース地表面（フェアウェイ・ラフ等の植生被覆地）を対象に、空撮写真に基づく観察・計測を目的とする、UAVによる空撮方法について述べる。

トンネル平面図、空撮範囲および対空標識設置状況を図-5に示す。空撮範囲は、トンネル掘削の影響範囲（トンネル底面から45°立ち上がった範囲）を内包する100m×60mの範囲とした。空撮パラメータを表-1に示す。

また、後述する基準点座標取得自動化を目的として、図-6に示すように、GNSS地表面自動変位計測に使用している埋設型GNSSアンテナの柵ふた上部を塗色したうえで、対空標識としての活用を試行した。本計測システムでは、水平方向±1.0mm、鉛直方向±1.5mmの精度で3次元変位が計測可能であり<sup>12)</sup>、計測データはインターネットを通じて配信されるため、柵ふた上部の対空標識の測量値とGNSS計測値との3次元方向のオフセットを予め把握しておくことで、対空標識のTS測量を省略可能とした。

#### 5. 全自動 UAV のレベル3 飛行によるデータ取得の自動化試行

##### 5.1. 全自動UAVの遠隔・無人運用

図-7に示す自律飛行・自動離着陸・自動充電可能な全自動UAVを採用した。本UAV機体は現場内に設置したドローンポート内に格納・充電されており、事前に設定した3Dフライトルートに沿って自動で飛行・空撮を行い、着陸後に自動充電を行う。これにより、前述の配置人員・作業を削減可能とした。

##### 5.2. UAV離着陸地点の気象把握

全自動UAVの遠隔・無人運用においては、UAV離着陸地点の気象を詳細かつリアルタイムに把握することが安全上重要である。本試行においては、図-8に示したように、ドローンポート背後にIoT風向風速計、IoT雨量計およびネットワークカメラ、防音ハウス屋根部（地上17m）にIoT風向風速計および吹き流しを設置することで、遠隔でのUAV離着陸地点の地上・上空の気象の把握を可能とした。取得した映像データおよび気象データは、専用アプリ上で一元的・リアルタイムに表示される（図-9）。

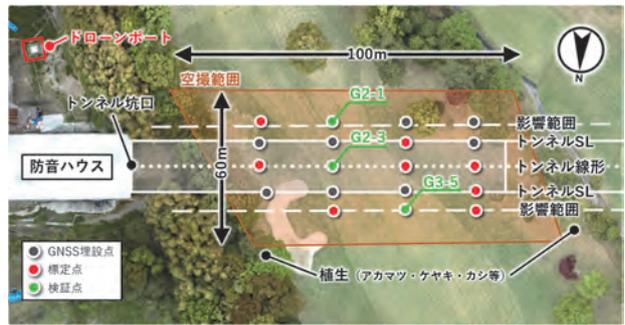


図-5 トンネル平面図、空撮範囲および対空標識設置状況

表-1 空撮パラメータ

対地高度	25m
地上解像度	8mm/pix
ラップ率	OL80% × SL80%
写真枚数	92枚



図-6 GNSS 柵ふた上部の塗色状況



図-7 採用した全自動 UAV

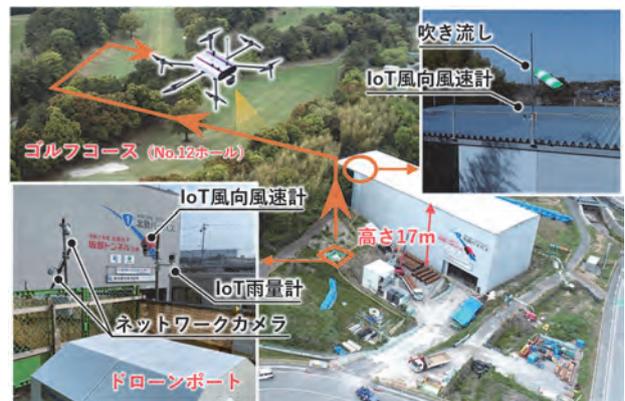


図-8 UAV 離着陸地点の気象観測状況

風速・雨量が閾値以上であれば、画面に警告表示する仕様としている（図-10）。これらにより、現場事務所など遠隔地から、UAV離着陸地点の地上・上空の気象の把握と、それらに基づくフライト可否の判断を可能とした。

