

土工の出来高算出における動画を使う写真測量の 精度確認手法と撮影条件

国土交通省国土技術政策総合研究所
国土交通省国土技術政策総合研究所
国立研究開発法人土木研究所

○ 金森 宗一郎
小塚 清
森川 博邦

1. 背景と目的

1.1 出来高部分払方式への ICT 活用

我が国では、公共工事代金の支払方法として前金払および完成払の2回払、もしくは前金払、中間前金払、完成払の3回払が一般的である。前金払は工事契約締結直後に請負代金額のうち最大40%を支払うものであり、中間前金払は出来高および工期が半分をこえた後に請負代金額の最大20%を支払うものである。

このような支払方式においては、工期の後半や増額変更の際に、請負業者が工事資金調達による金利負担を負ったり、下請業者への支払が遅れたりする可能性がある¹⁾。

そこで、国土交通省では3ヶ月に1回程度の頻度で出来高に応じて工事代金の部分払を行う出来高部分払方式を実施している。これにより、請負業者の財務状況の改善や、下請業者への工事代金の支払の迅速化といった効果が得られることが報告されている²⁾。

このような状況を受け、国土交通省では ICT を用いた出来形管理要領において、レーザスキャナや UAV 写真測量といった技術を、出来高部分払方式における出来高計測にも使用することができるように定めている³⁾⁴⁾。このように出来高部分払方式における出来高計測に使用可能な技術の選択肢を増やすことで、請負業者が出来高部分払方式を使用しやすくなることが期待される。

請負業者が出来高部分払方式をさらに使用しやすい環境を構築するためには、より多くの技術を出来高部分払方式における出来高計測に使用することができるように、要領を整備していくことが望ましい。

1.2 動画を使う写真測量による出来高計測

本研究が実施された令和元年当時、開発が進んでいた一方で、要領が策定されていなかった技術の一つとして、動画を使う写真測量による出来高算出が挙げられる。

この技術の原理を以下に記す。まず、人が盛土などの計測対象の周りを歩行しながらスマホやデジカメで動画撮影を行う(図-1)。このとき、スマホやデジカメには GNSS アンテナを取付け(図-2)時間と位置を記録する。得られた動画から写真を切り出し、SfM という技術により点群データを取得する。得られた点群データと起工面データを使用し、出来高を算出する。

レーザスキャナや UAV 写真測量が広範囲の計測を短時間で行えるが高価な機器が必要になるという特徴を持つ一方で、本技術は広範囲の計測には向かないが安価な機器のみで計測を行えるという特徴を持つ。

動画を使う写真測量による出来高算出の要領が策定されていない理由は以下の3点が挙げられる。

- ・必要な精度を得るための計測条件を、要領において厳密に規定する必要があるか不明であること。
- ・動画を使う写真測量による出来高算出を行うある製品の精度確認において、レーザスキャナや UAV 写真測量で用いられている基準値を適用可能か不明であること。
- ・本技術を使用することで生産性が向上する効果が得られるか不明であること。

1.3 本研究の目的

以上のことから、本研究では、動画を使う写真測量による出来高算出について、以下の3点を達成することを目的とした。

- ・必要な精度を得るための計測条件を厳密に規定することの要否を明らかにすること。
- ・レーザスキャナや UAV 写真測量での出来高計測で用いられている基準値を適用可能か確かめること。
- ・従来法と比較して生産性が向上するか明らかにすること。

上記を達成する方法として、実機を用いた現場検証を行った。

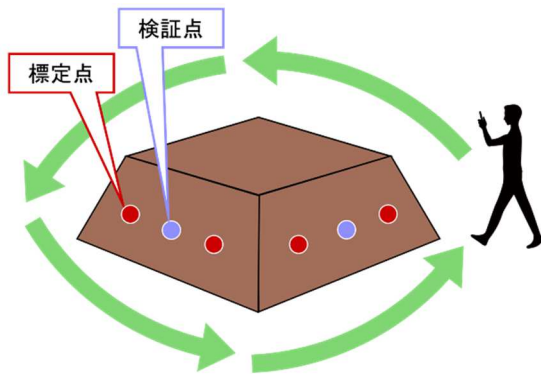


図-1 盛土撮影の概略図



図-2 GNSS アンテナを取り付けた撮影用スマートフォン

2. 検証方法

2.1 計測条件と基準値の検討

写真測量においては、測量精度を確保するために座標が既知である点を撮影範囲内に設置し、測量の基準とすることが多い。設置された点は標定点と検証点に分けられる。標定点は、写真測量の座標計測において基準とするための点である。一方、検証点は座標計測においては使用されず、計測後に計測誤差を評価するために使用される。

