

東京都市大学大学院 総合理工学研究科
建築・都市専攻 博士論文

簡易計測による三次元モデルを用いた地下埋設物
の二次元図面更新手法に関する研究

2021年3月

岡本 健

－ 要旨 －

都市部の社会資本整備（以下、「都市土木」という。）の地下施設の多くでは、今後、その維持管理、更新、老朽化対策が喫緊の課題である。特に都市部の地下空間には、地下埋設物が輻輳して収容され主に二次元図面で管理されているため、工事施工の際に地下埋設物の位置・高さの把握が困難となっている。また計画・設計時に作成した二次元図面の計画図と地下埋設物の実埋設状況との差異が生じることが往々にしてあり、施工の際に二次元図面が修正されているが、その作業には手間と時間がかかる。この解決の一方策として、構造物を立体的に表現できる三次元モデルを導入すると効率的な地下埋設物の関係性・規模の把握が可能であり、業務の効率化が期待される。三次元モデルに係る既往の研究として地表面より上の部分（道路面、道路付帯設備など）は、高価な地上レーザスキャナや MMS などにより広範囲の三次元モデルの抽出や生成技術の研究が報告されている。都市土木の施工では、夜間工事や施工範囲が限定される場合が多く、その中で地下埋設物の局所的な範囲において、高価な計測方法ではなく、短時間で三次元モデルを簡易に取得する方法や生成する手法は確立されていない。

本研究の目的は、地下埋設物の簡易な三次元モデルの生成手法を考案し、得られた三次元モデルを用いて既存の二次元図面を効率的に補正する手法の確立とした。

まず近年普及・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撮影パターン毎（撮影モード・昼夜区分・ラップ率など）に三次元モデルの生成を試行し、施工計画や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、三次元モデルは位置精度が高く、また目視の結果、三次元形状も良好であった。

次に、都市土木の現場にて地下埋設物の三次元モデルの生成実験を繰り返して、カメラを用いた撮影条件、モデル生成のパラメータの要件を定義し、簡易計測による地下埋設物の三次元モデルを用いた既存の二次元図面の補正手法を考案し、実証実験を通じて有用性を検証した。その結果、生成した三次元モデルは二次元図面の補正に利用できる位置精度を有していることがわかった。次に、三次元モデルと既存の二次元図面との重ね合わせを試行した結果、既存の二次元図面の補正が可能であることから提案手法の有用性が確認できた。

さらに既存二次元図面を補正する作業の効率化のためシステムを開発し、そのシステムに則して考案した簡易な三次元モデル生成手法の撮影方法を改善した。そして改善した三次元モデルの生成手法を用いて実現場で得られた三次元モデルから既存の二次元図面を効率的に補正する更新手法を用いて有用性を検証した。具体的には、実用化に向け従来手法と考案した更新手法の作業時間を比較検証した。その結果、生成した三次元モデルから画像データを抽出し、既存二次元図面と重ね合わせると効率的な図面の補正が可能であることを確認した。

実現場の撮影データにより更新手法に則して既存二次元図面の補正を検証した結果、①三次元モデルの精度は、都市土木の工事施工の沿道掘削の地表面変位の目安である 30 mm 以内であり十分な精度を持っている、②二次元図面の補正が可能である、③従来手法との比

較検証により内勤部門との連携により外勤部門の現場職員の作業時間が3割程度の削減が可能であり今後建設業における残業上限規制の施行を見据えた現場施工管理技術者の職員の残業時間が削減できるツール一助となる可能性があることを確認できた。

本研究の提案手法の活用として都市土木の地下埋設物以外の地下施設に適用して、簡易撮影機材より生成した三次元モデルと固定レーザスキャナ（TLS）で生成した三次元モデルの形状や精度、二次元図面の重ね合わせ状況や表面体積量を確認し、異なる特性の三次元モデルを比較することで提案手法の活用の可能性を明らかにした。また検証結果から広範囲では無く局所的な範囲での構造物や仮設物の出来高や出来形にも提案手法が活用できる。

本研究の成果を踏まえて都市土木の工事施工の際に地下埋設物の関係性・規模の把握が可能であり、簡易な三次元モデルを用いた既存の二次元図面を効率的に補正する更新手法による業務の効率化が提言できた。今後の都市土木の設計・施工から維持管理において近年急速に整備されている地表（道路）面以上の三次元モデルと本研究の提案手法である地表面以下の地下埋設物の簡易な三次元モデルとを重ね合わせることで業務の効率化がさらに期待できる。

－ 目次 －

1. 研究の背景と目的.....	1
1.1. 研究背景.....	1
1.2. 現状の取り組みと課題（既往研究）.....	4
1.2.1. 三次元モデルの生成技術.....	4
1.2.2. 三次元モデルの活用.....	7
1.2.3. 都市土木における地下埋設物の三次元モデルの活用に向けた解決すべき課題.....	10
1.3. 研究の目的.....	11
1.3.1. 研究対象.....	11
1.3.2. 課題の解決に向けた方策.....	11
1.4. 本論文の構成.....	13
2. 地下埋設物における実態調査および課題分析.....	14
2.1. 研究の適用対象.....	14
2.2. 地下埋設物の管理図および試掘調査の実態調査.....	14
2.2.1. 調査内容.....	14
2.2.2. 調査結果.....	15
2.2.3. 調査まとめ.....	21
2.3. 地下埋設物における SfM（三次元形状復元計算）.....	22
2.3.1. 基準点の設定.....	22
2.3.2. 撮影.....	23
2.3.3. 撮影機材.....	23
2.3.4. 撮影方法.....	24
2.3.5. SfM（三次元形状復元計算）.....	25
2.3.7. 都市土木における地下埋設物の SfM の課題.....	29
2.4. 本研究の位置づけ.....	30
3. 簡易計測による三次元モデルを用いた地下埋設物の二次元図面補正手法の提案.....	31
3.1. 地下埋設物の簡易な三次元モデルの生成手法.....	31
3.2. 作業計画（三次元モデル生成箇所（試掘箇所）の選定）.....	32
3.3. 三次元モデル生成手法の精度検証実験.....	33
3.3.1. 検証箇所.....	33
3.3.2. 測量.....	33
3.3.3. 撮影.....	37
3.3.4. 三次元モデルの生成.....	41
3.3.5. 各パターンの生成結果.....	45
3.4. 三次元モデルと二次元図面との重ね合わせ比較.....	47
3.5. 提案手法の追加検証.....	49
3.5.1. 検証実験 2 画素・解像度による評価実験.....	49
3.5.2. 検証実験 3 三次元モデルの補完手法の検証.....	55
3.6. 三次元モデルの生成条件の提案.....	58
3.6.1. 検証内容.....	58
3.6.2. 検証結果と考察.....	61
3.6.3. 二次元図面の補正に適した三次元データの生成条件.....	64
3.7. 結論と課題.....	64

4.	簡易計測による地下埋設物の三次元モデルを用いた二次元図面補正システムの開発 ...	66
4.1.	簡易計測による三次元モデルを用いた地下埋設物の二次元図面の補正手法の改良.....	66
4.1.1.	既存手法の概要と課題	66
4.1.2.	改良手法の概要	69
4.1.3.	二次元図面補正システム.....	70
4.2.	補正手法の有用性検証	72
4.2.1.	三次元モデルの生成手法の検証.....	72
4.2.2.	二次元図面の補正	77
4.2.3.	有用性の評価.....	81
4.3.	結論と課題	81
5.	簡易計測による地下埋設物の二次元図面更新手法の実証的検証.....	82
5.1.	二次元図面の補正に関する従来手法の課題	82
5.1.1.	従来手法の図面作成の流れ	82
5.1.2.	施工者の実態調査	84
5.1.3.	課題と考察	86
5.2.	地下埋設物の二次元図面の更新手法	89
5.2.1.	更新手法の改善点	89
5.2.2.	三次元モデルを用いた二次元図面補正作業	90
5.3.	更新手法の有用性検証	91
5.3.1.	三次元モデルの生成手法の検証.....	91
5.3.2.	二次元図面の補正	94
5.3.3.	二次元図面の更新手法の有用性検証.....	97
5.4.	結論と課題	99
6.	簡易計測による三次元モデルを用いた二次元図面補正手法の活用方法	102
6.1.	簡易計測による三次元モデルを用いた既存構造物の二次元図面との重ね合せ検証.....	103
6.1.1.	検証内容.....	103
6.1.2.	検証結果.....	105
6.1.3.	考察および課題.....	109
6.2.	結論と課題	109
7.	結論と今後の課題.....	110
7.1.	結論.....	110
7.2.	本研究が切り開いた新しい展開.....	112
7.3.	今後の課題	113
	参考文献.....	116
	業績.....	120
	謝辞.....	121

1. 研究の背景と目的

1.1. 研究背景

平成 30 年 7 月「建設業の働き方改革を推進するための関係法律の整備に関する法律」¹⁾ が公布され、労働時間に関する制度の見直しでこれまで法律上では残業時間の上限がなかったが、今回の改正により「原則として月 45 時間かつ年 360 時間」の上限規制が定められた（2019 年 4 月 1 日施行）。建設事業では、改正法施行から 5 年後（2024 年 4 月 1 日）に上限規制が適用²⁾されることから技能労働者に対する長時間労働問題の解決の一方策として建設現場に ICT の全面的な活用による生産性の向上施策の導入が期待される。

そして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生成、共有、活用、発展させる BIM（Building Information Model-ing)/CIM（Construction Information Model-ing/Management）の導入³⁾および普及が推進されている。当該施策の一環として、国土交通省では公共事業に携わる関係者（発注者、受注者など）が BIM/CIM を円滑に活用できることを目的に BIM/CIM 活用ガイドライン（案）⁴⁾（対象工種は、共通編を含む、計 11 編、令和元年 5 月に地すべり編と地下構造物である下水道編追加）が検討されている。そのうち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・新設構造物の事業増加が予想される。そのような中で、都市土木の建設工事の地下埋設物の事故⁵⁾がここ 10 年では増減を繰り返している。そして平成 29 年 9 月に国土交通省では、平成 28 年 11 月 8 日の福岡市地下鉄七隈線の延伸工事現場において発生した道路陥没事故の教訓および議論を踏まえて地下空間の利活用に関する安全技術の確立に関して「地下空間の利活用に関する安全技術の確立について 答申」⁶⁾の中でライフラインなどの埋設工事における安全対策の論点の中で「地下埋設物の正確な位置の把握と共有化」（図 1-1 参照）が挙げられている。答申の論点および現状と課題を図 1-1 に示す。図 1-1 では、答申の今後の方向性と対応策の中で最新技術の活用などによる地下埋設物位置情報の 3 次元データ化や掘削工事中の埋設物のずれを確認、路面下空洞探査を活用した埋設物ずれの確認などの技術開発を進めるとともに地下埋設物の正確かつ効率的に位置情報を修正できる仕組みを構築することが期待されている。

また既存の構造物は一般的には二次元図面で管理されているため、工事施工の際に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。都市土木では、計画・設計時に作成した二次元図面の計画図と地下埋設物の実埋設状況との差異が生じることが往々にしてある。そのため、施工の際に二次元図面が修正されているが、その作業には手間と時間がかかる。この解決の一方策として、三次元モデルを導入すると効率的な地下埋設物の関係性・規模の把握が可能であり、業務の効率化が期待される。

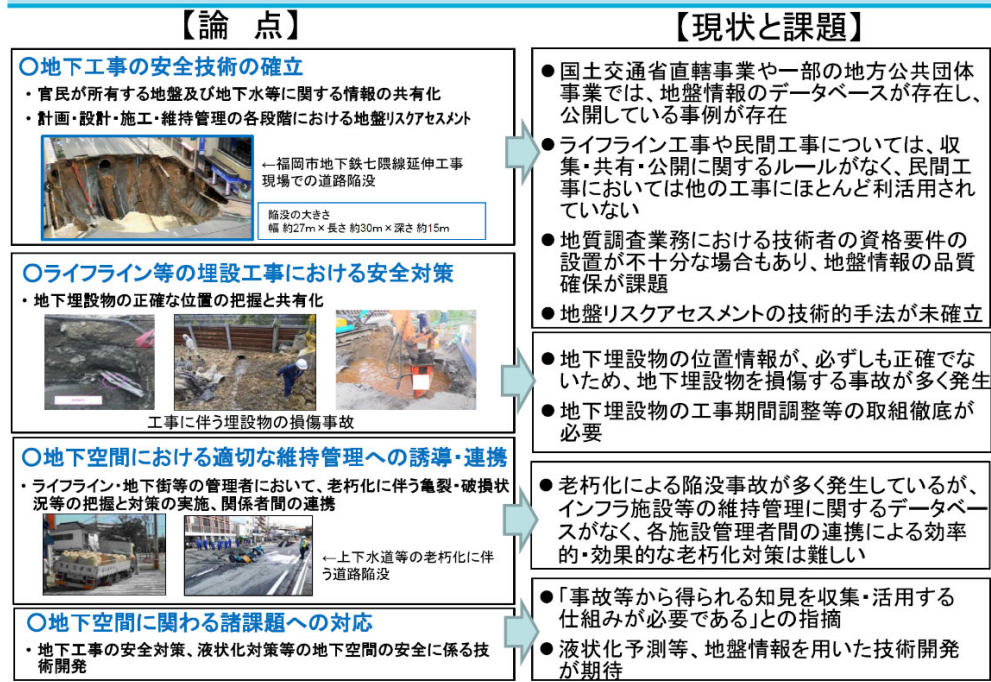


図 1-1 答申：論点及び現状と課題

都市土木の事業実施段階での課題の一例を表 1-1 に示す。表 1-1 では、都市土木の事業実施段階での課題（表 1-1 事業実施段階での課題の一例参照）として、複数の埋設企業者の管理図と計画図の図面重ね合わせ段階での位置の不整合や試掘結果による実埋設状況と設計図の差異が生じている。都市土木では、地下埋設物の位置や高さの相違による計画（設計図・施工方法）変更に伴う各管理者との協議・調整・合意がプロジェクトへ多大な影響を与えており、輻輳した地下構造物を把握するための方法として三次元モデルの活用が期待される。地下埋設輻輳状況の一例を図 1-2 に示す。図 1-2 では、地下埋設物が重曹に輻輳している写真であり工事施工の際に多大な影響を及ぼす箇所の一例である。

表 1-1 事業実施段階での課題の一例

項目	内容
作業時間・作業条件	・道路上での工事は、通常路上での夜間作業
各地下埋設物 (電気・通信・ガス・水道・下水など) 設備が輻輳	<ul style="list-style-type: none"> ・路上に工事支障物（電線・電柱、信号機など）が存在 ・更新時期を迎えている地下埋設物が輻輳 ・公衆災害事故の中で地下埋設物の損傷事故件数が大幅増^{*1} ・台帳上の位置情報が不明確（紙ベース：道路台帳の精度が低い） ・設計・調査段階、施工段階に浅層部の埋設物の確認（図 1-2参照） （道路占用（試掘）、道路使用許可手続き時間を要す） ・深層部の埋設物調査は、費用および精度の問題 （深礎工法による確認、探査ボーリングによる確認） ・近接する重要なインフラ設備の内部測量調査 （セキュリティの問題で手続き時間を要す） ・各関係企業との調整は道路調整会議を実施しているが、 近接および設計・施工協議は個別（各企業者毎の管理手法が相違）にて実施
維持管理	・CIMにおける維持管理手法が確立していない

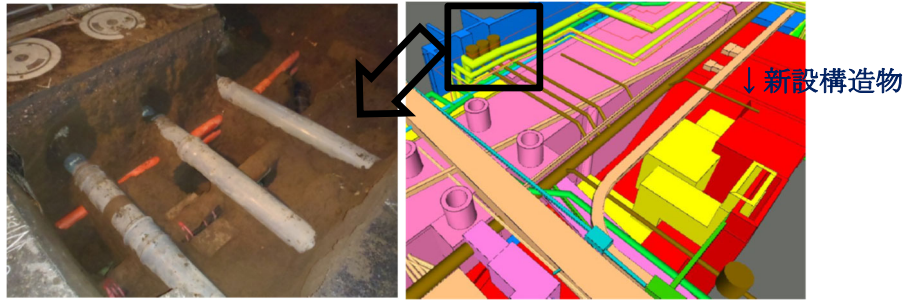


図 1-2 地下埋設輻輳状況の一例

* 1 事業実施段階における課題（地下埋設物に対する工事事務発生状況）

都市土木での施工段階では、地下埋設物への安全対策は重要である。地下埋設物件損傷が工事事務発生件数のうち高い割合を占めている状況を図 1-3 に示す。図 1-3 では、工事全般の工事事務の主な発生形態としては、公衆損害事故が工事事務全体の約 62%を占め、公衆損害事故の中で地下埋設物の損傷事故件数が大幅に増えており、これら事故に対する対策強化をはじめとした安全対策のより一層の向上が求められている。

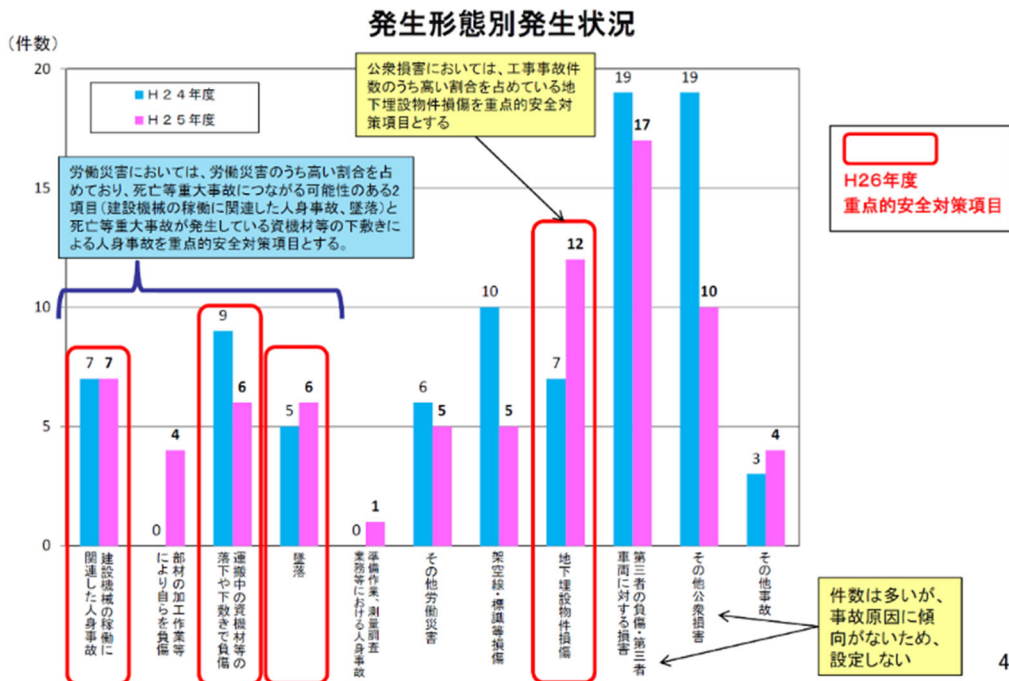


図 1-3 平成 25 年度 工事事務発生状況③（平成 26 年 3 月 31 日現在・速報値）²⁾

1.2. 現状の取り組みと課題（既往研究）

本節では、本研究の背景に関わる技術、手法、システムとして発表された既往の研究を述べる。これらの既往研究から現状を把握し、本研究の必要性、独自性を見出した。

1.2.1. 三次元モデルの生成技術

(1) レーザスキャナ・ドローン

i-Construction により施工現場の 3 次元モデル化が推進され、レーザスキャナやドローンによる Structure from Motion（以下、「SfM」という。）の活用が普及している。図 1-4 に固定式レーザスキャナ、図 1-5 にドローンを示す。SfM は、多くのカメラ画像を用いて、画像撮影時のカメラ位置および姿勢と対象物の幾何学的形状の復元を同時に行う技術である。以前より様々な手法が存在したが、街全体という規模での自動復元を可能にする手法⁷⁾が発表されて一躍注目を浴びた。織田⁸⁾、布施⁹⁾、中野¹⁰⁾は、SfM 技術や SfM を実現するソフトウェアの詳細を解説している。SfM によって三次元モデルを生成するソフトウェアのうち、代表的な商用ソフトとしては PhotoScan、Pix4Dmapper、Context Capture、フリーソフトウェアでは Bundler、MicMac、OpenMVG、VisualSfM など存在する。早坂ら¹¹⁾、北川ら¹²⁾は、UAV の撮影画像を用いて代表的な商用ソフトウェアで生成されたモデルの検証点較差の精度検証や形状比較、ソフトウェア (PhotoScan, Pix4Dmapper) による実験から特徴を導き出し、それぞれの違いを比較検証している。早川ら¹³⁾は、UAV による空撮写真から高精度な 3 次元データを得るためにトータルステーション（以下、「TS」という。）を利用した「自動追尾型 TS を用いた UAV による 3 次元モデル作成手法」性能実証実験を実施し精度検証を行っている。櫻井ら¹⁴⁾は、UAV の空中写真測量における誤差要因の影響度や発生条件を調査し、施工管理のための計測手法を提案している。新名ら¹⁵⁾は、土木構造物の効率的な維持管理を行うため、多視点画像による簡易に高精度なモデルを作成する手法を提案している。長尾ら¹⁶⁾は、UAV-SfM/MVS 測量において構造物の再現性を高めるための計測方法および解析方法を検討している。また SfM メッシュモデルを用いた鋳造品の 3D モデル化手法の提案¹⁷⁾がされている。

地上レーザスキャナ (Terrestrial Laser Scanner, 以下、「TLS」という。) による計測では、詳細かつ高密度で広範囲の 3 次元点群が取得できるため、定量的な 3 次元モデルの構築に有効である。櫻井ら¹⁸⁾¹⁹⁾は、レーザスキャナにより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や施工現場の常時観測における地表面生成技術を開発し有効性を評価している。北田ら²⁰⁾は、MVS (Multi-view-stereo) より系統的な数理計算法に適した 3 次元モデル化プロセスを実現している。また TLS から配管系を自動認識できるアルゴリズムの提案²¹⁾、TLS による点群を用いたプラントにおけるポリゴンの抽出²²⁾や角柱の抽出方法の提案²³⁾、点群からの円柱抽出方法の提案²⁴⁾がされている。

レーザスキャナのみではなく SfM と統合した技術として藤里ら²⁵⁾は、両者を統合する手法を提案し相補的なデータ活用を目指している。塚田ら²⁶⁾は、TLS と UAV で取得した点群データから橋梁の上部工と下部工を一体とした三次元モデルの生成手法を提

案している。久保寺ら²⁷⁾は、SfM と TLS による三次元モデルの精度検証のため、それぞれの三次元建物モデルを作成し、TS による計測の平均値を真値とした精度検証の結果、TLS、補正 SfM、SfM の順で精度高いことや TLS の精度を高める方法を提案している。



Focus (FARO社製)

<https://www.faro.com/ja-jp/products/construction-bim/faro-laser-scanner-focus/>より

図 1-4 固定式レーザスキャナ



Phantom4 (DJI社製)

<https://www.dji.com/jp/phantom-4>より

図 1-5 ドローン

(2) MMS

道路上の広範囲な道路地形・地物などを取得する方法として Mobile Mapping System (以下、「MMS」という.) が利用されている。MMS を図 1-6 に示す。道路地物を抽出する取り組みとして、写真などの色情報（反射強度値・RGB 値・高さ情報）を解析することで点群データから構造物を抽出する手法²⁸⁾が提案されている。江守ら²⁹⁾は、歩道空間の 3 次元データベース化を目的に歩道を歩行しながらデータ取得を行う手押し台車型 MMS を用いて歩道空間の 3 次元データの取得を試行している。奈良部ら³⁰⁾は、屋内型 MMS を用いて建物内の点群データを取得し、3 次元形状や位置情報の検証し、屋内空間のモデリングを検討している。

そして国土交通省では、技術基準類のカイゼンとして ICT 導入協議会（第 6 回）の平成 30 年度より開始する事項³¹⁾で新技術への対応（舗装工）ということで移動型レー

ザスキャナによる新たな計測手法を追加することを発表した。

公称スペック	
名称	Xv220ZLB5
メーカー	三菱電機株式会社
レーザスキャナ	Z+F(1台)
発射レート	1000kHz (スキャンレート200Hz)
点密度	2000点/m ² (@距離5m)
計測距離	MAX100m
測距(相対)精度	2mm (1σ)
絶対位置精度	10cm以下 (GNSS良好時)
IMU精度	Roll, Pitch: 0.36度(RMS) Heading: 0.72度(RMS)



図 1-6 MMS

(出典：アジア航測株式会社)

(3) デジタルカメラなど

三次元データを取得する計測方法・機器・機材としては、上記で述べたドローン、TLS、MMS などを利用して広範囲のデータを取得することが可能である。本研究の対象である都市土木においては、地上の道路施設物・地形・建物などの三次元データを取得する場合には大いに活用が期待されるが、都市土木においてはドローンによる計測の場合は航空法の規制や TLS や MMS の場合は道路の施設物などの計測する上での障害物が存在し、広範囲のみだけではなく部分的な計測が必要であり、調査・設計、施工、維持管理においては、局所的な範囲のデータ取得（道路変状測定、地下埋設物状況など）が重要である。構造物の維持管理への三次元モデルの適用についても検討が進んでおり、例えばアンカー壁面や道路を対象として撮影方法の検討や変状抽出の精度検証³²⁾を行っている。道路維持管理の活用手法としてデジタルカメラにより遠隔地から撮影した鉄蓋の画像処理によって段差計測を計測する手法³³⁾や地下埋設物の状況を把握するための技術として小型 RGB-D カメラを用いて、パイプラインの管内形状を計測し算出をする手法³⁴⁾が提案されている。局所的な現象を把握するための技術としてコンクリートの画像抽出技術^{35)~37)}があり、カメラやビデオカメラの撮影した画像を利用して画像処理を適用し、コンクリート構造物に発生したひび割れ幅・ひび割れ検出技術やモニタリングする技術・手法が提案されている。

(4) モバイルセンシングユニットなど

上記以外で塚田ら³⁸⁾は、携帯型のモバイルセンシングユニットを開発すると共に、3次元計測結果から複数の平面領域を推定し、その平面間の交差部にブレイクラインを発生させることにより、点群データの生成精度を向上する手法を提案している。三次元データを取得する計測方法・機器・機材としては、複数計測機器の点群データを基と

する三次元地形データの表示と作成方法を検討³⁹⁾している。田中ら⁴⁰⁾は、UAV 搭載型レーザスキャナにより短い時間で、かつ、夜間に計測でき、点群データを生成可能であり施工管理の現場における環境や計測方法による計測誤差を調査し、各誤差要因による点群データの生成精度を検討している。

1.2.2. 三次元モデルの活用

(1) BIM/CIM および i-Construction

我が国の公共事業では、建設現場において i-Construction の観点から出来形管理などに利用する動き⁴¹⁾が活発である。山岡ら⁴²⁾は、設計段階で作成された CIM モデルを用い、維持管理段階での活用に適した形となるように最適化を検証している。神崎ら⁴³⁾は、建設生産プロセスにおける有効な活用方法や導入効果を検討している。永富ら⁴⁴⁾は、三次元モデルから設計計算を行い、このモデルから従来形式の契約図書を出力する設計法を検討している。平面図や断面図などの既存データを使用し新たな管理手法を使用できる河川管理 CIM モデル⁴⁵⁾を考察している。

CIM を活用した施工現場の適用事例として地質情報 CIM 管理システム⁴⁶⁾やトンネル工事における施工 CIM から維持管理 CIM への取組み⁴⁷⁾、試行工事である築堤事業の施工段階における 3 次元モデルの作成・修正に関する業務フロー⁴⁸⁾が報告されている。設計段階において宮武ら⁴⁹⁾は、3 次元モデルを利活用した堤防設計において期待される効果を従来における設計との比較・検証している。鈴木ら⁵⁰⁾は、鋼構造部材のデジタル画像から FEM モデル構築の自動化手法の基礎的な検討をしている。

国土交通省では、道路の主に土工を対象とした維持管理における具体的な CIM の活用場面と、その活用場面を実現するための具体的な 3 次元モデルの作成方法と属性情報を設計、施工段階での CIM モデル作成仕様【検討案】<道路編>⁵¹⁾を検討している。榎谷ら⁵²⁾は、トンネルの維持管理の ICT 化を進め、人間が行う検査の効率化および結果データから迅速に適切な補修計画が立案できるシステム構築を検討している。小林ら⁵³⁾は、河川管理の維持管理段階における CIM の活用例として発注者が自ら CIM を活用するための一手法を報告している。保田ら⁵⁴⁾は、維持管理段階において景観性評価を 3 次元モデル上で把握するための方法を提案している。棧橋の維持管理において溝口ら⁵⁵⁾は、3D モデルの点検業務の様々なプロセスでの有効活用のため、テキストチャ付き 3D 簡略モデルへと自動変換する手法を開発している。

(2) 災害

三次元データの災害時の活用事例として無人航空機 (UAV) 写真測量で生成される点群データは、災害時の迅速な状況把握などの用途で活用されている。内山ら⁵⁶⁾は、災害調査における活用可能性について検討し、櫻井ら⁵⁷⁾は、災害時の活用を想定した UAV 写真測量の解析手法を提案し、実現場における適用の可能性を検討している。

(3) 測量

レーザスキャナの活用事例として国際学会（ICCB&CCACHE 2017）の発表論文では、固定式レーザスキャナの測量について補償器を利用した構築手法⁵⁸⁾、レーザスキャナを活用したモデリングプロセスを自動化手法の開発⁵⁹⁾、最適なスキャナ配置を求めるためのコンピュータ支援計画手法⁶⁰⁾、レーザ走査データに基づいたプレキャストコンクリートの鉄筋の寸法品質を自動的に評価する手法⁶¹⁾のレーザスキャナに関連した技術が報告されている。MMSの活用事例として太田ら⁶²⁾は、モバイルマッピングシステムを用いて鉄道駅空間を3次元点群データとして取得し、吊り下げ型サインの視認性評価が可能であるか検討している。山本ら⁶³⁾は、移動計測車両(Mobile Mapping System: MMS)を用いて、鉄道建築限界断面の中心位置抽出のための計測手法および鉄道建築限界の可視化システムを検討している。

(4) SfM

SfM 関連の海外の活用事例としては、ダムや橋梁などの大型構造物へ適用事例があり、ドローン調査から地上制御点(GCP)の配置(数と場所)がダムモデルの3次元(3D)モデルへの影響分析⁶⁴⁾、ローマ橋をUAV(無人航空機)と高性能の光学系やカメラを使用した三次元モデルの構築に関する事例研究⁶⁵⁾、ローマ橋のアーチ構造をTLSとSfM技術を使用した近距離写真測量の方法論の比較⁶⁶⁾、UAVベースの写真測量点群を使用した遺産橋の構造表面モデルを生成するための半自動化されたフレームワークの提案⁶⁷⁾、既存のコンクリート鉄道橋(6橋)をTLS、近距離写真測量、および赤外線スキャンで3D幾何学モデルのパフォーマンスの比較⁶⁸⁾、都市排水管を低コストのパノラマビデオカメラを使用したマルチビュー画像マッチングに基づく都市排水管の3次元(3D)再構成パイプラインが提案⁶⁹⁾されている。

(5) 都市土木

都市土木の活用事例としては、東京メトロの地下鉄駅改修計画・設計における点群データによるBIMモデルの構築と活用⁷⁰⁾や名古屋の地下街の3次元レーザ計測と点群データの利活用⁷¹⁾が報告されている。廣瀬ら⁷²⁾は、レーザスキャン点群データを利用したマーカレスAR(Augmented Reality)による浸水リスクの可視化を提案している。既往研究などでは、本研究の対象である都市土木の地下構造物や地下埋設物に関わる活用事例はなく、さらに三次元モデルを作成する方法論や三次元モデルから設計、施工、維持管理段階に使用される既存二次元図面へ展開する手法は確立されていない。

(6) 図面生成

3次元計測により得られる点群データの活用の課題として、解析対象のデータ量が莫大になる点や属性情報が付加されない点が挙げられている。中村ら⁷³⁾⁷⁴⁾は、道路工事完成図面のCADデータを基に、点群データから道路地物を抽出する手法を開発している。また高度成長期に建設された多くの道路橋の図面は、完成図が破棄された場合や現況

と一致しない場合などがあり、現況図の再現が求められている。姜ら⁷⁵⁾は、MMS 点群を用いて高架道路橋を計測し、維持管理用の図面の自動生成の研究^{76)~78)}を試み、特性が大きく異なる 2 種類の MMS 点群データを利用し、高架道路橋の特徴点の抽出結果と道路線形の生成精度を比較することで、提案手法の汎用性の検証をしている。Laser Profiler と河川横断測量成果を用いて点群データから高精度な横断図を生成する手法が提案⁷⁹⁾されており、点群データを利用して地形などの二次元上での出来形管理や横断図作成手法は提案されている。地下部分の地下埋設物の三次元モデルの既往研究に着目すると、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⁸⁰⁾がある。

1.2.3. 都市土木における地下埋設物の三次元モデルの活用に向けた解決すべき課題

本研究の対象である都市土木（地下構造物を含む）では，地上部に道路付帯設備（信号・電線・植樹帯（高木）など）の支障物の存在，地下部に輻輳した埋設物（受防護含む）や埋設位置（浅層・深層）により設計～施工段階において構造・線形変更や仮設計画の手戻りなどの事例が多い．また，都市の交通状況および近接構造への影響を踏まえた施工管理（近接施工・計測管理）や構造物の維持管理では，正確性（精度）および安全性が求められ，特に地下構造物という特性上視覚的に確認できない部分が多く存在し，さらに都市土木の施工では，夜間工事や施工範囲が限定される場合が多く，その中で地下埋設物の局所的な範囲において，三次元モデルを取得する簡易的な計測手法や三次元モデルの作成手法などの活用が想定される．しかし都市土木における現状は，以前として台帳図および地下構造物の構造図，設計図は二次元図面が使用されている．また都市土木分野の CIM モデル作成は，二次元図面から三次元モデルを作成されているが，三次元モデルを作成する方法論や三次元モデルから設計，施工，維持管理段階に使用される既存二次元図面へ展開する手法は確立されていない．