### 5.3. UAVのレベル3飛行

本検証においては、第三者の立入管理方法やフライトエリアを大阪航空局へ申請し、UAVのレベル3飛行（無人地帯における補助者なし目視外飛行）の承認を受けている。これにより、現地に人員を配置することなく全自動UAVの運用を可能とした。



図-9 専用アプリによるUAV離着陸地点のモニタリング状況

## 6. 取得データの通信・蓄積・分析・可視化の自動化試行

### 6.1. 取得データのクラウドストレージへの自動アップロード

本UAV機体は、搭載したLTE通信モジュールにより、着陸後、KDDIスマートドローン株式会社が提供する「KDDIスマートドローンプラットフォーム」上へ取得した空撮データの自動アップロードを行う。これにより、空撮データの通信および蓄積の自動化を可能とした。



図-10 専用アプリ上での警告表示の例

### 6.2. APIによる複数システム間のデータ連携

試行システムのアーキテクチャを図-11に示す。専

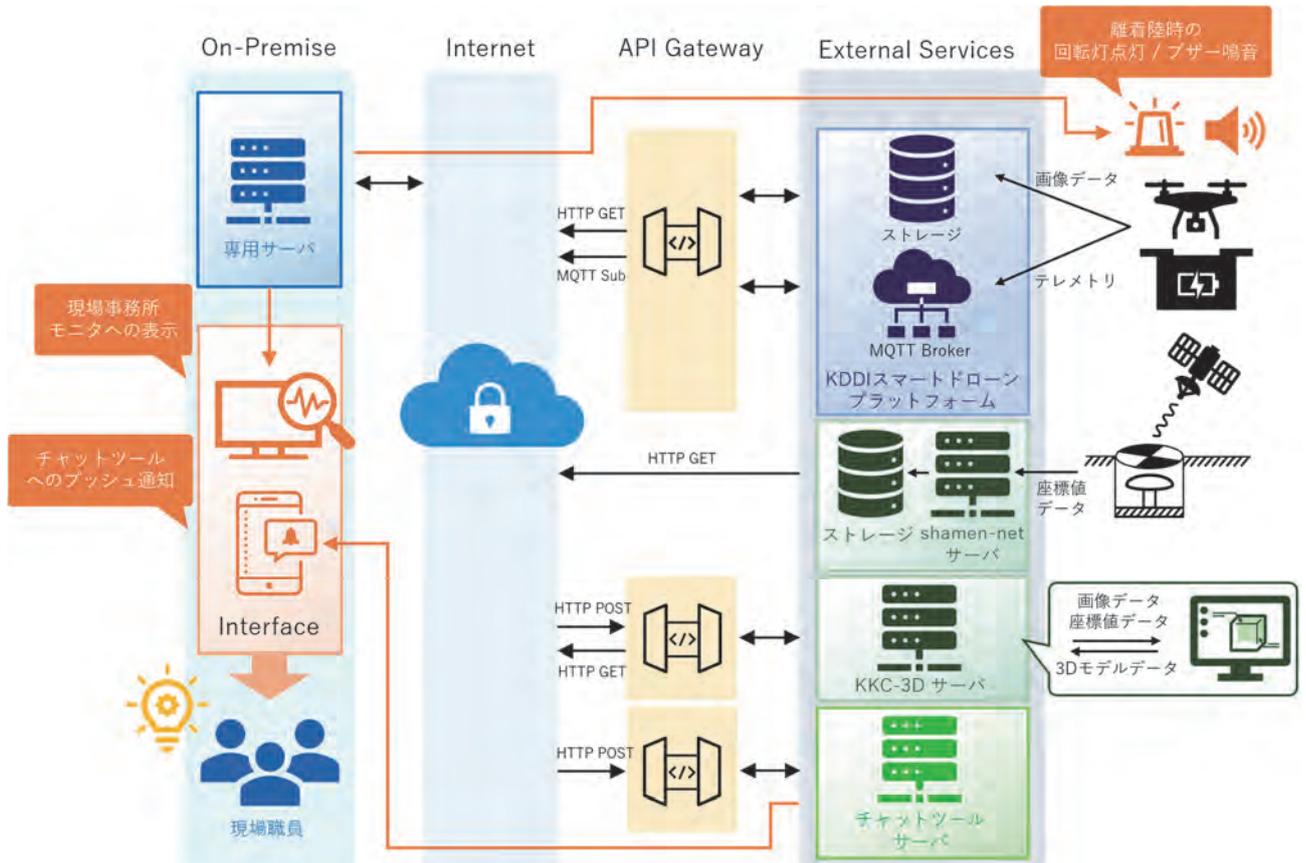


図-11 試行システムのアーキテクチャ

用サーバを基点に、API による複数システム間のデータ連携を可能とした。なお、データ受信方法については、画像データ、座標値データといったリアルタイムに取得する必要がないデータはプル型配信（HTTP 通信による GET リクエスト）、リアルタイムに取得する必要があるテレメトリ（位置・姿勢・LTE 通信品質・バッテリー残量などの機体情報）はプッシュ型配信（MQTT 通信による Subscribe）となる。

以下、各システム間のデータ連携について示す。

### 6.2.1. API による画像データおよびテレメトリ取得の自動化

KDDI スマートドローンプラットフォームから、空撮後にアップロードされた画像データおよびテレメトリの自動取得を行う。画像データは専用サーバ内に保存される。

### 6.2.2. API による基準点座標取得の自動化

国際航業株式会社が提供する GNSS 自動変位計測サービス「shamen-net」のストレージから、GNSS 計測データの自動取得を行う。本データは専用サーバ内に保存される。本データを UAV 測量の SfM 解析における基準点座標として利用する際には、あらかじめ把握しておいた樹ふた上部の対空標識の測量値と GNSS 計測値との 3 次元方向のオフセットを加算する。

