

土工における重機搭載型レーザスキャナを用いた出来形計測における精度確認手法

金森 宗一郎¹・小塚 清²・森川 博邦³

¹非会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

E-mail: kanamori-s926v@mlit.go.jp

²非会員 同上

E-mail: kozuka-k92ta@mlit.go.jp

³正会員 研究当時同上 現土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

E-mail: morikawa-h573ck@pwri.go.jp

重機に搭載されたレーザスキャナ（以下、重機搭載型 LS と称する）による出来形計測の技術開発が進んでいる。この技術を使用することが出来形管理における生産性向上につながると期待されている。

一方で、国土交通省が策定している ICT 活用工事の要領には、重機搭載型 LS による出来形計測を使った出来形管理は規定されていない。これは、重機搭載型 LS について、出来形管理に必要な精度で計測する能力を有しているか確認する手法が確立されていないためである。

そこで、本研究では、重機搭載型 LS の出来形計測における精度確認の手法を確立することを目的として、実機を用いた現場検証を行った。

Key Words : *LS on heavy equipment, laser scanner, accuracy test, earth work, ICT*

1. 背景と目的

(1) ICT 活用工事での出来形管理の現状

出来形管理への ICT の導入は生産性の向上をもたらすことが知られている^{1,2}。このことから、出来形管理のための ICT の開発が盛んに行われている。

このような状況を受け、国土交通省は公共工事における ICT 活用を促進するため、UAV による空中写真測量、トータルステーション、RTK-GNSS、地上型レーザスキャナといった計測技術を活用した出来形管理についての要領を策定している。

これらの要領は、各技術を用いた計測の標準的な方法や、精度確認手法について定めており、公共工事の出来形管理において ICT を活用する際に参照すべきものとされている。

ICT 技術の発展が急速に進む一方で、出来形管理についての要領の策定が遅れば、公共工事の出来形管理に使用可能な技術の活用が遅れるおそれがある。そのため、出来形管理での使用が可能な技術については、早急に要領を策定することが望ましい。

(2) 重機搭載型 LS を用いた出来形管理

現在開発が進んでいる一方で、要領が策定されてい

ない技術の一つとして、重機搭載型 LS を用いた出来形管理を挙げることができる

重機搭載型 LS は、2D レーザスキャナをバックホウなどの旋回可能な重機に搭載し、施工後に重機を旋回させながらレーザスキャナによる計測を行うことで、計測点までの距離を取得できる。得られた距離と、GNSS で取得した重機の位置と方位、傾斜計によるピッチ、ロールといった数値を使用することで、計測対象の 3 次元座標を求めることができるという技術である。

重機搭載型 LS の出来形管理要領が策定されていない理由の一つは、ある重機搭載型 LS によって出来形管理に必要なとされる精度で計測できるか否かを確認する手法が確立されていないということである。

(3) 本研究の目的

以上のことから、本研究では、重機搭載型 LS の出来形管理要領の策定に資するため、重機搭載型 LS による出来形計測が出来形管理に必要なとされる精度を満足するか否かを確認する手法を確立することを目的とした。