地表面より上の部分（土木構造物（高架橋道路・橋など）・道路施設物（信号機・灯具・樹木・白線など）や建築物）は，既往研究において TLS や MMS を利用して三次元データの取得するための計測方法や自動生成・図面生成技術などが報告されている．しかし地表面より下の部分（地下埋設物や地下構造物）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．その中で都市部は，地下部分の有効活用から地下埋設物が輻輳している中での三次元モデルの導入効果は高いと考えられる．しかし一般的な三次元モデルの生成に使用されるドローンによる計測の場合都市部では航空法の規制，TLS や MMS による計測の場合広範囲の計測には適しているが，地下埋設物は道路下に存在し三次元データを計測する場合には交通規制が伴うことから限定された範囲であることや計測に際して主に下向き（測量機材の足元付近）であり計測箇所が死角となり，機械の設置回数の増加による手間と時間を要することが懸念される．さらにデータ取得したい箇所が状況によっては取得できないなどの可能性があり都市部での活用事例がないことが考えられる．その中で都市土木の限定された範囲において簡易に三次元モデルが生成できる技術があると都市部における地下埋設物の正確な位置の把握と共有化の解決策となる．しかし都市土木の地下埋設物の局所的な範囲において，TS や高価な TLS による計測方法ではなく，スマートフォンやデジタルカメラの撮影画像により三次元モデルを生成する手法や，地下の埋設物の点群データから既存の二次元図面の補正手法は確立されていない．

1.3. 研究の目的

1.3.1. 研究対象

前項で整理した課題を解決するために、本研究では、地表面（道路面）より下の部分の上下水道、ガス、電力、通信などの地下埋設物（地下構造物も含む）に着目して、簡易計測による三次元モデルを用いて設計・施工段階で使用される地下埋設物を含む既存の二次元図面を効率的に補正する手法を提案する。これにより都市土木の設計、工事施工における業務の省力化と効率化への貢献を目指すものである。

1.3.2. 課題の解決に向けた方策

本節は、課題の解決に向けた方策について考察する。次に本研究の課題と目的を示す。

(1) 簡易計測による三次元モデルを用いた地下埋設物の二次元図面補正手法の提案

簡易計測による三次元モデルを用いた地下埋設物の二次元図面補正手法の提案では、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・静止画を撮影して三次元モデルを生成し、既存二次元図面（平面図・断面図）に重ね合わせて二次元図面の補正ができれば、施工計画や仮設計画における地下埋設物の現況把握の支援策になると考えた。本提案では、次のような課題などを抽出した。

- 三次元モデルを生成する撮影方法と基準点の設置方法
- 三次元モデルの生成状況と位置精度
- 生成された三次元モデルと既存の二次元図面の重ね合わせ状況
- 生成条件のパラメータの条件設定（必要画素数、解像度など）
- 複数の SfM ソフトによる生成されたモデルの精度検証や形状比較

上記の課題を踏まえて本提案の目的は、簡易計測による地下埋設物の三次元モデルを用いた既存の二次元図面を補正する手法を確立とした。都市土木の地下埋設物の局所的な範囲において、TS や高価な TLS による計測方法ではなく、スマートフォンやデジタルカメラの撮影画像により簡易計測による地下埋設物の三次元モデルを用いた既存の二次元図面の補正する手法を考案した。

(2) 簡易計測による地下埋設物の三次元モデルを用いた二次元図面補正システムの開発

都市土木の地下構造物は一般的に施設管理や施工の際に二次元図面が使用されており、埋設企業者や施工業者などと二次元図面で情報が共有されていることから SfM による三次元モデルを用いた既存の二次元図面の補正手法（以下、「既存手法」という）を提案した。SfM により生成した地下埋設物の三次元モデルは高い位置精度を保持し、二次元図面の補正に適用できることが確認できた。本提案では、既存手法の課題とし

て次のような課題などを抽出した。

- 三次元モデルを用いた既存の二次元図面を補正する手動作業の効率化
- 実現場データを用いた提案手法の有用性の検証
- 複数撮影者によるデータの検証（生成されたモデルの精度や形状検証）

課題として、実現場での撮影データを基にした地下埋設物の三次元モデルの生成と精度検証および二次元図面補正の際の図面の重ね合わせ作業（高密度点群データと二次元図面の重ね合わせ）や三次元 CAD 上での手動作業の効率化が挙げられた。

本提案の目的は、地下埋設物の簡易な三次元モデル生成手法で得られた三次元モデルを用いて既存の二次元図面を効率的に補正する手法を確立とした。簡易計測による地下埋設物の三次元モデルを用いた二次元図面補正システムの開発では、既存手法の課題であった三次元モデルと既存二次元図面との重ね合わせの手動作業を効率化し、既存の二次元図面を簡易に補正する手法を考案し、同手法に則したシステムを開発して有用性を評価した。

(3) 簡易計測による地下埋設物の二次元図面更新手法の実証的検証

三次元モデルと既存二次元図面との重ね合わせの手動作業の効率化として既存の二次元図面を簡易に補正する手法の改良案を考案し、同手法に則したシステムを開発して実現場での撮影データを基にした有用性を評価した。本提案では、改良案の課題として次のような課題などを抽出した。

- 開発したシステムに則した三次元モデル取得方法の改善
- 提案手法による現場作業の軽減
- 実現場での従来手法との比較による有用性の検証

課題として、三次元モデルを生成するためのデータ取得における TS を用いた現場（測量）作業の軽減や開発した図面補正補助ツールの手順に即した三次元モデルの生成手法の検討や実現場での撮影データを基にした地下埋設物の三次元モデルの生成と精度検証および二次元図面補正の際の図面の重ね合わせ作業（高密度点群データと二次元図面の重ね合わせ）と従来から行われている図面補正の手法（以下、「従来手法」という。）との比較による有用性の評価が挙げられた。

本提案では、既存手法による地下埋設物の簡易な三次元モデル生成手法を改善し、既存の二次元図面を効率的に補正する手法を確立とした。簡易計測による地下埋設物の二次元図面更新手法の実証的検証では、既存二次元図面の補正効率化のため開発したシステムを用いた二次元図面の補正手法（以下、「更新手法」という。）の確立と実用化に向けて従来手法と既存の二次元図面を簡易に補正する更新手法との作業時間や作業性を比較検討し、有用性を評価した。

1.4. 本論文の構成

本論文における構成を図 1-7 に示す。

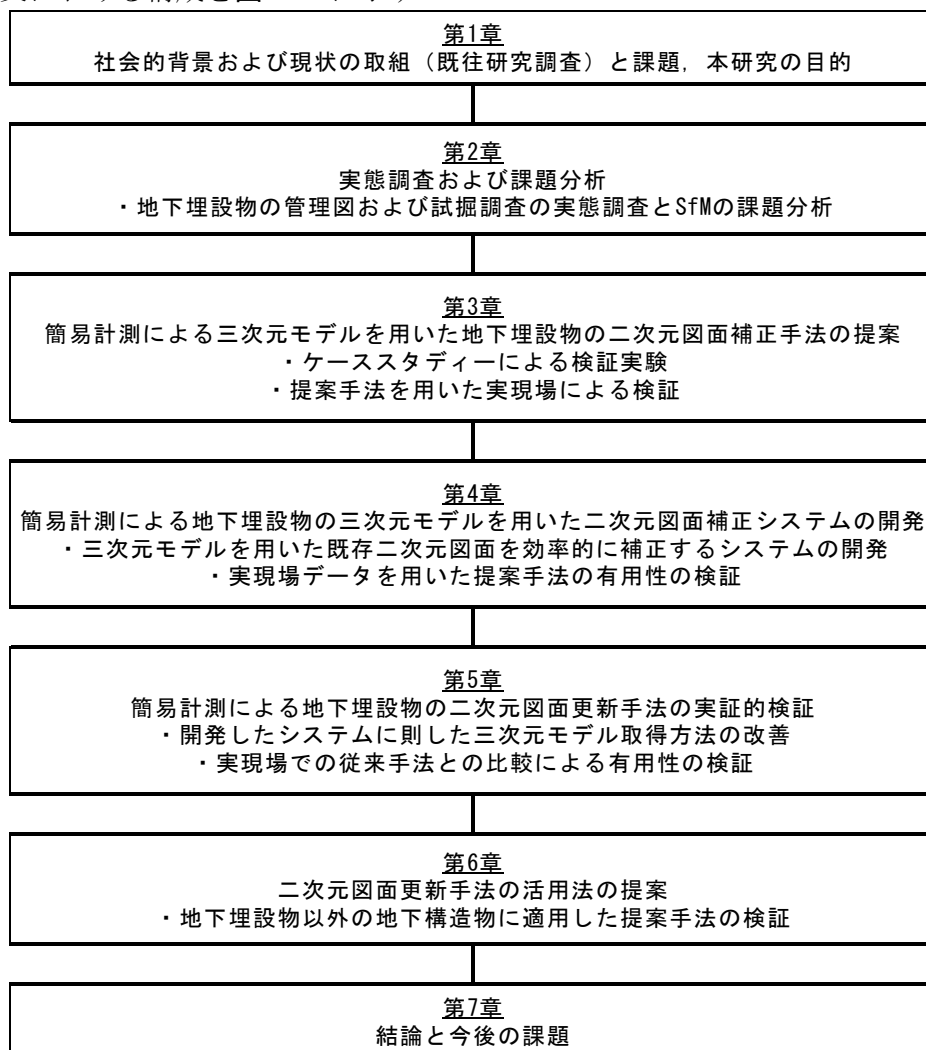


図 1-7 各章の構成

本論文は、第1章にて、都市部の社会資本整備の背景と、現状の取組と課題、本研究の目的を述べる。第2章にて都市土木の管理図や試掘調査の実態調査し課題を洗い出し、研究の着眼点を述べる。第3章は、簡易計測による地下埋設物の三次元モデルを用いた既存の二次元図面の補正手法を考案し、実証実験を通じて有用性を論じている。第4章は、既存二次元図面の補正効率化のためのシステムを開発し、開発したシステムを用いた既存二次元図面の補正手法を提案する。そして、実現場のデータを用いて有用性を論じている。第5章は、考案した地下埋設物の簡易な三次元モデル生成手法を改善し、得られた三次元モデルから既存の二次元図面を効率的に補正する更新手法を提案する。そして従来手法と提案手法を実現場において比較検証し実務への適用および有用性を論じている。第6章は、簡易計測による三次元モデルの生成手法の活用に着目して地下埋設物以外の地下構造物に適用した提案手法の検証結果を述べる。最後に第7章にて、本研究の結論と今後の課題を述べる。

2. 地下埋設物における実態調査および課題分析

2.1. 研究の適用対象

本研究の適用対象範囲は、前章にて説明した社会的ニーズへの有用性を評価・検証するために対象物は、都市土木の地下埋設物とし、そして設計、施工段階で使用される地下埋設物を含む二次元図面を対象とする。

以上の研究対象に関して、まず地下埋設物の各埋設企業者の管理図および地下埋設物の試掘調査の実態調査を分析し、都市土木における局所的範囲における三次元モデルを生成するための基本事項を整理した。そして本研究で着目した SfM の手法を説明し、都市土木における SfM 課題と対応方針を概説する。

2.2. 地下埋設物の管理図および試掘調査の実態調査

本節では、地中部分の計画図・設計図（二次元及び三次元図面）を作成する際に使用される各埋設企業者の管理図や計画・設計段階で作成された CIM モデルの実態調査を踏まえ、都市土木における課題分析を考察した。

2.2.1. 調査内容

三次元モデルは、インフラ設備の維持管理、修繕および地下構造物の新設・改築・更新の施工の際にも利活用が可能である。都市土木における三次元モデル作成の手順と方法の一例の詳細を図 2-1 に示す。図 2-1 は、二次元図面から三次元モデルを作成する事例を示している。

本研究では、都市土木における各埋設企業者の管理図と設計段階で作成された BIM/CIM モデルおよび地下埋設物の試掘結果の実態調査を実施した。

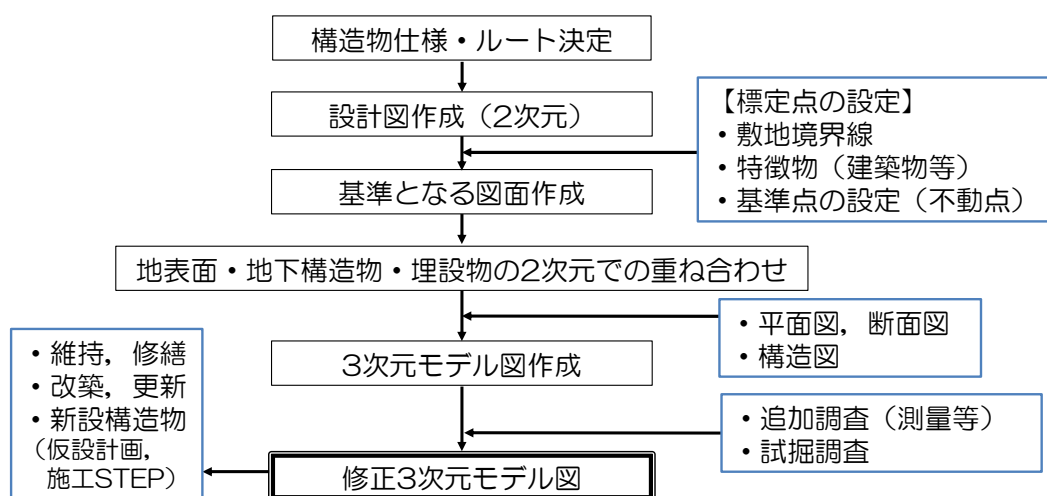


図 2-1 BIM/CIM モデル作成の方法論

2.2.2. 調査結果

2.2.2.1 管理図の調査

各埋設企業者の管理図の縮尺を参考に 2 工事を対象に図面調査を行った。

管理図の縮尺：参考値（2 現場対象）を表 2-1 に示す。表 2-1 は、各埋設企業の地下埋設台帳および完成図の縮尺を示している。

- 地下埋設台帳図の縮尺は、基本的には 1/500 であるが、一部埋設企業者では異縮尺で対応
- 各地下埋設物の完成図（構造図・平縦横断図）は、1/50～1/200 であり図面を作成する上で設計図および三次元モデルの精度の向上が可能

表 2-1 管理図の縮尺：参考値（2 現場対象）

単位：図面縮尺

埋設物管理者	地下埋設物台帳	完成図
		（構造図：S・平縦断図：VH・仮設図：K）
下水	1/500, 1/350	1/50,1/60(S),V:1/100(VH),1/200(K)
水道	1/500, 1/750	-
電力	1/500	1/50(S)
通信	1/500, 1/300	1/40,1/50(S),V:1/200(VH)
ガス	1/500	-
警察	1/700, 1/800	-

2.2.2.2 地下埋設物台帳・計画図・CIMモデルの検証

(1) 検証の概要

試掘結果を踏まえた地下埋設図(実埋設状況図)と下記に示すケースで実際の試掘結果と既存二次元図面やCIMモデルの任意断面での位置誤差の検証を行った。

1) 地下埋設台帳図(平面図): 平面位置

検証場所: 都市土木事例①地下接続

検証内容: 管理図と実埋設状況図との検証

2) 建築工事での道路部のインフラ図面(二次元)

検証場所: 都市土木事例②都市再開発の建築工事

検証内容: 試掘断面の検証

3) 地下街への接続通路工事(道路下)のCIMモデル

検証場所: 都市土木事例①地下接続

検証内容: CIMモデルの検証

上記の検証ケース実埋設状況図と検証箇所での位置誤差の検証結果を表 2-2 に示す。

表 2-2 は、各検証箇所における試掘結果を踏まえた実地下埋設物状況と既存の管理図(地下埋設台帳図)や図面およびCIMモデルとの位置誤差を示している。

表 2-2 実埋設状況図と検証箇所での位置誤差の検証結果

単位: mm

検証 埋設企業	①台帳	②断面1		②断面2		③CIM	
		水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直
下水	92	340	185	20	90	127	156
水道	598	10	117	6	160	32	355
電力	-	143	150	150	188	933	148
通信	-	測定不能		-	-	-	-
ガス	317	150	143	45	62	331	379

(2) 検証結果

1) 管理図と実埋設状況図との検証①

管理図と二次元図面(実埋設状況図)との平面位置関係を図 2-2 に示す。図 2-2 は、試掘結果で得られた実地下埋設物の状況と管理図(各地下埋設物台帳)と平面図の重ね合わせによる位置関係を示している。

- 企業者ごとに平面位置の相違が生じている
- 検証位置で下水管以外は、管径以上の位置ずれを確認

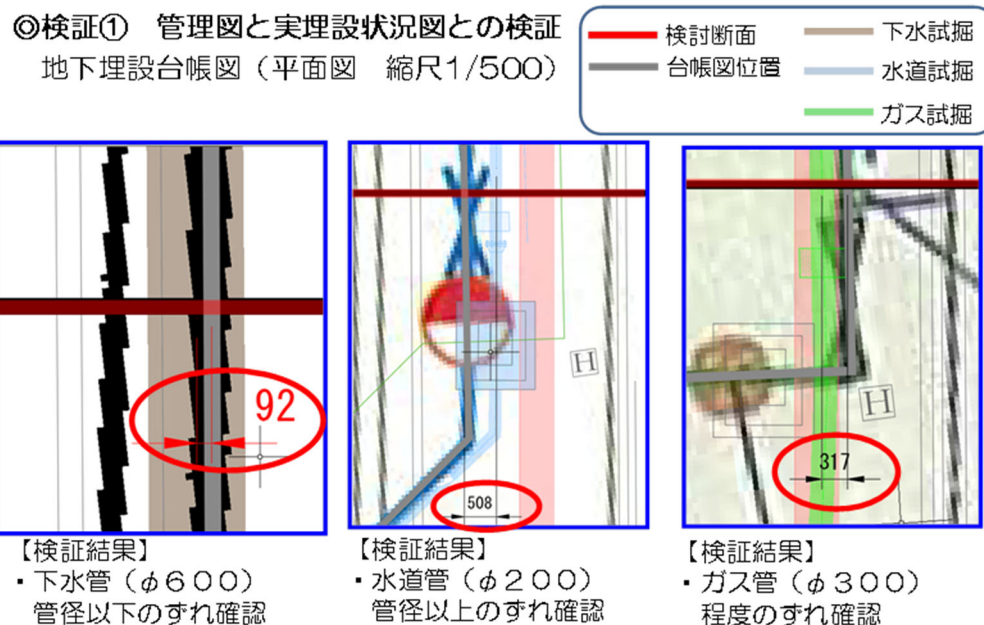
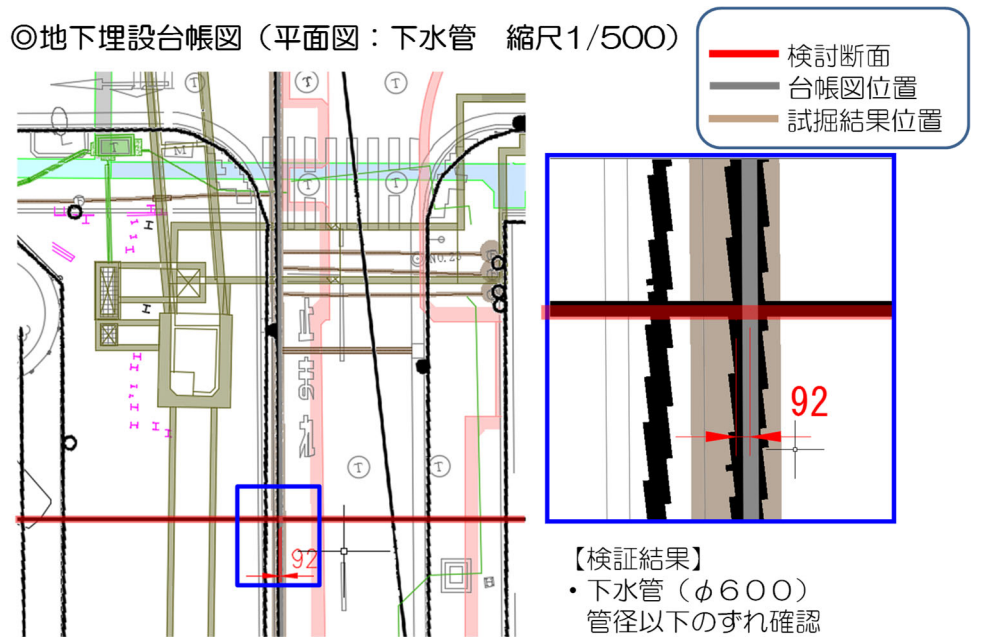


図 2-2 管理図と二次元図面(実埋設状況図:平面図)との検証結果(単位mm)

2) 試掘断面の検証②

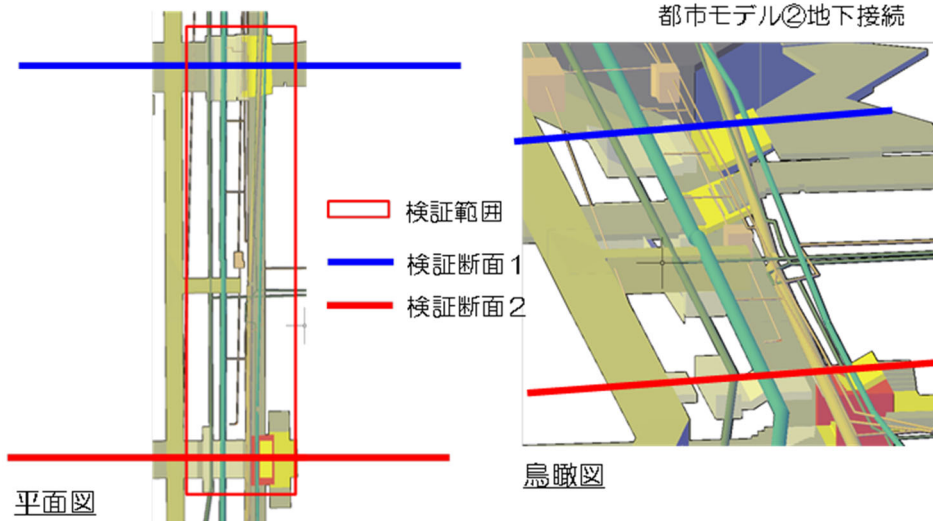
都市再開発の建築工事で作成された道路部のインフラを図面化（二次元）した任意の2断面（水平・鉛直位置）について検証を行った。

設計図と二次元図面（試掘結果）との位置関係（断面図）を図 2-3 に示す。図 2-3 は、試掘結果で得られた実地下埋設物の状況と計画時に作成された二次元図面と断面図の重ね合わせによる位置関係を示している。

- 検証位置で下水管以外は、管径程度の位置ずれを確認
- 下水管が新設構造物と干渉し、断面の再検討が必要

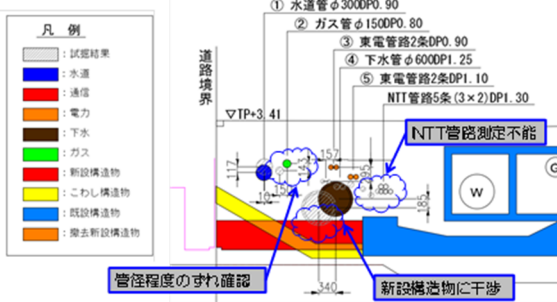
◎ 検証② 試掘断面の検証

建築工事での道路部のインフラ図面（二次元） 【検証場所】
都市モデル②地下接続



◎ 検証② 試掘断面の検証（断面1）

建築工事での道路部のインフラ図面（二次元）



◎ 検証② 試掘断面の検証（断面2）

建築工事での道路部のインフラ図面（二次元）

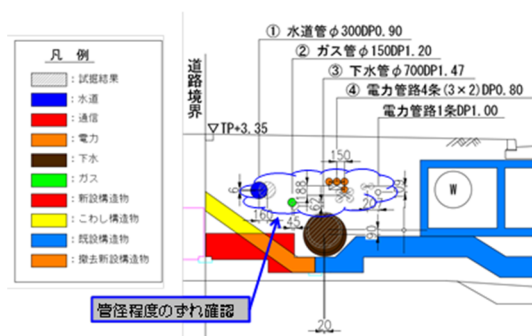


図 2-3 設計図と二次元図面（試掘結果：断面図）との検証結果（単位mm）

3) CIM モデルの検証③

設計段階で作成された都市部の地下接続工事において CIM を活用する目的で作成した CIM モデルの任意の 1 断面（水平・鉛直位置）について検証を行った。

CIM モデルと実埋設物状況との検証結果を図 2-4 に示す。図 2-4 は、試掘結果で得られた実地下埋設物の状況と計画時に作成された CIM モデルと平面・断面位置の重ね合わせによる位置関係を示している。

- 全体的に鉛直方向のずれが生じている
- 設計段階で存在しない管路が試掘調査にて確認

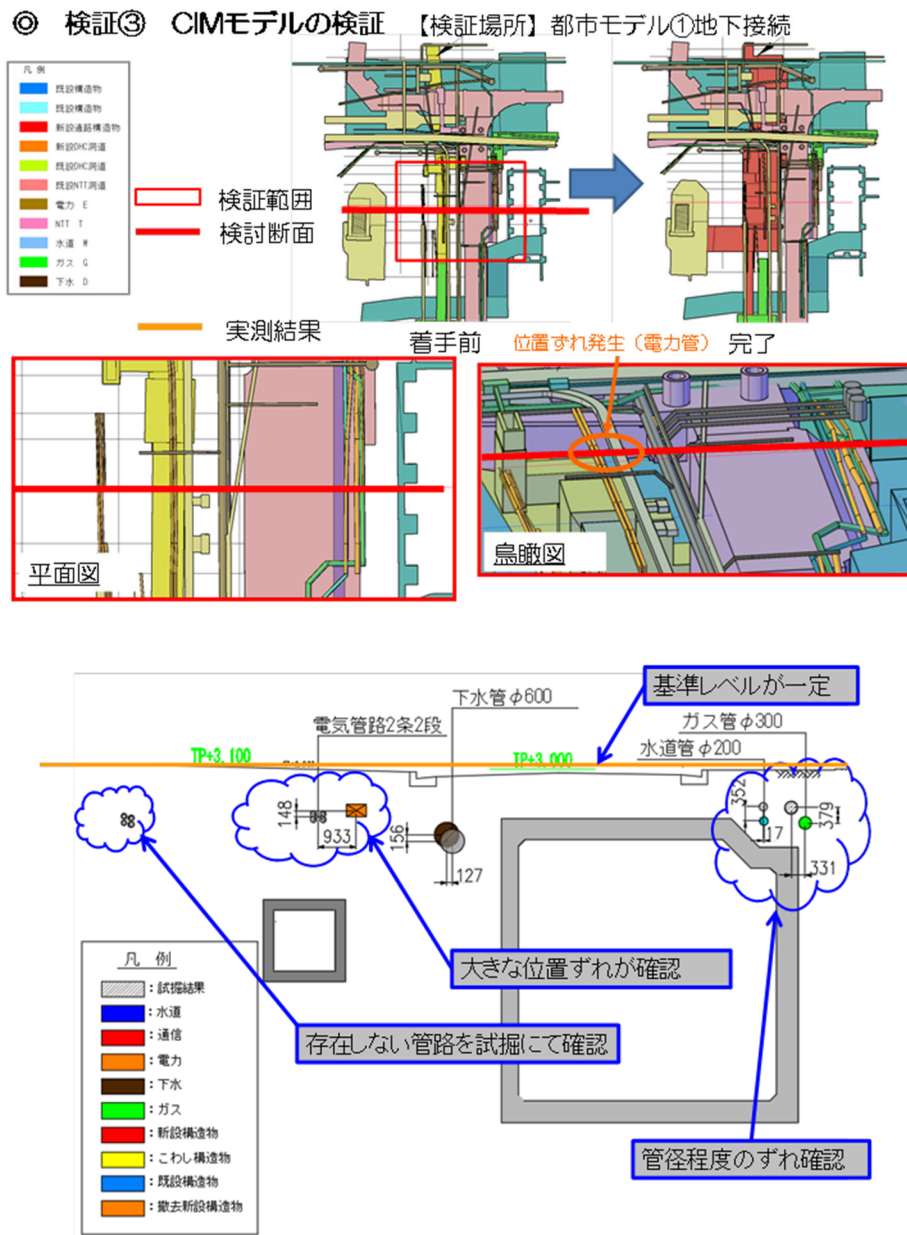


図 2-4 CIM モデルと実埋設物状況との検証結果（単位mm）

2.2.2.3 試掘調査の実態調査

試掘調査について参考に都市土木の6工事94箇所を対象に報告書および図面の実態調査を行った。

試掘実態調査結果概要を図2-5に示す。図2-5は、都市土木の6工事94箇所を対象に報告書および図面の実態調査の結果の概要（調査範囲、深さ、土被り、基準からの距離）を示している。

- 試掘調査は、夜間作業にて調査
- 調査範囲（掘削範囲） 長辺3m 短辺1m 深さ2m程度
- 調査対象物は、土被り（DP）で1.0m程度
（今回の調査箇所は歩道部に埋設されている箇所が多かった）
- 図面調査の結果、埋設物位置関係は官民および道路境界からの離隔表示

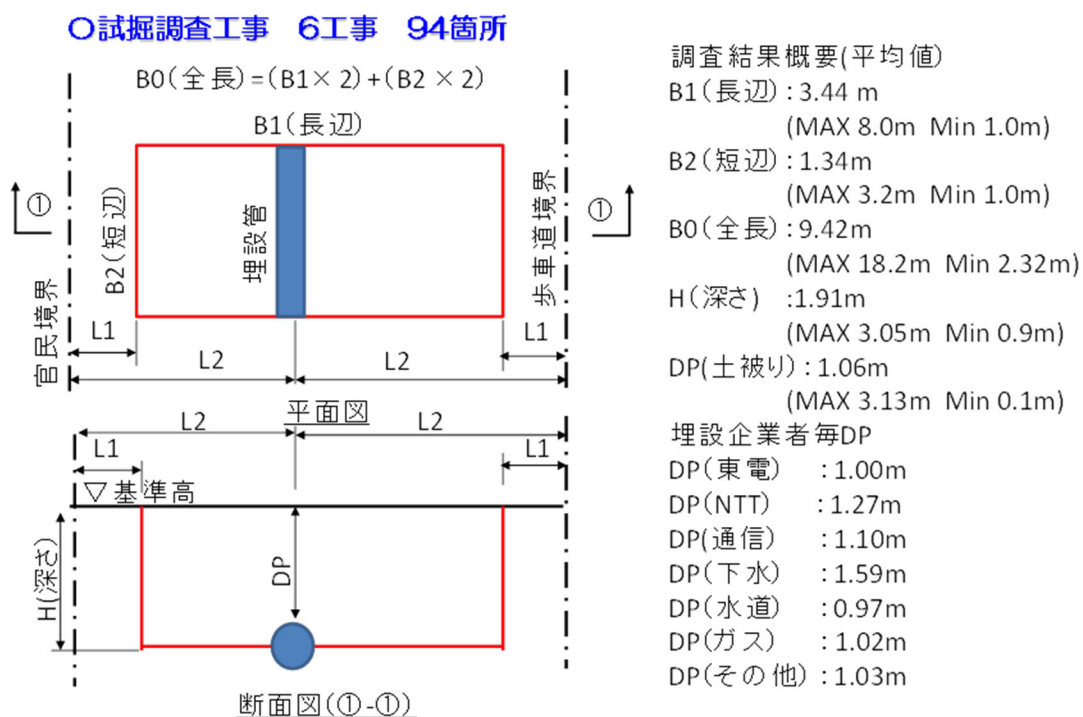


図 2-5 試掘実態調査結果概要（単位 m）

2.2.3. 調査まとめ

本研究の実態調査より課題として以下を抽出した。

- 台帳レベルからの図面縮尺 1/500 1mm→250mm 程度のずれの可能性有り
(一部異縮尺の図面使用)
- 完成図および内部測量可能な構造物は、供用範囲のずれ
- 基準レベル設定、各埋設物での基準位置（標定位置）が相違している
- 試掘調査結果では、任意の断面にて調査しており図面の作成方法に統一性がない

今回の検証箇所は、台帳縮尺レベルでの誤差である。また、既存構造図の活用や追加調査（測量・試掘調査）により精度向上は可能である。そして、CIM モデルの作成には、標定点や基準点の設定が重要である。また設計図や CIM モデルは、複数の埋設企業者の管理図と計画図の図面の重ね合わせ段階での位置の不整合や試掘結果による実埋設状況と設計図の差異が生じており、試掘結果を踏まえて計画図（二次元図面）の修正が行われていた。

2.3. 地下埋設物における SfM（三次元形状復元計算）

都市土木の施工では、夜間工事や施工範囲が限定される場合が多く、その中で地下埋設物の局所的な範囲において、高価な計測方法ではなく、短時間で三次元モデルを簡易に取得する方法や生成する手法として SfM（三次元形状復元計算）は有効である。地下埋設物における SfM による三次元モデルの生成方法の概要と SfM の課題を次項以降に述べる。

2.3.1. 基準点の設定

一般的な写真測量では、

①複数の画像中に写っている箇所の 3 次元地理座標（緯度、経度、標高）（基準点や標定点と呼ばれる）

②画像に結び付いた GPS（緯度、経度、標高）や IMU（ ω , φ , κ ）情報

を用いることにより、SfM によるカメラ位置・姿勢の復元時、現実世界と同じ座標やスケールで復元することができる。航空機や UAV による写真測量では、おおよその基準点の配置方法が定められている。UAV の撮影による基準点の配点を図 2-6 に示す。図 2-6 は、「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」⁸¹⁾における基準点数や配置方法である。

－ 撮影（標準）

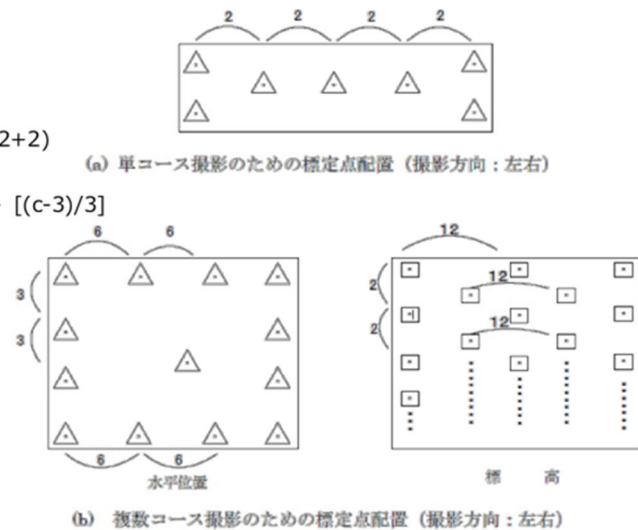
- ・ OL 60%
- ・ SL 30%

－ 標定点の配点

- ・ 単コース撮影 $NH = NV = (n/2 + 2)$
- ・ 複数コース撮影
 - $NH = 4 + 2 \cdot [(n-6)/6] + [(c-3)/3]$
 - + $[(n-6)(c-3)/30]$
 - $NV = (n/12)C + 2(c/2)$

－ 撮影

- ・ 地上画像の要求精度
 - レベル250 0.06m
 - レベル500 0.12m



www.sparj.com/UAVapp/UAV2016/speakers/MurakiUAV2016.pdf より

図 2-6 UAV の撮影による基準点の配点

SfM を用いる場合でも基本的には写真測量と同様である。なお、①、②が両方なく、画像のみでも相対的なカメラ位置・姿勢の復元と三次元モデルの生成は可能であるが、その場合は生成されたモデルの座標やスケール、方向（回転）は現実のものとは異なっていることに注意が必要である。