### 6.2.3. API による SfM 解析処理の自動化

国際航業株式会社が提供する 3 次元空間解析クラウド

表-2 インタフェースの違いを考慮した画像提示方法  
(参考文献<sup>13)-15</sup>)を基に作成)

画像表示デバイス	55インチモニター	スマートフォン
画像の表示形式	一覧	個別
画像の閲覧人数	複数人	一人
デバイスの場所	事務所など拠点に設置	各職員が所持
操作性	△	○
画像の表示アプリケーション	専用デスクトップアプリ	チャットツール



図-12 オルソマップ上への各画像データ撮影時の機体位置および方位角の描画

サービス「KKC-3D」へ、6-2-1 および 6-2-2 で取得した画像データおよび基準点座標データを自動送信し、SfM (Structure from Motion: 異なる視点の 2 次元画像から対象の 3 次元形状を再現する手法) 解析を行う。解析完了後、生成された 3D モデルを自動取得する。

## 6.3. 専用システム構築によるデータ活用

### 6.3.1. 画像データの提示

専用システムを構築し、2 種類のデバイス（55 インチモニター、スマートフォン）により画像データの表示を行った。なお、表-2 に示すように、各デバイスのインタフェースの違いを考慮し、それぞれ専用デスクトップアプリおよびチャットツールにて、現場職員へ画像を提示する仕組みとした。

図-12 に示すように、専用サーバ内に保存された空撮画像のデータセットの中から、複数設定された重点監視地点に最近傍の画像データを抽出し、オルソマップ上に各画像データ撮影時の機体位置および方位角を描画する機能を開発した。本オルソマップは、各重点監視地点の画像データとともに、専用デスクトップアプリ上およびチャットツール上で閲覧可能である。なお、本試行においては、UAV 搭載カメラをチルト角-80°（カメラ角度を水平方向から下向き 80°）で固定とし、現在の切羽位置（図-12 の①）およびトンネル線形直上の GNSS 計測点 G1-3~G4-3（それぞれ図-12 の②-⑤）の計 5 地点を重点監視地点として設定している。