その方法として、実機を用いた現場検証を行った。



図-1 バックホウと搭載されたレーザスキャナー

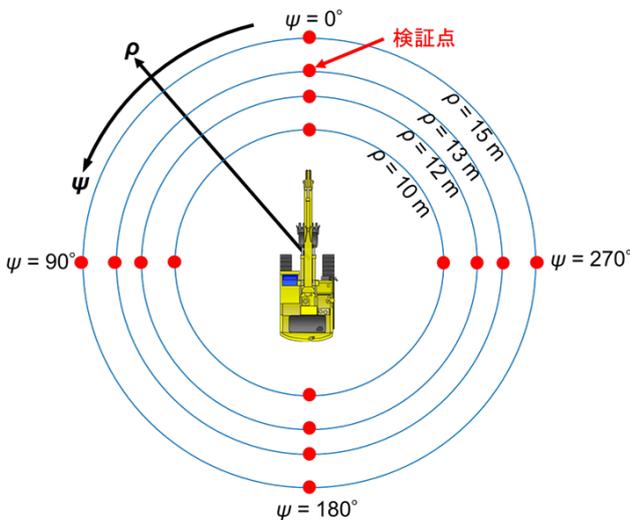


図-2 事前精度確認を模した計測での検証点の配置

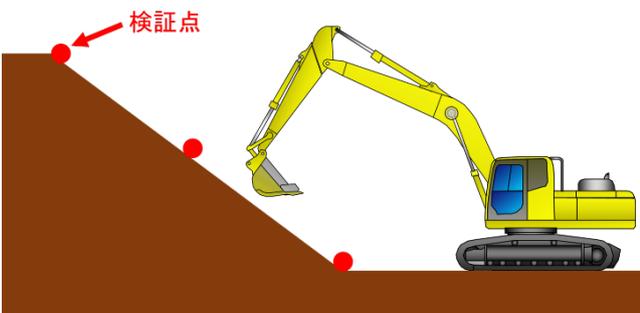


図-3 都度精度確認を模した計測での検証点の配置

2. 検証方法

(1) 使用した装置

重機搭載型 LS の実機として、バックホウ (ZX200-3、日立建機) に 2D レーザスキャナ (LMS511 PRO、Leica) を搭載した装置 (図-1) を使用した。

(2) 暫定的な精度確認手法と検討事項の整理

現場検証に先立ち、これまでに策定されてきた出来形管理要領を踏まえ、重機搭載型 LS による出来形計測のための精度確認手法を暫定的に定めた。その上で、現場

検証において検討すべき事項を整理した。

a) 暫定的な精度確認手法

計測範囲内に座標値の真値が既知である検証点をいくつか設置し、重機搭載型 LS を用いて、それぞれの検証点の座標を十分な回数計測する。得られた各計測軸 (水平方向 2 軸 + 鉛直方向) の計測値と真値との差分の分布より、要求される精度を満たしているかを判断する。判断の目安として、本稿においては、「それぞれの座標値の差分の 2σ (σ は標準偏差) が機器としての移動体搭載型レーザスキャナに許容されている誤差である 50 [mm] 以下に収まっていること」とした。

b) 検討事項

大きく分けて 2 つの検討事項を設定した。

第一に、合理的な検証点の設置箇所数および配置を検討することとした。

第二に、精度確認を現場ごとに事前に 1 回のみ行えばよいか、出来形の点群データごとに、すなわち毎回計測時に行わなければならないか検討することとした。

これらはいずれも、精度確認手法の作業効率と確からしさがトレードオフとなる可能性がある項目である。

たとえば、検証点の数を減らせば作業効率は上がるが、精度確認手法の確からしさが低下するおそれがある。これは、ある地点を計測する精度が他の地点を計測したときと同程度であるかどうかは自明ではないからである。

また、精度確認を現場ごとに 1 回行えばよいとすれば、作業効率は上がるが、精度確認手法の確からしさが低下するおそれがある。これは、重機が移動しても計測精度は一定であるかどうかは自明ではないからである。

以下、現場ごとに事前に 1 回のみ行う精度確認を「事前精度確認」、出来形の点群データごとに行う精度確認を「都度精度確認」と称する。

(3) 計測および解析手順

a) 事前精度確認を模した計測実験の手順

事前精度確認は水平面上で行うものとした。その上で、重機搭載型 LS を原点とする水平面状の極座標を定義し、計測地点の座標を ρ と ψ で表せるようにした (図-2)。ここで、 ρ および ψ は重機搭載型 LS から計測地点までの距離および重機の旋回角にそれぞれ対応する。

検証点を $\psi = 0, 90, 180, 270$ [deg] の 4 方向の $\rho = 10, 12, 13, 15$ [m] となる点、計 16 点に設置した (図-2)。

さらに、設置した検証点の 3 次元座標をトータルステーションで計測した。

その後、検証点の座標を、重機を 1 [deg/s] で旋回させながら、重機搭載型 LS で計測した。このとき、3 回計測を行い、その平均値を重機搭載型 LS による計測値とした。これを、重機の位置を変えながら 10 日間に亙り 53 回繰り返した。

表-1 計測実験で得られた計測軸ごとの計測誤差をグループ化し算出した計測誤差の平均値と標準偏差 σ
 ここで、 $\psi=270^\circ$ 方向を x 軸正方向、 $\psi=0[\text{deg}]$ 方向を y 軸正方向、鉛直方向を z 軸正方向とする。
 太字で示したデータは 2σ が 50 [mm] より大、すなわち要求精度が満たされていないもの。