本研究では、画像に付与される GPS 情報だけでは SfM で生成される三次元モデルの座標やスケールの精度が低く、特に高層ビルに囲まれた地区では GPS 精度が落ちるため、基準点を設ける。基準点は、計測対象範囲を囲むように 3 点以上（標準 4 点）配置する。

2.3.2. 撮影

撮影計画は、撮影箇所ごとに、撮影する三次元点群の位置精度、撮影高度、使用機器、地形形状、土地被覆、気象条件などを考慮して立案する。

2.3.3. 撮影機材

古典的な写真測量では、画像から精度の高い三次元データを得るには、元々レンズの歪みが少ない高価なカメラで、事前にキャリブレーション（レンズの歪みなどの係数の算出）も行う必要があったが、SfM では多くの画像を用いて、カメラの位置、姿勢とともにカメラのキャリブレーションデータも同時に算出することが通常なため、高価なカメラを用いる必要はなくなってきた。現在では、コンパクトカメラやスマートフォン、UAV（ドローン）搭載の GoPro などのカメラで SfM を行うことも一般的となっている。

図 2-7 にカメラキャリブレーションによる画像の幾何歪み補正イメージを示す。図 2-7 は、撮影した画像におけるカメラキャリブレーションの幾何歪み補正のイメージである。

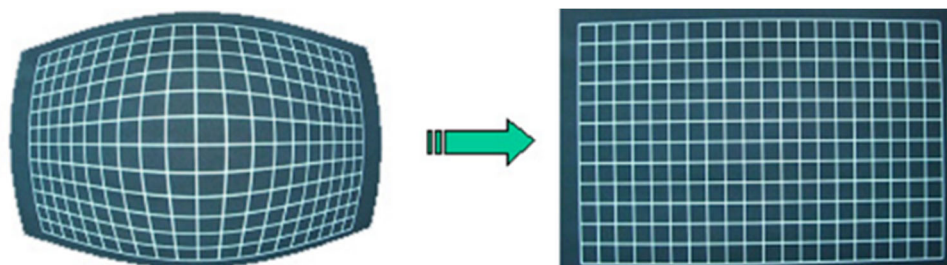
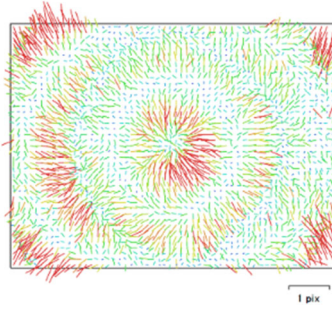


図 2-7 カメラキャリブレーションによる画像の幾何歪み補正イメージ

本研究の撮影機材としては、汎用的なデジタルカメラやデジタルビデオカメラ、スマートフォン用いて撮影し、一眼レフカメラなどの高価で大型のカメラは用いないこととした。

PhotoScan が出力されるキャリブレーションレポートの例を図 2-8 に示す。図 2-8 は、PhotoScan のアライメント（SfM）実行時に出力されるキャリブレーションレポートの例である。このように、カメラのキャリブレーション値が自動的に算出される他、画像中においてどの方向に歪みが発生しているか確認することができる。

	値	誤差
F	3421.82	0.13
Cx	1.99141	0.085
Cy	7.61759	0.13
B1	-1.82825	0.033
B2	-1.36997	0.018
K1	0.0785658	0.00013
K2	-0.0665324	0.00061
K3	-0.0771014	0.00087
P1	9.25093e-05	9.7e-06
P2	-0.00093483	1e-05



f : 焦点距離
 (C_x, C_y) : 主点位置ずれ
 B_1, B_2 : 非直交性アフィン係数
 K_1, K_2, K_3 : ラディアルディストーション係数
 P_1, P_2 : タンジェンシャルディストーション係数

図 2-8 PhotoScan が出力するキャリブレーションレポート例

2.3.4. 撮影方法

SfM は基本的には写真測量の原理でカメラ位置・姿勢の再現や対象物の 3 次元座標取得を行うため、用いる画像はステレオである必要がある。

SfM の撮影方法を図 2-9 に示す。図 2-9 に示すとおり撮影者は同じ箇所に留まって多方向を撮影するだけではステレオにならないため、絶えず移動しながら撮影する必要がある。平面的な対象物に対しては撮影者が対象物に沿って移動しながら行う「平行撮影」、対象物に対して撮影者が周囲を回るように撮影を行う「収斂撮影」、あるいはそれらの複合撮影が一般的である。また、形状が良く死角の少ないモデルを生成するには、オーバーラップを多め (80%以上) に撮影する、より多方向から撮影するなど、一定の撮影ノウハウが必要となってくる。しかしながら、大量の画像で SfM を行おうとすると膨大な時間が必要となり、場合によっては処理不能に陥るため、適切な三次元モデルを現実的な時間で生成することは、SfM 技術における課題のひとつである。本研究における撮影方法は、平行撮影 (静止画あるいは動画) を主体としたものとし、撮影者がそれほど意識せずともよいものとする。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。

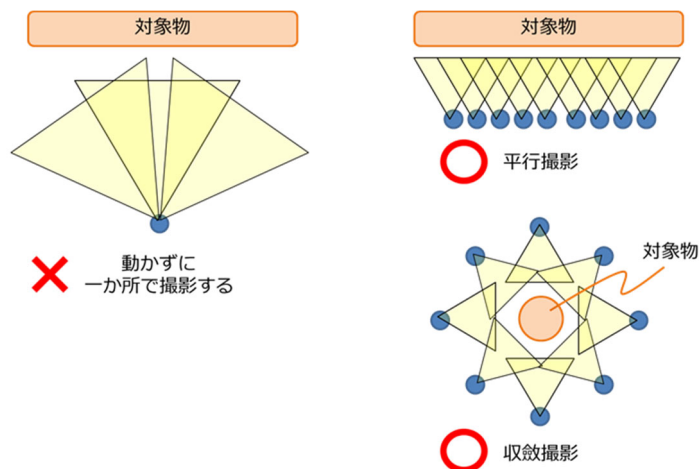


図 2-9 SfM の撮影方法

2.3.5. SfM（三次元形状復元計算）

SfM を用いた三次元データ生成における一般的な手順を図 2-10 に示す。図 2-10 は、画像の対応点の自動取得からテクスチャ貼り付けまでの高密度点群と三次元メッシュモデルを出力する手順である。まず画像撮影時のカメラの位置・姿勢を復元し、次にその情報を用いて高密度三次元点群を生成し、その点群を頂点とした三次元メッシュモデル（三角形の集まり）を構築する。つまり出力される三次元データとしては、高密度点群と三次元メッシュモデルとなる。以降は、単に「点群」と言う場合は高密度点群を指し、「三次元モデル」と言う場合は三次元メッシュモデルを指すこととする。SfM による三次元モデル生成例を図 2-11 に示す。

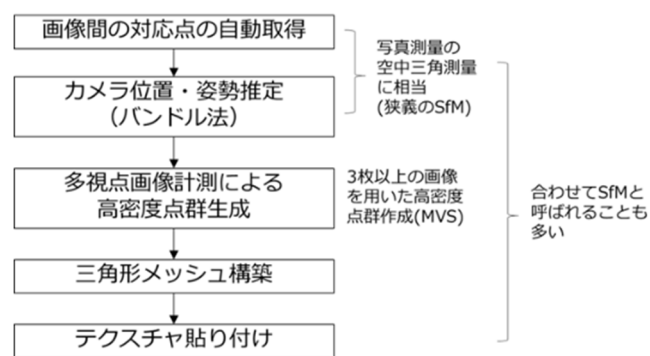
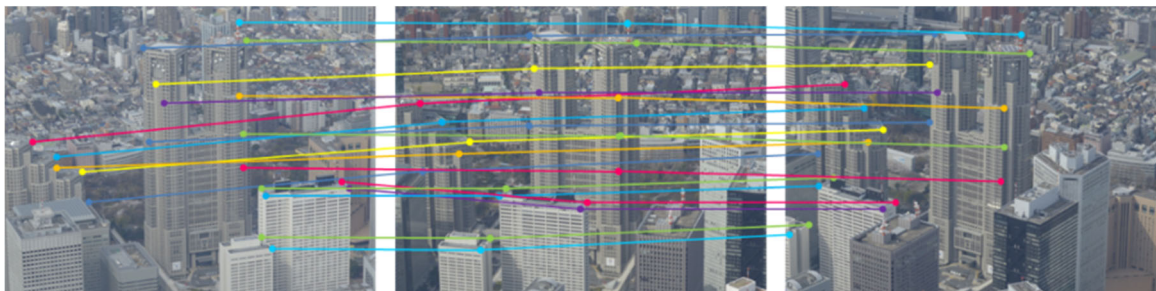
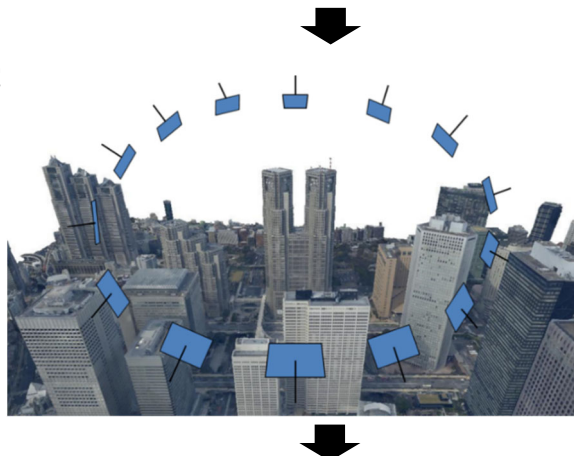


図 2-10 SfM による 3 次元モデル生成フロー

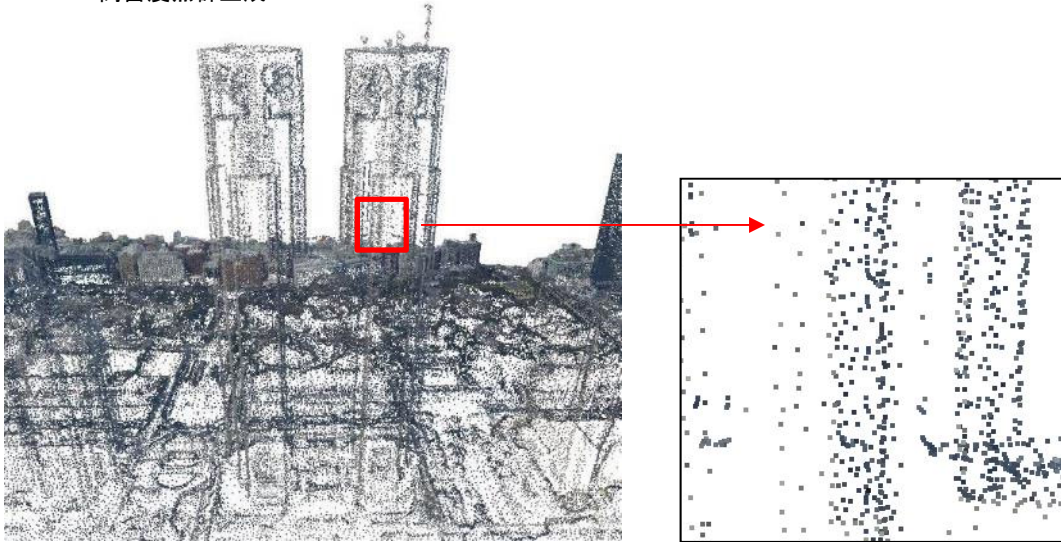
画像間の対応点の自動取得



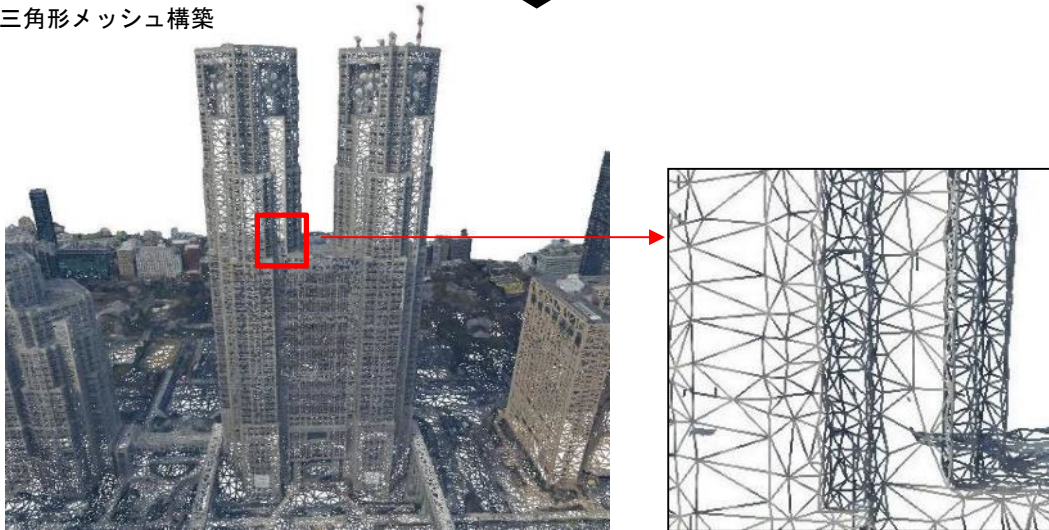
カメラ位置・姿勢推定



高密度点群生成



三角形メッシュ構築



テクスチャ貼り付け

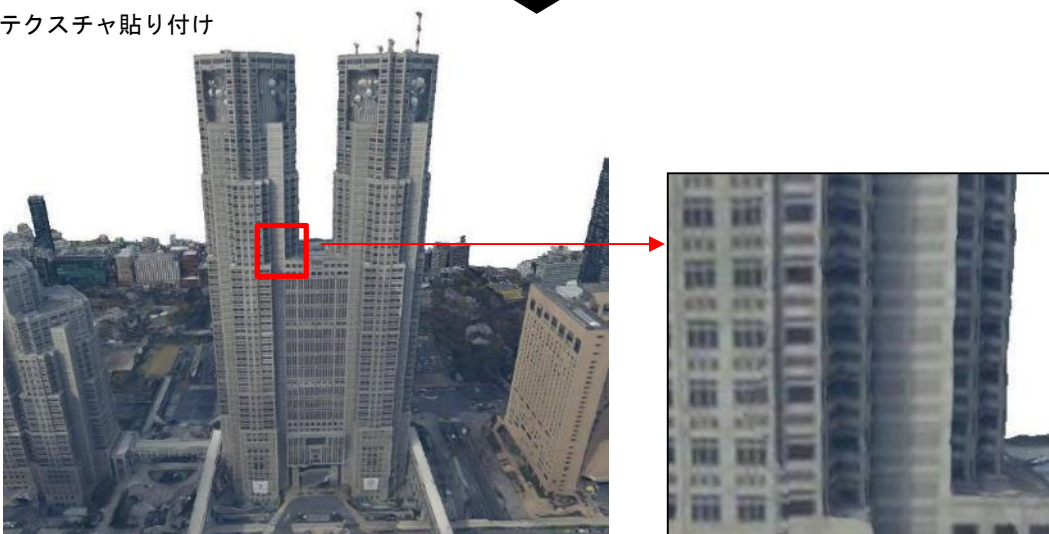
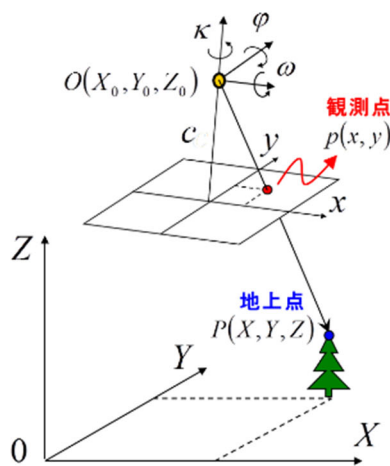


図 2-11 SfMによる三次元モデル生成例

SfM はもともとコンピュータビジョンやロボットビジョンからきた概念であり、多くのカメラの画像を用いて、画像撮影時のカメラの位置および姿勢と対象物の幾何学的形状の復元を同時に行う技術である。一般的には、図 2-11 は、まず画像間の対応点を取得して、その情報からカメラの位置と姿勢を復元するものであり、この工程までを SfM と呼ぶことも多い。対応点を用いたカメラの位置と姿勢の復元は写真測量における「バンドル調整計算」にあたる。図 2-12 に空中写真におけるバンドル調整計算、Multi View Stereo の概念を図 2-13 に示す。図 2-12 は、複数写真の対応点の画像座標など、各観測値は誤差を含むので、誤差が最小になるような最適解を求めるバンドル調整計算の概念図である。

➤ 地上点(X, Y, Z)が写真上に投影される位置(x, y)を求める式 (共線条件式)



$$x = -c \cdot \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = -c \cdot \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

(x, y) : 地上点が写真上に投影される位置 (写真座標系)

(X, Y, Z) : 地上点の地上座標 (地上座標系)

c : カメラの画面距離 (焦点距離)

(X₀, Y₀, Z₀, ω, φ, κ) : 写真の外部標定要素 (位置・姿勢)

$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$: 回転を表すマトリックス
(ω, φ, κの関数)

ここでは、対応点の実空間上での点を地上点と呼び、写真上でのその像を観測点と呼ぶことにする。

➤ バンドル調整計算とは

複数の写真に共通して写っている対応点を用いて、各写真の外部標定要素 (カメラの位置・姿勢) および対応点の地上座標を最小二乗法により同時に決定する方法。対応点の画像座標等、各観測値は誤差を含むので、誤差が最小になるような最適解を求める。

※対応点はタイポイント (Tie Point)とも呼ばれる。
(画像間を結ぶイメージ)

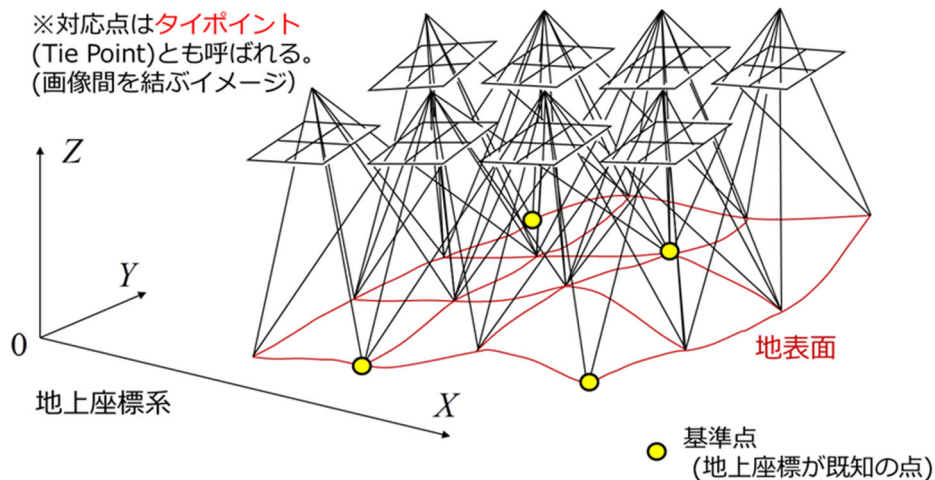
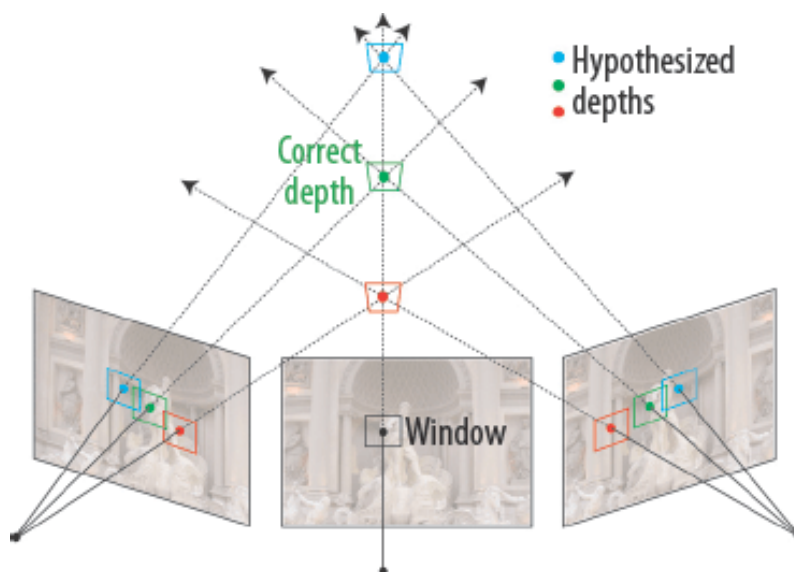


図 2-12 バンドル調整計算の概念

一方、MVS (図 2-13 参照) は復元されたカメラ位置、姿勢を用いて、同一点が撮影された 3 枚以上の複数画像から物体の高密度な点群を取得する技術である。写真測量の原理では最低 2 枚の画像で同一点があれば物体の三次元情報を取得できるが、3 枚以上の画像を用いることによりさらに精度の高い点群を取得することが可能である。さらに、高密度点群から三角形メッシュの構築、テクスチャの貼り付けを行うことで、テクスチャ付きの三次元モデルを生成することができる。なお、このカメラ位置、姿勢の復元 (狭義の SfM) と MVS、メッシュ構築、テクスチャの貼り付けまでを合わせて「SfM」と言う場合も多く、本論文でも単に SfM と呼ぶことにする。



<https://www.computer.org/csdl/mags/co/2010/06/mco2010060040-abs.html> より

図 2-13 Multi View Stereo の概念

SfM によって三次元モデルを生成するソフトウェアのうち、代表的な商用ソフトウェアとしては PhotoScan (Agisoft 社製), Pix4Dmapper (Pix4D 社製), Context Capture (Bentley 社製), SURE (nFrame 社製), フリーソフトウェアでは Bunlder, MicMac, OpenMVG, VisualSfM などが存在する。

本研究では、比較的安価な市販の SfM ソフトウェアを用いることとし、使用画像の指定および基準点 (・検証点) の設定のみ手動で行えば、自動で三次元モデル生成が可能なものとする。

2.3.7. 都市土木における地下埋設物の SfM の課題

都市土木における地下埋設物の SfM では、夜間工事や施工範囲が限定される場合が多く、輻輳した地下埋設物や局所的な施工範囲において、スマートフォンやデジタルカメラを用いて SfM により三次元モデル生成する。都市土木における地下埋設物の SfM の課題としては以下が挙げられた。

(1) 基準点

一般的な写真測量では、SfM によるカメラ位置・姿勢の復元時、現実世界と同じ座標やスケールで復元することができる 3 次元地理座標（緯度、経度、標高）（基準点や標定点と呼ばれる）を設置する。航空機や UAV による写真測量では、およその基準点の配置方法が定められているが、本研究の対象箇所である地下埋設物は供用している道路部であり容易に基準点を設置することができないことや地下埋設物に対しての基準点の配置方法は定められていない。

(2) 撮影

都市土木の施工では、夜間工事や施工範囲が限定される場合が多く、撮影計画は、撮影箇所ごとに、撮影する三次元点群の位置精度、撮影高度、使用機器、地形形状、土地被覆、気象条件などを考慮する必要がある。

(3) 撮影機材

本研究の撮影機材は、夜間の限られた時間の中、日常生活や現場施工管理に浸透しているデジタルカメラやスマートフォンを想定している。しかしながら既存研究では、地下構造物（地下埋設物を含む）に対してデジタルカメラやスマートフォンを用いた撮影の検証はされていない。

(4) 撮影方法

SfM の撮影方法において形状が良く死角の少ないモデルを生成するには、オーバーラップを多め（80%以上）に撮影する、より多方向から撮影するなど、一定の撮影ノウハウが必要となってくる。本研究の対象物である地下埋設物は、複数の地下埋設物が輻輳おり撮影のオーバーラップや撮影角度を設定する必要がある。

(5) SfM ソフト

SfM によって三次元モデルを生成するソフトウェアは、複数存在する中で汎用性のあるソフトを使用する必要がある。地下構造物（地下埋設物を含む）に対して複数ソフトによる検証が必要である。

2.4. 本研究の位置づけ

本節では、前節で論じた課題に対して、本研究の目的がどの課題に解決に寄与するのかを整理する。

- 都市土木では、実態調査の結果より複数の埋設企業者の管理図と計画図の図面重ねせ段階での位置の不整合や試掘結果による実埋設状況と計画・設計に作成した二次元図面の計画図と差異が生じることが往々にしてあり、施工の際に試掘結果を踏まえて二次元図面が修正されているが、その作業には手間と時間がかかる課題がある。

この課題に対して、本研究で提案する簡易な三次元モデルを用いた二次元図面を補正する手法は、都市土木の工事施工の際に地下埋設物の関係性や規模の把握が可能であり、既存の二次元図面を効率的に補正ができる。これにより業務の効率化が期待できる。

- 都市土木における地下埋設物の SfM の課題では、地下埋設物に対しての基準点の配置方法、夜間工事や施工範囲が限定される場合の撮影、簡易な撮影機材（デジタルカメラやスマートフォンなど）の撮影データによる SfM の検証、複数の地下埋設物が輻輳おり撮影のオーバーラップや撮影角度の設定などの撮影方法、地下構造物（地下埋設物を含む）に対して複数ソフトによる検証などの三次元モデル生成に係わる課題がある。

この課題に対して、本研究で提案する簡易計測（スマートフォンやデジタルカメラなど）による三次元モデルの生成手法を用いることで都市部の輻輳した地下埋設物でも位置精度の高い三次元モデルの生成ができる。生成した位置精度の高い三次元モデルを用いることで二次元図面の補正が可能である。

3. 簡易計測による三次元モデルを用いた地下埋設物の二次元図面補正 手法の提案

3.1. 地下埋設物の簡易な三次元モデルの生成手法

本章では、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埋設物を動画・静止画を撮影し、地下埋設物の簡易な三次元モデル生成手法を考案した。三次元モデル生成手法の手順を図 3-1 に示す。図 3-1 は、本研究が提案する三次元モデルの生成手法の処理およびデータの流れの手順である。

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。

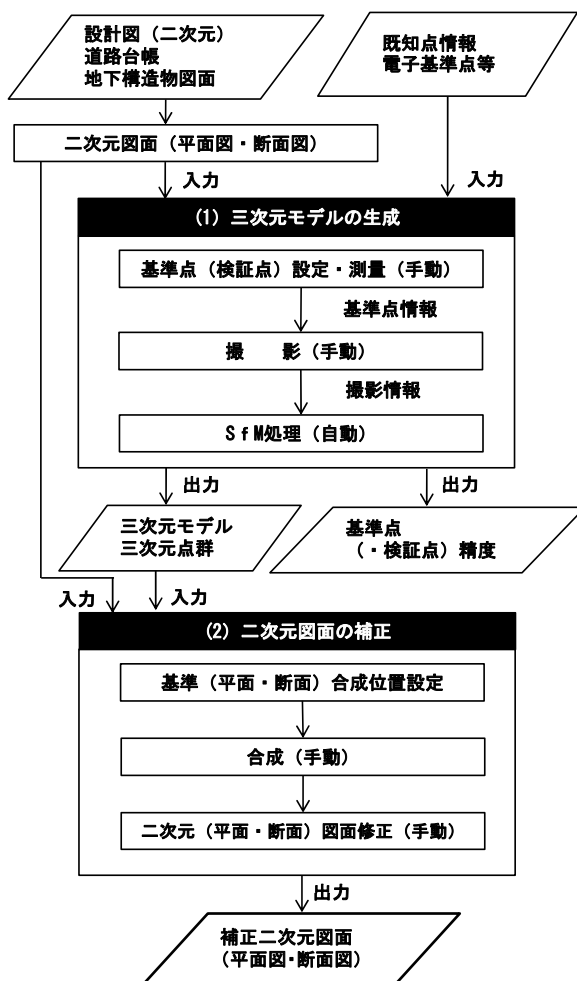


図 3-1 三次元モデル生成手法の手順

3.2. 作業計画（三次元モデル生成箇所（試掘箇所）の選定）

三次元モデルを生成する箇所の状況（昼または夜間）を確認し、基準点の設置する場所・方法、撮影機材（照明含む）および撮影方法を計画した。

三次元モデル生成は、都市土木の事業実施段階（設計および施工段階）で行われている試掘調査を想定している。三次元モデル生成箇所は、設計図（二次元）・地下構造物図面・道路台帳などから地下埋設物が輻輳している箇所や新設構造物や仮設物に干渉することが懸念される箇所を選定した。対象範囲の一例として前章での試掘調査の実態調査を踏まえて、試掘実態調査結果概要を図 3-2 に示す。本研究では、図 3-2 より幅は B1:長辺 3~4m, B2:短辺 1~2m, 深さは H:地表面~最深 2m 程度, 対象地下埋設物の土被り深さは DP 地表面~1.5m 程度であり、図 3-2 は三次元モデルを生成する対象範囲の目安とした。

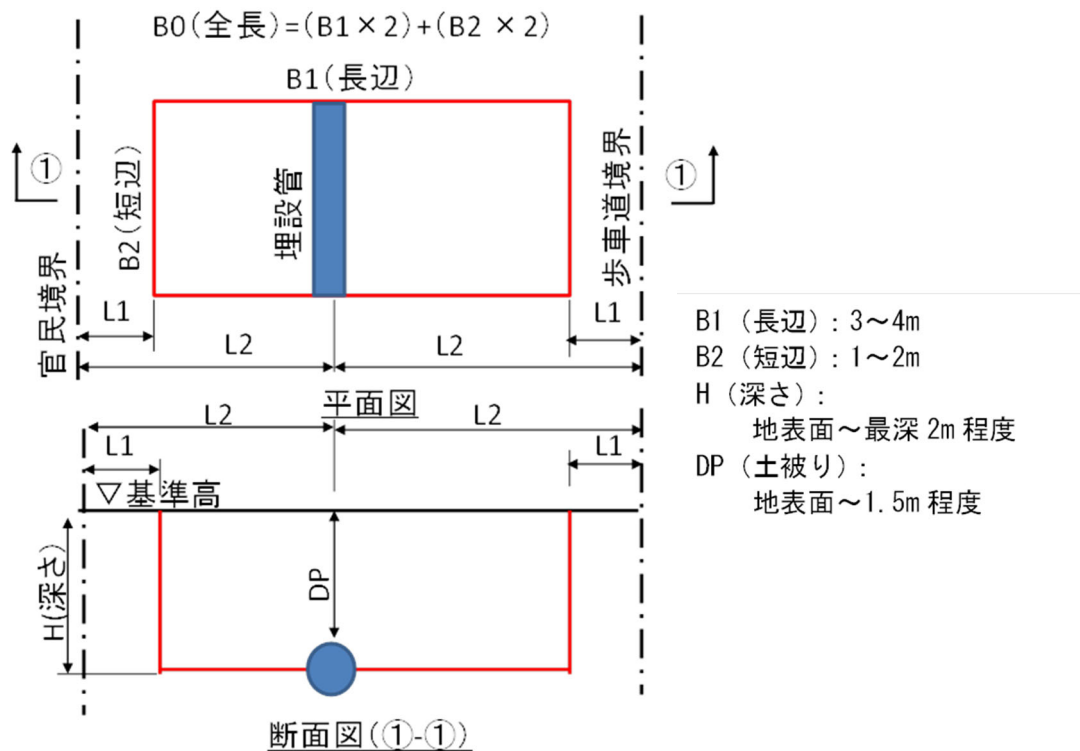


図 3-2 試掘実態調査結果概要（単位 m）

3.3. 三次元モデル生成手法の精度検証実験

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、地下埋設物は吊防護などが施されていた。

3.3.1. 検証箇所

検証実験は、東京都千代田区大手町付近にある工事現場で実施した。

検証実験箇所の写真を図 3-3 に示す。図 3-3 は、工事現場、基準点および基準点から見た検証箇所の写真である。



図 3-3 検証実験箇所写真

3.3.2. 測量

写真画像を用いた SfM による 3 次元データの位置精度検証のため、既設基準点(与点)を使用しトータルステーションによるトラバース測量ほかにより、現地に設置した検証点及び標定点の XY 座標及び標高を求めた。

(1) 測量機材

測量機材を表 3-1 に示す。表 3-1 は、使用した測量の TS 測量機材である。

表 3-1 測量機材

名称	型式	数量	備考
トータルステーション	Laica社製 TS11型	1	1級トータルステーション
反射鏡	wild社製 GPR型	5	
ピンポールプリズム	トプコン社製	1	
整準台	wild社製	5	
三脚	Laica社製	5	

基準点網図を図 3-4、与点座標を図 3-5、標定点配置図を図 3-6 に示す。

既設基準点 No23 及び AT1 を与点とし、併合トラバース測量にて作業現場内に新規に設置した T1 及び T2 の XY 座標及び標高を求めた (図 3-4 基準点網図参照)。

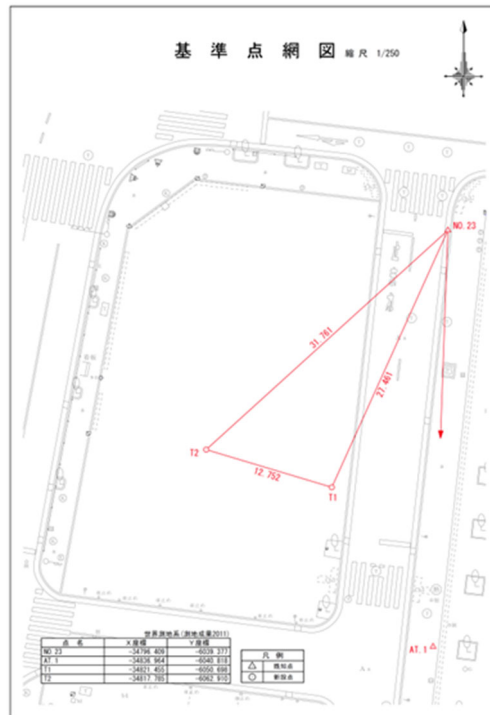


図 3-4 基準点網図

なお、No23 及び AT1 の成果が測地成果 2000 (東日本震災前) のため、測地成果 2011 (東日本震災後) に変換し使用した (図 3-5 与点座標について参照)。

与点座標について							
世界測地系 (測地成果2000)				世界測地系 (測地成果2000)			
	測点	X	Y		X	Y	
①	工事基準点成果	NO.23	-34796.407	-6039.724	T.1	-34836.962	-6041.164
↓ ソフトウェアにより地震補正							
世界測地系 (測地成果2011)				世界測地系 (測地成果2011)			
	測点	X	Y		X	Y	
②	工事基準点成果	NO.23A	-34796.415	-6039.387	T.1A	-34836.970	-6040.828
↓ (T.1A + ④)							
世界測地系 (測地成果2011)				世界測地系 (測地成果2011)			
	測点	X	Y		X	Y	
③	公共基準点成果	NO.23	-34796.409	-6039.377	AT.1	-34836.964	-6040.818
④ 較差 (③-②)		ΔX	ΔY				
		0.006	0.010				
距離		0.012m					
<ul style="list-style-type: none"> ・工事基準点(測地成果2000)を、国土地理院のソフトウェアにより地震補正を行う。 ・No.23の地理院成果と補正した工事基準点成果で12mmの誤差があり、T.1Aに誤差分を加算したものを成果とした。 ・標高は、公共基準点No.23の成果を基準とした。 							

