

(47) 簡易計測データに基づく三次元モデルを用いた 地下埋設物の二次元図面補正に関する一考察

岡本 健¹・新名 恭仁²・高橋 恭子³・今井 龍一⁴

¹正会員 株式会社竹中土木 (〒136-8570 東京都江東区新砂 1 丁目 1 番 1 号)

E-mail:okamoto-t@takenaka-doboku.co.jp

²正会員 アジア航測株式会社 (〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1 丁目 2 番 2 号新百合 21 ビル)

E-mail:ysh.niina@ajiko.co.jp

³非会員 アジア航測株式会社 (〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1 丁目 2 番 2 号新百合 21 ビル)

E-mail: kko.takahashi@ajiko.co.jp

⁴正会員 東京都市大学准教授 工学部 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1 丁目 28 番 1 号)

E-mail:imair@tcu.ac.jp

都市部の社会資本整備は、今後老朽化の著しいインフラ設備や地下埋設物が輻輳している箇所での構造物の改築・更新・新設といった事業の増加が予想される。しかしながら、現行の施工では主に二次元図面が用いられており、複雑な地下埋設物の位置・高さの把握が困難となっている。そこで本研究の目的は、地下埋設物の簡易な三次元モデル生成手法を考案し、生成された三次元モデルから二次元図面を生成または既存の二次元図面を補正する手法の確立とした。本研究では、近年普及・発展が進んでいるスマートフォンやデジタルカメラを使用して三次元モデルの簡易的な生成を試行し、施工計画および仮設計画における地下埋設物の状況把握への適用可能性を検証した。その結果、生成した三次元モデルは高い位置精度を持つことを確認した。

Key Words: Construction Information Modeling, 3-dimension model, underground structure, Structure from Motion

1. はじめに

我が国の公共事業では、建設生産システムにおける諸課題を解決して業務の効率化を図ることを目的に、調査・計画、設計、施工および維持管理の過程にて公共構造物の三次元モデルを共有、活用、発展させる CIM (Construction Information Modeling) が推進されている。その中で都市部の社会資本整備 (以下、「都市土木」という。) に着目すると、今後老朽化の著しいインフラ設備や地下埋設物が輻輳している箇所での改築・更新・新設構造物の事業の増加が予想される。しかしながら、現行は二次元図面が用いられており、複雑な地下構造物の位置・高さの把握などが困難となっている。一方、三次元モデルを導入すると効率的な地下構造物の関係性・規模の把握が可能であり、業務の効率化が期待される。

三次元モデルの生成および点群データの抽出技術に関する既往の研究に着目すると、地上レーザスキャナ (Terrestrial Laser Scanner, 以下、「TLS」という。) による多地点計測における高精度な点群データの選択技術

¹⁾ や施工現場の常時観測における地表面生成技術²⁾ が開発されている。また TLS と Structure from Motion (以下、「SfM」という。) とを統合した手法の提案³⁾ や、SfM および TLS により生成した三次元建物モデルの精度を検証し、TLS の精度を高める手法⁴⁾ が提案されている。道路や歩道空間では、Mobile Mapping System により取得した点群データからの道路地物抽出技術⁵⁾ や歩道空間計測⁶⁾ が提案されている。また地下部分に焦点を置いたものとしては、基準点測量、細部測量および GIS による下水道施設を対象とした高精度 3D データ作成手法⁷⁾ 等が提案されている。地下部分には、上下水道のみならず、ガス、電力、通信などの施設が複数の主体で管理されている。その中で都市土木の輻輳した地下構造物 (地下埋設物含む) の規模や関係性を把握するための地下埋設物の抽出技術や三次元モデル生成の方法論が求められるが、その確立には至っていない状況である。

本研究では、私たちの日常生活に浸透しているスマートフォンやデジタルカメラを用いて地下構造物 (地下埋設物含む) の動画・静止画を撮影し、その画像で簡易に

三次元モデルの生成ができれば、施工計画や仮設計画における地下埋設物の状況把握の支援策になると考えた。そこで本研究の目的は、地下埋設物の簡易な三次元モデル生成手法を考案し、ケーススタディを通じて考案手法に基づく三次元モデルの位置精度を検証し、既存の二次元図面を補正する手法を確立することとした。

2. 提案手法の概要

本研究では、計画・設計段階で作成された都市部の地下構造物（地下埋設物含む）の二次元図面と簡易的な撮影手法で生成された三次元モデルとを合成・比較することにより、二次元図面を補正する手法を提案する。

