

26. i-Constructionにおける空中写真測量及びレーザースキャナの 出来形管理への適用について

－ UAV等の出来形管理要領の諸規定設定根拠について －

国土交通省 ○ 近藤 弘嗣
 国土技術政策総合研究所 長山 真一
 アジア航測（株） 石田 大輔

1. はじめに

国土交通省が推進するi-Constructionのトップランナー施策の一つ「ICTの全面的活用」は、土工工事において3次元起工測量、3次元設計データ作成、ICT施工、3次元出来形管理及び3次元データでの納品を行うというものであり、具体的取り組みとして、この流れを定めた15の基準類を昨年度末に発出するとともに、直轄の土工工事において「ICT活用工事」の公告が始まったところである。基準類の中でも、ドローン等の活用を直轄工事の出来形管理にまで認める上で必要な「出来形管理要領」は、3次元データを活用するうえでの革新的な概念である「面管理」を定めた「出来形管理基準」とともにICT活用工事を規定する中心的な通知である。

本稿では、この「出来形管理要領」策定に際しての検討や現場検証の状況、及び基準の根拠について紹介する。

2. 出来形管理要領における計測基準の概要

今般策定したのは、地上型レーザースキャナで取得した3次元点群データを対象とした「レーザースキャナを用いた出来形管理要領」と、UAVによる連続写真からsfmソフトにより復元した3次元点群データを対象とした「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領」である。いずれも測量法に基づく作業規程の準則に位置付けられておらず、出来形管理基準に規定された計測精度±50mmを担保する計測プロセスが存在しない。

そこで、出来形管理要領における精度担保に関する規定については、一定の計測プロセスと現場での精度確認プロセスを規定した。技術毎に以下に示す。

2.1 空中写真測量（無人航空機）を用いる場合

sfmを用いた生成3次元点群の精度に関する早坂ら¹⁾の既往研究によれば、精度に良い影響を与

えるのはラップ率、地上画素寸法である一方、写真測量においてプロセスが規定されているキャリブレーションや焦点距離の固定については、sfmを用いる場合は精度向上にあまり寄与しないことがわかっている。結果として、以下のような規定とした。次章以降でその検証結果を示す。

(1) 計測プロセス規定

- ① 地上画素寸法：1cm／画素以内
- ② ラップ率：進行方向90%，隣接方向60%
- ③ 標定点設置間隔：外周100m間隔以下、天端上200m間隔目途（図-1）。検証点は標定点として利用できない。
- ④ キャリブレーション：写真測量同様の手法の他、セルフキャリブレーションも許容

(2) 精度確認規定

- ① 検証点設置間隔：天端上200m間隔で標定点と交互に設置（図-1）
- ② 検証点精度：x,y,z各成分で各々±50mm以内
- ③ 検証頻度：撮影毎

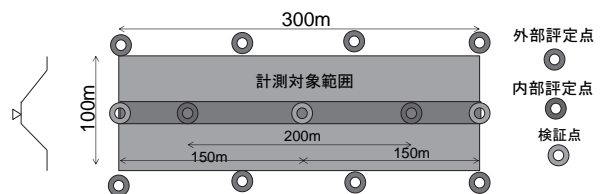


図-1 標定点及び検証点設置イメージ

2.2 地上型レーザースキャナを用いる場合

(1) 計測プロセス規定

事前の精度確認の条件（最大距離以内）で測定

(2) 精度確認規定

- ① 確認方法：実際に利用する最も厳しい条件（最も長い距離）において2既知点間の長

さを計測

② 検証点精度：長さの算出結果が±20mm 以内

③ 検証頻度：事前に1回実施

sfm と違って点密度に限界のあるレーザースキャナの場合は、検証点をピンポイントで取得することが困難であることから、座標間の成分比較ではなく、2既知点間の長さの比較としたものである。

3. 規定案に基づく計測精度検証

出来形管理要領に規定する予定である上記計測プロセスの妥当性を確認するための精度検証を実施した。ただし、2. で述べた規定と検証時では想定している以下の諸元が異なっている。

- ・空中写真測量の地上画素寸法：1cm/画素程度
- ・空中写真測量の進行方向ラップ率：80%

3.1 検証方法

(1) 正解データの取得方法

TSを用いて標高値を測定した。図-2で示すとおり、正解データは管理断面上に測点を設け2m間隔で測定する。これを5断面間（6測線分）について測定する。測線間隔は4mを標準とした。この5断面間を評価範囲として、この範囲を含む形で被評価データの計測を行う。

