

フォトグラメトリ技術と MEMS 加速度センサを利用した建築物の三次元形状スキャンデータの水平補正技術の開発とその利活用

Development of tilt correction technology for 3D shape scan data of buildings using photogrammetric technology and MEMS accelerometers and its application

東京大学生産技術研究所 助教 福島 佳浩

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 背景と目的

近年の LiDAR やフォトグラメトリ技術の発達を受け、高額なレーザースキャナを用いずとも建築物全体の三次元形状をデジタルデータとして記録することが可能になってきており、建築物の維持管理や歴史的建造物の保存などへの利活用が期待されている。しかし、フォトグラメトリ技術で合成された 3D モデルでは、原理的に長さや傾きに関する絶対値が確定されないため、何らかの基準に基づいてスケール操作と回転操作を施して補正する必要がある。傾きに関する基準としては、カメラに内蔵された加速度センサや建物自体の形状を用いることが考えられるが、一般的なソフトウェアでは自動補正されてしまうため、精度を検証することが難しい。デバイス自体に傾きセンサが内蔵され、スペックに水平精度が明記されているレーザースキャナと同程度の精度をフォトグラメトリ技術で担保するためには、回転操作による補正のための基準を新たに付与する必要がある。

本研究では、そのような基準として小型の MEMS 加速度センサを組み込んだ被写体（ターゲット）を作成し、フォトグラメトリ技術と組み合わせることで、レーザースキャナと同程度の水平精度を担保できる三次元形状計測技術を開発することを目的とする。

建築物の三次元形状計測において水平精度を担保することの利点は、

1. 各部位ごとの水平面に対する傾きの計測
2. スキャンモデルを用いた物理シミュレーション
3. 別々に撮影された非連続な三次元データの繋ぎ合わせ

などが可能になることが挙げられ、次のような応用事例につながると考えられる。

1. 仕上面の状態に左右されない不同沈下の確認
2. 水勾配や積雪状況のシミュレーションに基づく保全計画の作成・評価
3. 建物内外データの精緻な統合
4. 集落規模での建物群データのアーカイブ化とそれに基づく居住性・意匠性の評価

フォトグラメトリ技術はレーザースキャンに比べて安価に三次元計測を実現できるほか、建築物の屋根のように地上からは計測が困難な場所にもドローンを用いた撮影が利用できるため、フォトグラメトリ技術でレーザースキャンと同程度の水平精度が担保されることには大きなメリットがあると考えられる。

2. 調査手法

2.1. 水平精度の基準の設定

まず、レーザースキャナの水平精度について確認する。文献[1]では 2 種類の三次元レーザ

ースキャナを用いて取得された点群データについて、トータルステーションと電子レベルを用いた検証を行っている。2種類のレーザースキャナのいずれについても、トータルステーションや電子レベルに比べて高さ方向のずれを生じていることが確認されており、水平性等を評価する際は点群データの傾きを考慮する必要があると述べられている。ただし、その誤差は1mにつき0.3~1.4mmで、広範囲の計測でなければ微小だと言える。

また、Leica社製三次元レーザースキャナBNLK360G1に関して、メーカーにヒアリングを行ったところ、次のような回答が得られた。

- ・ 同機はチルトセンサーを内蔵し、計測時の傾きが $\pm 5^\circ$ の範囲に入る場合、傾き誤差は $\pm 0.3^\circ$ 以下となる
- ・ チルトセンサーが具体的にスキャナーのどこにあるかは回答できない
- ・ チルトセンサーにより傾き情報を取得し、ソフトウェア（Cyclone REGISTER360、Cyclone FIELD360）にインポートする際、傾き情報を基に水平性を補正している。

このように、水平補正方法についてブラックボックスの部分はあるものの、レーザースキャナでは一定程度の水平精度が担保されている。

一方、前述のとおり、フォトグラメトリ技術における水平精度はソフトウェアによる自動補正に依存する部分が多い。自動補正の方法の一つとして、レーザースキャナの場合と同様に、カメラに内蔵された加速度センサの計測値を用いることが考えられるが、撮影時のカメラ移動の影響を受けたり、カメラによって内蔵センサのスペックが異なったりといったことが原因で、水平精度を担保することは困難であると考えられる。

