

12. 土木現場におけるレーザースキャナの活用性を高める 代替ターゲットの検討

国土交通省国土技術政策総合研究所 ○池田 誠
国土交通省国土技術政策総合研究所 早川 直樹
国土交通省国土技術政策総合研究所 杉谷 康弘

1. 背景

1.1. ICT 活用工事実現に向けた近年の取り組み

国土交通省では、建設現場の抜本的な生産性向上を図る i-Construction のトップランナー施策のひとつとして、平成 28 年度より「ICT の全面的な活用」を打ち出し、ICT 土工を皮切りに ICT 舗装工、ICT 法面工、小規模土工等へと年々その適用工種を広げている。同時に、「3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）り」（以下、出来形管理要領）といった関係マニュアルの整備も進めている。この取り組みは、建設現場における生産性向上や安全性確保を目的に、3次元データや ICT といった技術を活用する施策であり、国内への普及拡大をすることで災害等の非常時における迅速な復旧復興作業での活用も期待されている。

図-1 は国土交通省直轄工事の ICT 活用工事件数²⁾である。実施件数および実施率ともに年々増加しており、ICT 活用工事が普及拡大している様子が伺える。



図-1 ICT 活用工事実施状況（直轄）

1.2. 3次元点群データの普及

日本国内においては、i-Construction の普及により、建設現場の現状把握や設計、検査における 3次元点群データの活用が進んでいる。その他にも、土砂災害時等の状況把握や仮設道路の設計などにおいても活用が進んでいる。また、令和 5 年度からは BIM/CIM (Building/Construction Information Modeling, Management) の原則適用という方針が示されており、今後さらなる 3次元点群データの活

用が期待される。

3次元点群データを取得する計測技術は、TS 等光波方式をはじめ、RTK-GNSS や地上型レーザースキャナ（以下、TLS : Terrestrial Laser Scanner）、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)など多くの計測技術がある。これらの技術により 3次元点群データを容易に取得できるようになってきている。

1.3. TLS のレジストレーションについて

TLS を用いた計測は、一度の計測で広範囲にデータを取得することができ、計測にかかる現場作業の大幅削減や安全性の確保などにつながる。その際、計測対象物や計測箇所に対して死角がないようにスキャンを行う必要があるため、TLS 本体を盛替えてスキャンといった作業を繰り返し行う必要がある。

このとき、器械点ごとの 3次元点群データ同士を結合するために「レジストレーション」と呼ばれる作業を行う。一般的なレジストレーションでは、図-2 のような白黒チェッカーターゲットなど各メーカーが販売する専用ターゲットを用いる。TLS によっては、直前と現在の器械点の相対位置をリアルタイムに追跡し、自動でレジストレーションを行うことでターゲットレスを実現する機種もある。このような TLS でのレジストレーションは、屋内においては建物の角といった特徴的なオブジェクトを検出することでレジストレーションが成功する場合がある。その一方で、土木現場などにおいては、特徴的なオブジェクトに乏しいことからレジストレーションができず、専用ターゲットが必要となる場合が多い。



図-2 レジストレーションに必要なターゲット³⁾

2. 研究目的

一般的な手順では、専用ターゲットを購入するコストや、少数のターゲットの盛替えなどの手間がかかるという問題がある。

そこで本稿では、土木現場において一般的な部材や器材をレジストレーションのターゲットとして代替することで、レジストレーションにかかるコストを低減する手法について検討した。

3. 研究方法

3.1. 従来手法と提案手法

従来手法では、専用ターゲットを使用することで専用ターゲットの中心座標を求め、専用ターゲットの中心座標を用いて器械点同士の相対位置を定め、点群同士をレジストレーションする。その際、専用ターゲットの個数が限られることから設置計画に配慮する必要がある。

それに対して、本稿の提案手法では、任意形状のオブジェクトをターゲットとして使用し、ターゲット上の代表位置の座標を用いて器械点同士の相対位置を定め、点群同士をレジストレーションする。その際、任意形状のターゲットを使用できることから入手性の高いオブジェクトを使用でき、設置計画に配慮する必要が低減する。