(a) 事前精度確認を模した計測実験で得られた計測誤差を ρ の値によってグループ化

ρ [m]	10 (n=212)			12 (n=212)			13 (n=212)			15 (n=212)			
	測定軸	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
誤差の平均値 [mm]		18.6	5.3	-2.5	17.7	3.5	8.1	18.2	7.2	5.0	18.7	5.6	9.2
誤差の標準偏差 σ [mm]		19.2	22.1	18.3	22.7	23.2	23.7	21.1	26.0	20.1	28.0	29.1	23.0

(b) 事前精度確認を模した計測実験で得られた計測誤差を ψ の値によってグループ化

ψ [deg]	0 (n=212)			90 (n=212)			180 (n=212)			270 (n=212)			
	測定軸	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
誤差の平均値 [mm]		19.0	3.2	-2.2	15.2	6.9	8.7	23.8	0.3	5.3	15.6	9.4	6.5
誤差の標準偏差 σ [mm]		14.7	34.9	21.7	28.2	10.5	20.6	14.7	32.4	21.7	28.3	12.8	21.5

(c) 都度精度確認を模した計測実験で得られた計測誤差を検証点の位置によってグループ化

検証点の位置	法肩 (n=48)			法面 (n=72)			法尻 (n=96)			
	測定軸	x	y	z	x	y	z	x	y	z
誤差の平均値 [mm]		19.6	11.5	-9.1	12.7	5.5	-8.0	26.2	13.0	-21.4
誤差の標準偏差 σ [mm]		21.9	23.7	19.9	17.1	24.2	19.6	19.4	15.6	17.0

b) 都度精度確認を模した計測実験の手順

都度精度確認は点群データごとに精度確認を行うため、施工箇所と重機が近接した状態で行われる。その状態を模擬するため、重機を法面に近接させ、検証点を法肩、法面、法尻にそれぞれ設置した (図-3)。

その後 a) と同様に検証点の座標をトータルステーションおよび重機搭載型 LS で計測した。重機搭載型 LS での計測は重機の位置を変えながら 48 回繰り返した。

c) 解析手順

a), b) で得られた重機搭載型 LS の計測値について、対応するトータルステーションの計測値との差をとり、それを重機搭載型 LS の計測値と真の座標値の誤差とした。

これは、トータルステーションが高精度で座標の計測が行えることから、トータルステーションによる計測値は真の座標に十分近いと仮定できると考えたためである。

その後、a) のデータおよび b) のデータを後述する方法でいくつかのグループに分類し、各グループについて真の座標値との誤差の平均値および標準偏差 σ を算出した。

なお、上記の実験の全部と解析の一部 (表-1 (a) 相当部分) 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

(1) 計測距離 ρ が精度に与える影響

事前精度確認を模した計測実験で得られた計測誤差を ρ の値によってグループ化し、算出した平均値と標準偏差を表-1 (a) に示す。

誤差の平均値については、 ρ の変化に伴う系統的な変化は見られない。一方、誤差の標準偏差については、 ρ

の増加に伴って増加する傾向が見られる。 2σ が 50 [mm] より大、すなわち要求精度が満たされていないと判定されるもの (太字で示されたもの) は、 ρ が 13, 15 [m] のときに限られる。これは、計測対象への距離が大きいほど計測誤差が増えるという一般的に知られているレーザスキャナの性質によるものと考えられる。

(2) 旋回角 ψ が精度に与える影響

事前精度確認を模した計測実験で得られた計測誤差を ψ の値によってグループ化し、算出した平均値と標準偏差を表-1 (b) に示す。

誤差の平均値については、 ψ の変化に伴う系統的な変化は見られない。一方、 ψ が 0, 180 [deg] のときは x 軸方向の誤差の標準偏差が、 ψ が 90, 270 [deg] のときは y 軸方向の誤差の標準偏差が、それぞれ要求精度を満たさないと判定されるほど大きな値となった。

これらの方向は対応する ψ のときのレーザスキャナの向き、すなわちレーザが照射される向きと一致する。また、ここでの標準誤差の算出には ρ が大きい検証点での計測誤差が含まれている。したがって、表-1 (b) において要求精度を満たさない値が現れたのは、 ρ が大きい検証点におけるレーザスキャナの計測誤差が大きいことを反映しているものであり、 ψ の変化を原因として精度が変わったのではないと考えられる。