図 3-5 与点座標について

次に、新設した T1 点より、放射トラバース測量で検証点及び標定点の XY 座標及び標高を求めた（図 3-6 標定点配置図参照）。測量の様子を図 3-7 に示す。

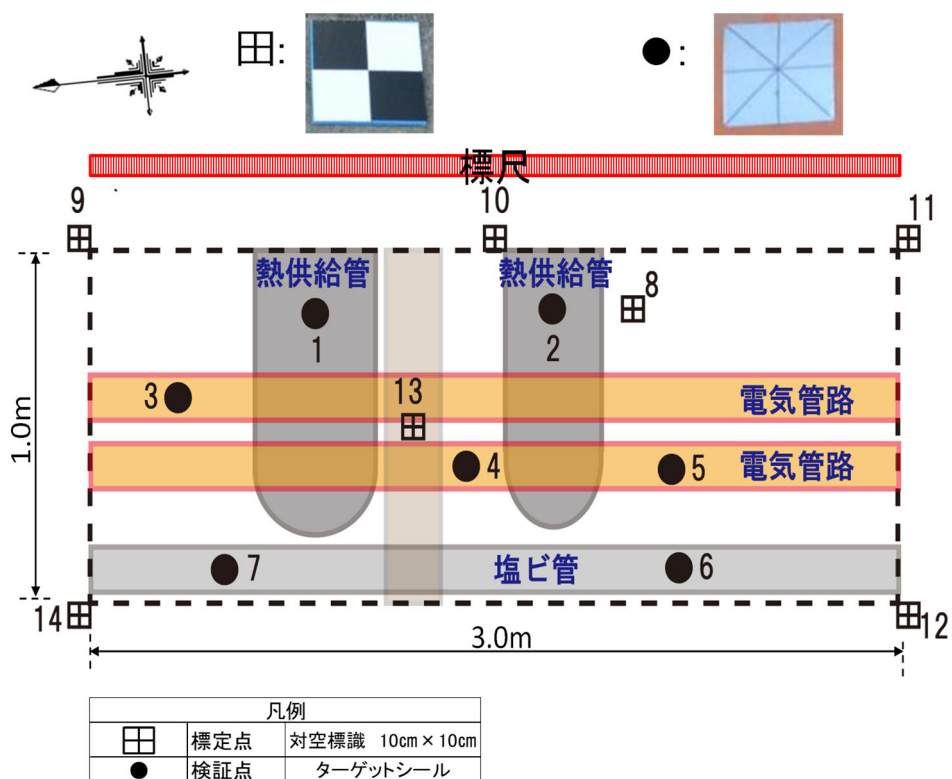


図 3-6 標定点配置図



図 3-7 測量の様子

(2) 測量結果

トラバース測量より得られた検証点及び標定点のXY座標及び標高を表 3-2に示す。
表 3-2 は、測量結果から基準となる標定点と三次元モデルの精度確認するポイントとなる検証点の測量成果である。

表 3-2 検証点座標成果表（世界測地系（測地成果 2011））

No	点番	点名	X座標	Y座標	Z座標	備考
1	20	1	-34823.996	-6051.625	1.289	熱供給管検証点
2	21	2	-34824.889	-6051.743	1.19	熱供給管検証点
3	22	3	-34823.459	-6051.9	2.079	電氣管路検証点
4	23	4	-34824.518	-6052.253	2.142	電氣管路検証点
5	24	5	-34825.277	-6052.346	2.185	電氣管路検証点
6	25	6	-34825.278	-6052.671	2.137	塩ビ管検証点
7	26	7	-34823.565	-6052.46	2.017	塩ビ管検証点
8	34	8'	-34825.119	-6051.768	0.13	底面基礎コンクリート部標定点
9	28	9	-34823.141	-6051.341	2.996	地表部標定点
10	29	10	-34824.683	-6051.512	3.039	地表部標定点
11	30	11	-34826.241	-6051.666	3.073	地表部標定点
12	31	12	-34826.118	-6052.774	3.072	地表部標定点
13	32	13	-34824.324	-6052.078	2.738	鉄筋部標定点
14	33	14	-34823.008	-6052.452	2.997	地表部標定点

3.3.3. 撮影

(1) 撮影機材と撮影パターン

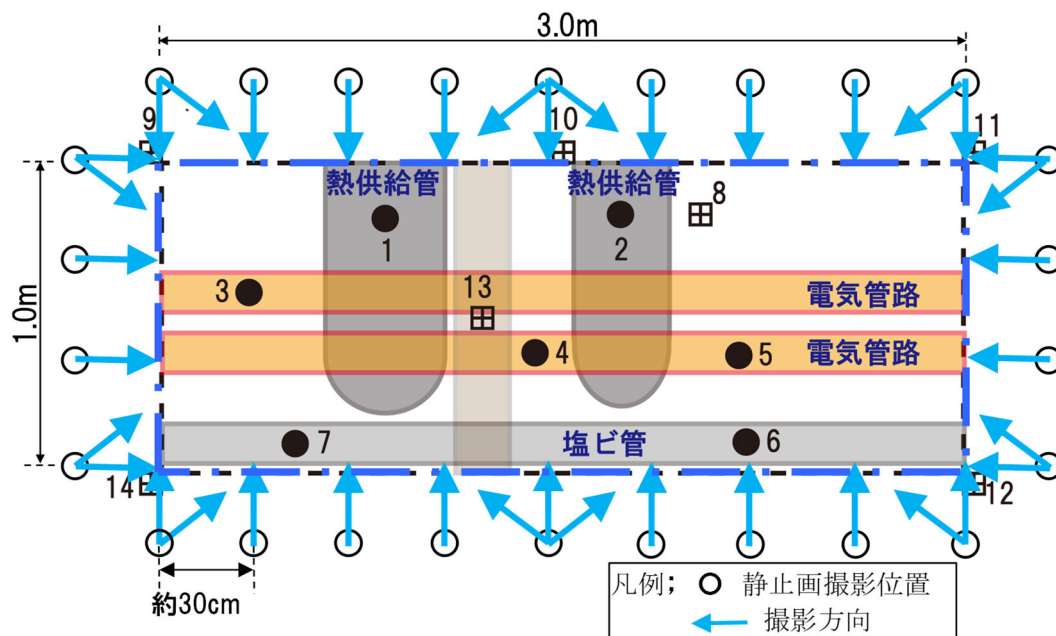
使用した撮影機材と撮影パターンを表 3-3 に示す。表 3-3 は、撮影パターンごとの撮影機材および機種名、撮影モード、写真画素数、撮影区分(昼夜区分)である。なお、スマートフォンを用いた撮影パターンのうち No.5~No.7 の 3 パターンについては夜間撮影を行わなかった。

表 3-3 撮影機材と撮影パターン

No	種別	機種	モード	サイズ	撮影	
					昼	夜
1	ビデオカメラ	Panasonic HC-VX985M	動画	3840×2160 (4K, 30fps)	○	○
2	デジタルカメラ	Nikon D5100	静止画	4928×3264	○	○
3	スマートフォン	iPhoneSE	静止画	4032×3024	○	○
4	スマートフォン	iPhoneSE	動画	3840×2160 (4K, 30fps)	○	○
5	スマートフォン	iPhoneSE	動画	1920×1080 (フルHD, 30fps)	○	—
6	スマートフォン	Xiaomi Mi	静止画	4608×3456	○	—
7	スマートフォン	Xiaomi Mi	動画	3840×2160 (4K, 23fps)	○	—

(2) 撮影方法

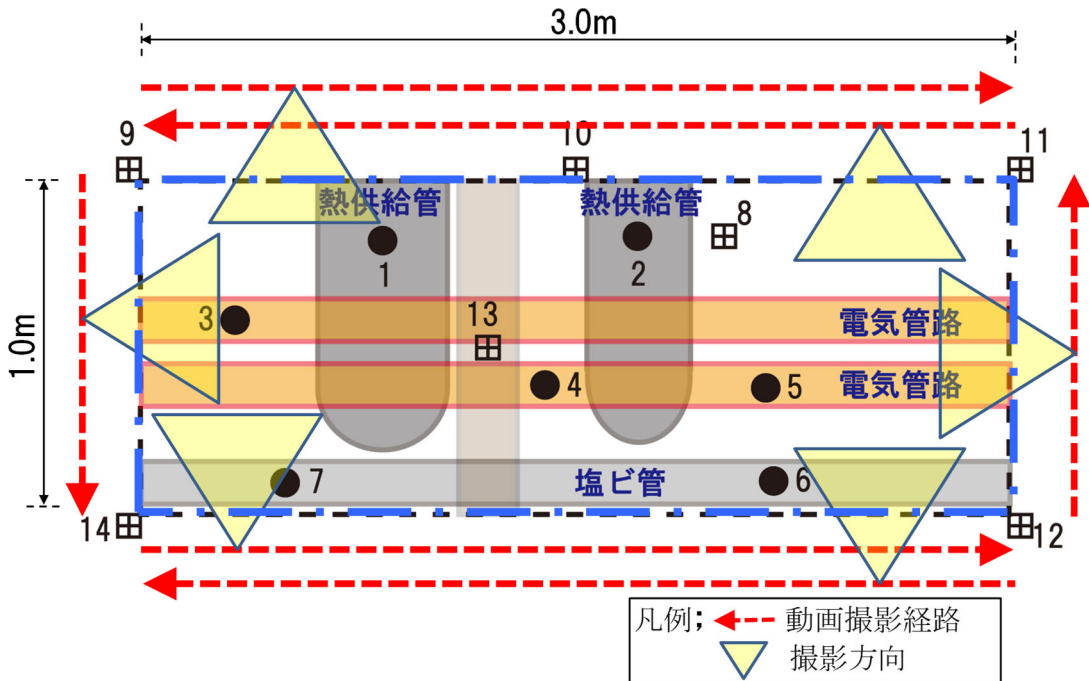
静止画の撮影方法を図 3-8 に示す。図 3-8 では、静止画はラップ率が 90%となるよう、30cm 程度の間隔で平行撮影を行った。四隅と長辺中央では斜め方向に撮影した。短辺での撮影は、試掘範囲の全体を画面に収めることができなかつたため、手前側と奥側の 2 回に分けて撮影を行った。



- 30cm程度の間隔で平行撮影。四隅・長辺中央では斜め方向も撮影
- 短辺での平行撮影時は、手前側・奥側と2回に分けて撮影

図 3-8 撮影方法 (静止画)

動画の撮影方法を図 3-9 に示す。図 3-9 では、30cm 程度の歩幅で移動しながら、長辺は手前側と奥側を 2 回に分けて平行撮影を行った。短辺は手前側を奥側が写るよう機材の角度を変えながら撮影した。



- 長辺撮影時は平行撮影。手前側・奥側と2回に分けて撮影
- 短辺撮影時は手前側・奥側が写るように角度を変えながら撮影

図 3-9 撮影方法（動画）

また、深い位置に設置されている熱供給管に影が差さないよう、昼間は日の陰っている間に撮影し、夜間はなるべく地面に対して直角に光が当たるように照明を設置し撮影した。撮影の様子を図 3-10 に示す。図 3-10 は、昼夜での撮影機材による撮影状況と夜間の照明設置状況である。

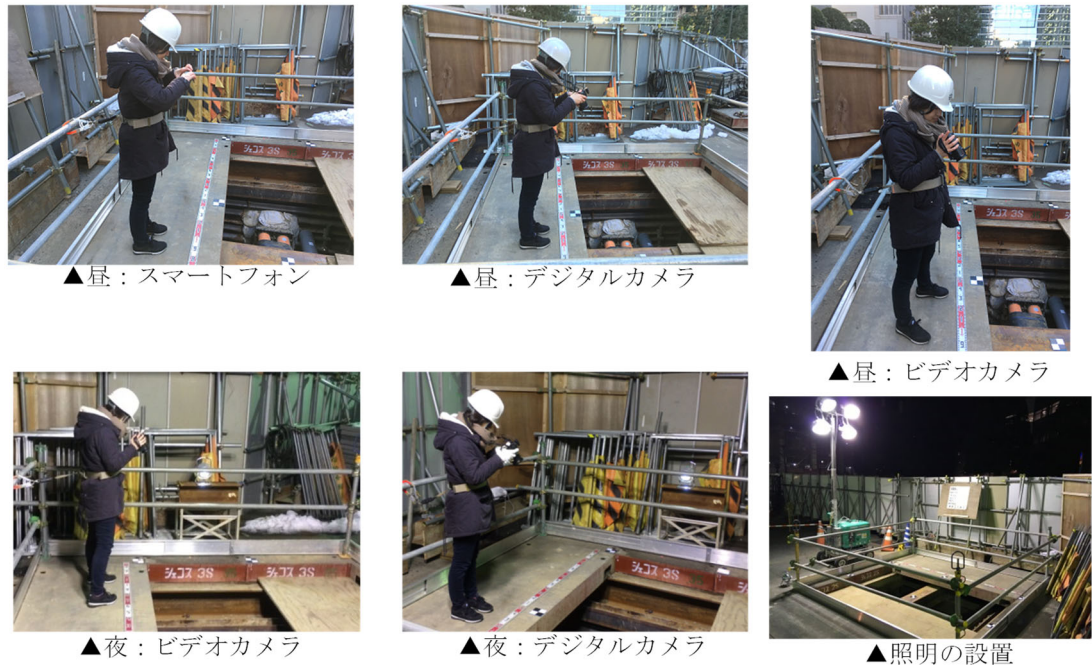


図 3-10 撮影の様子

(3) 撮影結果

撮影した静止画・動画の枚数と時間を表 3-4、撮影した画像例を図 3-11 に示す。表 3-4 は、撮影パターンごとの撮影機材、機種、撮影モード、写真画素数、昼夜区分と写真枚数である。図 3-11 は、昼夜での撮影機材ごとの撮影した画像の例である。

表 3-4 撮影結果

No	種別	機種	モード	サイズ	枚数・時間
1	ビデオカメラ	Panasonic HC-VX985M	動画	3840×2160 (4K, 30fps)	昼：133秒（約3,900枚） 夜：99秒（約2,900枚）
2	デジタルカメラ	Nikon D5100	静止画	4928×3264	昼：68枚 夜：82枚
3	スマートフォン	iPhoneSE	静止画	4032×3024	昼：52枚 夜：56枚
4	スマートフォン	iPhoneSE	動画	3840×2160 (4K, 30fps)	昼：124秒（約3,600枚） 夜：118秒（約3,400枚）
5	スマートフォン	iPhoneSE	動画	1920×1080 (フルHD, 30fps)	189秒（約5,600枚）
6	スマートフォン	Xiaomi Mi	静止画	4608×3456	80枚
7	スマートフォン	Xiaomi Mi	動画	3840×2160 (4K, 23fps)	179秒（約4,100枚）



▲昼：デジタルカメラ（静止画）



▲昼：スマートフォン（静止画）



▲夜：デジタルカメラ（静止画）



▲夜：スマートフォン（静止画）



▲昼：ビデオカメラ（動画）



▲昼：スマートフォン（動画）



▲夜：ビデオカメラ（動画）



▲夜：スマートフォン（動画）

図 3-11 撮影した画像例

3.3.4. 三次元モデルの生成

3.3.4.1 環境

三次元モデルの作成は下記の環境で実施した。

(1) 使用ソフトウェア

AgiSoft 社製 PhotoScan Professional 1.3.2

(2) 稼働環境

OS : Windows7 以上

CPU : Intel Core i7 – 6700K @4.00GHz

GPU : GeForce GTX 1080

メモリ : 64.0GB

3.3.4.2 生成パターン

基準点の設定条件を表 3-5, 三次元モデル作成パターン (静止画) を表 3-6, 三次元モデル作成パターン (動画) を表 3-7 に示す。

表 3-6～表 3-7 は, 静止画および動画による撮影パターン, 撮影種別, 撮影時間帯, 位置合わせを行う基準点, 撮影枚数である。生成パターンは, 機材種別, 撮影時間帯, 位置合わせを行う基準点の設定条件の 3 つの要素を組み合わせ, 表 3-5～表 3-7 のパターン別に三次元モデルを生成した。スマートフォン (静止画) は, 参考に iPhoneX の静止画も用いてモデルを生成した。

表 3-5 基準点の設定条件

設定条件	内容
全GCP	全ての標定点（13点）を基準点（GCP）とする
四隅GCP	四隅に配置した4つの標定点（No.9, No11, No12, No14）を基準点（GCP）とする
GCPなし	基準点（GCP）を設定しない

表 3-6 三次元モデル作成パターン（静止画）

No	種別	機種	時間帯	条件	枚数
2-0-D	デジタルカメラ	Nikon	昼	全GCP	68
2-0-N	デジタルカメラ	Nikon	夜	全GCP	82
2-1-D	デジタルカメラ	Nikon	昼	四隅GCP	68
2-1-N	デジタルカメラ	Nikon	夜	四隅GCP	82
2-2-D	デジタルカメラ	Nikon	昼	GCPなし	68
2-2-N	デジタルカメラ	Nikon	夜	GCPなし	82
3-0-D	スマートフォン	iPhoneSE	昼	全GCP	52
3-0-N	スマートフォン	iPhoneSE	夜	全GCP	56
3-1-D	スマートフォン	iPhoneSE	昼	四隅GCP	52
3-1-D'	スマートフォン	iPhoneSE	昼	四隅GCP 枚数1/2	39
3-1-N	スマートフォン	iPhoneSE	夜	四隅GCP	56
3-1-N'	スマートフォン	iPhoneSE	夜	四隅GCP 枚数1/2	38
3-2-D	スマートフォン	iPhoneSE	昼	GCPなし	52
3-2-N	スマートフォン	iPhoneSE	夜	GCPなし	56
3-3-D	スマートフォン(参考)	iPhone X	昼	全GCP	40
3-3-N	スマートフォン(参考)	iPhone X	夜	全GCP	43
3-4-D	スマートフォン(参考)	iPhone X	昼	GCPなし	40
3-4-N	スマートフォン(参考)	iPhone X	夜	GCPなし	43
3-5-D	スマートフォン(参考)	iPhone X	昼	四隅GCP	40
3-5-N	スマートフォン(参考)	iPhone X	夜	四隅GCP	43
6-1-D	スマートフォン	Xiaomi Mi	昼	四隅GCP	80
6-2-D	スマートフォン	Xiaomi Mi	昼	GCPなし	80

表 3-7 三次元モデル作成パターン（動画）

No	種別	機種	時間帯	条件	1/X	枚数
1-0-D-60	ビデオカメラ	Nikon	昼	全GCP	60	69
1-1-D-60	ビデオカメラ	Nikon	昼	四隅GCP	60	69
4-0-D-60	スマートフォン	iPhoneSE	昼	全GCP	60	67
4-0-D-30	スマートフォン	iPhoneSE	昼	全GCP	30	128
4-0-D-20	スマートフォン	iPhoneSE	昼	全GCP	20	189
4-1-D-60	スマートフォン	iPhoneSE	昼	四隅GCP	60	67
4-1-D-30	スマートフォン	iPhoneSE	昼	四隅GCP	30	128
4-1-D-20	スマートフォン	iPhoneSE	昼	四隅GCP	20	189

3.3.4.3 生成結果

(1) 基準点誤差, 検証点誤差による比較

各モデルの基準点誤差および検証点誤差について, 標準偏差と最大値を求めた. 下表に示す. 水平方向 (XY 方向) の標準偏差は式①, 鉛直方向 (Z 方向) の標準偏差は式②より求めた.

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i^2 + Y_i^2)} \quad \dots \text{式①} \qquad S_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i^2} \quad \dots \text{式②}$$

S : 標準偏差, n : 基準点または検証点の個数
Xi : X 誤差の値, Yi : Y 誤差の値, Zi : Z 誤差の値

(2) モデル比較結果

標準偏差[mm]および最大値[mm] (静止画) を表 3-8, 標準偏差[mm]および最大値[mm] (動画) を表 3-9 に示す. 表 3-8 および表 3-9 は, 各モデルの生成パターンごとの検証結果 (基準点誤差および検証点誤差) である. 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⁸²⁾に準じた±5cm とした.

表 3-8 標準偏差[mm]および最大値[mm]（静止画）

No	種別	機種	時間帯	条件	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	最大値	標準偏差	最大値
							2-0-D	デジタルカメラ	Nikon	昼
2-0-N	デジタルカメラ	Nikon	夜	全GCP	13	0	7.5 / 2.5	18.1 / 6.3		
2-1-D	デジタルカメラ	Nikon	昼	四隅GCP	4	9	3.0 / 3.6	4.5 / 4.8	9.3 / 3.0	20.5 / 6.2
2-1-N	デジタルカメラ	Nikon	夜	四隅GCP	4	9	2.8 / 3.6	4.6 / 5.5	9.5 / 3.7	21.1 / 8.2
2-2-D	デジタルカメラ	Nikon	昼	GCPなし	0	0	-	-		
2-2-N	デジタルカメラ	Nikon	夜	GCPなし	0	0	-	-		
3-0-D	スマートフォン	iPhoneSE	昼	全GCP	13	0	7.8 / 2.7	19.2 / 6.6		
3-0-N	スマートフォン	iPhoneSE	夜	全GCP	13	0	7.4 / 3.0	17.9 / 6.6		
3-1-D	スマートフォン	iPhoneSE	昼	四隅GCP	4	9	2.3 / 2.6	3.4 / 4.1	9.8 / 5.1	22.9 / 10.2
3-1-D'	スマートフォン	iPhoneSE	昼	四隅GCP枚数1/2	4	9	2.0 / 2.1	3.1 / 3.4	9.9 / 6.2	23.0 / 12.0
3-1-N	スマートフォン	iPhoneSE	夜	四隅GCP	4	9	2.4 / 2.7	3.9 / 4.9	9.3 / 3.6	20.7 / 7.0
3-1-N'	スマートフォン	iPhoneSE	夜	四隅GCP枚数1/2	4	9	1.9 / 2.2	3.2 / 3.8	10.5 / 9.2	24.3 / 21.1
3-2-D	スマートフォン	iPhoneSE	昼	GCPなし	0	0	-	-		
3-2-N	スマートフォン	iPhoneSE	夜	GCPなし	0	0	-	-		
3-3-D	スマートフォン (追加)	iPhoneX	昼	全GCP	13	0	7.4 / 2.8	17.9 / 8.4		
3-3-N	スマートフォン (追加)	iPhoneX	夜	全GCP	13	0	7.2 / 1.9	17.9 / 3.6		
3-4-D	スマートフォン (追加)	iPhoneX	昼	GCPなし	0	0	-	-		
3-4-N	スマートフォン (追加)	iPhoneX	夜	GCPなし	0	0	-	-		
3-5-D	スマートフォン (追加)	iPhoneX	昼	四隅GCP	4	9	2.1 / 1.9	3.2 / 2.8	9.3 / 4.3	21.3 / 11.5
3-5-N	スマートフォン (追加)	iPhoneX	夜	四隅GCP	4	9	1.5 / 1.9	2.0 / 2.9	9.4 / 2.4	22.6 / 5.1
6-1-D	スマートフォン	Xiaomi Mi	昼	四隅GCP	4	9	アライメント失敗			
6-2-D	スマートフォン	Xiaomi Mi	昼	GCPなし	0	0	アライメント失敗			

表 3-9 標準偏差[mm]および最大値[mm]（動画）

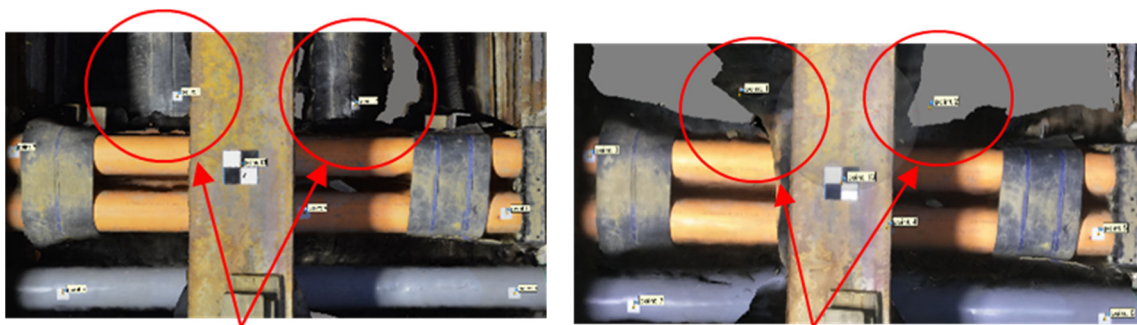
No	種別	機種	時間帯	条件	基準 点数	検証 点数	基準点誤差 (水平/鉛直)		検証点誤差 (水平/鉛直)	
							標準偏差	最大値	標準偏差	最大値
							1-0-D-60	デジタルカメラ	Nikon	昼
1-1-D-60	デジタルカメラ	Nikon	昼	四隅GCP	4	9	1.2 / 1.5	1.4 / 1.5	9.8 / 5.4	21.1 / 12.8
4-0-D-60	スマートフォン	iPhoneSE	昼	全GCP	13	0	7.5 / 3.4	11.6 / 8.5	-	-
4-0-D-30	スマートフォン	iPhoneSE	昼	全GCP	13	0	アライメント失敗			
4-0-D-20	スマートフォン	iPhoneSE	昼	全GCP	13	0	7.8 / 3.1	19.4 / 6.6	-	-
4-1-D-60	スマートフォン	iPhoneSE	昼	四隅GCP	4	9	1.4 / 0.8	1.6 / 0.8	9.9 / 4.4	19.9 / 9.5
4-1-D-30	スマートフォン	iPhoneSE	昼	四隅GCP	4	9	アライメント失敗			
4-1-D-20	スマートフォン	iPhoneSE	昼	四隅GCP	4	9	94.7 / 67.5	126.9 / 68.4	146.9 / 38.8	233.8 / 887.9

3.3.5. 各パターンの生成結果

(1) 静止画による3次元モデル生成

デジタルカメラ、スマートフォン（iPhone）では、昼夜問わず高精度でアライメント（写真位置・姿勢の推定）を実施することができた。目視の結果、三次元モデルの形状も良好であった。撮影した静止画を用いて生成した三次元モデルを図 3-12 に示す。図 3-12 は、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 3-6 の No.2-1-N, No.3-1-N）であり、対象物の三次元モデルの再現性で相違があった。

電気管路や塩ビ管の上面の形状は安定して再現できたが、深い位置に設置されている熱供給管は再現できないことがあった。特にスマートフォンでは再現できないことが多かった。



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 3-12 撮影した静止画を用いて生成した三次元モデル

スマートフォン（iPhone）の画像枚数を2分の1にして作成したモデル（No.3-1-D'）でも高精度なモデルを作成することができた。ラップ率を80%以上とするために30cm間隔で撮影していたが、本検証を行った試掘範囲の大きさの現場では、60cm間隔で撮影しラップ率を下げて問題ないと考えられる。スマートフォン（Xiaomi Mi）ではアライメント（写真位置・姿勢の推定）に失敗した。

照度計の測定状況を図 3-13 に示す。図 3-13 は、今回、参考に昼間の地表面と地表面から2m付近の仮熱供給の上部に照度計を設置して照度を測定した。参考値の測定結果を比較すると10倍程度の明るさの違いを示した。スマートフォンで再現できなかった原因は、撮影対象物の明るさが影響している可能性があることが考えられることから撮影の際、状況に応じて局所的な照明などの補助設備の検討が必要である。また今回の深い位置の仮熱供給管は、防護用に黒い保護シートが巻き付けられていた。今回の対象物は、照度（暗さ）と黒系の色の条件が重なったことより三次元モデルが生成できないことも考えられることから位置関係の把握したい場合は、地下埋設物の天端にマーキングやテープなどにて目印を設置することも対応処置として考えられる。



図 3-13 地表面（上部 3090lux）地表より 2m 付近（下部 371lux）

(2) 動画による三次元モデル生成

ビデオカメラ，スマートフォン（iPhone）では高精度でアライメント（写真位置・姿勢の推定）を実施することができた．目視の結果，三次元モデルの形状も良好であった．静止画で作成したモデルと同様に，電気管路や塩ビ管の上面の形状は安定して再現できたが，深い位置に設置されている熱供給管は再現できないことがあった．スマートフォン（iPhone 4K 動画）で，画像抽出枚数や基準点数を変えてモデルを作成したところ，アライメント（写真位置・姿勢の推定）の成否やモデルの精度が不安定であった．

作成に用いる画像を 20 枚に 1 枚抽出した場合のモデルでは熱供給管まで再現できていたが，そのほかのパターンでは再現できなかった．

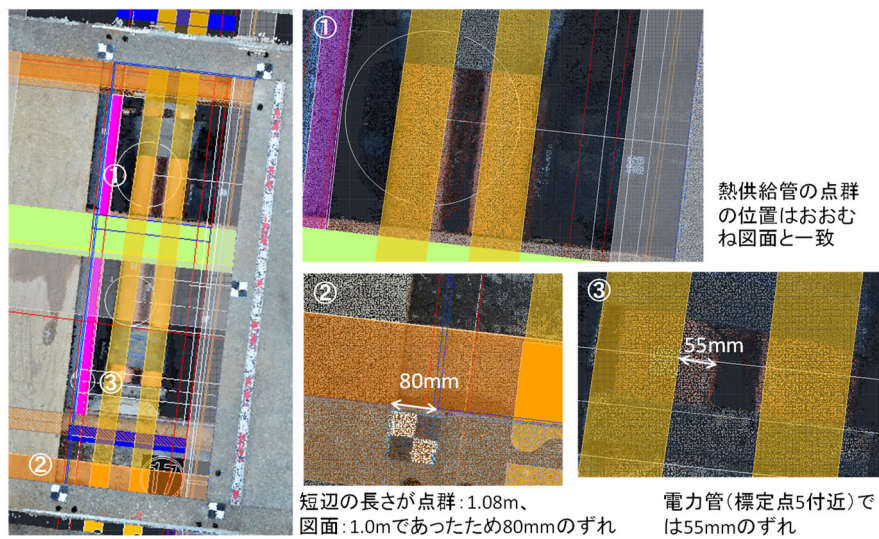
(3) 三次元モデルの比較

スマートフォン（iPhone 4K 動画（20 枚に 1 枚））を除き，基準モデル（デジタルカメラ（No.2-0-D））の誤差と比較したところ，大きな外れた値はなく，安定したモデルを作成できた．

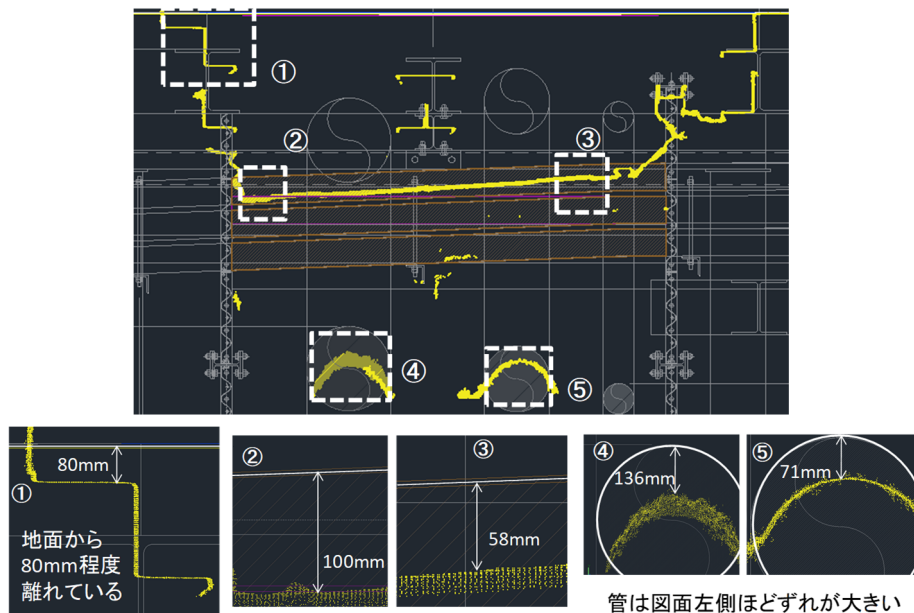
スマートフォン（iPhone 4K 動画（20 枚に 1 枚））は，目視ではおおむね形状を再現できていたが，基準点誤差と検証点誤差は他モデルと比べて大きくずれていた．全 GCP と四隅 GCP で作成したモデルの基準点誤差を比較したところ，四隅 GCP の条件で作成したモデルの誤差が小さかった．これは，GCP が少ないほうがモデルをその座標に合わせこみやすく，見かけ上の誤差は少なくなるためである．本来は GCP が多いほうが真の姿に近いモデルとなる．点群断面を基準モデル（デジタルカメラ（No.2-0-D））と比較したところ，大きなずれはなく，安定してモデルを作成できていたが，塩ビ管については，頂点部分の特に日の当たる箇所形状が崩れていた．基準モデルと同様の静止画を用いたモデルにおいても塩ビ管付近の形状が崩れ，ノイズがみられたことから，写真の撮影方法だけではなく，基準点の設定方法によりモデルの精度が変化することが分かった．

3.4. 三次元モデルと二次元図面との重ね合わせ比較

生成された三次元モデルと二次元図面（平面・断面図）とを重ね合わせ比較した。三次元モデルと二次元図面と重ね合わせは、汎用的な三次元 CAD ソフト、点群処理ソフト、三次元モデル（三次元点群データのこと）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）の計画図を使用する。使用するソフトは、点群処理解析ソフト（ReCap Autodesk 社）、三次元 CAD ソフト（AutoCAD Autodesk 社）、二次元 CAD ソフト（AutoCAD LT Autodesk 社）と複数のソフトを介在して二次元図面を補正した。三次元モデルと二次元図面との重ね合わせ比較図を図 3-14 に示す。図 3-14 は、重ね合わせた際の平面図および断面図での三次元モデルと二次元図面の位置誤差である。



(a) 平面図（二次元）と三次元モデルの比較



* 断面図のみ三次元モデルを黄点で図示

(b) 断面図（二次元）と三次元モデルの比較

図 3-14 三次元モデルと二次元図面との重ね合わせ比較図

重ね合わせた結果，水平方向および鉛直方向とも 50mm～100mm 程度のずれが生じている．三次元モデル精度検証の結果，三次元モデルは高精度であるため，二次元図面の修正が必要であることが確認された．ずれが生じた原因としては，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．