図-13 に示すように、専用デスクトップアプリ上で

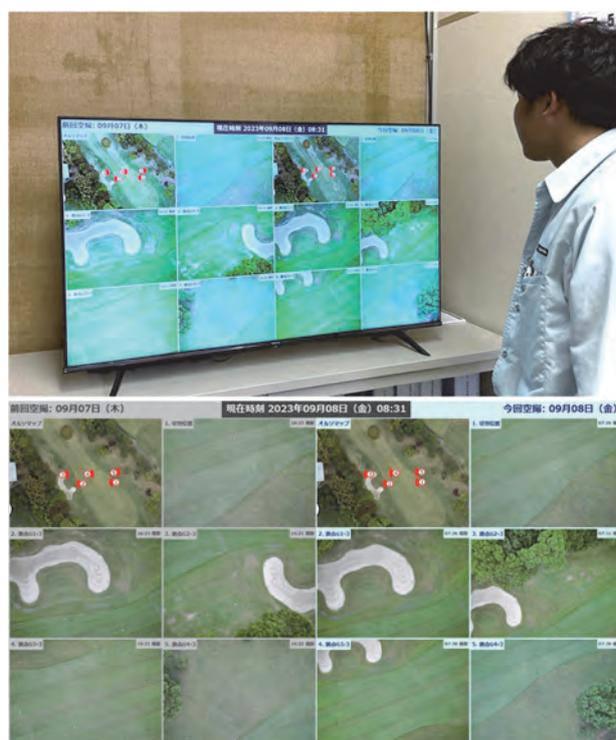


図-13 専用デスクトップアプリ上での空撮画像の一覧表示

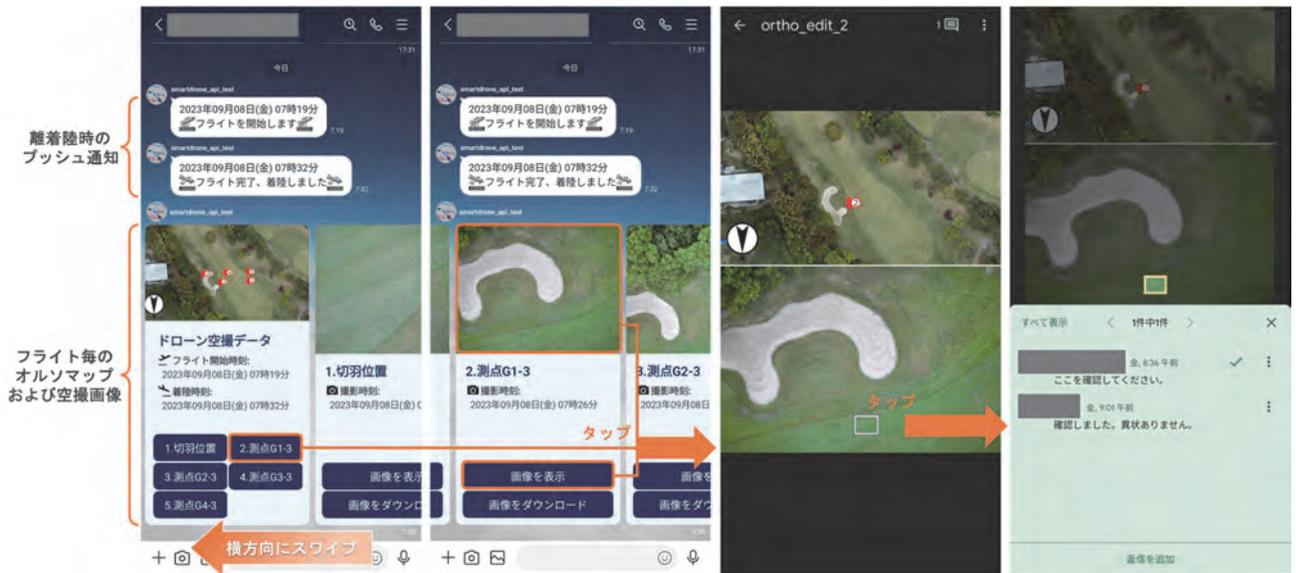


図-14 チャットツール上での空撮画像の個別表示およびコメント追加



図-15 回転灯とブザーによる離着陸時の警告

表-3 SfM 解析の精度検証結果

検証点	$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\Delta z$ (mm)
G2-1	-39	9	7
G2-3	0	2	6
G3-5	-6	-22	7

オルソマップと各画像データを一覧表示する。本アプリ上では、直近2件のフライトの空撮画像を比較することが可能である。

図-14に示すように、専用サーバによりオルソマップと各重点監視地点の画像データのチャットツールへのプッシュ通知を行う。画像はフライト単位で一括投稿され、チャットツール上で個別に閲覧可能である。また、コメント追加機能により、指示や応答が可能である。