本研究では、カメラ側に水平精度の基準を設ける代わりに、被写体側に水平精度の基準を設ける方法を提案する。基準となる被写体として、構造ヘルスマモニタリングに用いるために開発した小型のMEMS三軸加速度センサユニット（ADXL355, ANALOG DEVICES）^[2]を内蔵したターゲットを開発する。加速度センサにより重力加速度の向きをリアルタイムで計測することができるため、同ターゲットを含めてフォトグラメトリ用の画像を撮影し、撮影時間内における重力加速度の向きを加速度記録から算出することで、3Dモデル内に鉛直下向きの情報を付与することができる。既往研究^[3]より、同センサを用いると1/1000radオーダーの精度で傾斜角を計測できるため、レーザースキャナと同程度の水平精度を担保するにあたり十分な精度を有している。

2.2. ターゲットの設計

本研究で試作したターゲットを図1~図2に示す。設計方針は次のとおりである。

- ・ 頂点に球形を配した正四面体形状とする
 - 球はどの方向から見ても同一形状であるため、球の中心座標を計算しやすい
 - 正四面体はすべての面が三角形であるため、頂点間の距離を固定しやすい
 - 4つの球の中心座標から正四面体の図心座標を計算しやすい
- ・ 加速度センサは正四面体の図心付近に、z軸方向が図心と1つの頂点を結ぶ方向と一致するように配置する
- ・ なるべく安価に製作するため、塩ビパイプと3Dプリント部材を組み合わせる

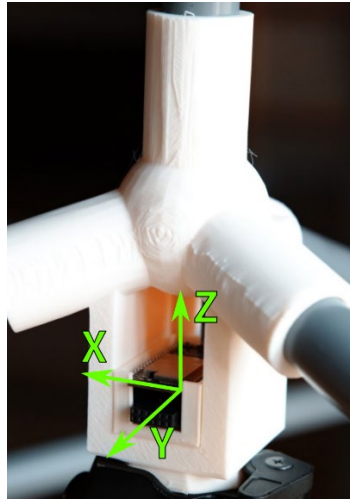


図 1 ターゲット全体

図 2 ターゲット中央部

図 3 計測対象建物

2.3. 水平精度検証実験概要

前節で述べたターゲットを用いたフォトグラメトリによる水平精度を検証するため、図 3 に示す伝統木造建築物を対象として、フォトグラメトリとレーザースキャンの 2 つの方法で三次元計測を行った。ターゲットは建物付近の屋外に三脚で固定したまま動かさず、手持ちしたカメラを用いてターゲットを含む建物外観を撮影した。撮影は 15:12~15:16 の 4 分間で行い、撮影中は加速度センサで連続測定を行った（サンプリング周波数 250Hz）。レーザースキャンには Leica 社製の BNLK360G1 を用いた。

（実験調査によって得られた新しい知見）

3. 調査結果

3.1. ターゲット回転角の推移

加速度センサで計測した三軸の加速度データから、下式で求めた回転角の時刻歴を図 4 に示す。 θ は加速度センサの X 軸まわりの回転角、 ϕ は同 Y 軸まわりの回転角を表し、 A_x , A_y , A_z は X, Y, Z 方向の加速度を表す。図 4 より、撮影中のターゲットの回転角が安定していることから、フォトグラメトリによる 3D モデルの傾き補正には 15:13 時点での値を用いた。

$$\theta = 0.5 \pi - \arctan\left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}{A_y}\right), \quad \phi = 0.5 \pi - \arctan\left(\frac{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}{A_x}\right)$$