3.5. 提案手法の追加検証

本研究では、前節の提案手法における課題を踏まえて2ケース（検証実験2・検証実験3）を検証した。

検証実験2では、画素数・解像度の変化による比較検証を目的に現場専用カメラ（100万画素，300万画素，500万画素，フルHD動画）やスマートフォン（高画素，4K動画）の静止画・動画による三次元モデル生成の目視による確認と前節と同様に正解値との位置精度の検証および三次元モデルと二次元図面との重ね合わせ比較を前節で実施した検証箇所付近の別エリアにて検証した。また静止画は他のSfM処理ソフトによる検証した。

検証実験3では、前節の検証実験および検証実験2の結果を踏まえ三次元モデルの生成で対象物が再現できない部分（暗色系埋設物）の仮想管を用いて前節で実施した検証箇所の立坑内（地表面より8m下）の照明下で撮影（検証実験2と同様の撮影機材使用）し、画素・解像度を変化させて目視にて三次元モデルの生成状況および三次元点群の生成状況を検証した。

3.5.1. 検証実験2 画素・解像度による評価実験

検証実験2では、前節同様の工事場所の別エリアの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、地下部は深さ2.5m付近に埋設物の点検通路が設置されており、地下埋設物は吊防護などが施されている。

(1) 実験内容

前節と同様な方法で三次元モデルを生成するための基準点と検証点を撮影範囲周囲（四隅など）および対象管路などに設置した。撮影機材・撮影パターンを表3-10に示す。そして、撮影機材・撮影パターン（表3-10参照）、前節と同様に静止画および動画の撮影方法（図3-8，図3-9参照）を設定した。三次元モデルの生成には、PhotoScan（Agisoft社製）と他ソフトとの比較検証のためPix4D mapper（Pix4D社製）を用いた。

表 3-10 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
2-1	デジタルカメラ	OLYMPUS TG-1 4・5	動画	1920×1080 (フルHD)	47秒 約1440枚	昼
2-2	デジタルカメラ	OLYMPUS TG-1 4・5	静止画	1280×960 (1M)	昼：32枚 夜：30枚	昼夜
2-3	デジタルカメラ	OLYMPUS TG-1 4・5	静止画	2048×1536 (3M)	昼：31枚 夜：32枚	昼夜
2-4	デジタルカメラ	OLYMPUS TG-1 4・5	静止画	2560×1920 (5M)	昼：32枚 夜：32枚	昼夜
2-5	スマートフォン	iPhoneX	動画	2160×3840 (4K, 30fps)	52秒 約1612枚	昼
2-6	スマートフォン	iPhoneX	静止画	4032×3024	昼：30秒 夜：30枚	昼夜

三次元モデルの精度は、前節と同様に TS で測量した標定点・検証点の実測データを正解値とし、撮影機材・撮影パターン毎（昼夜区分・ラップ率など）に生成された三次元モデルと照合して検証した。精度目標は、前節と同様に±5cm とした。標定点および検証点の平面位置を図 3-15 に示す。図 3-15 は、三次元モデルを生成するための撮影範囲および標定点および検証点である。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）：

ガス管路 Φ150 土被り 約 1.2m

仮想管 Φ150（塩ビ管） 土被り 約 1.3m

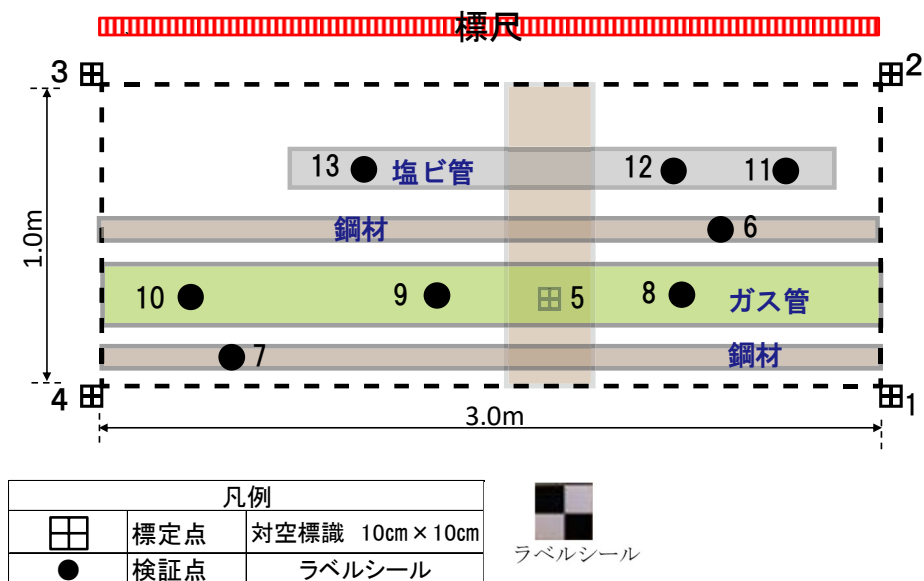


図 3-15 標定点および検証点の平面位置

(2) 三次元モデル生成比較

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 PhotoScan で生成された三次元モデルの比較検証を図 3-16、Pix 4D mapper で生成された静止画の三次元モデルの照合検証を図 3-17、動画・静止画の撮影パターンの PhotoScan での三次元モデル生成の精度検証結果を表 3-11、静止画による PhotoScan と Pix 4D mapper との三次元モデル生成の精度検証結果を表 3-12 に示す。また、PhotoScan で生成された三次元モデルでの検証点の基準点からの深さ方向による位置精度（Z 軸誤差）を図 3-18 に示す。

図 3-16 の三次元モデル形状の目視確認では、PhotoScan の動画においてフル HD 以上の画素・解像度が概ね形状が再現されているが、一部塩ビ管の暗所部の形状が表現されていない。静止画は、画素数で 3M（300 万画素）以上であれば三次元モデル形状が再現されている。図 3-17 の Pix 4D mapper の静止画の形状比較では、概ね形状が表現されている。

No. 2-1 動画 昼 デジカマHD 解像度 1920×1080	No. 2-2 静止画 昼 デジカマ1M 解像度 1280×960	No. 2-3 静止画 昼 デジカマ3M 解像度 2048×1536	No. 2-4 静止画 昼 デジカマ5M 解像度 2560×1920	No. 2-5 動画 昼 スマホ4K 解像度 2160×3840	No. 2-6 静止画 昼 スマホ 解像度 4032×3024
平面図	平面図	平面図	平面図	平面図	平面図
側面図 (視点①) 塩ビ管の形状が再現されていない	側面図 (視点①) 対象管路の形状が再現されていない	側面図 (視点①) 概ね対象管路の形状が再現されているが一部形状に歪みが生じている	側面図 (視点①) 対象管路の形状が再現されている	側面図 (視点①) 対象管路の形状が再現されている	側面図 (視点①) 概ね対象管路の形状が再現されているが一部形状に歪みが生じている

図 3-16 撮影したデータを用いて生成した三次元モデル (PhotoScan)

表 3-11 および表 3-12 の PhotoScan および Pix 4D mapper の検証点の位置精度は、すべてのケースにおいて 5mm 以内の位置精度が確保されている。また図 3-18 が示すとおり、検証点において Z 軸方向の位置誤差は深くなるほど誤差が大きくなる傾向にある。しかし、位置誤差が 10mm 以内であり許容値以内であるため、基準点から 2m 程度の深さであれば目標の位置精度が確保されていることが検証された。

No. 2-2 静止画 昼 デジカマ1M 解像度 1280×960	No. 2-3 静止画 昼 デジカマ3M 解像度 2048×1536	No. 2-6 静止画 昼 スマホ 解像度 4032×3024
平面図	平面図	平面図
側面図 (視点①) 概ね対象管路の形状が再現されているが、塩ビ管の形状に歪みが生じている	側面図 (視点①) 対象管路の形状が再現されている	側面図 (視点①) 対象管路の形状が再現されている

(Pix 4 D mapper)

図 3-17 撮影したデータを用いて生成した三次元モデル

基準点位置からの深さとz軸誤差(絶対値)の関係一昼

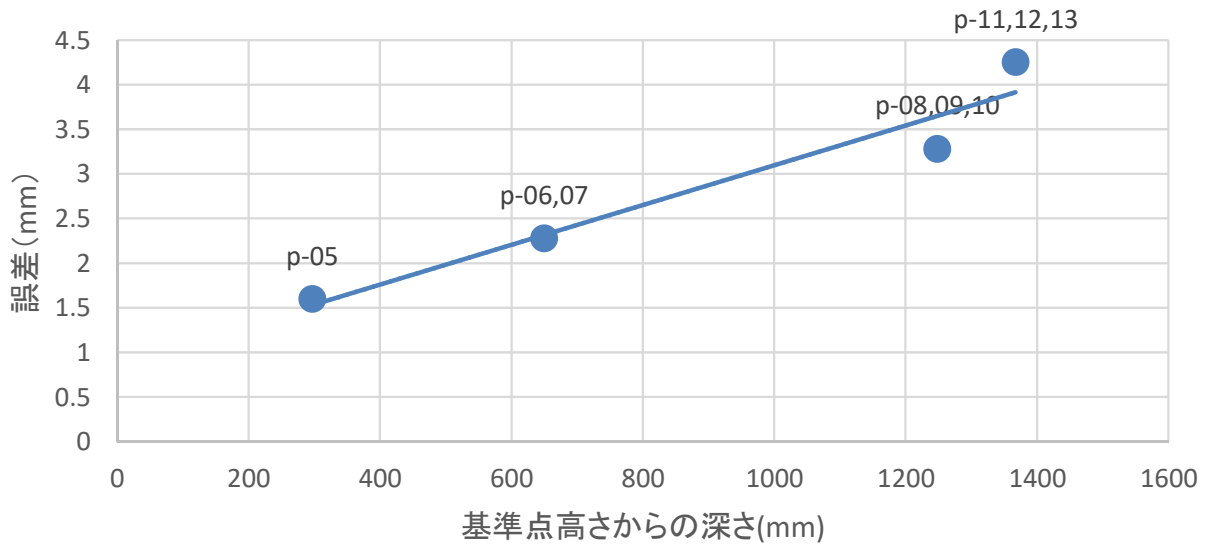


図 3-18 検証点の深さ方向と Z 軸誤差の関係

表 3-11 三次元モデルの精度検証結果 (PhotoScan)

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)
2-1-D	昼	四隅GCP	32	4	9	1.0/1.6	1.7/1.7	1.9/1.5	3.8/3.4
2-2-D	昼	四隅GCP	32	4	9	0.6/0.6	0.9/0.6	1.5/2.5	3.3/7.3
2-2-N	夜	四隅GCP	30	4	9	0.8/1.4	1.2/0.6	0.8/1.8	1.6/5.9
2-3-D	昼	四隅GCP	31	4	9	1.1/2.0	0.02/0.03	1.7/2.2	3.9/9.9
2-3-N	夜	四隅GCP	32	4	9	0.8/0.4	1.6/0.4	1.3/1.4	1.8/3.1
2-4-D	昼	四隅GCP	32	4	9	0.7/1.1	0.02/0.02	1.0/1.3	1.6/6.1
2-4-N	夜	四隅GCP	32	4	9	0.7/0.3	1.2/0.3	1.1/1.5	3.3/6.5
2-5-D	昼	四隅GCP	32	4	9	0.2/0.02	0.4/0.02	0.6/0.6	1.3/1.6
2-6-D	昼	四隅GCP	30	4	9	0.1/0.1	0.1/0.1	0.1/0.34	0.2/1.5
2-6-N	夜	四隅GCP	30	4	9	0.6/0.4	1.1/0.4	2.1/1.9	4.4/5.8

*1 No. 頭数字 2-1: デジタルカメ動画 2-2~2-4: デジタルカメラ静止画
2-5: スマートフォン動画 2-6: スマートフォン静止画

表 3-12 三次元モデルの精度検証結果 (PhotoScan と Pix4D mapper 比較)

No. *1	処理 ソフト	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)
2-2-D	Photoscan	昼	四隅GCP	32	4	9	0.6/0.6	0.9/0.6	1.5/2.5	3.3/7.3
2-2-D'	Pix4D	昼	四隅GCP	32	4	9	3.0/1.0	5.0/1.0	4.0/1.0	7.0/6.0
2-3-D	Photoscan	昼	四隅GCP	31	4	9	1.1/2.0	0.02/0.03	1.7/2.2	3.9/9.9
2-3-D'	Pix4D	昼	四隅GCP	32	4	9	3.0/1.0	5.0/1.0	3.0/1.0	6.0/5.0
2-6-D	Photoscan	昼	四隅GCP	30	4	9	0.1/0.1	0.1/0.1	0.1/0.34	0.2/1.5
2-6-D'	Pix4D	昼	四隅GCP	32	4	9	3.0/0.0	5.0/0.0	3.0/2.0	9.0/4.0

*1 No. 頭数字 2-2-D: デジタルカメ静止画 (1M) 2-3-D: デジタルカメ静止画 (3M)
2-6: スマートフォン静止画

(3) 三次元モデルと二次元図面との重ね合わせ

動画・静止画の撮影パターン毎に生成した三次元モデルと対象箇所の二次元図面とを重ね合わせを比較した検証結果を以下に示す。三次元モデルと二次元図面との重ね合わせ方法を図 3-19、撮影データより PhotoScan で生成された三次元モデルと二次元図面の重ね合わせ比較検証を図 3-20 に示す。

図 3-19 の重ね合わせ方法は、平面位置座標を合わせ平面上で重ね合わせし、平面で幅 10 cm の三次元モデルを抽出し、二次元の断面図にて重ね合わせする。

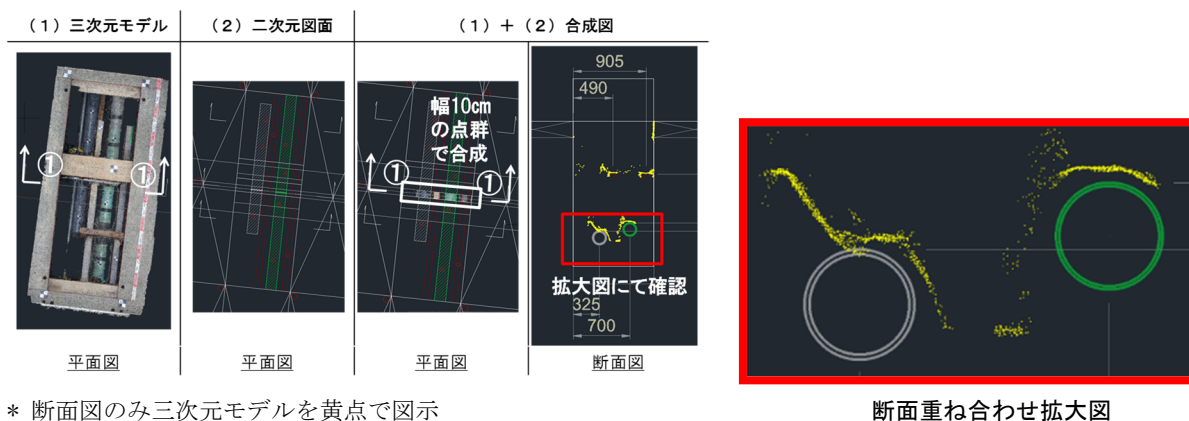
図 3-20 の重ね合わせ結果から動画はフル HD 以上の画素数・解像度であれば図面が修正可能である。静止画は、画素数・解像度 3M (300 万画素) 以上であれば図面修正可能な点群密度が確保されている。

(4) 検証結果と考察

検証実験 2 では、前節とは別フィールドにおいて画素数・解像度の変化による比較検証で三次元モデル生成の目視による確認と正解値との位置精度の検証および三次元モデルと二次元図面との重ね合わせ比較検証した。また静止画は他の SfM 処理ソフトによる三次元モデル形状と位置精度を比較検証した。

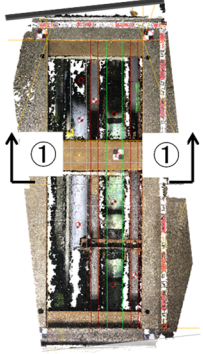
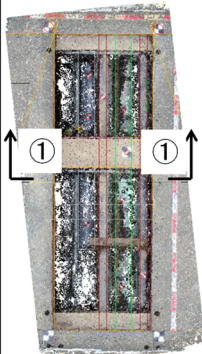
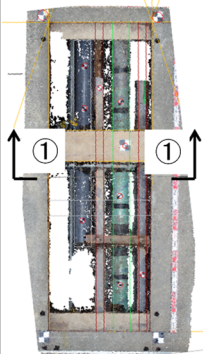
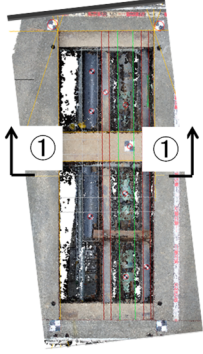
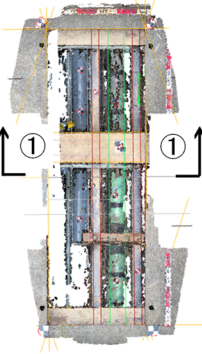
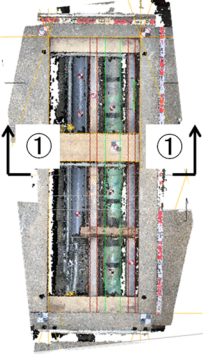
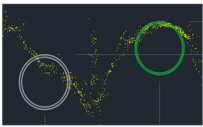
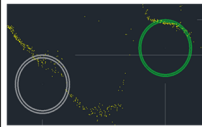
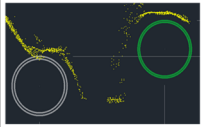
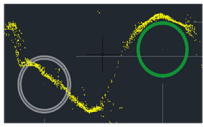
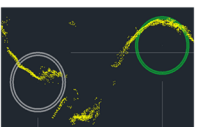
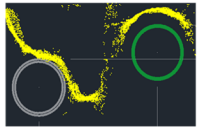
三次元形状の目視の確認および二次元図面の重ね合わせ結果から画素数・解像度は 3M (300 万画素) 以上が必要であることが確認された。また位置精度の検証では、PhotoScan および Pix 4D mapper の SfM 処理ソフトにおいて高精度の結果が得られた。しかし、検証点以外の部分で対象管路において再現されていない部分や歪みを生じていることが確認された。

上記の現象は、前節と同様に暗色系 (グレーや黒色) 埋設物において同様の傾向が確認されたことから何らかの対策が必要であると考えられる。



* 断面図のみ三次元モデルを黄点で図示

図 3-19 三次元モデルと二次元図面との重ね合わせ方法

No. 2-1 動画 昼 デジカマHD 解像度1920×1080	No. 2-2 静止画 昼 デジカマ1M 解像度 1280×960	No. 2-3 静止画 昼 デジカマ3M 解像度 2048×1536	No. 2-4 静止画 昼 デジカマ5M 解像度 2560×1920	No. 2-5 動画 昼 スマホ4K 解像度2160×3840	No. 2-6 静止画 昼 スマホ 解像度4032×3024
					
平面図	平面図	平面図	平面図	平面図	平面図
					
①-①断面 (拡大図)	①-①断面 (拡大図)	①-①断面 (拡大図)	①-①断面 (拡大図)	①-①断面 (拡大図)	①-①断面 (拡大図)
三次元点群は、対象管路が表現されており図面の修正が可能である	三次元点群は、ばらつきがあり点群密度が低い	三次元点群は、対象管路が表現されており図面の修正が可能である	三次元点群は、対象管路が表現されており図面の修正が可能である	三次元点群は、対象管路が表現されており図面の修正が可能である	三次元点群は、対象管路が表現されており図面の修正が可能である

* 断面図のみ三次元モデルを黄点で図示

図 3-20 三次元モデルと二次元図面の重ね合わせ比較検証 (PhotoScan)

3.5.2. 検証実験 3 三次元モデルの補完手法の検証

検証実験 3 では、前節と同様の工事場所の覆工板下の立坑内（地表面より 8m 下）で三次元モデルの生成で対象物が再現できない暗色系埋設物を対象とした仮想管（2 管路）を設置して検証した。立坑内での検証は、暗い部分で照明下での撮影条件が再現できることから選定した。また撮影する仮想管路は、掘削した地盤面に設置した。三次元モデルの再現できない部分の対策として検証実験 2 で検証点に設置したラベルシールを選定し、特徴点（ラベルシール（紙素材））を設置した場合と設置しない場合の 2 ケースにて比較検証した。

(1) 検証内容

撮影機材・撮影パターンを表 3-13 に示す。撮影機材・撮影パターン（表 3-13 参照）、前節と同様に静止画の撮影方法（図 3-8 参照）を設定した。三次元モデルの生成には、PhotoScan および Pix 4D mapper（ケース 2 のみ）を用いた。検証箇所平面位置および撮影状況を図 3-21 に示す。図 3-21 は、検証箇所の平面位置および検証ケースおよび撮影状況である。検証実験条件を以下に示す。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⁸²⁾に準じた±5cm とした。

撮影範囲：約 1m×3m

撮影対象物：

仮想管 Φ100（塩ビ管） 黒のガムテープ巻付

仮想管 Φ150（塩ビ管）

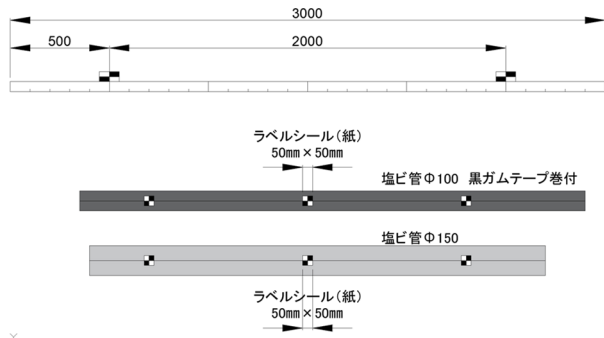
撮影ケース

ケース 1 特徴点なし

ケース 2 特徴点あり（ラベルシール）

表 3-13 撮影機材と撮影パターン

No.	種別	機種	モード	画像サイズ
3-1	デジタルカメラ	OLYMPUS TG-1 4・5	静止画	1280×960(1M)
3-2	デジタルカメラ	OLYMPUS TG-1 4・5	静止画	2048×1536(3M)
3-3	スマートフォン	iPhoneX	静止画	4032×3024



ケース2 平面位置

ケース1	ケース2
静止画 デジカマ3M	静止画 デジカマ3M
画素数 2048×1536	画素数 2048×1536
写真	写真
特徴点無し 3Dイメージ	ラベルシール(紙) 5cm角×各3個 3Dイメージ

図 3-21 検証箇所平面位置および撮影状況

(2) 三次元モデルの比較

静止画の撮影パターン毎に生成した三次元モデルの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生成状況の比較検証 (PhotoScan) を図 3-22, 三次元モデル生成状況 (Pix 4D mapper) を図 3-23 に示す。図 3-22 では, 特徴点を設置しない場合, 暗色系埋設物は前節および検証実験 2 の検証結果と同様な平面形状に歪みが生じた。また側面形状が再現されていない部分が確認された。特徴点を設置した場合は, 図 3-22 および図 3-23 の SfM 処理ソフトの PhotoScan および Pix 4D mapper の三次元モデル形状の目視確認では, 側面形状の特徴点を設置した箇所の三次元形状が一部再現されていた。画素数・解像度が 3M (300 万画素) 以上であれば, 特徴点を設置した場合は部分的に三次元形状が生成されていた。

ケース1			ケース2		
No. 3-1	No. 3-2	No. 3-3	No. 3-1	No. 3-2	No. 3-3
静止画 昼 デジカマ1M	静止画 昼 デジカマ3M	静止画 昼 スマホ	静止画 昼 デジカマ1M	静止画 昼 デジカマ3M	静止画 昼 スマホ
解像度 1280×960	解像度 2048×1536	解像度4032×3024	解像度 1280×960	解像度 2048×1536	解像度4032×3024
平面図	平面図	平面図	平面図	平面図	平面図
側面図 (特徴点無し)	側面図 (特徴点無し)	側面図 (特徴点無し)	側面図 (特徴点有)	側面図 (特徴点有)	側面図 (特徴点有)
平面形状は歪みがあり, 側面からの目視確認では三次元形状は再現されていない	平面形状は歪みがあり, 側面からの目視確認では三次元形状は再現されていない	平面形状は概ね再現されている。側面からの目視確認では部分的に三次元形状は再現されていない	平面形状は歪みがあり, 側面からの目視確認では三次元形状は再現されていない	平面形状は概ね再現されている。側面からの目視確認では特徴点のみ三次元形状が再現されている	平面形状は概ね再現されている。側面からの目視確認では特徴点のみ三次元形状が再現されている

図 3-22 三次元モデルの生成状況の比較検証 (PhotoScan)

ケース2		
No. 3-1	No. 3-2	No. 3-3
静止画 昼 デジカメ1M	静止画 昼 デジカメ3M	静止画 昼 スマホ
解像度 1280×960	解像度 2048×1536	解像度4032×3024
平面図	平面図	平面図
側面図（特徴点有）	側面図（特徴点有）	側面図（特徴点有）
平面形状は歪みがあり、側面からの目視確認では三次元形状が再現されていない	平面形状は概ね再現されている、側面からの目視確認では主に特徴点のみ三次元形状が再現されている	平面形状は概ね再現されている、側面からの目視確認では三次元形状が再現されている

図 3-23 三次元モデルの生成状況 (Pix 4D mapper)

(3) 三次元モデルと二次元図面との重ね合わせ

静止画の撮影パターン毎に生成した三次元モデルと対象箇所の二次元図面と重ね合わせ比較した検証結果を以下に示す。三次元モデルおよび二次元図面は、検証実験 2 と同様の方法で重ね合わせした。三次元モデルと二次元図面の重ね合わせ比較検証を図 3-24 に示す。図 3-24 は、特徴点を設置した撮影画像を用いて Pix4D mapper で生成された三次元モデルと二次元図面の重ね合わせをし、画素数・解像度の変化による比較検証結果である。

特徴点を設置した場合の三次元モデルと二次元図面との重ね合わせた結果から、画素数・解像度が 3M（300 万画素）以上であれば図面修正可能な点群密度が確保されている。

ケース2		
No. 3-1	No. 3-2	No. 3-3
静止画 昼 デジカメ1M	静止画 昼 デジカメ3M	静止画 昼 スマホ
解像度 1280×960	解像度 2048×1536	解像度4032×3024
平面図	平面図	平面図
①-①断面（特徴点有）	①-①断面（特徴点有）	①-①断面（特徴点有）
三次元点群は、ばらつきがあり点群密度が低い	三次元点群は、対象管路が表現されており図面修正が可能である	三次元点群は、対象管路が表現されており図面修正が可能である

* 断面図のみ三次元モデルを黄点で図示

図 3-24 三次元モデルと二次元図面の重ね合わせ比較検証 (Pix4D mapper)

(4) 検証結果と考察

検証実験 3 では、三次元モデルの生成で対象物が再現できない暗色系埋設物を対象とした仮想管（2 管路）を設置して検証した。検証結果から暗色系埋設物は、障害物がない箇所（影の影響がない場所）においても三次元形状が再現されない傾向にあることから、何らの対策が必要である。

今回の検証で設置した特徴のある色・形状のラベルシールなどは、三次元形状が部分的に再現できることが確認された。ただし、今回のラベルシールの大きさは 5cm 角であり、対象管路全体ではなく狭い範囲での三次元モデルの形状が生成された。今後は、既存の二次元図面を補正するための特徴点の設置方法や形状などの検証が必要であると考えられる。

3.6. 三次元モデルの生成条件の提案

3.6.1. 検証内容

本節では、二次元図面の補正に適した三次元データの点群密度および形状を取得するため、撮影機器および埋設管の明るさに関する条件を検証した。埋設管の配置図および寸法を図 3-25、撮影環境を図 3-26 に示す。

(1) 現場環境

本検証では、U 型コンクリート（幅 90mm）、塩化ビニル管（直径 130mm）および単管パイプ（直径 48.6mm）を対象とした（図 3-25 参照）。対象とした埋設管を地上（明るさ：1,893Lux）、地下の照明あり（明るさ：160Lux）および地下の照明なし（明るさ：5Lux）の 3 環境に設置し検証した（図 3-26 参照）。



図 3-25 埋設管の配置図および寸法




地上	地下（照明あり）	地下（照明なし）
		
明るさ：1,893Lux	明るさ：160Lux	明るさ：5Lux

図 3-26 撮影環境

(2) 検証方法

三次元データを用いた二次元図面の補正フローを図 3-27 に示す。図 3-27 の手法を適用して地下埋設物の三次元データの断面を抽出し、断面の形状を目視で確認した。

①から④の検証手順を以下に示す。

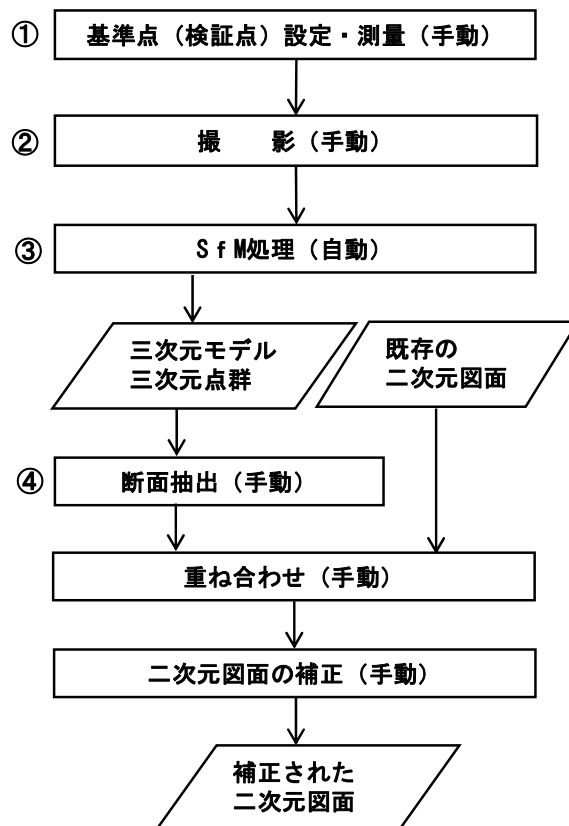


図 3-27 三次元データを用いた二次元図面の補正フロー

(3) 標定点の設置

標定点を設置した位置を図 3-28 に示す。図 3-28 の標定点は、地表面の二点に標定点（対象物の点群データの縮尺および向きを決定するための基準点）を設置した。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⁸²⁾に準じた±5cm とした。

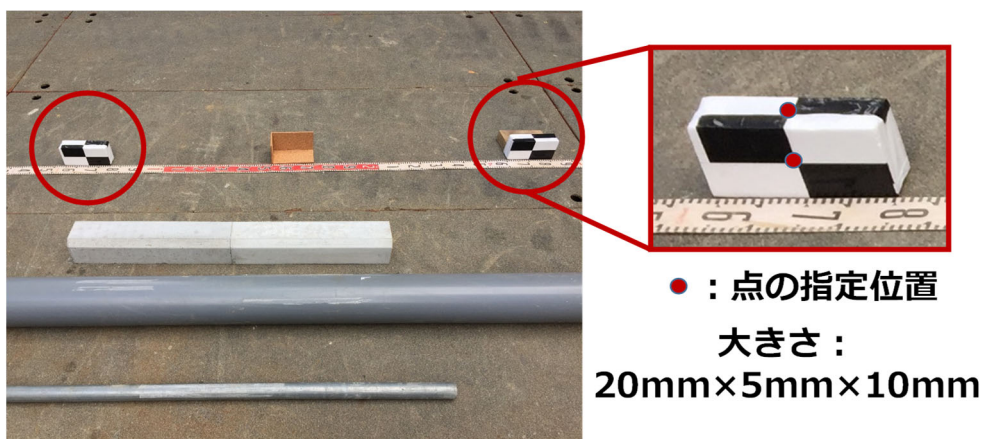


図 3-28 標定点を設置した位置

(4) 撮影

使用した撮影機器および撮影枚数を表 3-14 に示す。表 3-14 は、本検証に用いた撮影機器などを整理した撮影ケースの撮影機器、機種、撮影モード、画素数（サイズ）、撮影枚数である。画像サイズが三段階になるように、デジタルカメラ/1M、デジタルカメラ/3M およびスマートフォンの 3 機種で撮影し、計 30 枚の画像を取得した。撮影方法を図 3-29 に示す。図 3-29 の撮影方法は、対象物と標定点を取り囲むように撮影した。

表 3-14 使用した撮影機器および撮影枚数

撮影機器	撮影機種	モード	画像サイズ(px)	枚数
デジタルカメラ (1M)	Olympus Tough TG_4.5	静止画	640×480	30枚
デジタルカメラ (3M)	Olympus Tough TG_4.5		1,920×1,440	
スマートフォン	iPhone6		3,264×2,448	

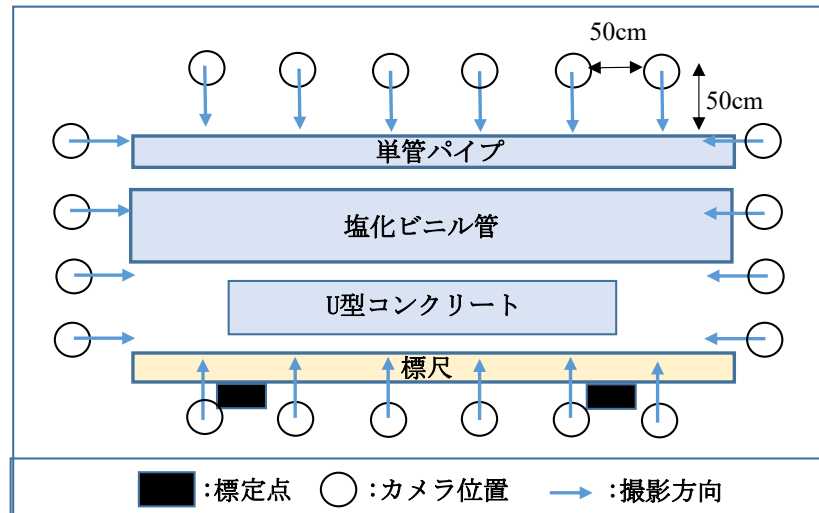


図 3-29 撮影方法

3.6.2. 検証結果と考察

(1) SfM 処理

生成した三次元点群データを図 3-30 に示す。図 3-30 の三次元点群データは、前段で撮影して取得した計 30 枚の画像から SfM 処理（各画像間から特徴点を結び付けて点の三次元座標を推定する処理）をして三次元点群データを生成する（図 3-30 参照）。その際に①で取得した標定点の位置座標を用いて位置合わせをすることで、三次元データの向きと縮尺を決定する。



図 3-30 生成した三次元点群データ

(2) 断面の抽出

断面の抽出方法を図 3-31 に示す。図 3-31 の断面抽出は、生成した三次元データを CAD に取り込み、幅 50mm の断面を抽出する。抽出した断面の形状を目視で確認することで、図面の補正に適した撮影機器および埋設管の明るさの条件を抽出した。