### 6.3.2. テレメトリの活用

リアルタイムに取得するテレメトリを離着陸のトリガとし、図-14に示すようにチャットツールへのプッシュ通知を行う。また、図-15に示すようにドローンポート付近に設置した回転灯の点灯・ブザー音の鳴音により、周囲への警告を行う。これにより、UAV 離着陸時の第三者接近リスクの低減が可能である。

## 7. センシングデータの活用高度化の試行

### 7.1. 地表面 3D モデルの差分による地表面変位計測

パイプルーフ施工前・施工中に計測した点群の例を図-16に示す。また、SfM 解析時の検証点精度を表-3に示す。いずれの検証点においても、鉛直方向の差 ( $\Delta z$ ) は 10mm 未満である。本工事ではトンネル掘削における地表面変位の管理基準値を  $\pm 25\text{mm}$  と設定しており、計測精度はこの管理基準値より小さいことから、本工事へ



(a) 基準面 (2022年5月計測)



(b) 比較面 (2023年2月計測)

図-16 パイプルーフ施工前・施工中に計測した点群の例

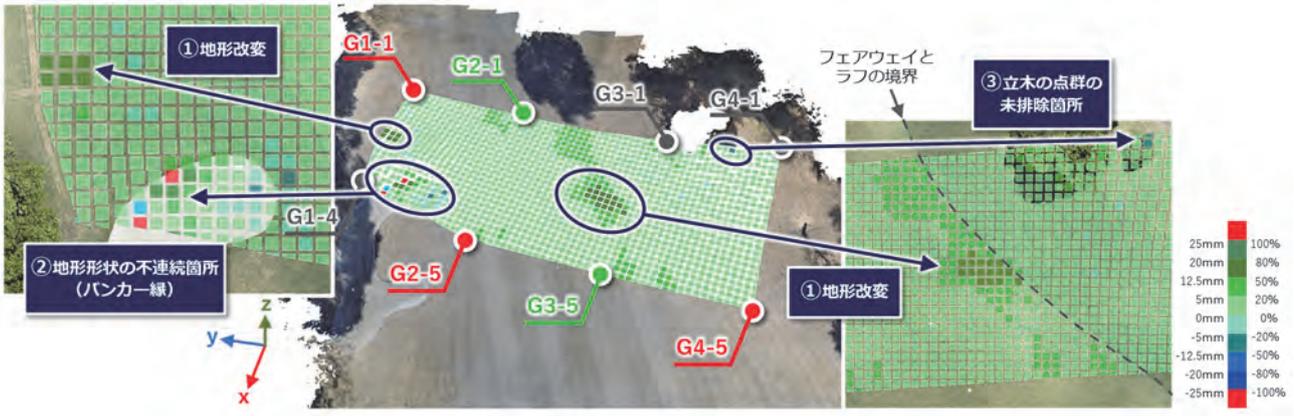


図-18 基準面と比較面の差分の評価結果 (コンター表示)