(3) 施工箇所ごとの精度確認の要否

都度精度確認を模した計測実験で得られた計測誤差を検証点の位置でグループ化し、算出した平均値と標準

偏差を表1-(c)に示す。

誤差の平均値、誤差の標準偏差ともに計測点の位置による系統的な変化は見られない。また、誤差の標準偏差については、 2σ が50 [mm]より大となった条件はない。

(4) 精度の日間差について

重機搭載型LSの精度が測定日によって異なるか調べるために、F検定により測定値のばらつきが測定日によって異なるか調べた。

測定日は10日間であるから、45パターンの多重比較検定を行うことになる。そこで、false discovery rate = 0.05としてBH法により有意水準を算出し、得られた有意水準 $P=0.01$ を下回る組について、帰無仮説を棄却した。

すると、5日目と4・8・9・10日目、10日目と1・2・3・6・7日目の間で測定値のばらつきが異なることが分かった。これは、測定日によって重機搭載型LSの精度が変化することを示唆するものである。

(5) 誤差の平均値について

x 軸方向の誤差が y 軸や z 軸と比べて大きいという傾向が常に見られる。この誤差は旋回角 ψ や計測日に関わらず現れていることから、レーザスキャナの測距誤差、GNSSの測位誤差またはGNSSと重機の相対位置の誤差に由来するものではない。したがって、この誤差の原因は工事基準点の誤差と考えられるが、実際にどの程度誤差があるかは確認出来ていない。

(6) 精度確認手法の提案

(1)~(3)の結果から、平面に検証点を置いて行う事前精度確認のほうが、法面に検証点を置いて行う都度精度確認よりも、要求精度を満たせない可能性が高い計測条件であることが分かった。一方で、(4)の結果から、精度が日ごとに変化する可能性があることが分かった。これらの結果から、事前精度確認で要求精度を満たしている場合は、都度精度確認でも要求精度を満たしている可能性が高いと言える。また、日によって精度が変化する可

能性があると言える。したがって、作業効率の観点から、1日に1回の頻度で事前精度確認のみを行い、都度精度確認は不要とするべきである。

(1)の結果から、計測距離 ρ が大きくなるほど、要求精度が満たされにくくなる傾向があることがわかった。このことから、精度確認に要求精度を満たすことが可能な最大計測距離を見出すことを盛り込み、出来形計測はそのような範囲内でのみ行うようにすべきである。

(2)の結果から、旋回角 ψ の変化が計測精度に与える影響は小さいことが分かった。したがって、作業効率の観点から、精度確認では旋回角 ψ を固定して行うか、旋回角 ψ を狭い範囲でのみ変化させながら行うべきである。

4. 結言

重機搭載型LSについて実機を用いた現場検証を行った。その結果、精度確認は、1日1回の頻度で始業時点検と併せて実施すれば十分であること、要求精度を満たせるような最大計測距離を精度確認を通して把握しておくべきこと、広範囲の旋回角に対して精度確認を行う必要はないことが分かった。

ただし、本研究は可能なあらゆる重機搭載型LSの構成について検証したものではない。したがって、ここで得られた結論が異なる構成の重機搭載型LSに適用可能か検討することは、今後の課題である。

謝辞：本研究の現場検証は株式会社フジタの協力のもと、同社が施工する土岐口開発造成工事の用地造成現場で、同社所有の重機を用いて実施した。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 遠藤和重、田中洋一、神原明宏：トータルステーションによる土工の出来形管理手法、土木技術資料、51-6 (2009)、pp. 26-29
- 2) 重高浩一ほか：3次元計測機器を活用した出来形管理の技術拡大の取り組みについて～RTKGNSS、写真測量の出来形管理への活用手法の検討～、平成27年度建設施工と建設機械シンポジウム、pp. 63-66

SUITABLE PRECISION TEST METHOD FOR A LASER SCANNER ON THE HEAVY EQUIPMENT IN AS-BUILT FORM MEASUREMENT

Soichiro KANAMORI, Kiyoshi KOZUKA, Hirokuni MORIKAWA

Technology of as-built form measurement with a laser scanner mounted on heavy equipment (hereafter called “LS on heavy equipment”) is being developed. This technology is expected to lead productivity improvement on as-built form management.

However, ministry of infrastructure haven't standardized as-built form management with measurement by a LS on heavy equipment. One of the reasons is that established method hasn't been obtained to confirm if one LS on heavy equipment can measure as-built form precisely enough for as-built form management.

Therefore, in this research, we conducted on-site investigation with real machine to establish suitable precision test method for a LS on heavy equipment in as-built form measurement.