本研究が提案する三次元モデルによる二次元図面の補正手法の処理およびデータの流れの手順を図-1に示す。

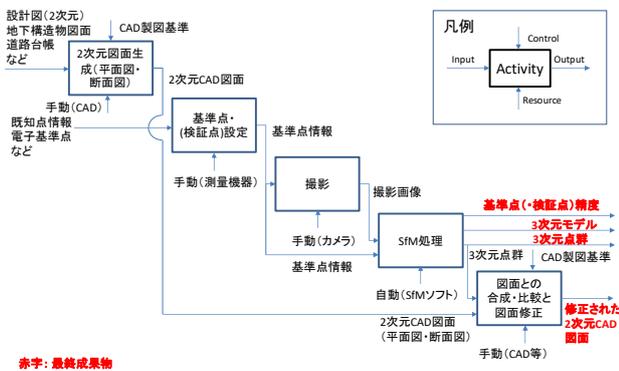


図-1 三次元モデルによる二次元図面の補正手法の手順

(1) 三次元モデル生成手順

三次元モデルは、多視点画像（動画・静止画）を用いて SfM により自動生成する。動画・静止画は、汎用的なスマートフォンの搭載カメラ・デジタルカメラやビデオカメラを用いて撮影する。また SfM で生成される三次元モデルの座標やスケールの精度を高めるために基準点を3点以上設ける。画像の解像度はフル HD 以上とし、静止画は 80%以上のラップ率を確保して撮影する。SfM により出力されるデータは、高密度三次元点群および三次元メッシュモデル、基準点（検証点含む）精度である。

(2) 二次元図面の補正手順

二次元図面の補正は、Autodesk AutoCAD および ReCap を用いて、三次元点群データ（rcp 形式）および計画・設計時に作成された二次元図面（代表平面および断面:dwg 形式）を使用する。三次元モデル（点群）と二次元図面とを合成して補正する手法を図-2に示す。補正手順は、まず Autodesk AutoCAD に点群データおよび二次元図面を取り込む。次に点群データに対して手動に

て二次元図面全体の位置を合わせる。最後に、この両者が合成された状態から、二次元図面上の個々の地下埋設物等の位置を手動にて点群に合わせることにより補正する。

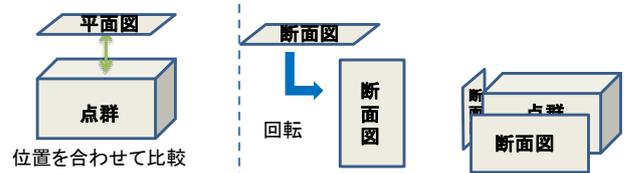


図-2 三次元モデルと二次元図面の合成による補正

3. 提案手法の検証

検証実験では、提案手法の有用性を明らかにするために、ケーススタディを通じて前章の手法に則して生成した三次元モデルの精度を検証した。また生成された三次元点群データと二次元図面とを合成・比較した。

(1) 三次元モデルの生成手法の精度検証

a) 実験対象箇所概要

検証場所は、都市再開発の新築ビルから地下鉄への新設地下連絡通路工事において、民地と公道の歩道部を一部占用し常設作業帯を設置している施工ヤードの一角とした。施工基面（表面部）は、路面覆工板が設置してあり、地下部の深さは 3m 程度で、地下埋設物は吊防護等が施されている。

b) 実験内容

三次元モデルを生成するための基準点となる標定点（GCP）と SfM で算出された三次元モデルの位置精度を評価するための検証点を撮影範囲周囲（四隅等）および対象管路等に設置した。そして、撮影機材・撮影パターン（表-1 参照）、静止画および動画の撮影方法（図-3 参照）を設定した。三次元モデルの生成には、PhotoScan（Agisoft 社製）を用いた。

表-1 撮影機材と撮影パターン

No.	種別	機種	モード	画像サイズ	枚数・時間	撮影
1	ビデオカメラ	Panasonic HC-VX985M	動画	3840×2160 (4K, 30fps)	133秒 約3900枚	昼夜
2	デジタルカメラ	Nikon D5100	静止画	4928×3264	68枚	昼夜
3	スマートフォン	iPhoneSE	静止画	4032×3024	52枚	昼夜
4	スマートフォン	iPhoneSE	動画	3840×2160 (4K, 30fps)	124秒 約3600枚	昼夜
5	スマートフォン	iPhoneSE	動画	1920×1080 (フルHD, 30fps)	189秒 約5600枚	昼