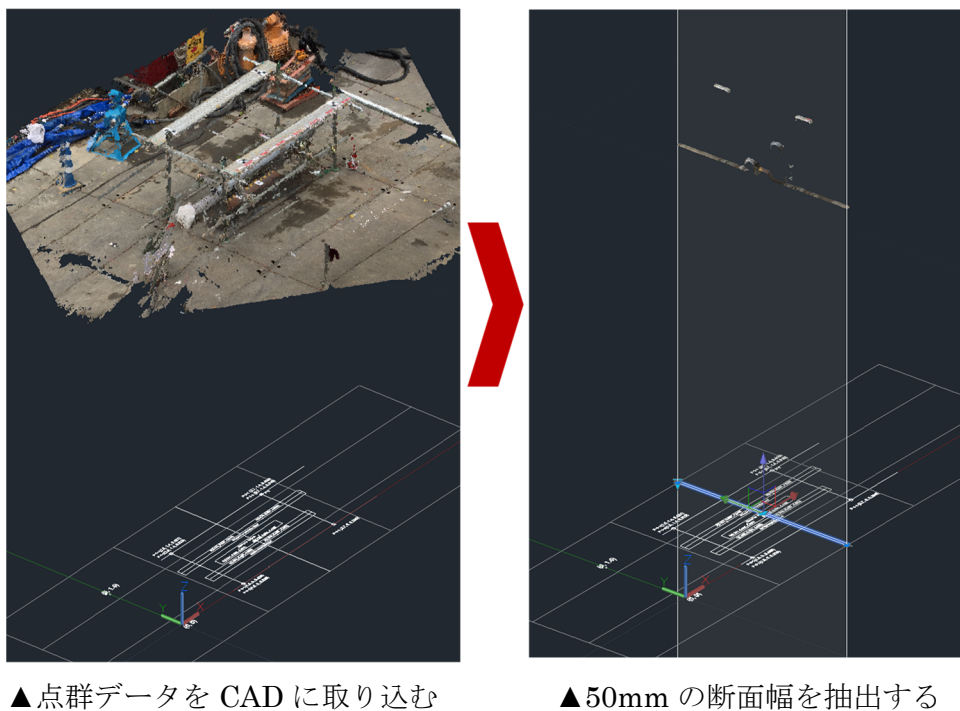


図 3-31 断面の抽出方法

(3) 検証結果

幅 50mm の断面の抽出結果を表 3-15 に示す。表 3-15 の検証結果は、地下の照明がない状態およびデジタルカメラの小さな画素数では、殆ど断面の形状を確認することができなかった。しかし、白く目立つ U 型コンクリートに関しては地下の照明がない状態でも断面の形状を確認することができた。また、光沢が目立つ塩化ビニル管は断面の形状を取得しにくいですが、それはマーカー（対空標識）を貼付することで改善できることを確認した。しかし、単管パイプはマーカーを貼付してもデジタルカメラの中の画素数では断面の形状を確認できなかった。このことより、管径が 50mm 程度の小さい管は、スマートフォンなどの比較的高い画素数を用いる必要があることを確認した。

表 3-15 断面の抽出結果

埋設管	検証場所 (明るさ) *	マーカー添付なし			マーカー添付あり		
		画素数			画素数		
		小・デジカメ (640×480)	中・デジカメ (1,920×1,440)	中・デジカメ (3,264×2,448)	小・デジカメ (640×480)	中・デジカメ (1,920×1,440)	中・デジカメ (3,264×2,448)
塩ビ管	地下照明なし (5Lux)						
	地下照明あり (160Lux)						
	屋外 (1,893Lux)						
U型コンクリート 幅90mm	地下照明なし (5Lux)						
	地下照明あり (160Lux)						
	屋外 (1,893Lux)						
単管パイプ Φ48.6	地下照明なし (5Lux)			取得不可			
	地下照明あり (160Lux)						
	屋外 (1,893Lux)						

* 明るさは照度計で計測

□ : 図面の補正に適した断面

3.6.3. 二次元図面の補正に適した三次元データの生成条件

本節では、前節までの検証結果を基に、二次元図面の補正に適した三次元データの生成条件を抽出した。抽出した結果を表 3-16 に示す。表 3-16 の三次元データの生成条件では、カメラの画素数は、撮影機器の検証より、デジタルカメラの規格 3M（画素数：1,920×1,440）以上が適切な三次元データの断面を確認することができた。標定点は、地表面に 3 点以上設置した場合に、向きおよび縮尺が適切な三次元データが生成された。撮影枚数は、50cm 移動するごとに 1 枚撮影することとし、撮影方法は、埋設管と標定点が画像に認識されるように埋設管を中心に移動することとした。埋設管の明るさおよび色は、取得した画像から埋設管を目視で確認できる程度とし、確認できない場合には埋設管周辺に明るさが確保されるように照明を設置することとした。マーカー（対空標識）に関しては、管表面に光沢が目立つ場合にのみ貼付することとした。

表 3-16 二次元図面の補正に適した三次元データの生成条件

カメラの画素数	標定点	撮影枚数	撮影方法	管表面の明るさおよび色	マーカー
1,920×1,440以上 (現場カメラの規格3M) ※1	地表面 3点以上	1枚/50cm 移動	標定点が認識されるように埋設管を中心に移動	取得した画像から埋設管を目視で確認できる程度 ※2	管表面の光沢が目立つ場合に添付

※1 管径が50mm程度の小さいものは3,264×2,448(スマートフォン程度)以上の画素数が必要

※2 確認不可能な場合は照明の設置が必要

3.7. 結論と課題

本章では、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の撮影動画・静止画像を用いた地下埋設物の三次元モデル生成手法を考案した。ケーススタディを通じて、考案手法に則して生成した三次元モデルを目視で形状および位置精度検証した結果、十分な精度を有していることがわかった。次に、三次元モデルと既存の二次元図面との重ね合わせを試行した結果、既存の二次元図面の補正が可能であることから提案手法の有用性が確認できた。三次元モデルと二次元図面の重ね合わせでは、それらの間に位置ずれが発生しており、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。

今回の三次元モデル生成手法の精度検証結果によると、昼夜の撮影を問わず、撮影画像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、三次元形状も良好であった。一部暗色系（黒およびグレー系）埋設物は、

三次元モデルが再現できないことが確認にされ、対策として特徴点を設置することで三次元モデルの再現や二次元図面の補正が可能であるということが確認できた。しかし、良好な三次元モデルを生成するために適した特徴点の設置方法や形状など、更なる検証が必要であると考えた。

そして、二次元図面の補正に適した三次元データの点群密度および形状を取得するための撮影機器および埋設管の明るさに関する条件を検証し、提案手法を適用した地下埋設物の三次元データの生成を通して、二次元図面の補正に適した三次元データの生成条件を明らかにした。

課題としては、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、実現場および複数の現場管理職員による撮影にて有用性の検証が挙げられた。また、既存二次元図面を補正する際の三次元 CAD 図上での二次元図面の重ね合わせの手動作業で時間を要していた。

4. 簡易計測による地下埋設物の三次元モデルを用いた二次元図面補正システムの開発

3章では、都市土木の地下構造物は一般的に施設管理や施工の際に二次元図面が使用されており、埋設企業や施工業者などと二次元図面で情報が共有されていることから SfM による三次元モデルを用いた既存の二次元図面を補正する手法（以下、「既存手法」という）を提案した。SfM により生成した地下埋設物の三次元モデルは高い位置精度を保持し、二次元図面の補正に適用できることが確認できた。課題として、実現場での撮影データを基にした地下埋設物の三次元モデルの生成と精度検証および二次元図面補正の際の図面の重ね合わせ作業（高密度点群データと二次元図面の重ね合わせ）や三次元 CAD 上での手動作業の効率化が挙げられた。

以上の課題を踏まえ、本章では、既存手法による地下埋設物の簡易な三次元モデル生成手法で得られた三次元モデルを用いて既存の二次元図面を効率的に補正する手法（以下、「改良手法」という）の確立とした。具体的には、既存手法の課題であった三次元モデルと既存二次元図面との重ね合わせの手動作業を効率化し、既存の二次元図面を簡易に補正する手法を考案し、同手法に則したシステムを開発して有用性を評価した。

4.1. 簡易計測による三次元モデルを用いた地下埋設物の二次元図面の補正手法の改良

本章では、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）の二次元図面と既存手法で考案した簡易的な方法で撮影された写真から生成された三次元モデルから既存二次元図面と重ね合わせ可能な画像データ（平面・断面図）を生成し、既存二次元図面を補正する手法を提案した。

4.1.1. 既存手法の概要と課題

既存手法では、既存の地下埋設物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重ね合わせをし、二次元図面を補正する手法を提案した。

既存手法で考案した三次元モデルを用いた二次元図面の補正手法の手順（既存手法）を図 4-1、各手順の内容を以下に示す。図 4-1 は、三次元モデルの生成と生成された三次元モデルから既存二次元図面を補正する手順である。

(1) 三次元モデルの生成

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やデジタルカメラ、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。画素数はカメラ規格で 3M 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）の精度情報である。

既存手法で得られた三次元モデルの生成方法および生成条件のパラメータを表 4-1 に示す。既存手法では，表 4-1 に示すように，三次元モデル生成に必要なカメラの画素数，標定点数，撮影方法などを考案した。

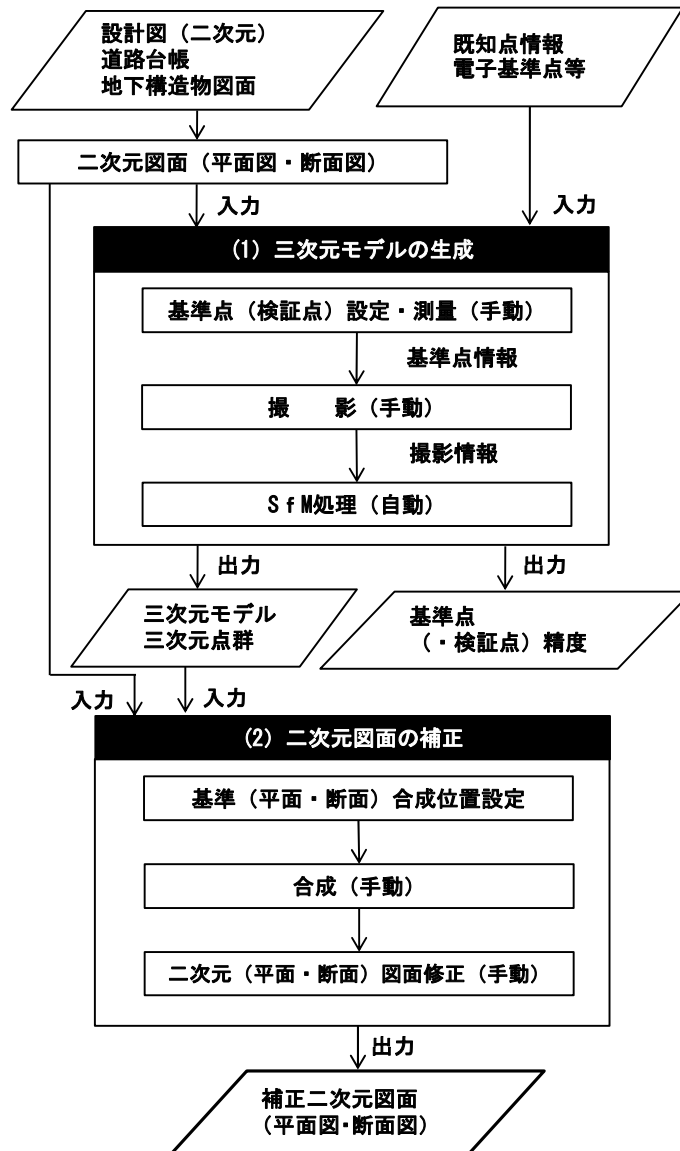


図 4-1 三次元モデルを用いた二次元図面の補正手順（既存手法）

表 4-1 三次元モデルの生成方法および生成条件のパラメータ

カメラ画素数	標定点	撮影枚数	撮影方法	管表面の明るさおよび色	マーカー(特徴点)
1920×1440以上 (カメラ規格 3 M)	地表面 3点以上	1枚/50cm 移動	標定点が認識されるように埋設管を中心に移動	取得した画像から埋設管を目視で確認できる程度*1	管表面の光沢が目立つ場合や暗色系対象物に添付

*1 確認不可能な場合は照明設置が必要

(2) 二次元図面の補正

二次元図面の補正には、汎用的な三次元 CAD ソフト、点群処理ソフト、三次元モデル(三次元点群データのこと)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)の計画図を使用する。三次元モデルと二次元図面とを重ね合わせして補正する手法を図 4-2 に示す。まず三次元 CAD ソフトに三次元モデルおよび二次元図面を取り込む。次に図 4-2 に示すように三次元モデルに対して手動にて二次元図面全体の位置を合わせ、最後にこの両者が重ね合わされた状態から、二次元図面上の個々の地下埋設物などの位置を手動にて三次元モデルに合わせることで、図面の補正を行った。

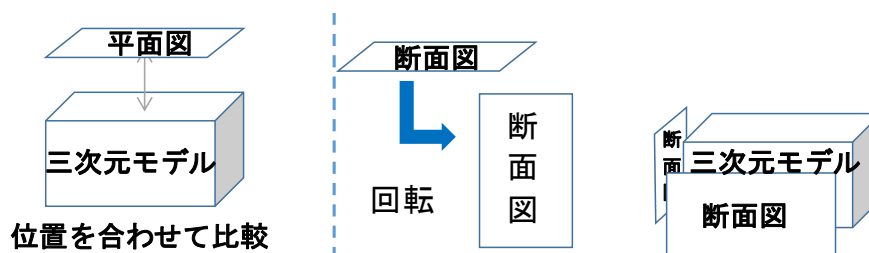


図 4-2 三次元モデルと二次元図面の重ね合わせによる補正

(3) 既存手法の課題

既存手法は、点群処理解析ソフト (ReCap Autodesk 社)、三次元 CAD ソフト (AutoCAD Autodesk 社)、二次元 CAD ソフト (AutoCAD LT Autodesk 社) と複数のソフトを介在して二次元図面を補正している。主な二次元図面の補正は、三次元 CAD ソフトで行われ、三次元 CAD ソフト上でのデータサイズの大きい高密度点群データを操作することによる既存手法での作業性の低下が見受けられた。また、三次元モデルと二次元モデルの重ね合わせ作業(高密度点群データと二次元図面の重ね合わせ)は、まず二次元上での座標 (X, Y 軸) を同一座標に設定した後、手動作業にて高さ方向 (Z 軸) の基準位置での位置合わせをし、次に既存の二次元図面の断面図を回転させて X, Y 軸 (平面) 上での断面位置での位置合わせを手動作業にて行う必要があり、三次元モデルや三次元 CAD に不慣れな作業者は全体の作業時間のうちこれら位置合わせや回転作業が占める割合が多くなっていた。以上より、既存手法の課題として、図面補正作業の向上と三次元 CAD 上での手動作業の効率化が挙げられた。

4.1.2. 改良手法の概要

既存手法の図面補正作業の向上と三次元 CAD 上での手動作業を効率化した改良案として、考案した三次元モデルを用いた二次元図面の補正手法の手順(改良手法)を図 4-3、三次元モデルを用いた二次元図面補正と使用ソフトとの関係を図 4-4 に示す。提案手法の基本方針として、点群三次元モデルを二次元図面(平面図・断面図)と基準位置が一致しそのまま重ね合わせ可能なように画像化して出力することを考える。これにより、点群データを汎用的な二次元 CAD ソフトで画像として扱えるので、作業性の低下を防ぐことができるとともに、二次元 CAD ソフトのみで作業を行うことが可能となり、作業者の負担も軽減される。

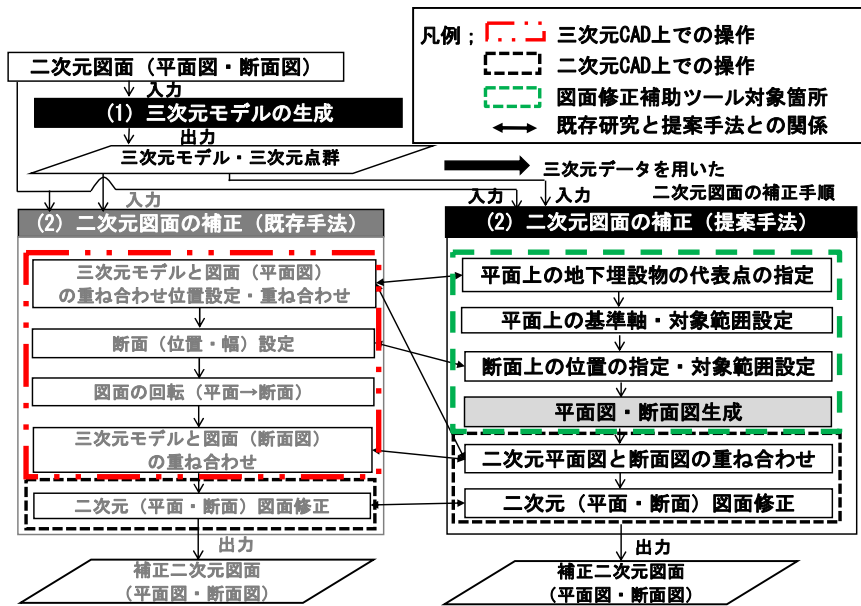


図 4-3 三次元モデルを用いた二次元図面の補正手順(改良手法)

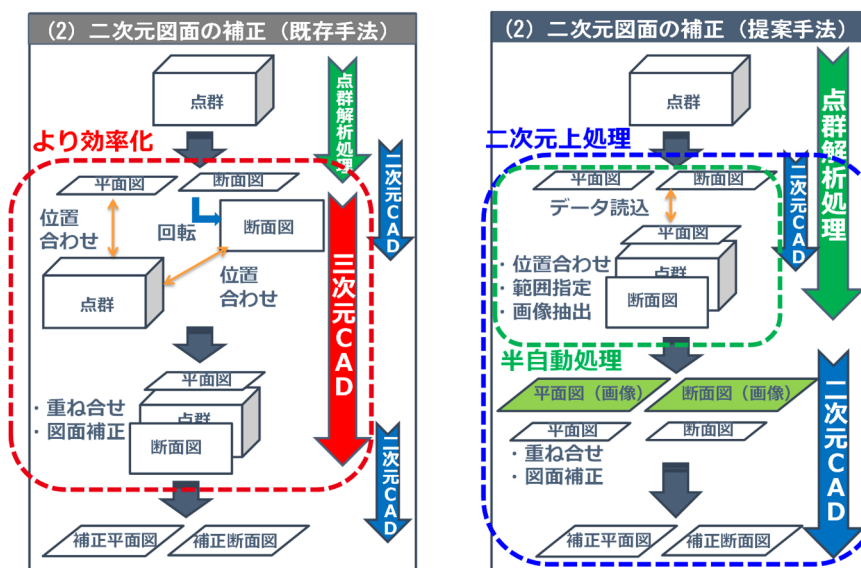


図 4-4 二次元図面補正と使用ソフトとの関係

提案手法の具体的な処理を図 4-5 に示す。まず、補正対象の二次元平面図が三次元モデル上で正確に重なるよう、三次元モデルを上面から正射投影した状態を参照しながら平面図の位置と回転角を調整する。その際、三次元モデル上の試掘範囲の四隅の一つなど特徴となる点を代表点とし、その点と平面図上の点を対応付ける。さらに、三次元モデル上で試掘範囲の境界など基準となる軸を決定し、図面上で対応する軸を対応付けることにより、位置と角度を調整する。その上で、最終的に画像として出力する範囲を指定する。

次に、二次元平面図上で断面を切るための基準線を決定し、基準線から対象の断面位置および点群を抽出する幅を設定する。その情報に従って点群をクリッピングし、得られた点群断面上において地下埋設物の既存二次元図面（断面図）を読み込む。そして、点群断面と二次元断面図で同一点となる代表点（特徴点）を指定することにより位置調整を行った後、断面上の画像出力する対象範囲を設定する。

最後に、三次元モデルで指定した対象範囲の画像データ（平面図・断面図）を生成する。その際、画像の解像度（1 ピクセルあたりの実距離）を指定するとともに、位置合わせを行った結果の座標値から画像左上ピクセルの座標を算出し、その情報も併せて出力する。

このように生成された画像データ（平面図・断面図）は既存二次元図面（平面図・断面図）と整合した座標値と解像度を持つので、二次元 CAD 上で画像と図面の位置は一致する。作業者は汎用性のある二次元 CAD 上を用い、画像を参照しながら図面の地下埋設物の位置ずれなどを手動により容易に補正することができる。

4.1.3. 二次元図面補正システム

考案した二次元図面の補正手法を実現化するためのツールとして、三次元モデル（点群データ）から、二次元図面（平面・断面）に対応する部分の点群データを効率的に抽出して画像化するシステムを開発した。システムは、点群の解析および可視化ソフトウェアである LaserMapView（アジア航測社製）上に構築した。

開発した二次元図面補正システムの稼働環境および開発環境を以下に示す。

(1) 稼働環境（構成）

OS : Windows7 以上
CPU : Intel Core 2 Duo 以上（推奨 Intel Core i7 以上）
GPU : 推奨 NVIDIA GeForce GTX 750 以上の GeForce 系グラフィックボード
メモリ : 2.00GB 以上（推奨 8.00GB 以上）

(2) 開発環境

環境 : Microsoft Visual Studio 2010
言語 : C++

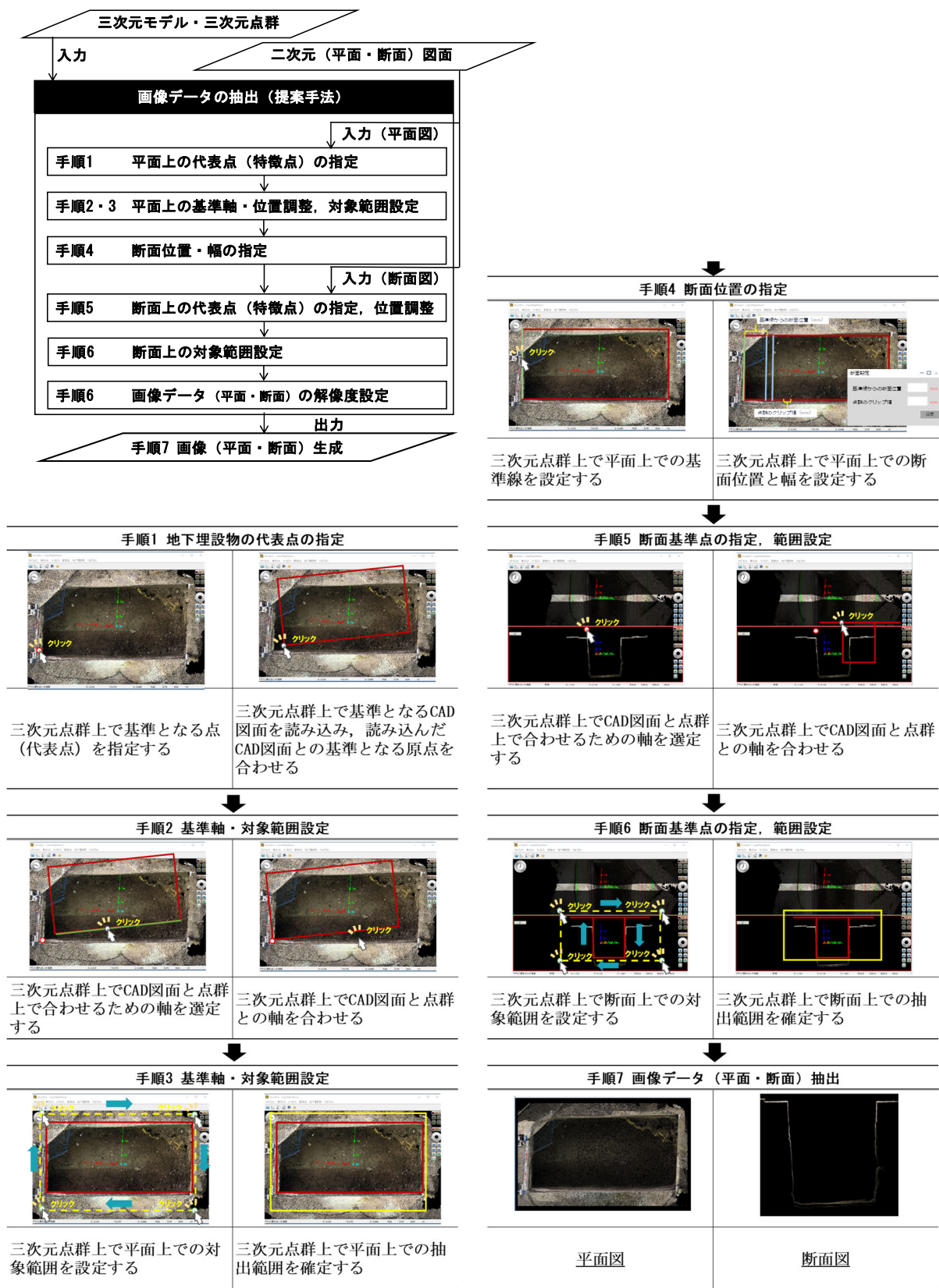


図 4-5 画像データ（平面図・断面図）の抽出手順

4.2. 補正手法の有用性検証

本節では、実現場（試掘調査工事）の撮影データ（現場職員撮影）により改良手法に則して生成した地下埋設物の三次元モデルの形状および精度を検証し、さらに三次元モデルから生成した対象範囲の画像データ（平面図・断面図）と既存二次元図面との重ね合わせを比較して補正手法の有用性を検証した結果を記す。

4.2.1. 三次元モデルの生成手法の検証

(1) 検証箇所概要

検証場所は、都市部の高速道路の橋脚耐震補強工事および地下鉄への新設地下連絡通路工事において、車道部および歩道部を一部道路占用し夜間規制した試掘工事箇所である。試掘箇所は、計 30 箇所（耐震補強工事 15 箇所、新設地下連絡通路工事 15 箇所）である。静止面の撮影は、夜間工事（道路規制時間内での工事）にて試掘工事（既設舗装撤去～掘削～地下埋設物の位置・高さ調査～埋戻し～舗装仮復旧）内の掘削完了後の 30～60 分間程度で実施した。

(2) 検証内容

三次元モデルを生成するための基準点となる標定点（GCP）は、撮影範囲周囲（四隅など）に設置した。撮影機材を表 4-2 に示す。そして、撮影機材（表 4-2 参照）、

表 4-1 の三次元モデルの生成条件により静止面の撮影方法（図 4-6 参照）を設定した。三次元モデルの生成には、Pix 4D mapper(Pix4D 社製)を用いた。また表 4-3 では、検証場所と試掘箇所ごとの撮影機材、試掘面積、生成した三次元点群の面積当たりの点数（以下、「点密度」という。）を示す。

三次元モデルの精度は、地下埋設物の特徴点をオートレベルで測量した検証点の実測データ（高さ）を正解値とし、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⁸²⁾に準じた±5cm とした。

表 4-2 撮影機材

機種	種別	機種	モード	画像サイズ
01	スマートフォン	iPhoneX	静止画	4032×3024
02	デジタルカメラ	RICOH WG-50	静止画	2048×1536
03	デジタルカメラ	COOLPIX AW130	静止画	3264×2448

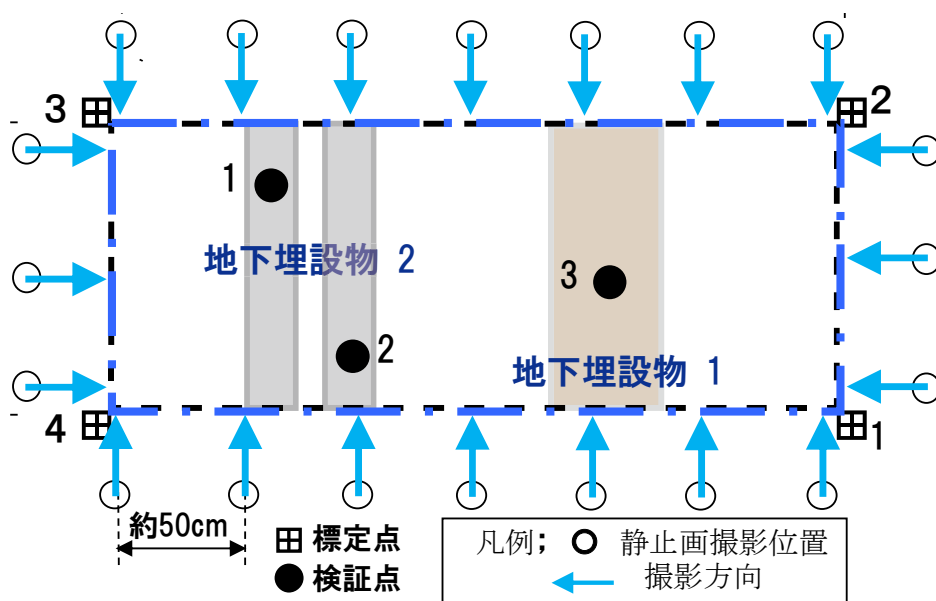


図 4-6 標定点・検証点および撮影方法

表 4-3 検証箇所の撮影条件および点密度

No.	検証 場所*2	試掘 箇所	機種	撮影 枚数	面積 m ²	点密度 点/m ²
1	a-	1-	01	35	4.4	226,522
2	a-	2-	02	44	5.4	86,937
3	a-	3-	02	26	6.2	60,450
4	a-	4-	02	29	8.9	54,775
5	a-	5-	02	47	6.1	87,416
6	a-	6-	01	29	5.8	216,053
7	a-	7-	01	39	6.1	199,300
8	a-	8-	02	43	6.2	78,521
9	a-	9-	02	36	5.9	109,236
10	a-	10-	02	43	5.8	71,696
11	a-	11-	02	38	4.3	79,133
12	a-	12-	02	35	4.0	90,181
13	a-	13-	02	36	3.6	70,295
14	a-	14-	02	38	3.9	84,777
15	a-	15-	01	35	3.0	144,847
16	b-	1-	03	33	2.2	253,338
17	b-	2-	03	36	6.5	128,569
18	b-	3-	03	54	2.6	214,960
19	b-	4-	01	58	8.1	228,311
20	b-	5-	03	17	2.0	165,959
21	b-	6-1-	01	44	5.8	752,836
22	b-	6-2-	01	47	12.5	875,365
23	b-	6-3-	01	20	1.9	72,814
24	b-	7-	01	37	2.5	180,785
25	b-	8-	03	24	1.8	168,181
26	b-	9-	03	19	2.0	2,567
27	b-	10-	03	29	2.9	87,087
28	b-	11-	01	25	2.4	211,906
29	b-	12-	03	25	2.5	289,017
30	b-	13-	03	26	2.8	553,079

*2 a:高速道路耐震補強工事 b:地下連絡通路工事

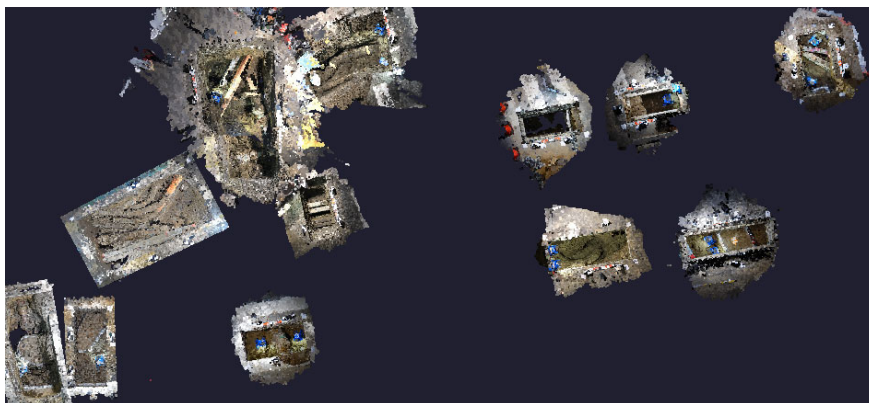
(3) 検証結果

実現場での撮影毎に生成した三次元モデルの形状および位置精度の検証結果を以下に示す。撮影データより生成された検証場所（2 工事）の三次元モデルを図 4-7 とその一例（表-3 の No.19b-4-01）を図 4-8，また三次元モデル生成条件不足の一例（標定点および照明不足）を図 4-9，実現場での三次元モデルの精度検証結果を表 4-4 に示す。目視確認の結果，試掘 30 箇所全てにおいて概ね三次元モデルが再現されており（図 4-7 参照），図 4-8 の輻輳した埋設物でもモデル上で認識可能であった。

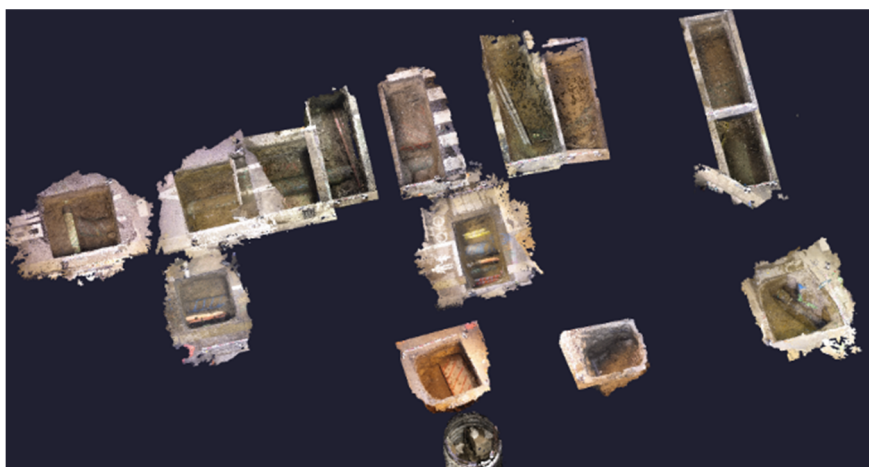
図 4-9 より三次元モデルの生成条件（標定点数および明るさ）が不足すると三次元モデルの精度および二次元図面の補正に影響することがわかった。

また照明を設置しない場合(No.26b-9-03)は，点密度が低く三次元モデル形状把握が困難であったが，照明を設置した場合(No.15a-15-01)は，深度が 4m 程度の深い箇所でも点密度が高く三次元形状が把握できる結果が得られた。

次に、表 4-4 の実現場による三次元モデルの精度検証は、地下連絡通路工事試掘 9 箇所において実施した。三次元モデルの位置誤差は 10~20mm 程度であり、目標精度内であることが確認できた。この結果より、生成された三次元モデルは二次元図面の補正に十分適用可能であり、提案手法が有用であると結論づけた。