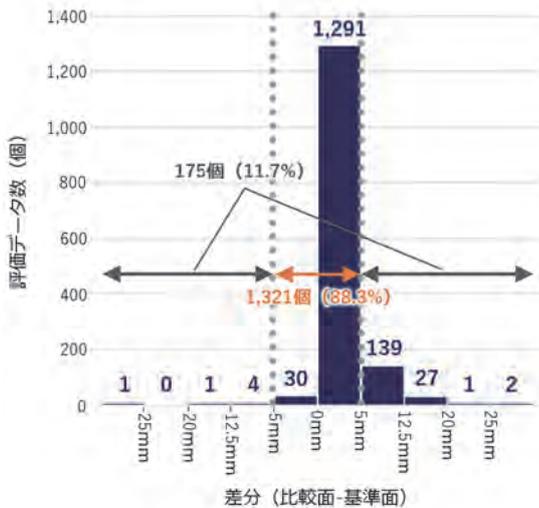


図-17 基準面と比較面の鉛直方向 (z 方向) 差分の評価結果 (度数表)

の適用が可能であると判断できる。

次に、実際の地表面変状について評価および検証を行った。パイプルーフ施工前・施工中の点群をそれぞれ基準面、比較面とした鉛直方向の差分の頻度分布を図-17に示す。対象エリアをメッシュサイズ1m×1mとして評価している。評価面積1,410m<sup>2</sup>内の評価データ総数1,496点のうち1,321点(88.3%)が±5mmの範囲内となっていることが分かる。GNSS地表面自動変位計測および手動計測によるトンネル地表面沈下の2023年2月時点での実測値は最大3mmとなっており、パイプルーフ施工により大きな変状は発生していないものと考えられる。また、±5mmの範囲外となったデータについては、図-18に示したコンター図より、①地形改変の影響、②地形形状の不連続箇所(バンカー縁)による評価の揺らぎ、③立木の点群の未排除箇所の評価の混入、の三つが影響しているものと考えられる。SfM解析および変状評価においては、上記の影響について留意する必要がある。

## 7.2. 点的計測と面的計測との融合表示

GNSS地表面自動変位計測の結果(点的計測: 計測点の

3次元変位ベクトル)と、全自動UAV空撮画像に基づいて生成した地表面3Dモデルの差分による地表面変位計測の結果(面的計測: 鉛直変位コンター図および鉛直変位グラフ)との融合表示を試行した(図-19)。なお、断面はトンネル線形直上の縦断方向としている。

これにより、2種類の異なる地表面変位計測技術を相互補完的に利用し表示することが可能であることを確認した。

## 8. まとめ

本試行により、以下の結果を得た。

- 遠隔・無人運用が可能な全自動UAVの採用と、離着陸地点周辺の気象データのインターネット経由での取得およびUAVのレベル3飛行の承認取得により、UAVによる画像データ取得の自動化を実現した。
- LTE通信モジュール搭載のUAVの採用と、APIによるデータ連携を行い、以下のような自由度の高いシステム連携・システム構築を行うことにより、UAVにより取得した画像データの通信・蓄積・分析・可視化の自動化を実現した。
  - ① 空撮完了後の画像データの自動アップロード
  - ② 画像データの自動取得・蓄積
  - ③ GNSS地表面自動変位計測データの自動取得・蓄積と測量基準点座標データとしての利用
  - ④ 画像データと測量基準点座標データの外部SfM解析サービスへの自動アップロードおよび生成した3Dモデルの自動取得
  - ⑤ 事前設定された優先度に基づく画像データの抽出およびインタフェースの違いを考慮した方法による現場職員への提示
- 取得した画像データに基づいて生成された3Dモデルを高度に活用し、以下のような方法での可視化を実現した。
  - ① 二時期に生成した点群の鉛直方向の差分によるトンネル地表面の面的変位の定量評価・可視化