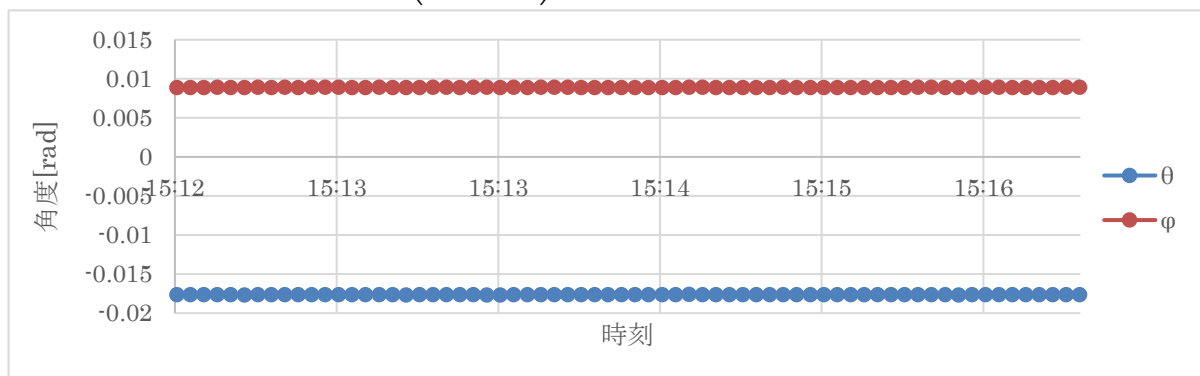


図 4 回転角の時刻歴

3.2. フォトグラメトリとレーザースキャンの傾き比較

図 5 および図 6 にフォトグラメトリにより合成した点群データ（南面および東面）を示す。同図には、フォトグラメトリとレーザースキャンのそれぞれで得られた 3D モデルの桁梁の中心線を黄線で示している。黄線のなす角を計測すると、南面で -0.493° 、東面で -0.986° の傾きの差が生じている。レーザースキャナの公称精度 $\pm 0.3^\circ$ と比較すると誤差が 2~3 倍となっているものの、定量的に水平精度を検証できることが確認できた。

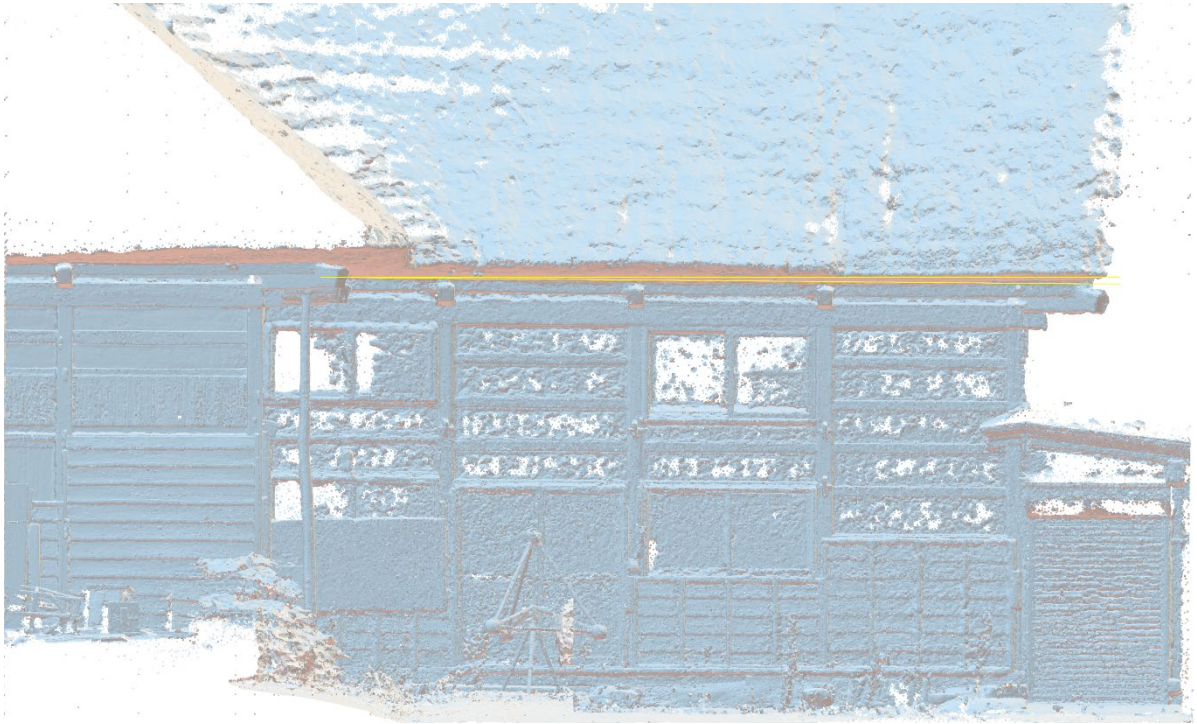


図 5 3D モデルの傾き比較（建物南面）



図 6 3D モデルの傾き比較（建物東面）

4.ターゲットの改良と今後の展望

本提案手法で誤差が生じる要因としては、次のようなものが考えられる。

1. 塩ビパイプと 3D プリント部材の製作誤差
2. ターゲットに対して加速度センサを固定する向きのずれ
3. フォトグラメトリで 3D モデルを合成する際の誤差