地下鉄への新設地下連絡通路工事



高速道路の橋脚耐震補強工事

図 4-7 実現場（2 工事）で生成した三次元モデル

表 4-4 三次元モデルの精度検証結果

No.	検証場所*2	機種	平均土被り DP (m)	基準点数	検証点数	検証点誤差 (鉛直)	
						標準偏差 (mm)	最大値 (mm)
16	b-1	03	1.036	3	7	8.8	21
17	b-2	03	1.424	3	3	10.5	17
18	b-3	03	1.289	3	5	7.3	11
19	b-4	01	0.868	3	10	8.3	18
20	b-5	03	0.396	3	3	13.6	18
22	b-6-2	01	1.709	3	4	12.3	22
25	b-8	03	1.311	3	2	20.2	28
27	b-10	03	1.76	3	4	16.3	27
28	b-11	03	0.895	3	5	6.8	9

*2 a: 高速道路耐震補強工事 b: 地下連絡通路工事

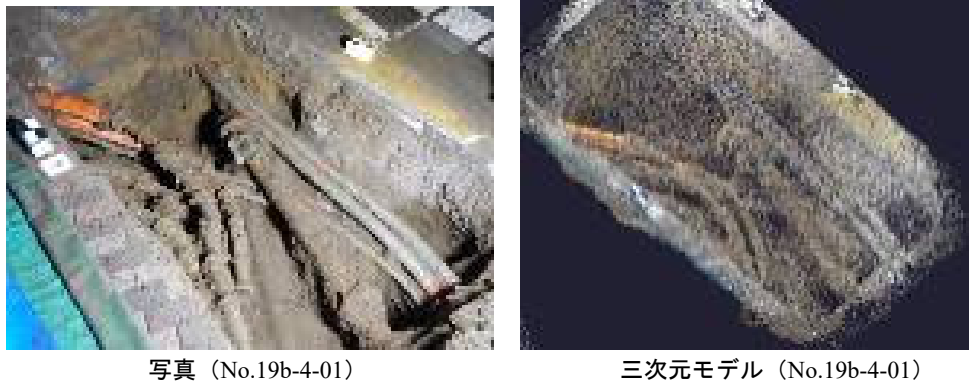


図 4-8 撮影したデータを用いて生成した三次元モデル一例

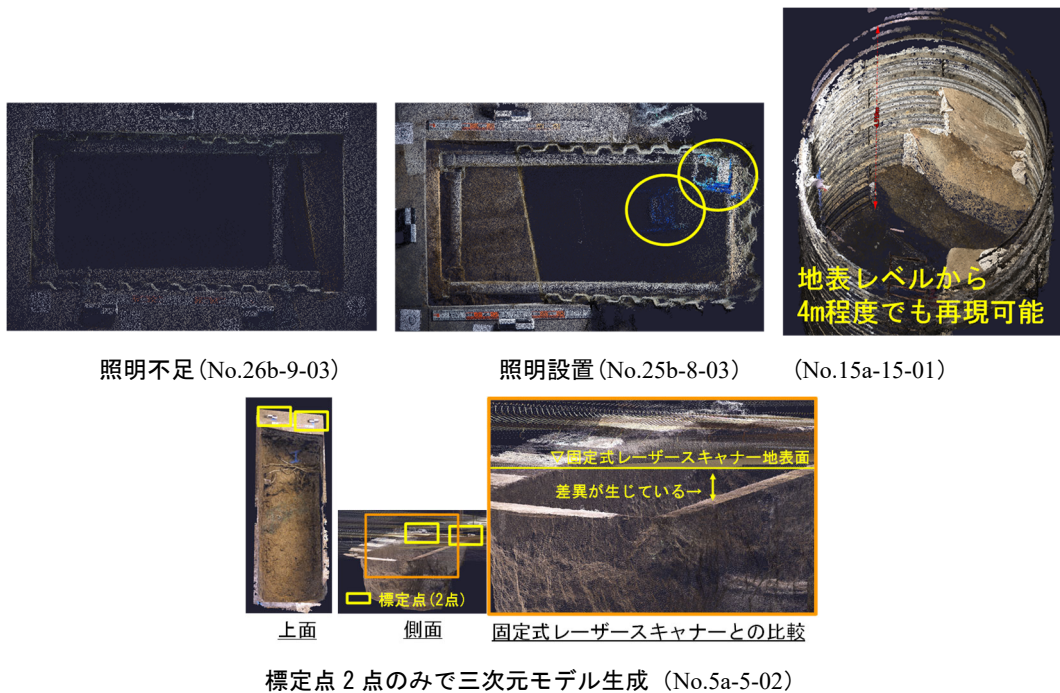


図 4-9 三次元モデル生成条件不足の一例

(4) 三次元モデル生成のためのデータ取得時間の検証

本研究では、都市土木の試掘工事（地下埋設物調査）に着目して、図面補正するための試掘データ取得に必要な作業時間について従来手法と改良手法を比較することで適用手法の有用性を検証した。

検証は、改良手法にて三次元モデルを取得した地下鉄への新設地下連絡通路工事において、同一工事での過年度に実施した従来手法（21 箇所）と提案手法（7 箇所）による試掘工事の全体時間の割合を比較した。試掘工事の一般的な手順を図 4-10、従来手法と提案手法による試掘工事の全体時間を表 4-5 に示す。図 4-10 は、試掘工事における一般的な手順であり、表 4-5 は試掘工事における従来手法と提案手法での全体時間の割合を比較した。

表 4-5 の試掘工事における従来手法と提案手法の時間を比較する対象作業は図 4-10 の STEP3 掘削～埋設物露出、測量・立会・写真撮影にあたり、従来および提案手

法とも全体の 4 割程度の時間がかかり全体の中で大きな割合を占める作業である。従来手法と提案手法との試掘箇所の平均面積が 1.5 倍（提案(3m²)/従来(2m²））となっているが、対象 STEP での時間を比較すると 1.25 倍（提案(171 分)/従来(137 分)）程度であり、改良手法の適用の効果（時間削減）や時間ロスが発生していないことが確認できた。

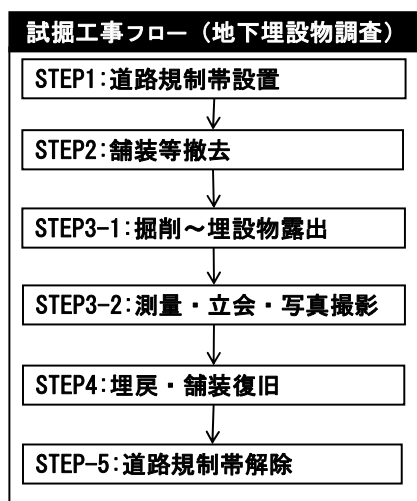


図 4-10 試掘工事の一般的な手順

表 4-5 従来手法と提案手法による試掘工事の全体時間

作業時間	STEP	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	合計
	従来手法（21箇所） （試掘平均面積2m ² ）	平均時間（分）	37	22	137	111	24
割合（％）		11.2	6.6	41.4	33.5	7.3	100.0
提案手法（7箇所） （試掘平均面積3m ² ）	平均時間（分）	26	56	171	159	31	443
	割合（％）	5.9	12.6	38.6	35.9	7.0	100.0

4.2.2. 二次元図面の補正

高速道路耐震補強工事および新設地下連絡通路工事の試掘結果（8 箇所：デジタルカメラ）より提案手法に則して生成した画像データ（平面図・断面図）と二次元図面（平面図・断面図）とを重ね合わせし比較検証した。なお、平面図および断面図の重ね合わせと修正には二次元 CAD の AutoCAD LT（Autodesk 社）を使用した。

(1) 検証内容

検証は、画像データと既存二次元図面とを重ね合わせて図面が修正可能かどうかを目視で確認した。抽出された画像データと既存二次元図面の重ね合わせを図 4-11、

図 4-12 に示す。図 4-11、図 4-12 では、デジタルカメラにより生成された三次元モデルの画素数・点密度（試掘範囲）、三次元モデルから抽出した画像の解像度、断面幅および既存二次元図面の地下埋設物の位置・高さを提案手法で抽出した平面図・断面図から図面修正できるかの可否を示す。

(2) 検証結果

画素数では、既存手法と同様に 3M 以上であれば概ね図面修正可能であるが、一部点密度が 60,000 点/m² 程度となる箇所では、図面修正のためには画像解像度を調整するなどの処置が必要になることがわかった。図 4-11 の No.3a-3-02 と No.4a-4-02 は、No.11a-11-02 と No.12a-12-02 と同様な撮影機材（デジタルカメラ）を使用しているものの、概ね土の面での特徴点不足と照明不足により点密度が低下していると推定される。図 4-12 の新設地下通路工事の No.16b-1-03, No.18b-3-03, No.19b-4-03, No.28b-11-03 では、対象箇所に照明施設を設置しており、高密度のデータを取得することで図面修正が可能となっている。点密度を変化させた画像データを図 4-13 に示す。図 4-13 では、点密度による図面修正の可否を確認するため、同一データによる点群密度を変化させた画像データを比較検証した。

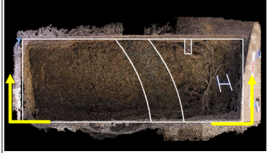
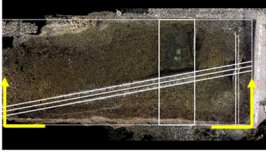

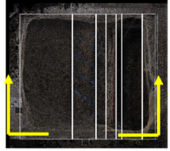
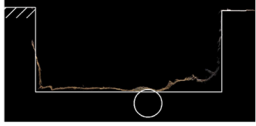
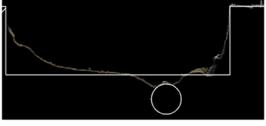
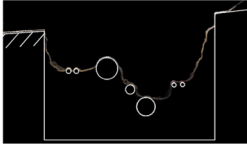
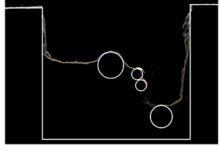
No.	No. 3a-3-02 デジカメ	No. 4a-4-02 デジカメ	No. 11a-11-02 デジカメ	No. 12a-12-02 デジカメ
平面図				
断面図				
	断面位置から400mm	断面位置から1000mm	断面位置から500mm	断面位置から800mm
画素数	2048×1536 (3M)	2048×1536 (3M)	2048×1536 (3M)	2048×1536 (3M)
点密度	60,450 点/m ²	54,775 点/m ²	79,133 点/m ²	90,181 点/m ²
解像度	5 mm/pix	5 mm/pix	2 mm/pix	2 mm/pix
断面幅	200 mm	200 mm	200 mm	200 mm
図面修正	可（解像度調整必要）	可（解像度調整必要）	可	可

図 4-11 抽出された画像データ（平面図・断面図）と既存二次元図面の重ね合わせ（1）

No.	No. 16b-1-03 デジカメ	No. 18b-3-03 デジカメ	No. 19b-4-03 デジカメ	No. 28b-11-02 デジカメ
平面図				
断面図				
画素数	3264×2448 (8M)	3264×2448 (8M)	3264×2448 (8M)	3264×2448 (8M)
点密度	253,338 点/m ²	214,960 点/m ²	228,311 点/m ²	211,906 点/m ²
解像度	2 mm/pix	2 mm/pix	2 mm/pix	2 mm/pix
断面幅	200 mm	200 mm	200 mm	200 mm
図面修正	可	可	可	可

図 4-12 抽出された画像データ（平面図・断面図）と既存二次元図面の重ね合わせ（2）

No.	No. 19b-4-03 デジカメ (100%) 点群データの間引き無し	No. 19b-4-03 デジカメ (50%) デジカメ (100%) より 点群データの50%の間引き	No. 19b-4-03 デジカメ (25%) デジカメ (100%) より 点群データの75%の間引き	No. 19b-4-03 デジカメ (25%) デジカメ (100%) より 点群データの75%の間引き
平面図				
断面図				
画素数	3264×2448 (8M)	3264×2448 (8M)	3264×2448 (8M)	3264×2448 (8M)
点密度	228,311 点/m ²	114,155 点/m ²	57,078 点/m ²	57,078 点/m ²
解像度	2 mm/pix	2 mm/pix	2 mm/pix	5 mm/pix
断面幅	200 mm	200 mm	200 mm	200 mm
図面修正	可	可	可 (解像度調整必要)	可 (解像度調整必要)

図 4-13 点密度を変化させた画像データ

図 4-13 より同一データによる点密度を変化させた結果から、図面補正が可能な点密度として 50,000 点/m²以上が必要であり、点密度が高いほど図面修正に適している。また点密度が低い（デジカメ 25%）場合の画像化解像度を 2mm/pix から 5 mm/pix に変

更させた場合は、画像データが平面および断面ともに鮮明になっていることから、図面補正をする上で必要な点密度と解像度の関係性を把握することが今後必要である。

(3) 二次元図面補正時間の検証

高速道路耐震補強工事および新設地下連絡通路工事の試掘結果のデータより生成された三次元モデルを用いて、既存手法および提案手法による既存二次元図面を補正する作業の平均時間を調査した結果を表 4-6、表 4-7 に示す。

検証は、図 4-3 および図 4-4 の既存手法と改良手法による二次元図面の補正手順により作業時間を計測した。被験者は、二次元 CAD 操作歴 3 年（三次元 CAD 操作歴 1 年）である。

表 4-6 は、既存手法の点群解析処理～三次元 CAD～二次元 CAD 上での二次元図面補正の作業時間、表 4-7 は、提案手法の点群解析処理～二次元 CAD 上での図面補正の作業時間である。表 4-6、表 4-7 より改良手法では、二次元図面補正に関する作業時間が既存手法と比較して 4 割程度の削減効果があることが確認できた。

表 4-6 既存手法による二次元図面補正の作業時間

作成手順		作成時間
点群解析処理	点群読込	約5分
三次元CAD	平面位置合わせ	約3分
	断面位置合わせ	約6分
二次元CAD	重ね合わせ図面補正	約5分
合計		約20分

表 4-7 提案手法による二次元図面補正の作業時間

作成手順		作成時間
点群解析処理	点群読込	約2分
	平面位置合わせ	約2分
	断面位置合わせ	約2分
	画像出力	約2分
二次元CAD	重ね合わせ図面補正	約5分
合計		約13分

4.2.3. 有用性の評価

本節では、提案手法に則して実現場（試掘調査工事）の撮影データ（現場職員撮影）により生成した地下埋設物の三次元モデルの生成手法および既存二次元図面の補正手法の有用性を検証した。

検証の結果、実現場で複数の撮影者により撮影されたデータを用いて作成した三次元モデルは、30箇所を検証箇所において概ね三次元形状を再現し良好な位置精度も確保できていた。今回検証した実現場における試掘工事では、即日で対象箇所の舗装撤去～掘削～埋戻し～舗装復旧まで行うことから、試掘終了後には埋設物の位置を再確認できない。そこで本手法を用いれば、位置精度の高い三次元モデルにより、地下埋設物の位置および高さを机上で容易に再確認可能である。また、試掘工事のような夜間の限られた時間の作業においては、改良手法を活用することで、作業時間や道路規制時間の短縮の可能性も確認できた。

既存二次元図面の補正においては、提案手法を実現化したシステムにより、三次元モデルに不慣れな作業員でも図面補正に使用する点群の画像化データ（平面・断面）を直感的な操作で出力でき、また出力した画像データは二次元CAD上で快適に作業可能な程度のデータサイズであることがわかった。これにより、図面補正に係る作業性の向上と手作業での効率化を確認できた。

4.3. 結論と課題

本章では、まず既存手法の課題であった三次元モデルと既存二次元図面との重ね合わせの手動作業を効率化し、既存の二次元図面を簡易に補正する手法を考案し、同手法に則したシステムを開発した。次に実現場の撮影データにより考案手法に則して生成した三次元モデルの形状確認および位置精度を検証した結果、十分な精度を持っていることがわかった。さらに、実現場データの三次元モデルと開発したシステムを用いて二次元図面との重ね合わせを試行した結果、改良手法の既存二次元図面が効率的に補正可能であることが確認できた。

課題としては、地下埋設物を対象とした既存二次元図面の補正は、図面上に記載されている地下埋設物の情報以外の不明管などについて図面上に作図しなければならない場合がある。作図する際には、基本情報（種類・管種・管径）を現場にて収集し図面上に反映する必要がある。また、三次元モデルを生成するためのデータ取得におけるTSを用いた現場（測量）作業の軽減や開発した図面補正補助ツールの手順に即した三次元モデルの生成手法の検討や実現場での撮影データを基にした地下埋設物の三次元モデルの生成と精度検証および二次元図面補正の際の図面の重ね合わせ作業（高密度点群データと二次元図面の重ね合わせ）と従来から行われている図面補正の手法との比較による有用性の評価が挙げられる。さらに、手動作業の自動化の検討や、必要な情報を図面上に反映できるようなシステムを構築して実用性を検証する必要であると考えられる。

5. 簡易計測による地下埋設物の二次元図面更新手法の実証的検証

都市土木の地下構造物は一般的に施設管理や施工の際に二次元図面が使用されており、埋設企業者や施工者などと二次元図面で情報が共有されていることから SfM による三次元モデルを用いた既存の二次元図面の補正手法（「既存手法」および「改良手法」）を 3 章および 4 章で提案した。SfM により生成した地下埋設物の三次元モデルは高い位置精度を保持し、二次元図面の補正に適用できることが確認できた。また、三次元モデルと既存二次元図面との重ね合わせの手動作業の効率化として既存の二次元図面を簡易に補正する手法の改良案を考案し、同手法に則したシステムを開発して実現場での撮影データを基にした有用性を評価した。4 章の課題として、三次元モデルを生成するためのデータ取得における TS を用いた現場（測量）作業の軽減や開発した図面補正補助ツールの手順に即した三次元モデルの生成手法の検討や実現場での撮影データを基にした地下埋設物の三次元モデルの生成と精度検証および二次元図面補正の際の図面の重ね合わせ作業（高密度点群データと二次元図面の重ね合わせ）と従来から行われている図面補正の手法（以下、「従来手法」という。）との比較による有用性の評価が挙げられた。

以上の課題を踏まえ、本章では、既存手法による地下埋設物の簡易な三次元モデル生成手法を改善し、既存の二次元図面を効率的に補正する手法の確立とする。具体的には、既存二次元図面の補正効率化のため開発したシステムを用いた二次元図面の補正手法（以下、「更新手法」という。）の確立と実用化に向けて従来手法と既存の二次元図面を簡易に補正する更新手法との作業時間や作業性を比較検討し、有用性を評価した。

5.1. 二次元図面の補正に関する従来手法の課題

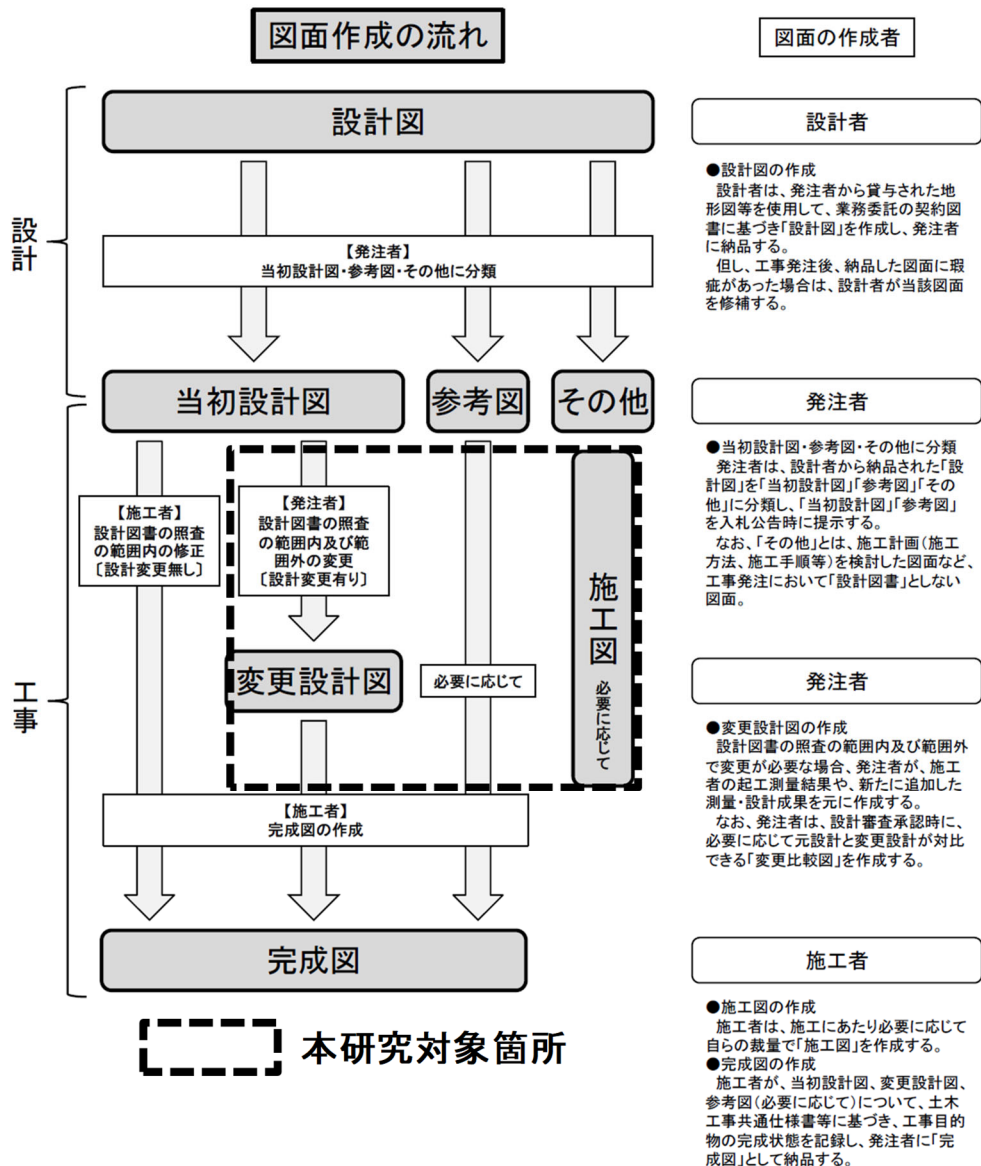
本研究では、計画・設計段階で作成された都市部の地下構造物（地下埋設物含む）の二次元図面の補正が対象である。

5.1.1. 従来手法の図面作成の流れ

一般的な土木工事における設計と工事における図面の作成の流れを図 5-1 に示す。図 5-1 は、設計から工事において設計図から完成図までの図面作成の流れや各段階での図面の作成者を示している。

本研究で対象とする図面は、設計図書の照査の範囲内および範囲外で変更が必要な場合、発注者が施工者の起工測量結果や新たに追加測量・設計成果を基に作成する変更設計図および参考図と施工者が施工にあたり必要に応じて自らの裁量で作成する施工図とする。

都市土木における従来手法による変更設計図・施工図補正の流れを図 5-2 に示す。図 5-2 は、都市土木における地下埋設物に関連する図面補正の流れと各段階における関係者や図面作成者を示している。



「よくわかる設計と工事図面」抜粋 北陸地方整備局監修⁸³⁾

図 5-1 設計と工事における図面作成の流れ

本研究は、都市土木の輻輳した地下構造物の改築・更新・新設構造物工事において受注者（設計者・施工者）が設計や施工前に実施する現地との整合性を把握するための試掘調査および調査結果から設計図などの二次元図面を補正する作業を対象とする。

対象とする作業は、受注者が現場職員を配置し試掘調査の立会および調査時のデータ収集から収集したデータを基に図面の補正が行われており、一連の作業が現場立会職員の概ね裁量により図面が作成されている。

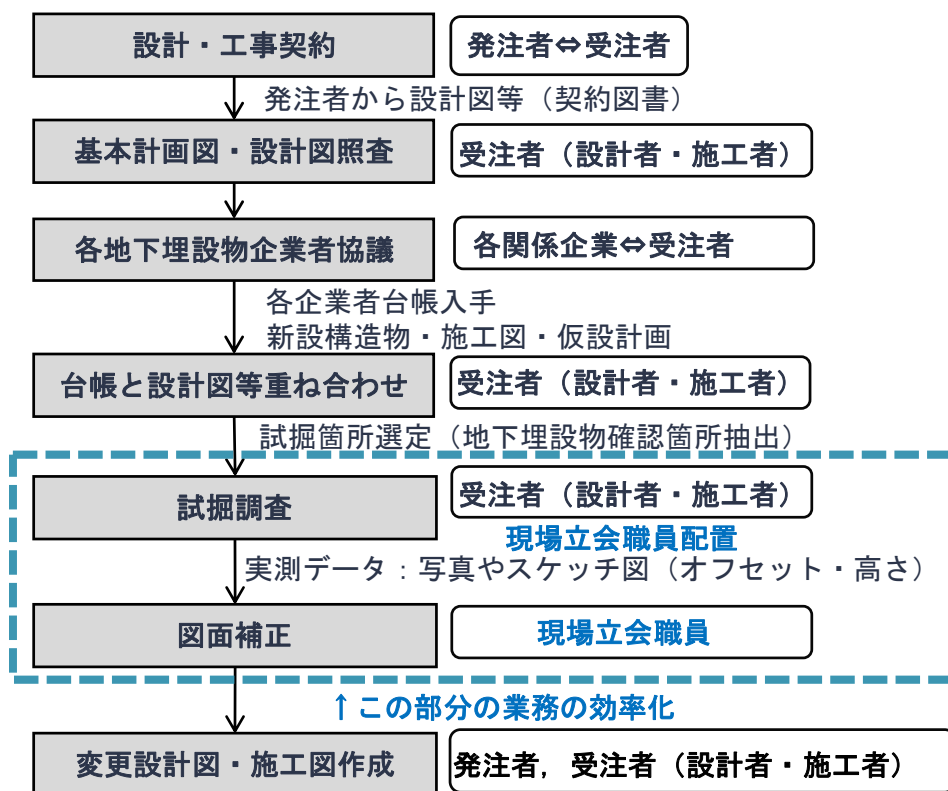


図 5-2 従来手法による変更設計図・施工図補正の流れ

5.1.2. 施工者の実態調査

2024年4月1日の建設業における残業上限規制が開始されることを踏まえ施工会社（株）竹中土木のQC活動の一環として「作業所における働き方改革の実現に向けた取り組み」において施工者（作業所の現場職員）の残業時間の実態調査を実施した。

調査は、作業所の業務実態を把握するために主に関東地区の現場作業所で働く社員を対象にアンケート調査を実施した。調査期間は、2019年11月11日から11月18日で実施し回答率は91%（148人／163人）であった。

施工管理技術者の時間外労働時間は、現場の規模、工事種別、発注者、現場の周辺環境、作業時間（昼夜間工事）などにより大きく変動する。当該企業による過去2年間の各年代の平均残業時間を図5-3に示す。図5-3は、横軸に該当年と月、縦軸に一ヶ月当りの平均残業時間とし、赤点線で残業時間の月平均45時間を示している。各年代の残業時間は、2018年から2019年かけて減少傾向であるが20代・30代で月平均45時間を超過している。

意識調査アンケート調査結果から長期労働の要因となっている業務を図5-4に示す。図5-4は、作業所に勤務する社員148名が53の業務リストから上位5位まで選択して回答（全740票）したすべての票数に対しての割合を示している。

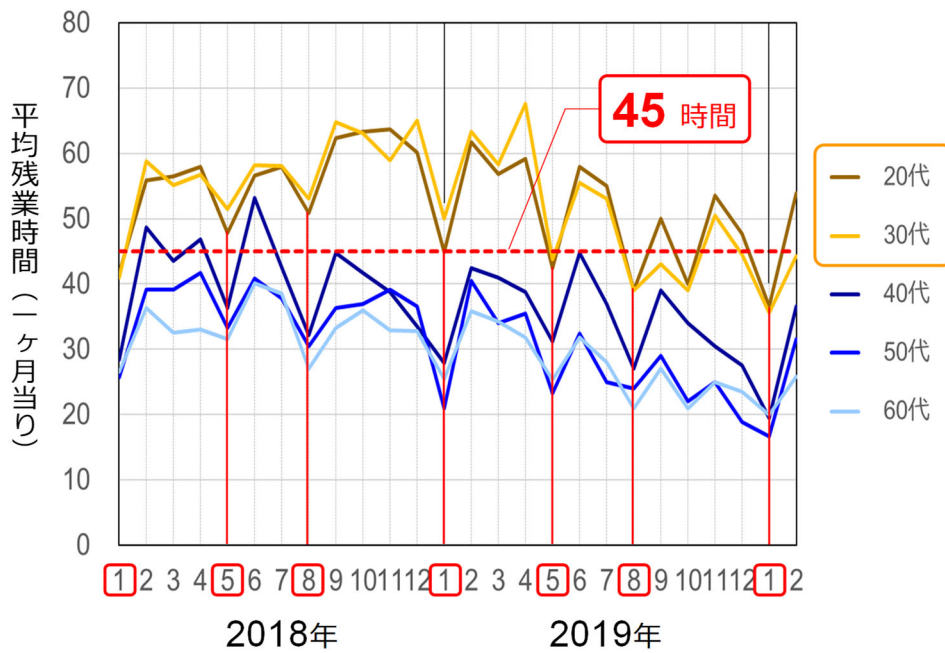


図 5-3 各年代の平均残業時間

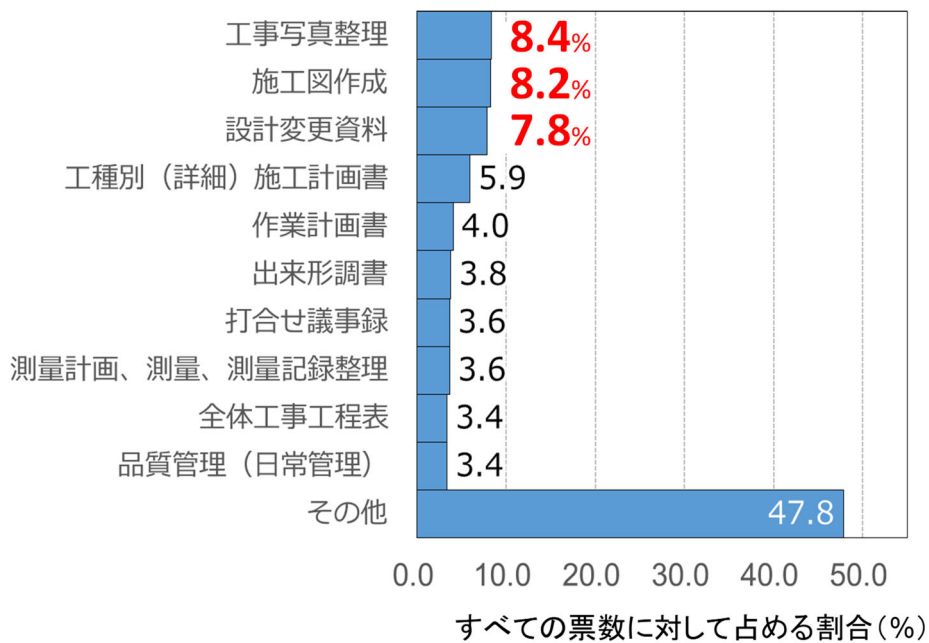


図 5-4 長時間労働の要因となっている業務

第1位から3位は、「工事写真整理」、「施工図作成」、「設計変更資料」であり、施工図作成を含め設計変更資料作成の際も何らかの設計変更図面の基礎図面を作成していることが想定される。このため、図面作成に関する業務は、長時間労働の要因となっている可能性がある。工事写真は、デジタルカメラで撮影された工事写真を素早く分類、整理して、電子納品やアルバム (写真帳) に整理可能な施工管理ソフトが開発されている。施工図は、施工前 (事前調査など) や施工中に現場の状況を踏まえ現場の技術者の経験や能力

より作成されている。施工図の作成は、経験不足の若手技術者の長時間労働の要因の一つにもなるため、業務改善となる補助的なツールの開発が望まれる。また長時間労働の要因である「その他」の割合が調査結果では約 50%を占めていることから長時間労働の要因となる業務が多岐にわたることから更なる業務分析が必要である。

5.1.3. 課題と考察

本研究は、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）の主に変更設計図や施工図などの二次元図面の補正が対象であり、受注者（設計者・施工者）が行う地下埋設調査では、現地立会職員は 20 代から 30 代の若手施工管理技術者が配置されるケースが多く、試掘調査から図面の補正作業までの業務を行なっている。従来手法による試掘調査から図面補正の手順を図 5-5、試掘調査における現場状況およびデータ整理状況、図面作成の具体例を図 5-6 に示す。図 5-5 は都市土木における地下埋設物の試掘調査の結果を基に補正される二次元図面の補正の手順を示し、図 5-6 は現地作業である掘削から地下埋設物の露出までの掘削作業と掘削完了後の地下埋設物の天端の高さの確認状況写真および現地データ整理（スケッチ作成）状況と内業で作成される図面（平面図・断面図）の具体例を示している。

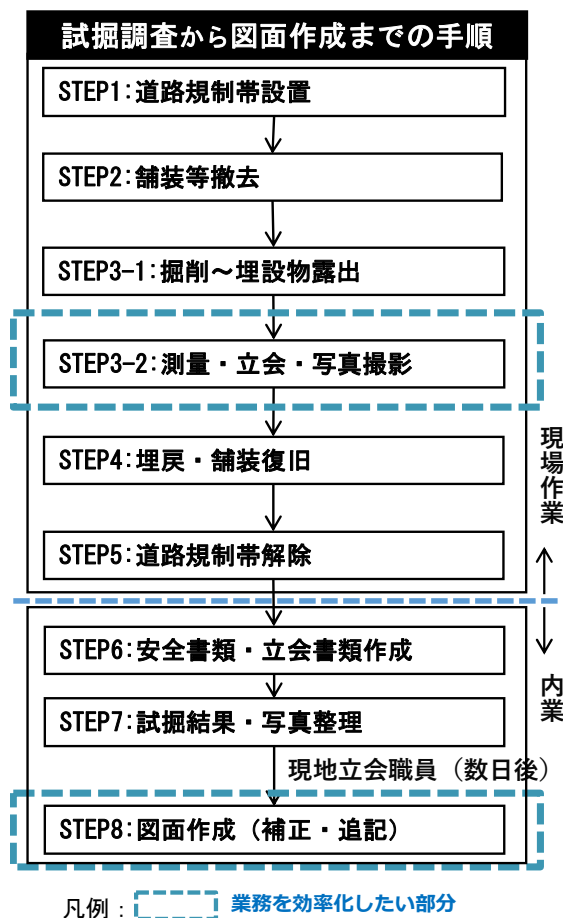


図 5-5 従来手法による試掘調査から図面補正の手順

現地作業は、主に STEP3-1 の人力による掘削作業が行われ、掘削完了後に道路や歩車道境界または試掘箇所端部などの基準位置から人力でオフセット位置を測量し、高さは図 5-6 の STEP3-2 の写真に示すように埋設物付近の近傍道路高さから地下埋設物の土被り高さを測量している。また現地計測したデータを図 5-6 の STEP3-2 のスケッチ図を作成し、STEP8 の内業で行われる図面作成作業の基礎資料となる。

