■構造物点検における小型UAVによる低空空撮技術の活用

Application of small-UAV-based low-altitude aerial photography for the inspection of structures

今村大地* Daichi IMAMURA／株式会社栄泉測量設計 Eisen Survey & Ground Design Inc.

内山庄一郎 Shoichiro UCHIYAMA／国立研究開発法人 National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

江山栄一 Eiichi EYAMA／株式会社栄泉測量設計 Eisen Survey & Ground Design Inc.

梅田 篤 Atsushi UMEDA／株式会社栄泉測量設計 Eisen Survey & Ground Design Inc.

キーワード：小型UAV，低空空撮，構造物点検，三次元モデル

Key words：small unmanned aerial vehicle(UAV)，low-altitude aerial photography, inspection of structures, three-dimensional (3D) model

1. はじめに

平成24年12月2日に発生した中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故に見られるように、施工から長期間経過した構造物の多くは、老朽化による破損の危険性が増大している。このようなことから、既存の道路構造物の維持管理が重要な課題となっている¹⁾。

構造物の適切な維持管理において、高頻度かつ高精度な点検が重要である。構造物点検方法の一例として望遠目視点検や構造物を直接観察する近接点検(写真-1)が挙げられる。これらの既存手法にも問題点がある。望遠目視点検では、死角になる場所は点検が困難である。また、近接点検では、安全性やコストの面で高頻度の実施が困難である場合がある。

そこで、本稿では小型UAV(unmanned aerial vehicle)と高解像度デジタルカメラによる低空空撮²⁾に着目した。低空空撮は主に対地150m未満の高度で実施し、対象物への近接撮影および実機では得られない高解像度写真の取得が可能である。このため、低空空撮を活用すると、人の立入りが困難もしくは危険な場所であっても、大掛かりな準備が必要なく安全な点検が可能となる。そのた

め、近接点検と比較すると、低空空撮を活用した点検はコストや即応性、安全性の面において優位である。さらに、望遠目視点検と比較すると、対象に接近できるため、より詳細な点検が可能と言える。

本稿では、このような特長を持つ低空空撮を活用した新しい点検手法(以下、新手法)を道路のり面に対して実施し、その実用性を検証した。

本稿は第53回日本地すべり学会研究発表会において2014年8月20日に発表した内容に基づいてまとめたものである³⁾。

2. 調査対象地

熊本県阿蘇郡南阿蘇村河陽(図-1)において、オーバーハングがみられる長大斜面の一部分(写真-2)を対象として新手法を実施した。現在、道路構造物の点検要領⁴⁾を基に、いわゆるストック点検が実施されているが、本調査対象の斜面のように、打音検査等の近接点検が困難な場合もあり得る。この点を意識して調査地を選定した。本稿ではこの場所で平成26年4月7日(撮影者：内山)と同年5月16日(撮影者：今村)の2回にわたり空撮した。

3. 道路のり面への新手法の実施

3.1 新手法および斜面管理図(案)の概要

図-2に新手法および斜面管理図(案)作成のフローを示す。図中の破線で囲まれた部分が新手法である。

新手法ではまず小型UAVによる低空空撮と地上基準点(以下、GCP:Ground Control Point)の測量を実施する。GCPとは写真上で明確に識別可能な地点であり、三次元モデルに実空間の座標(例えば、GCPに経緯度・標高を付与すれば、三次元モデル内の任意の点の経緯度・標高を計測できる。)を付与するために使用する。低空空撮による写真群とGCPの座標をSfM-MVS(Structure from Motion and Multi-view Stereo)ソフトウェアで処理することにより三次元モデルを作成する⁵⁾。構造物の点検作業は、ここで作成した三次元モデルと空撮

写真-1 近接点検

* 連絡著者／corresponding author
〒861-4108 熊本県南区幸田2-10-7
2-10-7, Koda, Minami-ku, Kumamoto-shi, Kumamoto, 861-4108, Japan

図-1 調査対象地位置図
(出典: 地理院地図)

写真-2 調査対象の構造物
(上: 道路上方, 下: 道路下方)

写真を利用して実施する。

新手法では既存の点検手法と比較して得られる情報が多く、既存の点検カルテでは十分に表記できない。そこで、斜面管理図(案)を提案する。斜面管理図(案)は、新手法で得られた多様なデータと点検結果を管理するために、既存カルテをベースにして最適化したカルテである。

3.2 使用機材

低空空撮に用いた小型UAVはDJI Phantom 2 (以下, Phantom 2), デジタルカメラはRicoh GR (以下, GR), SfM-MVSソフトウェアはAgisoft PhotoScan Professional (以下, PhotoScan) を使用した。