3.2. 提案手法の手順

提案手法では、専用ターゲットの代替として任意の形状のオブジェクトをターゲットとして使用する。提案手法の手順は以下のとおりである。

- (ア) ICP (Iterative Closest Point) マッチング⁴⁾がしやすいモデル点群を取得できる理想的な条件で設置した、計測点群中に含まれる代替オブジェクトを抽出し、「基準モデル」とする。
- (イ) 任意の位置に設置した計測点群中に含まれる代替オブジェクトの点群を抽出し、「計測モデル」とする。
- (ウ) 基準モデル上の「代表位置点」を抽出する。
- (エ) 基準モデルと計測モデルを ICP により位置合わせする。
- (オ) ICP マッチングで得た座標変換パラメータを用いて、基準モデルの代表位置点を座標変換する。このとき、ICP マッチングをした基準モデルの点群と座標変換した代表位置点の相対的な位置関係は常に同じとなる。
- (カ) 計測点群ごとにそれぞれ対応する座標変換した代表位置点同士を ICP マッチングする。
- (キ) ICP マッチングで得た座標変換パラメータを用いて、計測点群同士のレジストレーションを行う。

3.3. 検証条件

基準モデルと計測モデルを ICP マッチングして得た座標変換パラメータを用いて計算した代表位置点の座標と、計測モデル上の代表位置点に相当する場所の真値座標との誤差を求めることで、提案手法における座標精度を検証した。

検証では、TLS、TS、白黒チェッカーターゲット、代替オブジェクト、点群処理ソフトウェアを使用した。検証条件については、以下のとおりである。

- 代替オブジェクト：
一般的な土木現場にある資材や器材という観点から、700mm サイズの「三角コーン」と 20t クラスの「油圧ショベル」を使用した。
- 器材の配置：
使用する器材は図-3、図-4のように配置した。基準モデルとなる代替オブジェクトは、2.5m 地点に設置した三角コーン、および 10m 地点に設置した油圧ショベルとする。計測モデルとなる代替オブジェクトは、三角コーンは 5~50m まで 5m おきに、油圧ショベルは 10~60m まで 10m おきに設置した。
- TLS：
Leica 社 RTC360 を使用し、取得する点群密度は、3mm@10m の設定とした。
- 点群処理ソフトウェア：
点群データの表示および ICP マッチング、座標変換などは、オープンソースのソフトウェアである Cloud Compare⁵⁾とその機能を使用した。



図-3 器材の配置

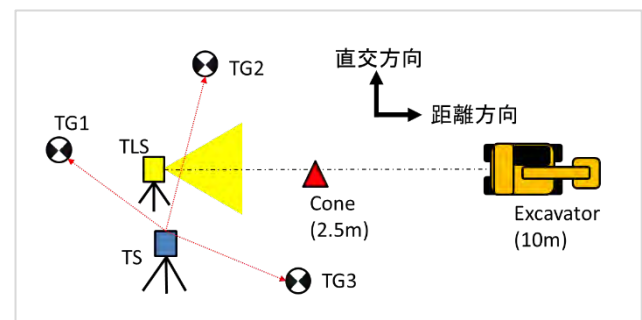


図-4 器材の配置 (概念図)

3.4. 検証手順

検証は図-5のような現場にて実施した。作業手順について、「現場作業」と「点群解析作業」に分けて説明する。まず、「現場作業」の手順は以下のとおりである。

- ① 使用する器材 (TLS, TS, 白黒チェッカーターゲット, 代替オブジェクト) を図-3, 図-4のように配置した。
- ② TS のノンプリズム計測で白黒チェッカーターゲットの中心位置座標を計測した。
- ③ 図-6のように TS と反射プリズムを用いて, 代替オブジェクトの代表位置点の座標を計測し, 本検証における真値座標とした。
- ④ 任意位置に設置した代替オブジェクトを TLS で点群計測した。

次に、「点群解析作業」の手順は以下のとおりである。

- ⑤ ②で計測した白黒チェッカーターゲットの中心位置座標を利用して, TS 座標系を TLS 座標系に変換した。
- ⑥ ICP マッチングを行う基準モデルおよび計測モデルについて, トリミングなどの点群処理を行った。本検証では, ICP マッチング精度が向上するようトリミングを工夫し, それぞれ図-7, 図-8のように基準モデルを作成した。三角コーンは, 地面に接地する四角いベース部分とその上の段差部分を除いた円錐部のみ (赤色ハイライト箇所) とした。油圧ショベルは, 油圧ショベル本体の後部のカウンターウェイトの一部 (黄色ハイライト箇所) とした。
- ⑦ 図-9, 図-10に示すように, 基準モデルと計測モデルを ICP マッチングにより位置合わせをした。
- ⑧ 図-10に示すように, ICP マッチングして得た座標変換パラメータを用いて基準モデル代表位置点を座標変換した位置点座標と, ③で計測した真値座標との差 (誤差) を求めた。