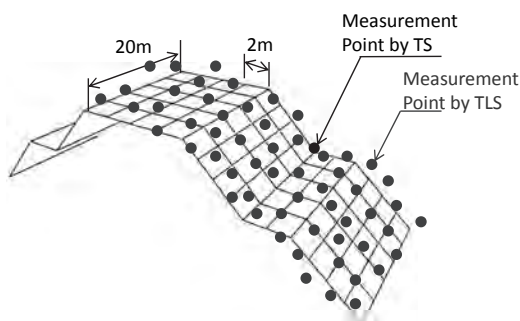


図-2 正解データの測線イメージ

正解データの測定については、試行現場の施工者が実施するか、実験協力会社により実施したが、いずれの場合もTSを用いた出来形管理に準じた計測方法とした。

法面へ踏み入ることが困難な場合は、図-3のようにリボンロッドにシールプリズムを張り付けた器具を製作し、ターゲットの計測値から、地表に接しているテープとの距離と設計法面勾配から、地表との接点の座標を算出した。

なお、本手法については、事前検証により真値との差が±3mm以内であることを確認している。

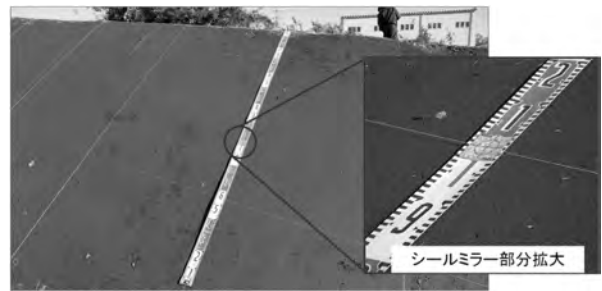


図-3 法面正解データ取得用器具

(2) 被評価データの取得方法

① 地上型レーザースキャナ

設置箇所から最も遠い箇所において、点密度10cm以内、2既知点の基線長が±2cm以内となることが確認された地上型レーザースキャナとする。測定については、試行現場の施工者が実施するか、実験協力会社により実施した。

② 無人航空機による写真測量

標定点は概ね100m間隔以内、同程度の数の検証点を設け、すべての点において各成分それぞれ±50mm以内であることを確認した。

地上解像度、ラップ率は先述のとおりとし、sfmソフトはPix4Dとした。撮影及び3次元点群復元作業については著者らで実施した。詳細は別著²⁾による。

(3) 比較方法

標高値を正解データと比較するうえで、平面座標をそろえる必要がある。そこで、被評価計測から得られる点群データを図-4のようにTINデータ化したうえで、正解データと同じ平面座標値における三角面上の標高座標値と正解データとの標高較差を評価する。

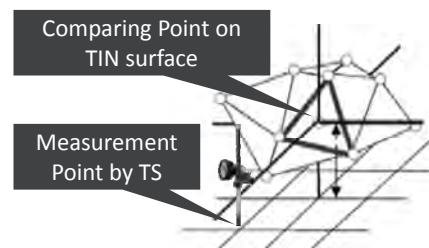


図-4 正解データと被評価データの標高比較方法

(4) 現場諸元

国土交通省直轄の道路事業6現場、治水事業3現場において実施した。

3.2 計測精度検証結果（レーザースキャナ）

9現場におけるTSとレーザースキャナの標高較差について、部位別（天端・法面の別）に取りま

とめた結果が以下のとおりである。

① 天端

- ・標準偏差： 24mm
- ・平均 : +15mm

標準偏差の2倍が±50mmに収まっていることを考えると、概ね±50mmが達成可能な計測精度であると評価できる。具体的な結果の分布は図-5のとおりであり、いくつかの計測値で±50mmを超えているものがあるが、以下の理由により計測精度の評価からは排除できると考える。

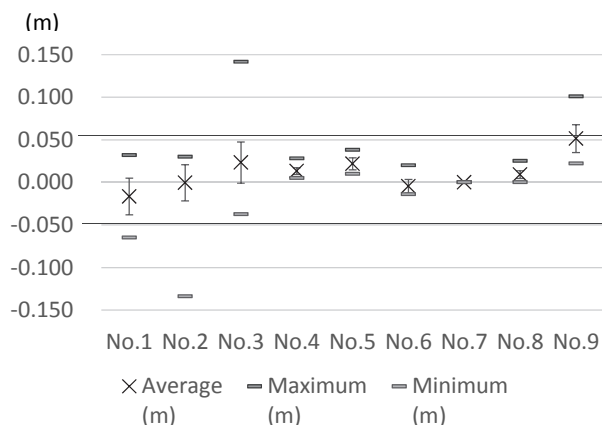


図-5 天端の計測結果の正解データとの標高差

・現場No.3

較差が±50mmを大きく超えている結果が含まれている。この現場を精査すると、ブルドーザによる転圧途中の現場であり、履帯の凹凸により、レーザースキャナがとらえた表面と、正解データとしてのTSがとらえた表面が大きく異なっていた可能性がある。