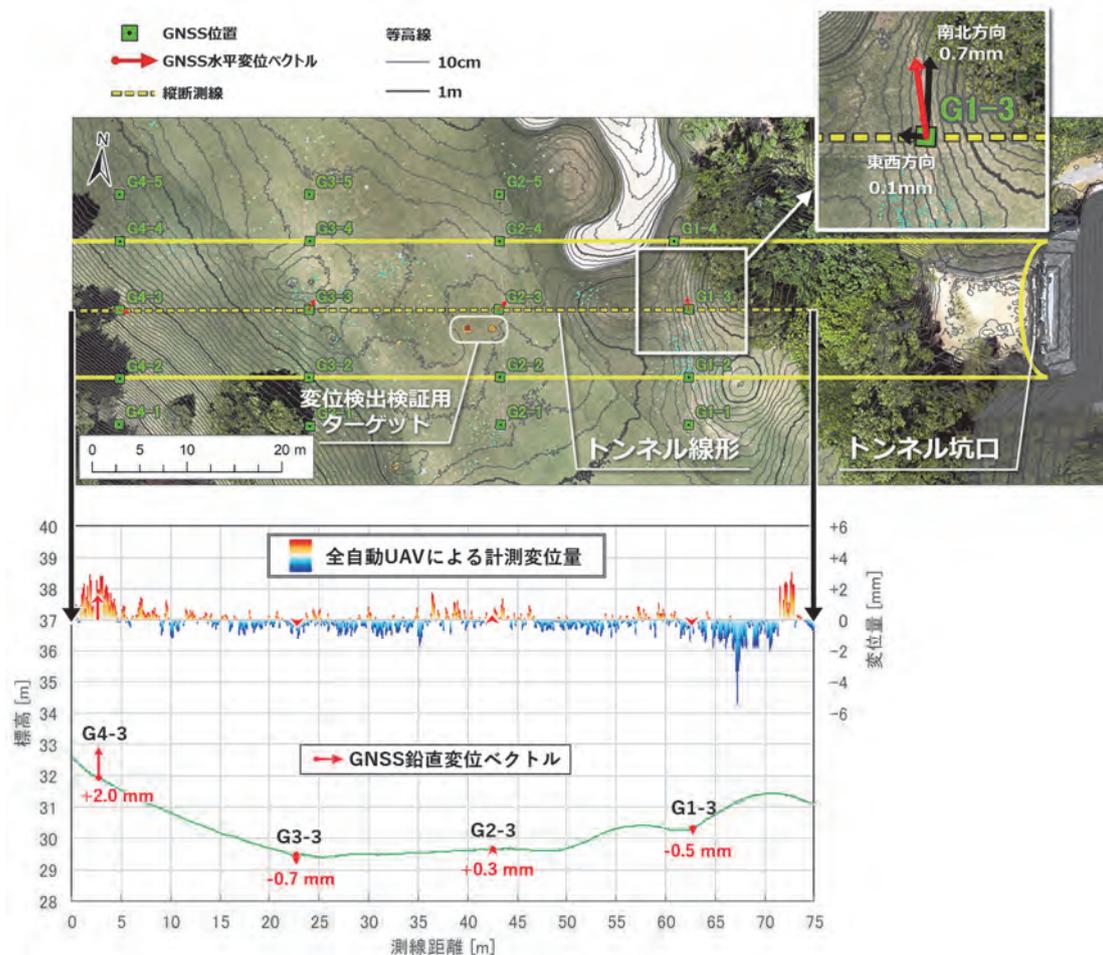


図-1 19 GNSS 計測の結果と全自動 UAV による計測の結果との融合表示の一例

- ② GNSS 地表面自動変位計測の結果 (点的計測) と全自動 UAV 空撮画像に基づいて生成した地表面 3D モデルの差分による地表面変位計測の結果 (面的計測) との相互補完的な融合表示