図-5 検証現場の様子



図-6 代表位置点の座標計測

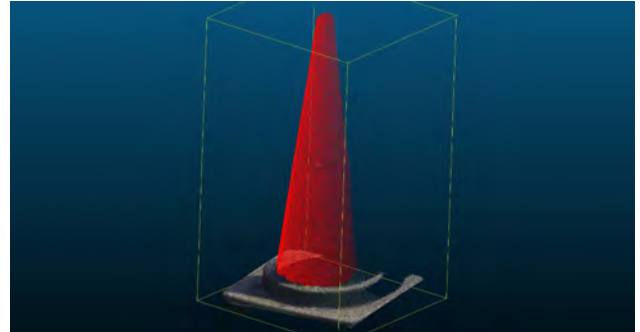


図-7 基準モデル (三角コーン)

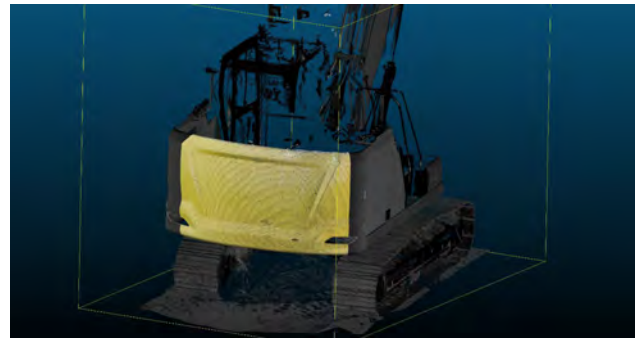


図-8 基準モデル (油圧ショベル)

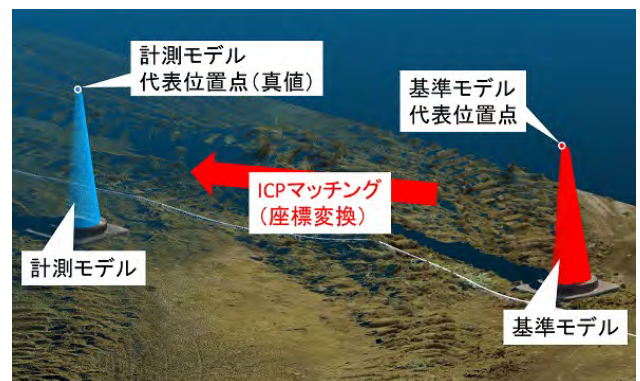


図-9 ICP マッチングのイメージ (1)

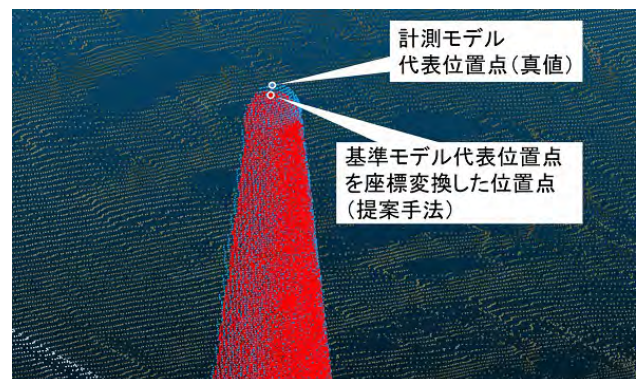


図-10 ICP マッチングのイメージ (2)

4. 検証結果と考察

4.1. 結果

提案手法による代替オブジェクト上の代表位置点の座標精度の検証結果を表-1、図-11、図-12に示す。

三角コーンは、距離方向、直交方向は概ね10mm以内であったが、高さ方向はTLSからの距離に比例して最大30mm程度の誤差がみられた。油圧ショベルは、距離方向、直交方向、高さ方向の全てで10mm以内であり、特に高さ方向で油圧ショベルの精度が高いという結果になった。

表-1 提案手法による座標精度

| 三角コーン | | | 油圧ショベル | | | | |
|--------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|
| 点名 | 距離方向 [mm] | 直交方向 [mm] | 高さ方向 [mm] | 点名 | 距離方向 [mm] | 直交方向 [mm] | 高さ方向 [mm] |
| Cone0 | - | - | - | EXC0 | - | - | - |
| Cone5 | 1.9 | 0.2 | -8.3 | EXC10 | 0.4 | 0.3 | -0.6 |
| Cone10 | 1.8 | 8.6 | -7.1 | EXC20 | -1.0 | 3.1 | -4.7 |
| Cone15 | -7.1 | -1.5 | -14.1 | EXC30 | 4.9 | 2.9 | 1.5 |
| Cone20 | -6.7 | -0.5 | -15.2 | EXC40 | 5.3 | 5.2 | 0.2 |
| Cone25 | -3.1 | -3.2 | -15.0 | EXC50 | 9.1 | 8.9 | 1.1 |
| Cone30 | -10.4 | -6.2 | -20.1 | EXC60 | 7.4 | 7.1 | -0.1 |
| Cone35 | -0.9 | -2.5 | -19.2 | | | | |
| Cone40 | -7.3 | 2.8 | -17.9 | | | | |
| Cone45 | -4.7 | 6.1 | -20.6 | | | | |
| Cone50 | -5.1 | 2.8 | -29.7 | | | | |