標定点は数が多いほど測量精度が上がるのが期待できるが、設置時に TS 等で座標を計測する必要があり手間がかかる。そのため、出来高部分払方式に必要なとされる出来高計測の精度を満足するために設置しなければならない標定点の数を明らかにすることは、作業量を最小限に抑えつつ求められる精度を確保するために重要である。

必要な標定点の数を明らかにするために、以下の手順で標定点の数を変えて SfM および出来高算出を行った。

<測定手順>

- i 盛土施工前の起工面データを作成する。
- ii 図-1 のように、計測対象の盛土の法面に標定点と検証点を設置し、TS で座標を計測する。隣り合う標定点の間隔は 25 m とする。

- iii 図-1 のように、計測対象の盛土を徒歩で一周しながら GNSS つきスマートフォンで盛土の法面を動画撮影する。
- iv 得られた動画から写真を切り出し、SfM により点群データを作成する。この際、同じ写真を使い、以下の3条件でそれぞれ点群データを作成する。
 - ・標定点すべて (25 m 間隔) を使用する。
 - ・標定点の半分 (50 m 間隔) を使用する。
 - ・標定点の4分の1 (100 m 間隔) を使用する。
- v 得られた出来形面データと起工面データから出来高を算出する。

3 条件の計測結果についてそれぞれ以下の2点を満たすか調べた。

- ① SfM で得られた点群における検証点座標の計測値と真値との較差が、既存の技術において定められた値 (x, y, z 方向の較差がそれぞれ 200 mm 以下³⁴⁾) を下回っていること。
 - ② SfM で得られた点群から作成した出来形面データより算出した出来高が、真値 $\pm 10\%$ に収まっていること。
- ①における検証点座標の真値としてはトータルステーション (以下 TS) で計測した値を用いた。②における出来高の真値としてはレーザスキャナで計測して得られた出来形面データより算出した値を用いた。これらの技術は比較的高精度で座標の計測が行えることから、真値に十分近いと仮定できると考えたためである。

また、②において基準を真値 $\pm 10\%$ としたのは以下のような理由による。出来高部分払方式では計測した出来高の 9 割分の工事代金を支払うこととされている。よって、算出した出来高が真値 $\pm 10\%$ に収まっていれば、実際の出来高を超える工事代金を支払うといった事態を防ぐことができる。

2.2 作業に要する時間の検討

従来法による出来高算出と、本技術を用いた出来高算出に要する時間を比較した。

従来法として、巻き尺及びトータルステーションによる計測により盛土の図面を作成し、幾何的に土量算出を行った。

なお、2.に記した実験の全ては日本建設機械施工協会に業務委託して行った。

3. 結果と考察

3.1 標定点間隔と検証点座標の計測誤差の関係

標定点間隔を 25 m または 50 m とした場合、SfM によって点群データを得ることができた。一方で、標定点間隔を 100 m とした場合、SfM によって点群データを生成することができなかった。

表-1 動画を使う写真測量で計測した検証点座標と真値（TS で計測した検証点座標）の較差
 （東を x 軸正方向、北を y 軸正方向、鉛直上向きを z 軸正方向とする。較差が 200 mm 以下であれば、既存の技術で出来高部分払方式の出来高計測を行う際に必要とされる計測精度を満たす。）

標定点間隔 [m]	検証点 1			検証点 2			検証点 3		
	Δx [mm]	Δy [mm]	Δz [mm]	Δx [mm]	Δy [mm]	Δz [mm]	Δx [mm]	Δy [mm]	Δz [mm]
25	37	25	-19	86	8	15	-34	-25	25
25	-2	-15	2	-28	12	-1	29	-16	4
25	-39	-22	-4	-39	41	1	-9	6	4
50	-22	-48	-31	-20	15	112	-57	-3	58