Phantom 2は小型(幅45cm)・軽量(約1.4kg)で、安定性・操作性が高い。GRは最短で1秒間隔の自動撮

図-2 新手法による道路のり面点検のフロー

影と約1,600万画素(4928×3264ピクセル)の高解像度の静止画が撮影可能である。PhotoScanは複数の画像から、SfM等の三次元形状復元技術を用いて三次元モデルを作成できる。さらに、測量によって得られたGCP座標を付与することにより、三次元モデル上で点間距離を計測できる。また、三次元モデルのファイル出力や、オルソフォトの生成が可能となる。

3.3 安全航行の基準

小型UAVは飛行体であるため、空撮には墜落のリスクが伴う。空撮の際は、安全を確保し、事故を未然に防止するための対策が必要である。筆者らが留意する、安全な空撮を実施するための重要項目について記述する。

3.3.1 関連法規

平成27年前半において低空空撮を明確に規制する法律は存在しないが、UAVの運用に関わる法律として航空法と電波法がある。航空法による規制として、条文に記載された空域(空港周辺の制限表面の上空、航空路内の地表または水面から150m以上の高さの空域、および地表または水面から250m以上の高さの空域)内を飛行する場合には国土交通大臣の許可が必要である。電波法による規制として、送信機などの電波を発信する機材には技適マーク(特定無線設備の技術基準適合証明等のマーク)がなければ使用できない。

3.3.2 第三者傷害賠償責任保険

機体が墜落した場合、人間や家財、または重要インフラに衝突すれば損害が発生する。UAVの運用者は、適切な第三者傷害賠償責任保険に加入する必要がある。

3.3.3 飛行前点検

機体の状態を把握するために専用ソフトを使用してパラメータの確認し、必要に応じてキャリブレーションする。飛行制御装置(フライトコントローラ)などは屋外ではなく屋内の水平な場所で点検する必要がある。

3.3.4 現地での注意点

空撮を実施する前に現地の風速や周囲の状況を確認す

表-1 空撮状況

空撮日	天気	地上での風速	準備時間	フライト回数	合計フライト時間
2014/4/7	晴れ	1.4~1.8m/s	30分	4回	17分
2014/5/16	晴れ	1.2~1.6m/s	30分	2回	13分

る。離陸地点周辺の地上での風速を確認し、平均風速 5 m/s以上または瞬間風速 7 m/s以上であれば中止を検討する。上空の風速に関しては直接計測が困難であるため、予定航路付近の木々の揺れ具合などから判断する。また、飛行予定地の地形や土地利用状況、飛行禁止区域等を確認し、安全運行可能であるかを判断する。

空撮は2名以上で実施する。一人は操縦に専念し、他者は時間管理や機体位置把握の為に距離計測等を実行する。操縦者は、衝突等の事故を回避するため、周囲の環境の変化に注意しながら、対象物やGCPの撮影漏れが無い飛行経路を航行する。

3.4 空撮の実施

今回行った空撮時のデータを表-1に示す。また、図-3に内山が空撮した回（以下,1回目）の、図-4に今村が空撮した回（以下,2回目）の空撮位置と撮影方向を示す。撮影位置の最高点は,1回目が対地高度113.048m,2回目が対地高度60.129mであった。これらの位置,方向,高度は三次元モデルによる推定値である。

3.5 モデル化

空撮した写真をPhotoScanで処理し、三次元モデルを作成した。図-5に1回目の空撮での写真から作成した三次元モデル（以下,モデル1）のオルソフォトを示す。このモデルを作成する際に使用した写真は718枚である。

3.6 変状確認

写真を拡大することによりクラックや遊離石灰等の変状を発見できた（写真-3）。これらの変状を三次元モデル上で確認し、それらの長さや幅を計測することがで

図-3 1回目の撮影位置と撮影方向
(上:西から,下:南から)
(四角が撮影位置を示し,その四角から出ている垂線の伸びている方向とは逆の方向が撮影方向である。)

図-4 2回目の撮影位置と撮影方向
(上:西から,下:南から)

図－5 三次元モデルのオルソフォト
(上：真上から，下：南側から)

きた。

3.7 斜面管理図（案）

新手法ではオルソフォトや三次元モデル，多数の高解像度写真など，既存手法では得られない多様なデータが取得できる。既存の点検カルテではこれらを活用しきることは困難である。そのため，新手法に対応した，既存カルテを補完する斜面管理図（案）を提案する（図－6）。空撮写真や既存カルテから読み取れる構造物の変状をオルソフォトに記載したものである。