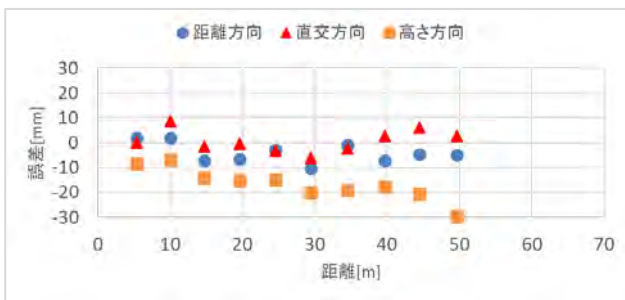


図-11 提案手法による座標精度 (三角コーン)

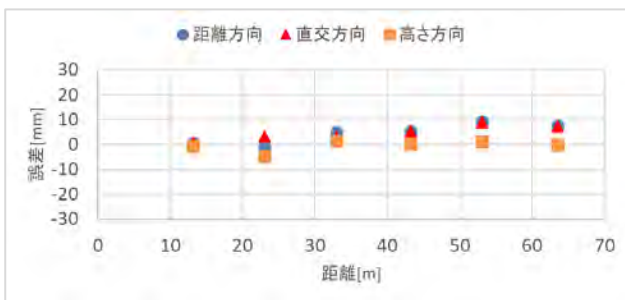


図-12 提案手法による座標精度 (油圧ショベル)

4.2. 考察

- 提案手法の座標精度について：

本検証の座標精度の最大誤差30mmであり、出来形管理要領中で定める土工の出来形管理の要求精度50mm以内を満たした。本検証の条件においては、使用したTLSの計測範囲(70m)全体で三角コーンと油圧ショベルをレジストレーションのターゲットとして利用することが可能であるとい

える。ただし、三角コーンは、遠方になるほど精度低下の傾向があることから50m以上での使用は注意が必要となる。

- 代替オブジェクトについて：

三角コーンは高さ方向の軸対称な形状であるため、水平方向の精度が良かったと考えられる一方で、高さ方向に特徴的な形状がないため、高さ方向の座標精度が悪化したと考えられる。油圧ショベルは、大きな面かつ特徴的な凹凸があるため座標精度が良かったと考えられる。また、地面から高さがあることで遮蔽物の影響を受けづらく、遠方でも安定した座標精度になったと考えられる。

- ICP マッチングについて

本検証において、三角コーンは高さ方向に特徴がないことから座標精度が悪化したと考えられ、三角コーンの段差部分のように高さ方向に特徴を持つモデルにすることで精度向上すると考えられる。その一方で、三角コーン下部の段差部分は、遠方になるほど密度が低い不完全な点群となり、そのような段差部分を含むモデルでは、ICP マッチングが困難であった。この場合、不完全な段差部分の点群をトリミングするといった工夫が必要となる。このことから、ICP マッチングに使用するモデルの点群密度やトリミングの範囲がICP マッチングの精度に影響することが分かった。

5. 結論

本稿では、土木現場において一般的な部材や器材をレジストレーションのターゲットとして代替する手法について検証することで、任意形状のオブジェクトをレジストレーションのターゲットとして代替できることを明らかにした。これにより、ターゲットの設置作業や専用ターゲットの購入といったコストを低減することができる。

今後の展望として、点群処理手法の整理や代替オブジェクトの調査によって、さらなる精度向上について検討する。また、提案手法における、点群処理や座標変換、変換パラメータ取得、精度計算といった手動作業を自動化するプログラミングを行う。

参考文献

- 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）、令和5年3月
- 国土交通省：ICT導入協議会（第15回）、2022
- 国土交通省国土地理院：地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）平成30年3月15日改正
- Szymon.R and Marc.L：“Efficient Variants of the ICP Algorithm”, Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001, pp. 145-152. [fasticp_paper.pdf\(princeton.edu\)](https://fasticp.paper.pdf(princeton.edu))
- Cloud Compare：<https://www.danielgm.net/cc/>