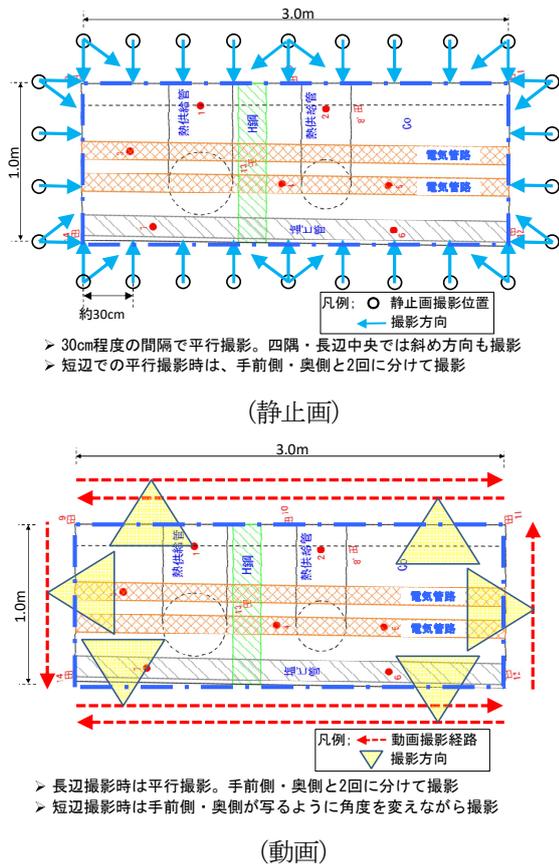


図-3 静止画および動画の撮影方法

三次元モデルの精度は、トータルステーション (TS : Total Station) で測量した標定点・検証点の実測データを正解データとし、撮影機材・撮影パターン毎 (昼夜区分・ラップ率等) に生成された三次元モデルと照合することにより検証した。精度目標は、空中写真測量 (UAV) を用いた出来形管理要領 土工編⁸⁾ に準じた ±5cm とした。標定点および検証点の平面位置を図-4、検証実験条件を以下に示す。

- 撮影範囲：
 - 約 1m×3m×深さ 3m (試掘調査を想定)
- 撮影対象物 (地下埋設物) :
 - ・電気管路 Φ130 2条2段 土被り 約 0.6m
 - ・熱供給管 (仮管) 3系統 土被り 約 2m
 - ・仮想管 Φ150 (塩ビ管) 土被り 約 0.8m

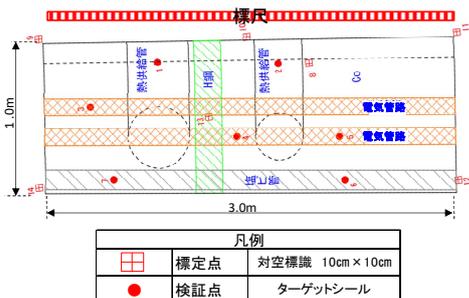
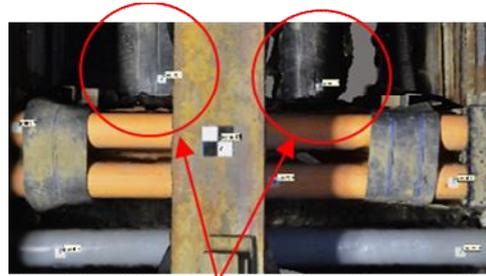


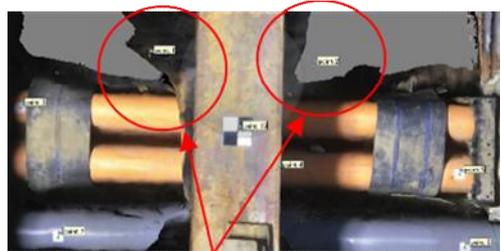
図-4 標定点および検証点の平面位置

c) 検証結果

動画・静止画の撮影パターン毎に生成した三次元モデルの位置精度および形状の検証結果を以下に示す。撮影データより生成された三次元モデルの一例 (静止画一部 : 表-2 の No.2-1-N, No.3-1-N) を図-5、動画・静止画の撮影パターン毎の三次元モデル生成の精度検証結果を表-2 および表-3 に示す。