・現場No.9

平均値が+50mmを超えている状況である。データを精査したところ、2既知点の基線長が±2cm以内となることの確認がなされていなかったため、そもそも精度が担保出来ない条件での測定がなされていた可能性がある。

・現場No.2

原因は特定できないものの、±50mmを超えている計測点は72のうち3点と、エラーとしては5%を下回っているため、実用上問題にならない（例えば別の機材で再測する等により個別にエラーとして排除出来る）ものと考えられる。それ以外の現場も同様に±50mmを超過するのは数点に留まる。

② 法面

- ・標準偏差： 17mm
- ・平均 : +12mm

天端同様、概ね±50mmが達成可能な計測精度であると評価できる。具体的な結果の分布は図-6のと

おりであり、計測値で±50mmを超えている点も各現場1点前後であったことから、実用上問題にならないと考える。

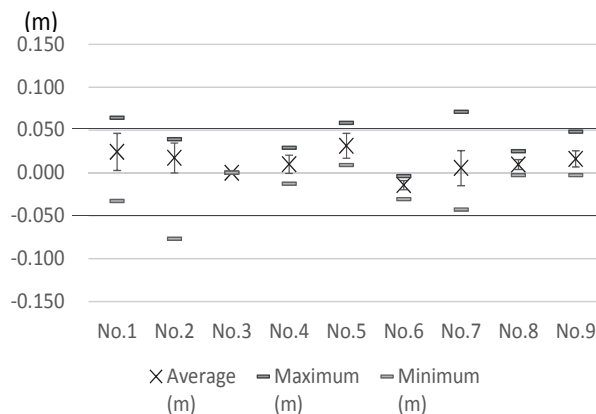


図-6 法面の計測結果の正解データとの標高差

3.3 計測精度検証結果（空中写真測量）

9現場におけるTSと空中写真測量の標高較差について、部位別（天端・法面の別）に取りまとめた結果が以下のとおりである。

① 天端

- ・標準偏差： 24mm
- ・平均 : - 4mm

この結果のみを評価すると、レーザースキャナと遜色ない。±50mmを超えている理由については、現場No.3-1等説明可能なものもあるが（レーザースキャナの現場No.3と同一のため）、多くは原因が特定できず、数も多いことから、±50mmが概ね達成可能だと評価するのは困難であると言える。具体的な結果の分布は図-7のとおりである。

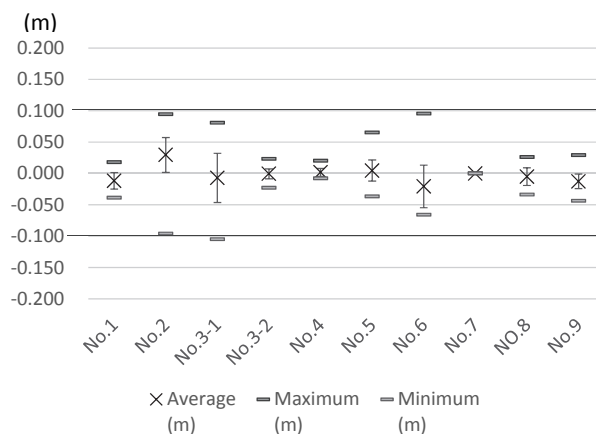


図-7 天端の計測結果の正解データとの標高差

② 法面

- ・標準偏差： 32mm
- ・平均 : + 7mm

標準偏差の大きさから、±50mmが概ね達成可能だと評価するのは困難であると言える。具体的な

結果の分布は図-8のとおりである。

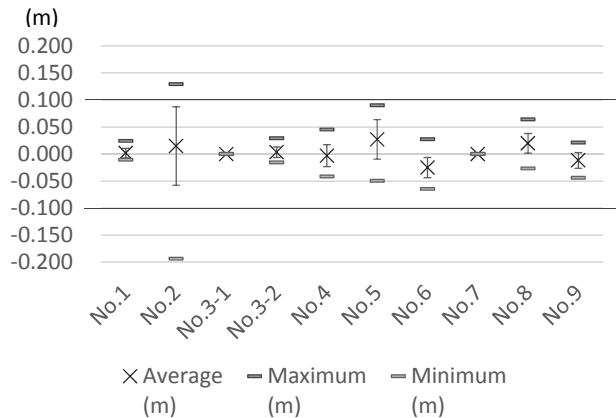


図-8 法面の計測結果の正解データとの標高差

③ 検証点残差

検証点におけるモデルと真値の残差ベクトルの高さ成分については、表-1のとおりである。一応±50mmに収まっているものの、現場No.8のようにギリギリのものもある。