これは標定点の数が足りず、座標を算出する条件が不足したものと考えられる。

表 1 に標定点間隔を 25 m または 50 m としたときの SfM で算出した検証点座標と、TS で計測した検証点座標の較差を示す。全ての検証点の全ての方向の較差が 200 mm を下回っており、レーザスキャナや UAV 写真測量で出来高部分払方式の出来高計測を行う際に必要とされる計測精度を満たしている。

以上の結果から、動画を使う写真測量において、点群データを生成可能であれば、標定点間隔によらず既存の技術で出来高部分払方式の出来高計測を行う際に必要とされる精度を満たすことができると分かった。

3.2 出来高の計測誤差

動画を使う写真測量による出来高計測で算出した土量と、レーザスキャナによる出来高計測で算出した土量の比較を表 2 に示す。なお、写真測量からの算出には 3.1 において生成に成功した点群データを使用したものであり、従って、検証点座標の測定誤差が 200 mm を下回っているものである。

写真測量の場合はレーザスキャナと比較して 3.8% 多い値が得られた。これは、2.1 で設定した真値 $\pm 10\%$ という基準を満たす値である。

以上の結果は、写真測量で算出した検証点座標と、TS で計測した検証点座標の較差が 200 mm を下回っていれば、真値 $\pm 10\%$ の精度で出来高の算出が可能であることを示唆する。

3.3 出来高の計測精度を確保できる盛土高さ

写真測量の座標計測誤差の大きさは、計測地点の座標の値に追従して変化するものではなく、常に一定の範囲の値で与えられると考えることができる。従って、盛土の高さが低くなるほど座標計測誤差は相対的に大きくなり、出来高算出の相対誤差も大きくなることが予想される。

そこで、真値 $\pm 10\%$ の精度を確保できる最低限の盛土高さについて検討を行った。メッシュ法を使用する場合、土量の真値 V_T と土

表-2 動画を使う写真測量で算出した土量とレーザスキャナで算出した土量の比較

	写真測量	レーザスキャナ(真値)
土量 [m ³]	6000.0	5790.1
割合(対レーザスキャナ)	103.8%	100%

量の計測値 V_M は式 (1) のように表すことができる。ただし、 h_{Ti} はあるメッシュにおける出来形の起工面からの高さの真値、 h_{Ei} はあるメッシュにおける出来形の起工面からの高さの計測誤差、 S_i はあるメッシュの鉛直方向の投影面積をそれぞれ表す。

$$V_T = \sum_i^n h_{Ti} S_i, \quad V_M = \sum_i^n (h_{Ti} + h_{Ei}) S_i \quad (1)$$

S_i が全てのメッシュにおいて一定であると仮定すると、算出した土量の相対誤差 ϵ_R は式 (2) のように表すことができる。

$$\epsilon_R = \frac{V_M - V_T}{V_T} = \frac{nS \sum_i^n h_{Ei}}{nS \sum_i^n h_{Ti}} = \frac{\overline{h_E}}{\overline{h_T}} \quad (2)$$

$$(\overline{h_T} = \frac{1}{n} \sum_i^n h_{Ti}, \overline{h_E} = \frac{1}{n} \sum_i^n h_{Ei})$$

すなわち、算出した土量の相対誤差は、z 軸座標計測誤差の平均値を真の起工面から出来形までの高さの平均値で除した値に等しい。

ところで、表 1 に示す z 軸方向の計測誤差から 99% 信頼区間を算出すると、 14 ± 34 [mm] である。これは、動画を使う写真測量で任意の回数だけ座標計測をしたとき、それらの計測誤差の平均値が 99% の確率で 14 ± 34 [mm] に収まると言うことを示している。

ここで、z 軸座標計測誤差の平均値を算出した 99% 信頼区間における最大値 48 [mm] とおくと、相対誤差 ϵ_R が 10% 未満となるような $\overline{h_T}$ の最小値は式 (2) より 480 [mm] と求められる。

この結果は、動画を使う写真測量を用いる場合、盛土の平均高さが 480 [mm] を越えていれば、真値

±10%の精度での土量算出が行える確率が 99%を越えるということを示す。ほとんど全ての盛土は 1~10 [m]オーダの平均高さを有するため、本技術は平均高さ 1メートル以上の盛土の土量算出に十分有効であると考えられる。