熱供給管は再現できた
(デジタルカメラ, 四隅 GCP, 撮影夜)



熱供給管は再現できなかった
(スマートフォン, 四隅 GCP, 撮影夜)

図-5 撮影した静止画を用いて生成した三次元モデル

【静止画】

静止画の検証結果を表-2 に示す。

- ・デジタルカメラ (No.2-1-D, N : 昼・夜共) ・スマートフォン (No.3-1-D, N : 昼・夜共) は、検証点誤差の標準偏差で 10mm 以内の位置精度を確保できた。
- ・スマートフォン (No.3-1-D' : No.3-1-D の写真を 1/2 程度間引き) は、No.3-1-D・N と比較してほぼ同等の精度を確保できた。
- ・デジタルカメラでは、最深部の熱供給管まで三次元モデル化されたが、スマートフォンでは熱供給管が再現できなかった (図-5 参照)。

表-2 静止画を元にした三次元モデルの精度検証結果

No. #1	撮影条件	枚数	基準点数	検証点数	基準点誤差 (水平/鉛直)		検証点誤差 (水平/鉛直)	
					標準偏差 (mm)	最大値 (mm)	標準偏差 (mm)	最大値 (mm)
2-0-D	昼 全GCP	68	13	0	7.5/2.5	18.0/5.3	-	-
2-0-N	夜 全GCP	82	13	0	7.5/2.5	18.1/6.3	-	-
2-1-D	昼 四隅GCP	68	4	9	3.0/3.6	4.5/4.8	9.3/3.0	20.5/6.2
2-1-N	夜 四隅GCP	82	4	9	2.8/3.6	4.6/5.5	9.5/3.7	21.1/8.2
3-1-D	昼 四隅GCP	52	4	9	2.3/2.6	3.4/4.1	9.8/5.1	22.9/10.2
3-1-D'	昼 四隅GCP・1/2 ^{*2}	39	4	9	2.0/2.1	3.1/3.4	9.9/6.2	23.0/12.0
3-1-N	夜 四隅GCP	52	4	9	2.4/2.7	3.9/4.9	9.3/3.6	20.7/7.0

*1 No. 頭数字 2 : デジタルカメラ 3 : スマートフォン (iPhoneSE)

*2 3-1-Dより写真撮影枚数を間引き (半減) させた場合 (撮影ピッチ@0.3m程度→@0.6m程度にした場合)

【動画】

動画の検証結果を表-3に示す。

- ・ビデオカメラ (No.1-1-D-60) では、検証点誤差の標準偏差で 10mm 以内の位置精度を確保できた。
- ・スマートフォン (No.4-1-D-60, 30, 20:iPhoneSE) の 4K 動画は、画像抽出枚数や標定点数を変えて試行してみたが、アライメント (写真位置・姿勢の推定) の成否や検証点での精度が不安定であった。

表-3 動画を元にした三次元モデルの精度検証結果

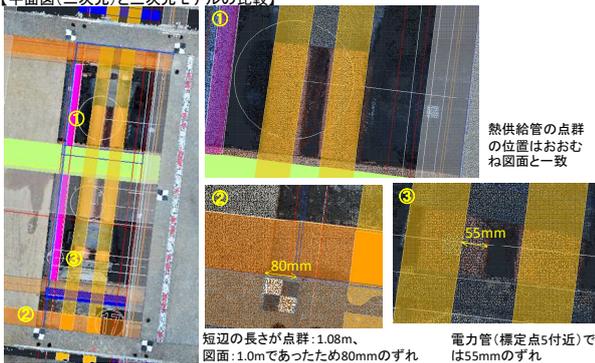
No.*3	撮影条件	1/尺	枚数	基準点数	検証点数	基準点誤差 (水平/鉛直)		検証点誤差 (水平/鉛直)	
						標準偏差 (mm)	最大値 (mm)	標準偏差 (mm)	最大値 (mm)
1-0-D-60	昼 全GCP	60	69	13	0	7.5/3.2	18.8/8.2	-	-
1-1-D-60	昼 四隅GCP	60	69	4	9	1.2/1.5	1.4/0.2	9.8/5.4	21.1/12.8
4-1-D-60	昼 四隅GCP	60	67	4	9	240.4/2.9	242.1/4.5	155.5/193.0	240.0/320.6
4-1-D-30	昼 四隅GCP	30	128	4	9	アライメント失敗			
4-1-D-20	昼 四隅GCP	20	189	4	9	94.7/67.5	126.9/68.4	146.9/358.8	233.8/887.9