以上により, UAV センシングにおける一連のプロセス自動化およびセンシングデータの活用高度化を実現できた。

なお, 本試行においては, 重点監視地点の画像データの抽出についてはルールベースであり, また提示された画像や可視化された評価結果については熟練技術者が解釈・判断することを前提としている。さらなる生産性向上を達成するためには, 深層学習の適用によりルール策定や結果の解釈・判断も自動化し, 観察・計測の業務プロセス全体の自動化・省力化を進めていくことが必須であると考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) 一般社団法人日本建設業協会: 建設業デジタルハンドブック, <https://nikkenren.com/publication/handbook/ch-art6-4/index.html> (accessed 2023.9) .
- 2) 一般社団法人日本建設業協会: 建設業デジタルハンドブック, <https://nikkenren.com/publication/handbook/ch-art6-5/index.html> (accessed 2023.9) .
- 3) 国土交通省:i-Construction、インフラ分野の DX の推進について, i-Construction 推進コンソーシアム第 8 回企画委員会, 資料 1, 2022.
- 4) M. Zucchi: Drones: A Gateway Technology to Full Site Automation, Engineering News-Record, 2015.
- 5) C. Koch, S. G. Paal, A. Rashidi, Z. Zhu, M. König and I. Brilakis: Achievements and Challenges in Machine Vision-Based Inspection of Large Concrete Structures, Advances in Structural Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 303-318, 2014.
- 6) Y. Ham, K. K. Han, J. J. Lin and M. Golparvar-Fard: Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works, Visualization in Engineering, Vol. 4, No. 1, 2016.
- 7) 春原久徳, 青山祐介: ドローンビジネス調査報告書 2023, 2023.
- 8) 公益社団法人日本道路協会: 道路トンネル観察・計測指針 (平成 21 年改訂版), 2013.
- 9) D. Bremner: Sensor systems: a hierarchical approach, Scottish Sensor Systems Centre, Project Report, 2011.

- 10) I. Brilakis, L. Soibelman and Y. Shinagawa: Material-Based Construction Site Image Retrieval, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.19, No.4, pp. 341-355, 2005.
- 11) 古宮正勝, 藤本克郎, 松田浩朗, 勝部峻太郎: 営業中のゴルフ場直下を掘削するトンネル工事における埋設型 GNSS による地表面変位計測, とびしま技報, No.70, pp. 53-54, 2022.
- 12) 大寺正宏, 吉田幸信, 内田純二, 大西邦晃, 岩崎智治: GPS を用いた動態観測の実用化検討, 平成 14 年地盤工学会四国支部技術研究発表会講演集, pp.47-48, 2002.
- 13) 原田秀司: UI デザインの教科書[新版] マルチデバイス時代のインターフェース設計, 株式会社翔泳社, p. 19, 2019.
- 14) R. T. Watson, L. F. Pitt, P. Berthon and G. M. Zinkhan: U-commerce: Expanding the universe of marketing, *Journal of the Academy of Marketing Science*, Vol. 30, No. 4, pp. 333-347, 2002.
- 15) G. Robertson, M. Czerwinski, P. Baudisch and B. Meyers: The Large-Display User Experience, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 25, No. 4, pp. 44-51, 2005.

**Summary** In the aerial photography using UAV and its data utilization, the entire process is inefficient because of the labor of UAV operation, laws and regulations such as aviation laws, and the difficulty of data linkage. As a result, it was difficult to use UAV frequently for daily construction management, monitoring and patrols.

For solving the above problems, the authors attempted to automate image data acquisition by adopting a fully-autonomous UAV capable of remote and unmanned operation and receiving BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) waiver. At the same time, we attempted to automate the communication, storage, analysis and visualization of acquired data by adopting a UAV equipped with an LTE module and performing system integration and system construction utilizing APIs.

As a result, we achieved the automation of the process of observation and measurement of the tunnel ground surface using UAV, and the advance utilization of acquired data such as the evaluation of ground surface displacement based on the generated 3D model and the fusion display with GNSS measurement results.

**Key Words :** UAV, BVLOS (Beyond Visual Line of Sight), API, SfM, GNSS