3.4 計測条件の規定および基準値の提案

3.1の結果より、点群データを生成可能であれば、その点群データは既存の技術において定められている計測誤差 200 mm 以下を満たす精度での座標計測が可能であることが分かった。また、3.2の結果より、計測誤差 200 mm 以下を満たす精度で得られた点群データを使用すれば、真値±10%以内の精度で出来高算出が可能であることが分かった。

これらのことから、十分な精度で出来高算出を行えるための条件は、点群データが生成できていること、および計測誤差 200 mm 以下であることの2点である可能性がある。そうであれば、標定点の数などの撮影条件を要領において厳密に規定する必要は無く、検証点を用いた精度確認のみを行うように定めるべきである。また、精度確認においては、既存の技術と同様、3軸全てにおいて計測誤差 200 mm 以下であることを確認するべきである。

ただし、本研究においては、標定点を設置していない場合の検討は行っていないため、標定点を設置せずに点群データを作成できた場合に、十分な精度で出来高計測を行えることを直接的に支持する根拠はない。

3.5 作業に要する時間

図-3に巻き尺及びTSを使う従来法による出来高計測に要した時間と、動画を使う出来高計測に要した時間を比較するグラフを示す。

従来法では90分を要する一方で、動画による写真測量では35分を要した。従来法と比べて半分以上の所要時間で計測を行える事が分かった。特に、計測に要する時間が著しく短縮された。

この結果から、動画を使う写真測量による出来高計測を使うことは生産性向上に有効であると言える。

4. 結言

動画を使う写真測量による出来高計測について、実機を用いた現場検証を行った。その結果、以下のことを明らかにした。

- ・撮影条件を厳密に規定せずとも、検証点を用いた精度確認を行えば、十分な精度で出来高算出を行うことが可能であること。ただし、標定点の不要であるかについては更なる検討を必要とする。
- ・精度確認では、レーザスキャナやUAV写真測量

での出来高計測で用いられている基準値を適用可能であること

- ・従来法と比較して計測の所要時間が半以下になる場合があること。
- また、一般的に見られるどんな高さの盛土に対しても有効であることを統計的に示した。

ただし、本研究は可能なあらゆる動画を使う写真測量システムについて検証したものではない。また、あらゆる現場において検証を行ったものでもない。したがって、ここで得られた結論が異なる構成の動画を使う写真測量システムや、異なる特性を持つ現場に適用可能か検討することは、今後の課題である。

また、今後、動画を使う写真測量の座標計測精度が向上すれば、出来高計測だけでなく出来形管理にも使用できるようになる可能性がある。その際には、出来形管理に必要な精度を満たすための計測条件の既定の要否や、精度確認手法について検討を行っていくことが必要である。

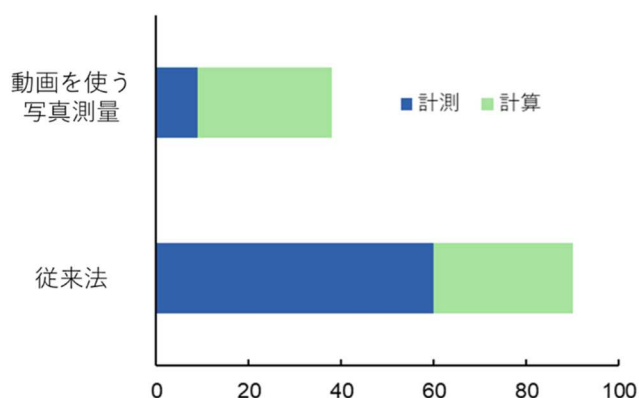


図-3 動画を使う出来高計測に要した時間と、巻き尺及びTSを使う従来法による出来高計測に要した時間の比較

謝辞

本研究の現場検証は日立建機株式会社の協力のもと、円山川鶴岡地区河道掘削工事現場で、同社所有の機器を用いて実施した。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 出来高部分払方式検討報告書, 2002
- 2) 溝口 宏樹: 我が国における出来高部分払方式の試行を通じた効果・課題と改善策に関する考察, 建設マネジメント研究論文集, Vol11, pp.1~13, 2004
- 3) 国土交通省: 空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案), 2020
- 4) 国土交通省: 地上型レーザスキャナーを用いた出来形管理要領(土工編)(案), 2020