*3 No.頭数字 1: ビデオカメラ 4: スマートフォン (iPhoneSE)

(2) 合成された三次元モデルと二次元図面との比較

生成された三次元点群データと二次元図面 (平面・断面図) とを合成・比較した。三次元モデルと二次元図面とを合成した際の位置誤差の例を図-6に示す。

【平面図 (二次元) と三次元モデルの比較】



【二次元図面断面図2と基準モデルの比較】

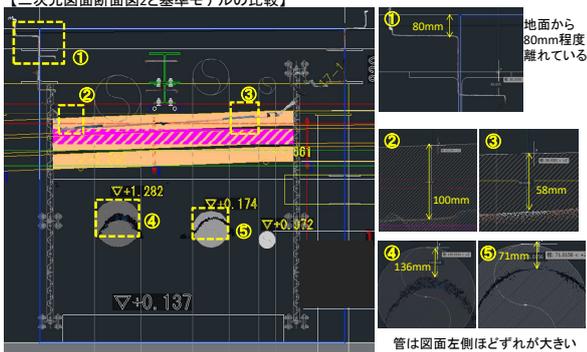


図-6 三次元モデルと二次元図面との合成比較図

合成された三次元モデルと二次元図面は、水平方向および鉛直方向とも 50mm~100mm 程度のずれが生じており、(1)の結果、三次元モデルは高精度であることから、図面の修正が必要であることが確認された。図面の誤差が発生した原因としては、管および道路勾配や製品寸法

誤差が二次元図面に考慮されていないことが考えられる。

4. おわりに

今回の検証結果によると、昼夜の撮影を問わず、デジタルカメラでの静止画・ビデオカメラでの動画・スマートフォンでの静止画を用いて生成した三次元モデルは位置精度が高く、高精度のアライメント結果が得られた。また目視の結果、モデルの三次元形状も良好であった。一方、スマートフォンで撮影した動画を用いた場合は、アライメント結果が不安定となり、動画から抽出する画像のブレや焦点距離等に依存している可能性があることから、スマートフォン動画による簡易な三次元モデルの生成には更なる措置を講ずる必要があると考えられる。

また三次元モデルと二次元図面の合成では、位置誤差が発生しており、施工段階 (施工計画や仮設計画) において二次元図面の補正が必要であることが確認できた。

今後は、今回の精度検証の結果を踏まえて簡易的な三次元モデルの生成手法を洗練し、実現場および現場専用デジタルカメラ (現場管理職員による撮影) にて有用性を検証する予定である。

参考文献

- 1) 櫻井淳, 田中成典, 中村健二, 今井龍一, 窪田諭, 重高浩一: レーザスキャナを用いた多地点計測における高精度な点群データの選択技術の開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.72, No.2, pp.1209-1218, 2016.
- 2) 櫻井淳, 田中成典, 中村健二, 今井龍一, 窪田諭, 重高浩一: レーザスキャナを用いた施工現場の常時観測における地表面生成技術の開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.72, No.2, pp.1219-1230, 2016.
- 3) 藤里和樹, 檀寛成, 安室喜弘: 点群の 3 次元分布を考慮したレーザスキャナデータと SfM データのレジストレーション, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.73, No.2, pp.1219-1225, 2017.
- 4) 久保寺貴彦, 政春尋志, 里見裕己, 川井純也: SfM と TLS による三次元建物モデルの TS に着目した精度の検証と向上, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.73, No.2, pp.1211-1216, 2017.
- 5) 今村一紀, 佐田達典, 江守央: MMS による 3 次元点群データを用いた道路構造物抽出に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.72, No.2, pp.1106-1113, 2015.
- 6) 広田健一, 佐田達典, 今村一紀, 小川達也, 岩上弘明: 手押し台車型 MMS を用いた歩道空間計測に関する実験, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.71, No.2, pp.1186-1191, 2015.
- 7) 久保寺貴彦, 那須充, 草野賢己, 姫野賢治: 基準点測量, 細部測量および GIS による下水道施設を対象とした高精度 3D データ作成, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.71, No.1, pp.30-42, 2015.
- 8) 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), 2017.