現状では二次元画像に情報を記載しているが，これを三次元モデル上で表現するなど，今後の発展的な活用を検討していく必要がある。

4. 三次元モデルの検証

新手法の実用性を確認するため，三次元モデルの正確

性と再現性を検証した。正確性の検証はトータルステーションでの実測値とモデル内座標値との比較により，再現性の検証は撮影日・操縦者が異なるモデル間の比較により実施した。

4.1 調査方法

トータルステーション（ニコン・トリンブルS65” DR Plus）を用いてGCP（写真－4）とは別に9点（塩ビ管8点，測量鉄1点）を調査点（写真－4）として選択し，測量した。実測値が得られたGCPと調査点の位置図を図－7に示す。これらの実測値と三次元モデル内の推定座標値を利用して検証する。

4.1.1 現地実測結果と三次元モデルとの比較

検証は実測値とモデル1との比較により実施する。表－2に調査点9点の実測による座標値，モデル1内の推定座標値，実測値と推定値の誤差を示す。また，図－8にそれらのグラフを示す。

実測値との誤差が十分小さいと判断できれば，そのモデルは実物の真値に十分近く正確性が高いと評価できる。その判断をするために公共測量作業規定の準則に表記された空中写真測量での誤差の許容値⁶⁾と比較した。その中で最も厳密な地図情報レベル500と最大誤差を比較すると，水平方向では許容値の22.2%（許容値150mm，最大誤差33mm），垂直方向では18.8%（200mm，38mm），三次元では17.6%（250mm，44mm）であった。それぞれの誤差は許容値に対して十分小さい値であるので，正確性が高いと評価できる。

水平誤差と垂直誤差に着目すると，水平誤差と比べて垂直誤差の方が大きな値である。これはGCPの配置に起因するものと推測される。構造物の高さ（道路から45m）に対してGCPの配置が道路上の低い位置（最高点で道路から17m）に偏っており，道路から離れた調査点では垂直方向の歪みが大きくなると推測される。

4.1.2 撮影日が異なる写真を用いた三次元モデル間の比較

三次元モデル間の比較を行うために2回目の空撮を実施した。モデルを作成するために使用した写真枚数は225枚である。この日は，道路より上の構造物の比較を目的として空撮したため，1回目よりも枚数が少ない。この空撮による写真で作成した三次元モデルをモデル2とする。

調査点9点について，モデル1内の推定座標値，モデル2内の推定座標値，およびそれら座標値の差を表－3に示す。それらの値のグラフを図－9に示す。

モデル1とモデル2上の同一点の推定座標値が十分近い値であれば，ばらつきが小さいと判断できるため，三次元モデルには再現性があると言える。比較対照として，公共測量作業規定の準則に表記された空中写真測量での較差の許容値「100mm」⁶⁾を使用する。調査点における2つのモデル間の最大差は61mmである。この差は比較対照の値の61%であり，その結果から2つのモデル間の差は十分小さく，三次元モデルには再現性があると評価

写真-3 変状確認

(A: 写真全体, b: 開口したクラック, c: クラック, d: クラックと遊離石灰, e: 変状の疑いあり)

図-6 斜面管理図(案)

(a: 南側から, b: 西側から, c: 東側から)

図-7 GCPと調査点の位置図

(PT-100~104: GCP,
105, 200~205, 208, 209: 調査点)

できる。

ここで、調査点200に注目すると他の調査点と比して大きな誤差(61mm)が目立つ。調査点200が写っている写真のうち最も画質の良い写真を選択し比較した(写真-5)。モデル1では塩ビ管がはっきりと分かるように撮影されているが、モデル2では影に隠れて判別が困

難である。この写りの差異が誤差となっていると推測される。差の最も小さい調査点204ではモデル1, モデル2共にはっきりと写っている(写真-6)。

4.2 正確性・再現性検証の結論

正確性および再現性を検証し、いずれも実用レベルにあることを確認できた。ただし、今回は対象とした構造

写真-4 GCPと調査点
(左: GCP (測量点は測量鉄の中心。)
右: 調査点 (測量点は塩ビ管の下端部。))