表-1 法面の計測結果の正解データとの標高差

	No.1	No.2	No.3-1	No.3-2	No.4	No.5	No.6	No.8	No.9
検証点数	3	5	1	5	7	4	5	5	7
検証点RMS誤差 垂直(m)	0.019	0.015	-	0.014	0.018	0.018	0.013	0.026	0.017
検証点最大誤差 垂直(m)	0.032	0.027	-0.042	0.023	0.033	0.030	0.026	0.048	0.029
標定点数	5	5	4	5	5	5	5	5	5
標定点RMS誤差 垂直(m)	0.005	0.026	0.005	0.006	0.009	0.016	0.011	0.003	0.016
標定点最大誤差 垂直(m)	0.011	0.032	0.009	0.011	0.014	0.022	0.021	0.005	0.026

現場No.8で最大の検証点誤差が生じたのは、図-9のNo.5の検証点であるが、外周標定点の間隔が140m弱と若干離れていることから、そのほぼ中間に位置する検証点で残差が大きめに出たと思われる。(なおNo.6の位置の検証点も、+23mmとそれなりに大きな残差が出ている。) 制度設計上は、外周標定点は100m間隔程度とすることが望ましいことが分かった。

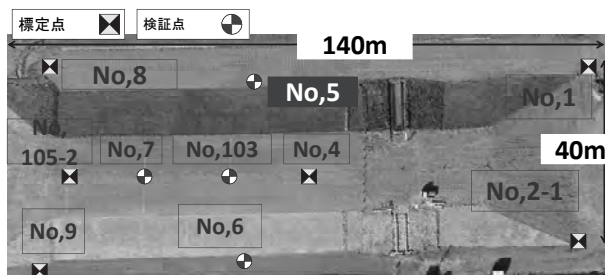


図-9 現場No.8の標定点、検証点分布の様子

4. 規定素案の修正と結論

検証結果より、レーザースキャナについては、当初素案どおりの計測基準とした。一方空中写真測量については、実験で採用した諸元を以下のとおり修正することとした。

① 空中写真測量の地上画素寸法

1cm/画素程度を1cm/画素以内とした。

分解能の低さによる精度悪化については、地上画素寸法を小さくすることで対応できる。ただし、出来るだけセンサーサイズの大きい機材を採用することを想定しており、望遠レンズによりこれに対応することは想定していない(写真測量の常識からすれば、基線高度比が下がることで、高さ精度は逆に悪くなる。)

② 空中写真測量の進行方向ラップ率

80%→90%とした。

写真測量の常識からすれば、基線高度比を半分にするだけで精度が倍悪くなるが、sfmソフトの場合は多くの写真によりマッチング不良を極小化する仕様であると考えられ、経験的にもラップ率の大きさが高さ精度向上にも寄与していることが早坂ら¹⁾の既往研究にも表れていることから、精度向上を期待して、実験時諸元よりも高く設定した。

5. おわりに

15の基準類を発出するべく行った検証作業は、限られた時間の中行ったため、十分なサンプル数による念入りの分析が行われたとは言い難い。要求精度を達成するにはプロセス規定が不十分であったり、逆に無意味に縛りを入れている可能性もあるだろう。今後展開されるICT活用工事の中でさらなる検証作業を進め、i-Constructionの取り組みが逆に現場の生産性を落とすことがないように、基準類については不断の見直しを行う所存である。

謝辞

本検証作業にあたり、UAVによる空中写真測量作業及び3次元点群復元作業は、アジア航測(株)の自主研究という形で多大なる協力いただいた。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 早坂寿彦・大野裕幸他：UAVによる空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証，国土地理院時報，No.127，pp.107～116，2015
- 2) 石田大輔・近藤弘嗣他：UAVによる出来形管理に向けた3次元点群生成と精度検証，第16回建設ロボットシンポジウム論文集，2016（掲載予定）