3についてはフォトグラメトリ手法自体に付随する要因であるが、1、2については下記の点を改善したターゲットを試作した。

- ・ 塩ビパイプをアルミパイプに変更し、土台を木板で製作
 - 製作精度と安定性を高める
- ・ 3つの頂点それぞれに加速度センサを設置する
 - ターゲットと加速度センサの固定角度のずれを平均化する

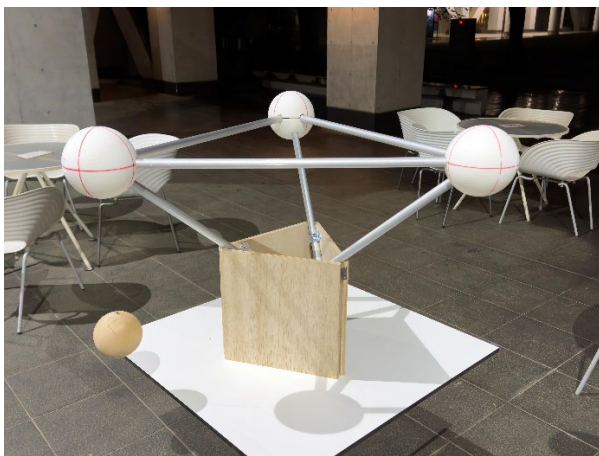


図 7 改良版ターゲット

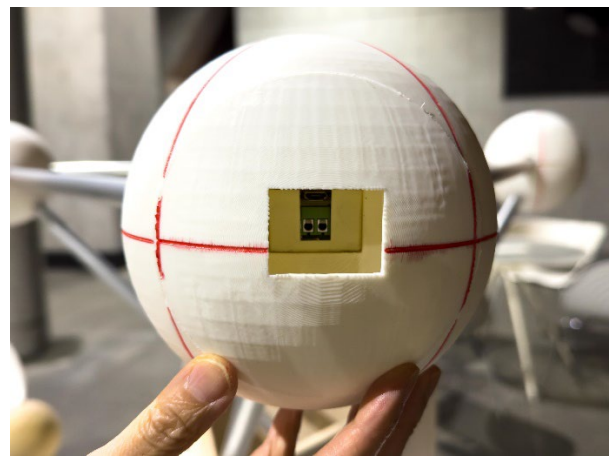


図 8 改良版ターゲット（頂点）

しかし、3D プリントした頂点の製造誤差の影響が大きく、MEMS 加速度センサの計測精度を十分に発揮できるほどの改善はみられなかった。

今後の展望として、数 cm の誤差で三次元座標を計測可能な RTK 測位技術^[4]を用いることが考えられる。100m オーダーの間隔で配置した球体の座標を同技術で即位しながら、球体を含む範囲をフォトグラメトリで計測することで、スケーリング操作と回転操作の両方の補正を行うことが可能になると期待される。

参考文献

- [1] 白井敦士, 石田 航星: 3次元レーザースキャナで取得された点群データの水平性の精度検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 建築社会システム, pp.175-176, 2021.7
- [2] 福島佳浩, 松本直之, 伊東優, 今井公太郎, 山口大翔: 不整齊木造架構を対象とした三次元計測および AM 技術を用いた構造補強方法の開発 その 2 MEMS 加速度センサおよび温湿度センサを用いた伝統木造建築物のモニタリング, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 構造Ⅲ, pp.201-202, 2023.7
- [3] 八木尚太郎, 伊山潤, 福島佳浩, 吉敷祥一, 石田孝徳, 清家剛, 山田哲: 鉄骨骨組に取り付けられた乾式間仕切り壁の大変形時における損傷と加速度計による傾斜計測を用いたその検出の可能性, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 788 号, pp.1400-1411, 2021.10
- [4] <https://www.it-ex.com/products/maker/softbank/ichimill.html>, 2024-04-25 最終閲覧

(発 表 論 文)

特になし