表-2 実測値と推定値の比較

調査点	座標値						誤差		
	X (実測値)	X (推定値)	Y (実測値)	Y (推定値)	Z (実測値)	Z (推定値)	水平	垂直	三次元
105	998.966	998.977	981.459	981.440	11.385	11.369	0.02206	0.01638	0.0275
200	1016.565	1016.556	989.214	989.214	22.804	22.808	0.00930	0.00358	0.0100
201	1024.958	1024.957	990.527	990.525	29.764	29.747	0.00251	0.01728	0.0175
202	1024.603	1024.603	996.587	996.590	27.653	27.624	0.01211	0.02897	0.0314
203	1030.874	1030.876	1005.761	1005.759	31.299	31.274	0.00262	0.02536	0.0255
204	1030.650	1030.643	992.155	992.154	35.351	35.323	0.00672	0.02753	0.0283
205	1030.488	1030.506	988.548	988.520	36.550	36.521	0.03331	0.02865	0.0439
208	1033.847	1033.842	1011.153	1011.155	34.466	34.428	0.00540	0.03752	0.0379
209	1032.584	1032.575	1001.427	1001.418	35.407	35.376	0.01295	0.03092	0.0335
ローカル座標系 単位: m							平均誤差 標準偏差	0.012 0.010	0.024 0.009 0.028 0.010

図-8 実測値と推定値の水平誤差・垂直誤差・誤差のグラフ

物の大きさに対し調査点が9点と少ないため、更なる検証が必要となる。

5. まとめ

低空空撮による写真からSfM-MVS技術によって三次元モデルを作成し、構造物点検を施行した。まず、空撮写真からクラックを発見し、その長さをモデル上で計測した。次に、トータルステーションによる測量データを基に、三次元モデルの正確性と再現性を検証し、ともに十分な正確性と再現性を有すると評価した。

今後さらに精度を高めるためには対象物に接近するか、あるいは、高解像度のデジタルカメラを使用する必要がある。また、既存手法との比較により、新手法と既存手法で確認できる変状の大きさや数、種類の差を調査する必要がある。

謝 辞

堤昭一氏には既存手法に関する資料やご意見をいただきました。南阿蘇村役場建設課建設係の宮崎智弘氏、古庄広幸氏には調査地の提供と空撮の許可をいただきました。Enago (www.enago.jp) には英文校正をお願いしました。各位に心より感謝申し上げます。

表-3 モデル1とモデル2の比較

調査点	推定座標値						差		
	X (モデル1)	X (モデル2)	Y (モデル1)	Y (モデル2)	Z (モデル1)	Z (モデル2)	水平	垂直	斜め
105	998.977	998.958	981.440	981.447	11.369	11.403	0.0203	0.0346	0.040
200	1016.556	1016.502	989.214	989.237	22.808	22.824	0.0558	0.0164	0.061
201	1024.957	1024.944	990.525	990.536	29.747	29.735	0.0180	0.0116	0.021
202	1024.603	1024.584	996.590	996.597	27.624	27.641	0.0208	0.0170	0.027
203	1030.876	1030.874	1005.759	1005.751	31.274	31.258	0.0089	0.0161	0.018
204	1030.643	1030.642	992.154	992.146	35.323	35.329	0.0084	0.0054	0.010
205	1030.506	1030.472	988.520	988.543	36.521	36.536	0.0405	0.0145	0.043
208	1033.842	1033.854	1011.155	1011.128	34.428	34.429	0.0296	0.0007	0.030
209	1032.575	1032.583	1001.418	1001.405	35.376	35.362	0.0159	0.0138	0.021
ローカル座標系 単位: m							差の平均 標準偏差	0.025 0.015	0.014 0.009 0.030 0.015

図-9 モデル1とモデル2の水平方向・垂直方向・斜め方向の差のグラフ

写真-5 調査点200
(左: モデル1, 右: モデル2)

写真-6 調査点204
(左: モデル1, 右: モデル2)

引用文献

- 1) 村田和彦 (2013): 老朽化が進行する道路構造物の維持管理—道路法等の一部を改正する法律案—, 立法と調査, No. 340, pp. 63-73
- 2) 井上 公・内山庄一郎・鈴木比奈子 (2014): 自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術, 防災科学技術研究所研究報告, No. 81, pp. 61-98
- 3) 今村大地・内山庄一郎・古庄広幸・宮崎智弘・江山栄一・梅田 篤, 構造物点検における小型UAVによる低空空撮技術の活用, 第53回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 120-121
- 4) 国土交通省国道・防災課 (2013): 道路のり面工・土工構造物の調査要領 (案)
- 5) 内山庄一郎・井上 公・鈴木比奈子 (2014): SfMを用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究, 防災科学技術研究所研究報告, No. 81, pp. 37-60
- 6) 日本測量協会 (2011): 公共測量 作業規定の準則 (平成23年度3月31日改正版)
(原稿受付2015年6月26日, 原稿受理2015年9月14日)