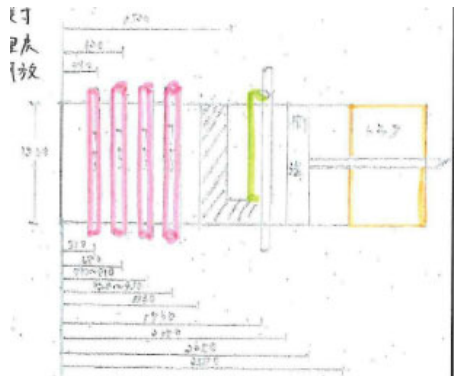
従来手法における都市部の地下埋設物に関する図面の補正は、前項の施工者の実態調査で今後施行される残業時間の上限を超過している年代の 20 代や 30 代である施工管理技術者（現地立会職員）により図面が補正されることが推定できるので図面作成に係る業務が長時間労働の一原因となる可能性がある。また、限られた時間の内でデータ取得が求められる現地作業の中でデータ整理や図面作成は比較的経験の浅い現地立会者のデータ取得に依存する可能性が高く実際に取得したい情報の不足が懸念される。従来手法の手順の中で図 5-5 の現地作業 STEP3-2 の測量作業や図 5-6 のスケッチ図を作成および内業である図面作成業務は、業務を効率化したい部分であり本研究の提案手法である図面の補正に関する更新手法が適用できる可能性がある。



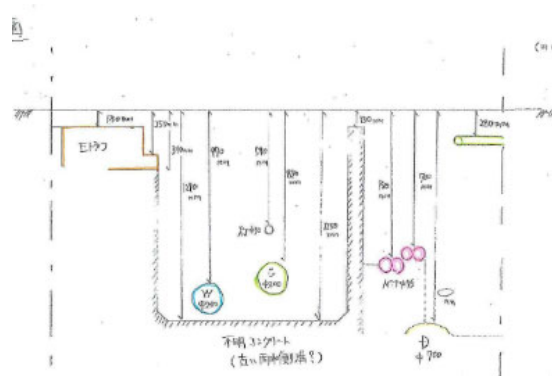
STEP3-1 掘削作業



STEP3-2 写真撮影

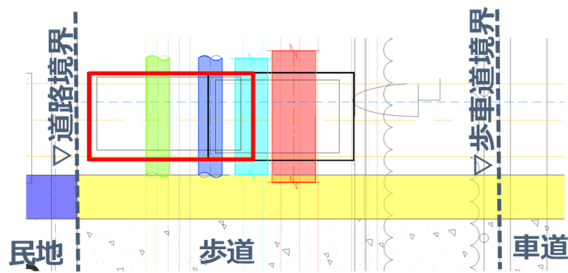


平面図

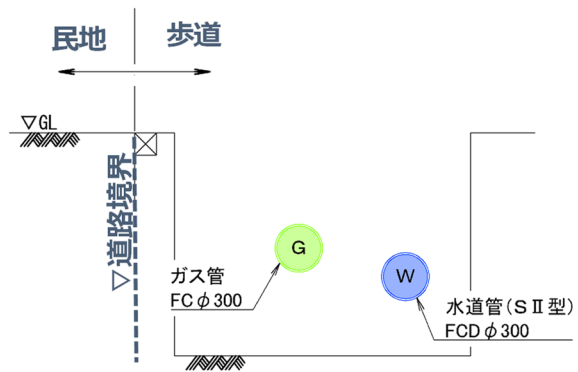


断面図 (別断面)

STEP3-2 現地データ整理 (スケッチ作成)



STEP-8 図面作成 (平面図)



STEP-8 図面作成 (断面図)

図 5-6 試掘調査における現場状況およびデータ整理状況, 図面作成の具体例

5.2. 地下埋設物の二次元図面の更新手法

本研究は、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）の二次元図面と既存手法で考案した簡易的な方法で撮影された写真を用いて生成された三次元モデルから既存二次元図面と重ね合わせ可能な画像データ（平面・断面図）を生成し、既存二次元図面を補正する手法を提案する。

5.2.1. 更新手法の改善点

既存研究で考案した三次元モデルの撮影方法と撮影状況（以下、「生成手法（既存）」という。）を図 5-7 に示す。図 5-7 は、三次元データ取得するための撮影方法および撮影状況と標定点の設置状況である。生成手法（既存）では、任意の位置に標定点を設置して TS を用いて座標（X, Y）を取得し、水準測量にて標定点の天端高さの座標（Z）を取得していた。試掘作業は、夜間に行うことが多いので作業性の面から TS 測量による座標取得に多少時間を要していた。また開発した図面補正補助ツールでは、画像データを取得する際に基準点（試掘箇所四隅点）や基準線（試掘箇所端部）を用いて画像を出力することから基準点や基準線を明確にする必要がある。図 5-7 に示すとおり生成手法（既存）では、基準となる点や線が不明確な箇所が見受けられた。

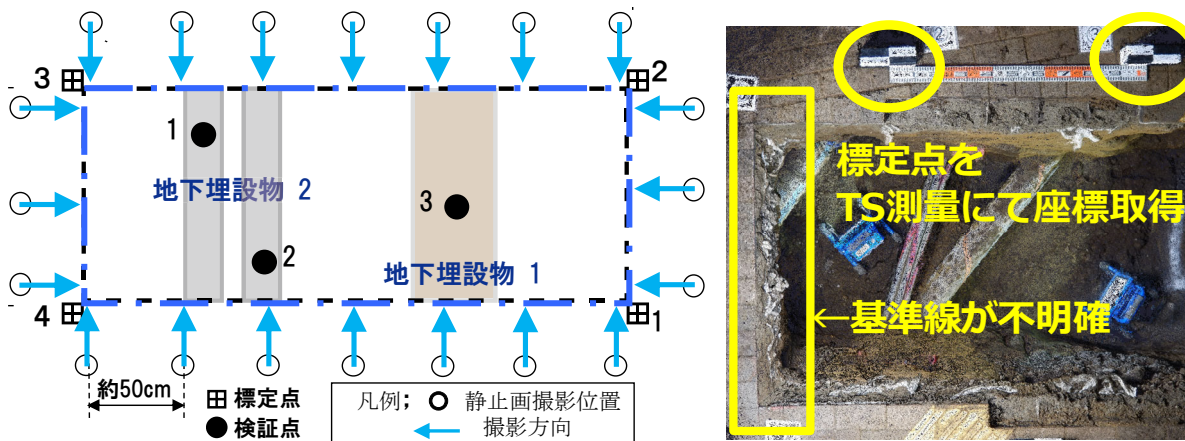


図 5-7 生成手法（既存）の撮影方法と撮影状況

既存手法で考案した生成手法（既存）の改善点を踏まえて三次元モデル生成の新たな撮影方法と撮影状況（以下、「生成手法（改善）」という。）を図 5-8 に示す。図 5-8 は、標定点を四隅に設置し、基準となる基準点と基準線（基準軸）が明確になるように L 字型に標定点を設置した撮影方法と撮影状況である。生成手法（改善）の標定点の位置の測量は、試掘予定箇所の端部からのオフセット（手動計測）にて位置を測量し、高さの測量は水準測量で既存手法と同様に標定点の天端を測量する。生成手法（改善）により現場（測量）作業の軽減や開発した図面補正補助ツールの手順に即した三次元モデルの生成が可能となる。

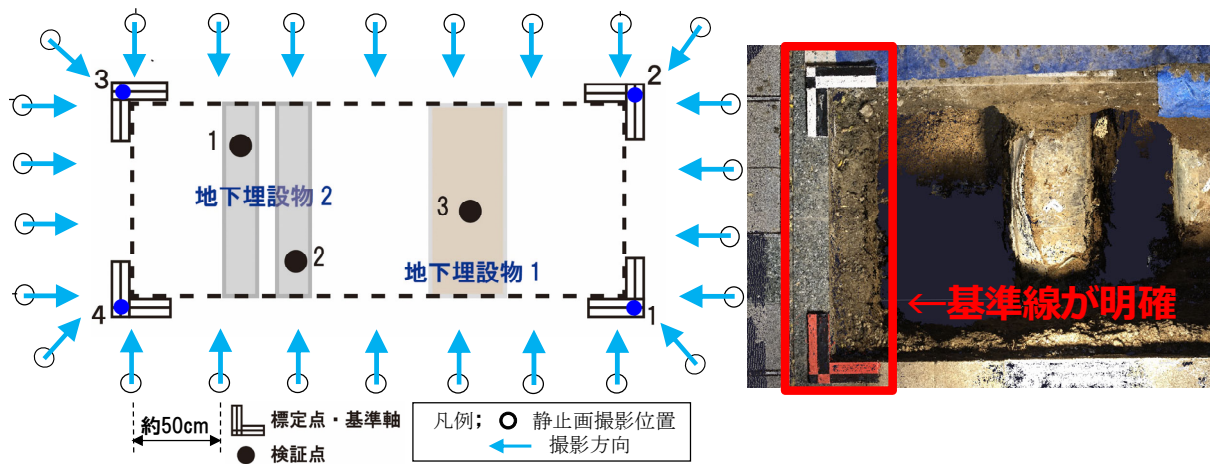


図 5-8 生成手法（改善）の撮影方法と撮影状況

5.2.2. 三次元モデルを用いた二次元図面補正作業

三次元モデルを用いた二次元図面の補正作業では、現場立会職員が行う作業と内勤など・外注（支援部門）行う作業の役割が区分されている。更新手法に則した作業区分と共有するデータ内容を図 5-9 に示す。図 5-9 は、更新手法に則した現場および支援部門で行う作業内容と三次元モデルを用いた二次元図面補正を行う上でのルール（座標系など）や受渡りするデータを示している。現場作業前に現地立会者と支援部門とで事前に図面の座標系（世界測地系または現場座標系）の確認、撮影方法や標定点の設置方法、データ形式（CAD）や交換方法を確認することが必要である。

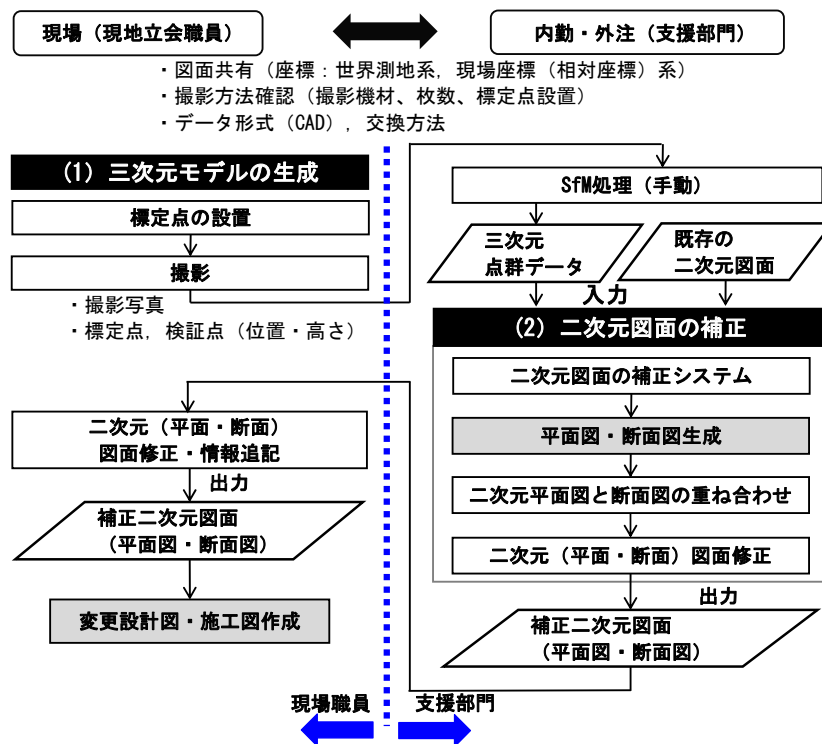


図 5-9 更新手法に則した作業区分と共有するデータ内容

5.3. 更新手法の有用性検証

本章では、実現場（試掘調査工事）の撮影データ（現場職員撮影）により更新手法に則して生成した地下埋設物の三次元モデルの形状および精度を検証し、さらに三次元モデルから生成した対象範囲の画像データ（平面図・断面図）と既存二次元図面との重ね合わせを比較して更新手法の有用性を検証した結果を記す。

5.3.1. 三次元モデルの生成手法の検証

(1) 検証箇所概要

検証場所は、都市部の道路下にある地下連絡通路関連工事において、車道部および歩道部を一部道路占用し夜間規制した試掘工事箇所である。試掘箇所は、計 7 箇所（従来手法の検証 10 箇所，更新手法の検証 7 箇所）である。静止画の撮影は、夜間工事（道路規制時間内での工事）にて試掘工事（既設舗装撤去～掘削～地下埋設物の位置・高さ調査～埋戻し～舗装仮復旧）内の掘削完了後の 10 分間程度で実施した。

(2) 検証内容

三次元モデルを生成するための基準点となる標定点（GCP）は、撮影範囲周囲（四隅など）に設置した。そして、撮影機材（表 5-1 参照），

表 4-1 の三次元モデルの生成条件により静止面の撮影方法（図 5-10 参照）を設定した。三次元モデルの生成には、Pix 4D mapper(Pix4D 社製)を用いた。また表 5-2 は、検証場所と試掘箇所ごとの撮影機材、画像サイズ、試掘面積、生成した三次元点群の面積当たりの点数（以下、「点密度」という。）を示す。

表 5-1 撮影機材

機種 No.	種別	機種	モード	画像サイズ
01	スマートフォン	iPhoneX	静止画	4032×3024
02	デジタルカメラ	OLYPUS TG-6K	静止画	1280×960 4000×3000
03	タブレット	iPad(5th)	静止画	3264×2448

表 5-2 検証箇所の撮影条件および点密度

試掘 No.	機種	画像サイズ	撮影枚数	面積 m ²	点密度 点/m ²
1	01	4032×3024	27	3.5	256,890
2	01	4032×3024	36	3.1	397,544
3	02	4000×3000	24	3.8	198,261
8	01	4032×3024	23	3.5	112,944
11	03	3264×2448	21	3.8	152,146
12	02	1280×960	30	4.2	60,073
13	01	4032×3024	39	3.9	328,528

三次元モデルの精度は、実際の試掘工事の道路規制時間内に検証した。その際、鉛直精度は検証できたが、水平精度は規制時間内に計測時間がとれなかった。地下埋設物の特徴点をオートレベルで測量した検証点の実測データ（高さ）を正解値とし、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⁸²⁾に準じた±5cm とした。

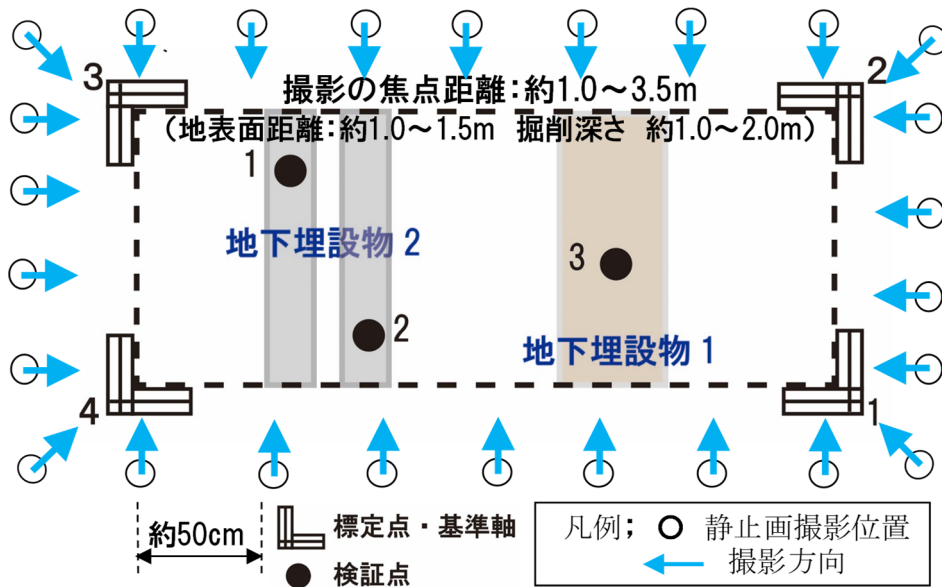


図 5-10 標定点・検証点および撮影方法

(3) 検証結果と考察

実現場での撮影毎に生成した三次元モデルの形状および位置精度の検証結果を以下に示す。撮影データより生成された検証場所の三次元モデルを図 5-11、実現場での三次元モデルの精度検証結果を表 5-3 に示す。

表 5-3 検証箇所の精度検証結果

試掘 No.	機種	平均土被り DP (m)	基準点数	検証点数	検証点誤差 (鉛直)	
					標準偏差 (mm)	最大値 (mm)
1	01	0.68	4	2	2.3	10
2	01	0.99	4	4	6.6	13
3	02	1.23	4	3	10.0	13
8	01	1.69	4	2	5.0	5
11	02	0.69	4	2	13.1	14
12	02	0.75	4	3	14.1	24
13	01	1.29	4	6	7.8	24

図 5-11 の目視確認の結果より、試掘 7 箇所において概ね三次元モデルが再現されており、試掘 No.2 の輻射した埋設物でもモデル上で認識可能であった。一部試掘 No.12 では、三次元モデルの生成条件 (画像サイズ (3M 以下で撮影)) が不足であり、他と比較して三次元モデルの精度と三次元モデルの点密度が低く二次元図面の補正に影響する可能性がある。また、試掘 No.8 (地下埋設物が少ない) の試掘箇所は、画像サイズが大きい撮影機材を用いても点密度は No.2 (地下埋設物が多い) と比較すると点密度が 1/2 以下となっている。これは地下埋設物や地面形状などが特徴点として点密度に

影響している。点密度が大きいと画像の形状が明確になり図面の補正に有利である。特徴点が不足している撮影箇所では、取得したい部分に特徴点が取得できるように照明を使用するか何かしら特徴点（例：地面の場合は白色系テープ）を添付するなどの処置が必要である。次に、表 5-3 の実現場による三次元モデルの精度検証は、試掘 7 箇所において実施した。三次元モデルの位置誤差は 3～15mm 程度であり、目標精度内であることが確認できた。この結果より、生成された三次元モデルは二次元図面の補正に十分適用可能であり、更新手法が有用であると結論づけた。

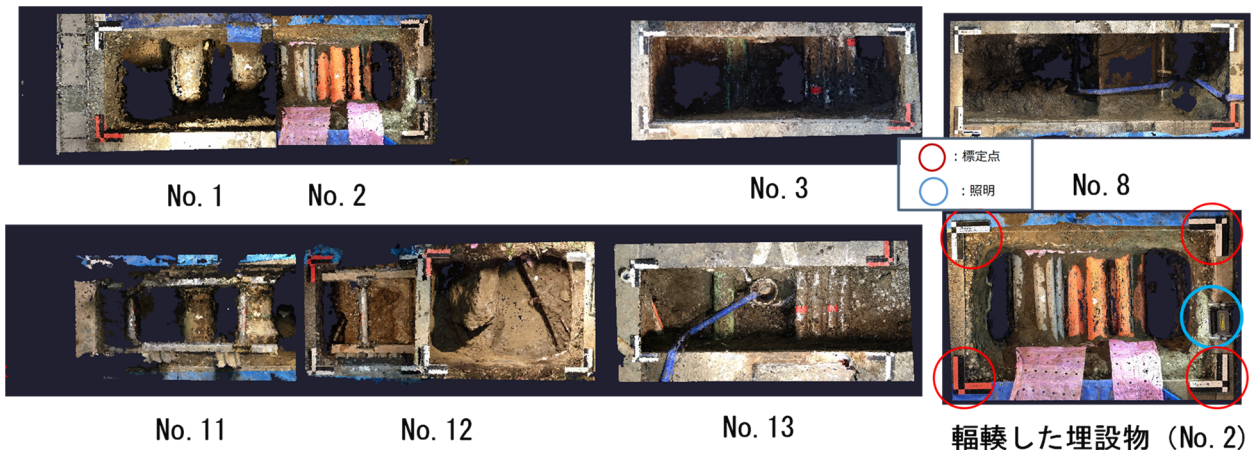


図 5-11 撮影データより生成された検証場所の三次元モデル

5.3.2. 二次元図面の補正

地下連絡通路関連工事の試掘結果（7 箇所：スマートフォン，デジタルカメラ）より提案手法に則して生成した画像データ（平面図・断面図）と二次元図面（平面図・断面図）とを重ね合わせをし比較検証した。なお，平面図および断面図の重ね合わせと補正には二次元 CAD の AutoCAD LT (Autodesk 社) と図面補助ツールソフトである LaserMapView を使用した。

(1) 検証内容

検証は，画像データと既存二次元図面とを重ね合わせて図面が補正可能かどうかを目視で確認した。抽出された画像データと既存二次元図面の重ね合わせを図 5-12 に示す。図 5-12 では，スマートフォン，デジタルカメラにより生成された三次元モデルの画素数・点密度（試掘範囲），三次元モデルから抽出した画像の解像度，断面幅および既存二次元図面の地下埋設物の位置・高さを更新手法で抽出した平面図・断面図から図面補正できるかの可否を示す。

No.	No. 1 iPhoneX	No. 2 iPhoneX	No. 3 TG-6K	No. 8 iPhoneX
平面図				
断面図				
画素数	4,032×3,024 (M)	4,032×3,024 (M)	4,000×3,000 (M)	4,032×3,024 (M)
点密度	256,890 点/m ²	397,544 点/m ²	198,261 点/m ²	112,944 点/m ²
解像度	2 mm/pix	2 mm/pix	2 mm/pix	2 mm/pix
断面幅	50 mm	50 mm	80 mm	80 mm
図面補正*3	可	可	可	可

No.	No. 11 iPad	No. 12 TG-6K	No. 13 iPhoneX
平面図			
断面図			
画素数	3,264×2,448 (M)	1,280×960	4,032×3,024 (M)
点密度	152,147 点/m ²	112,944 点/m ²	328,529 点/m ²
解像度	2 mm/pix	2 mm/pix	2 mm/pix
断面幅	50 mm	50 mm	50 mm
図面補正*3	可	可	可

凡例：

- 色塗着色：更新前
実線（既存図面）
- 色着無し：更新後
色破線（更新図面）
- 赤寸法値 図面（既存）と
↔ 図面（画像）との差

*3 図面補正の可否の判断は、既存二次元図面を更新可能な画像による可否

図 5-12 抽出された画像データと既存二次元図面の重ね合わせ

(2) 検証結果

検証箇所の平面および断面図は、概ね全ての試掘箇所で見存図面位置とずれ（図 5-12 参照）が発生しており図面の補正が必要であった。本研究の更新手法である図面補助ツールソフトにより出力した画像データと既設図面（試掘 7 箇所）とを重ね合わせることで図面の補正が可能であった。

画素数では、既存手法と同様に 3M 以上であれば概ね図面補正可能であるが、一部 No.12 画素数 3M 以下で点密度が 60,000 点/m²程度となる箇所でも、画像解像度を調整するなどの処置を行えば図面補正が可能であることがわかった。試掘 No.8 は、No.1 お

よび No.2 と同様な撮影機材（スマートフォン）を使用しているものの、概ね土の面での特徴点不足により点密度が低下していたが、土被りが 2m 程度ある地下埋設物の天端の形状も再現され図面補正が可能であった。

本研究で開発した図面補助ツールソフト上での二次元図面（平面図）と三次元モデルの重ね合わせの一例を図 5-13 に示す。図 5-13 は、ソフト上での二次元図面（平面図）と生成手法（改善）により生成した三次元モデルの重ね合わせの状況を示している。三次元モデル生成の改善により三次元モデル上に二次元図面と同一の基準点・基準軸の標定を設けることで基準が明確になり図面重ね合わせや図面補正が容易になった。

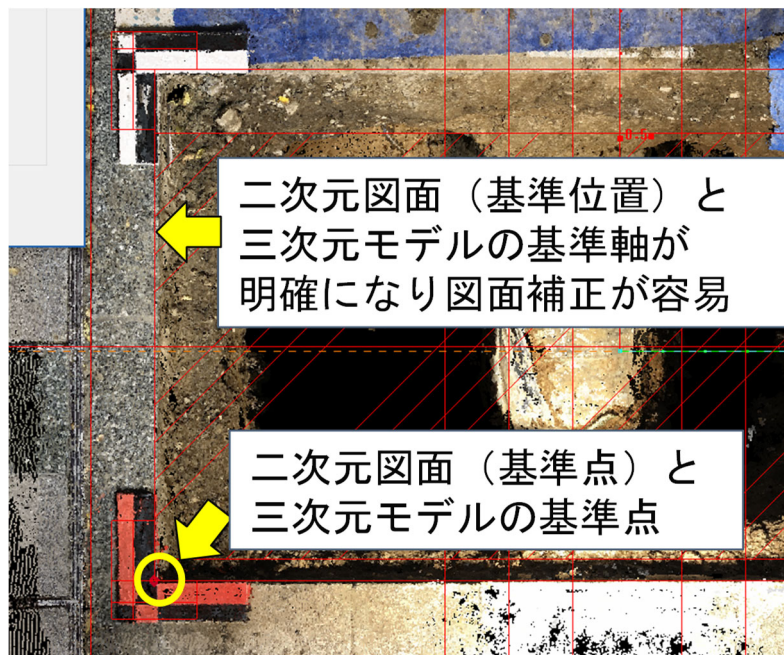


図 5-13 二次元平面図と三次元モデルの重ね合わせの一例

5.3.3. 二次元図面の更新手法の有用性検証

(1) 検証内容

本研究では、都市土木の試掘工事（試掘調査から図面作成までの手順）に着目して、試掘データ取得から図面補正するための作業時間に係わる従来手法と更新手法とを比較することで提案手法の有用性を検証した。

検証する従来手法と更新手法の手順を図 5-14 に示す。図 5-14 の従来手法は、試掘結果から得られた試掘整理データおよびスケッチ図、写真より既存図面を補正する。更新手法は、撮影データや標定点座標から三次元モデルの生成し、生成された三次元モデルから点群解析処理（図面補助ツール）により画像データ（平面・断面図）を出力し、出力された画像データと既存二次元図面とを重ね合わせて図面を補正する。

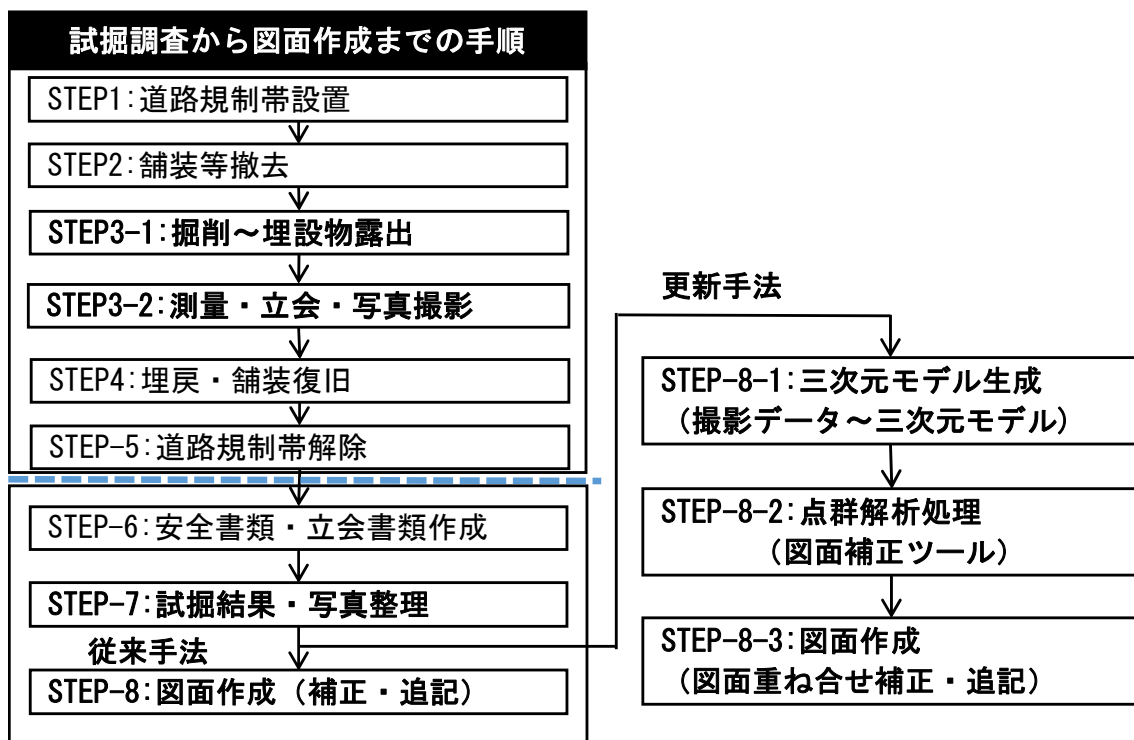


図 5-14 検証する従来手法と更新手法の手順

地下連絡通路関連工事において従来手法（10箇所）と更新手法（7箇所）による同一現場での試掘調査から既存二次元図面を補正する作業の平均時間を調査した結果を表 5-4、表 5-5 に示す。表 5-4 は、図 5-14 の更新手法の STEP8-1 から STEP8-3 までの作業の平均時間を計測した。表 5-5 は、図 5-14 の従来工手法と更新手法の STEP1 から STEP8 までの手順の作業全体の平均時間を集計した。

図面補正作業の被験者は、従来手法では現場経験および二次元 CAD 操作歴 10 年以上、更新手法では二次元 CAD 操作歴 4 年（三次元 CAD 操作歴 2 年：CAD オペレータ）である。

表 5-4 更新手法による図面補正時間

更新手法：STEP8-1～3		
	作成手順	作成時間
STEP8-1 三次元処理 (写真～ 三次元モデル)	初期処理	約2分
	データ入力～写真読込	
	標定点・検証点設定	約11分
	解析処理	約12分
	その他（データ抽出）	約2分
	小計	約27分
STEP8-2 点群解析処理	点群読込	約1分
	平面位置合わせ	約3分
	断面位置合わせ	約3分
	画像出力	約1分
	小計	約8分
STEP8-3 二次元CAD	重ね合わせ図面補正	約7分
	修正・追記	約5分
	小計	約12分
	合計	約47分

表 5-5 試掘調査から既存二次元図面を補正する作業の平均時間

現場作業								
STEP		STEP1	STEP2	STEP3-1	STEP3-2	STEP4	STEP5	合計
作業時間	平均時間(分)	30	30	120	53	93	30	356
	割合(%)	8.4	8.4	33.7	14.9	26.1	8.4	100.0
内業								
STEP		STEP6	STEP7	STEP8	STEP8-1	STEP8-2	STEP8-3	合計
作業時間	平均時間(分)	60	60	49	-	-	-	169
	割合(%)	35.5	35.5	29.0	-	-	-	100.0
従来+提案手法(7箇所)	平均時間(分)	60	60	-	27	8	12	167
	割合(%)	35.9	35.9	-	16.2	4.8	7.2	100.0

(2) 検証結果

表 5-4 より更新手法による図面補正時間は、三次元処理作業が大きな割合を占めている。写真の枚数が多い場合や画素数が大きい場合は、標定点設定や解析に時間を要するので地下埋設物の状況踏まえて撮影方法を検討する必要がある。

二次元図面の補正は、更新手法で出力された画像データが視覚的に位置関係の把握できることから容易に図面の補正が可能であった。

表 5-5 より従来手法と更新手法の図面補正に要する平均作業時間は、従来手法で 49

分、更新手法が47分でほぼ同様な作業時間であった。ただし、更新手法は、今回の被験者のような経験が浅く比較的土木の知識の無いCADオペレータでも対応可能であった。また、支援部門での図面補正後に補正された図面に対しての現場立会職員の確認作業が必要であり、図面修正および追加情報の追記作業は発生する可能性がある。

表5-5より現場作業において、掘削作業後のSTEP3-2 測量・立会・写真撮影時間が現場作業の15%（時間平均約50分）程度の時間を割いているため、更新手法を前提で作業を進めれば時間短縮（短縮可能作業：オフセット測量作業やスケッチ作業など）につながる。

今回の検証のコスト面の効果は、図面補正を支援部門が代替（作業時間は同等であることを前提）することで現場職員（平均75万円/月^{*1}）と派遣社員のCADオペレータ（50万円/月^{*2}）との人件費^{*3}の比較（ $50/75 \approx 0.7$ ）から3割程度のコストダウンにつながる。別途費用としてSfMソフト使用料は、ソフトウェアを購入していれば別途SfM解析業務との併用で使用頻度が高ければコストは抑えられる。

*1 現場職員（20代～30代：月に発生する原価は60万～90万円（平均75万円））

*2 CADオペレータの場合（20代～30代：月に発生する原価は50万円）

*3 給与、時間外手当、賞与、交通費、社会保険料など

(3) 有用性の評価

本章では、更新手法に則して実現場（試掘調査工事）の撮影データ（現場職員撮影）により生成した地下埋設物の三次元モデルの生成手法および既存二次元図面の補正手法の有用性を検証した。

検証の結果、実現場で複数の撮影者により撮影されたデータを用いて作成した三次元モデルは、7箇所の検証箇所において概ね三次元形状を再現し良好な位置精度も確保できていた。今回検証した実現場における試掘工事では、即日に対象箇所の舗装撤去～掘削～埋戻し～舗装復旧まで行うことから、試掘終了後には埋設物の位置を再確認できない。そこで本研究の提案手法を適用すると、位置精度の高い三次元モデルにより、地下埋設物の位置および高さを机上で容易に再確認可能である。また、試掘工事のような夜間の限られた時間の作業においては、更新手法を活用することで、作業時間や道路規制時間の短縮の可能性も確認できた。

5.4. 結論と課題

本章では、まず都市土木における二次元図面の補正の従来手法の手順と施工者の実態調査を実施し施工現場における課題を確認した。次に実現場において補正効率化のため開発したシステムを用いて二次元図面の更新手法を試行し、実用化に向け従来手法と考案した更新手法の作業時間とを比較検証した。その結果、実現場の撮影データにより更新手法に則して既存二次元図面の補正を検証した結果、①十分な精度を持っている、②二次元図面の補正が可能である、③従来手法との比較検証により今後建設業における残業上限規制の

施行を見据えた現場施工管理技術者の職員の残業時間が削減できるツール一助となる可能性があることを確認できた。

課題としては、既存二次元図面の補正における手動作業の自動化の検討や、必要な情報を図面上に反映できるようなシステムを構築して実用性を検証する必要がある。また、対象とした地下埋設物以外に都市土木では、例えば施工時に想定し得ない残置物や支障物に遭遇した際にデータを早期に収集し対処方法を検討し、対象物の形状および数量把握する必要があり、その際のデータ取得する方法として簡易計測による三次元モデルの活用が期待される。その他にも広範囲では無く局所的な範囲での構造物や仮設物の出来高や出来形にも提案手法の活用の可能性がある。さらに本節では、現場（現場施工管理員）と支援部門（内勤・外注）との連携により現場施工管理員の業務の効率化の可能性が確認できたが、課題として事前及び作業中のデータの連携方法と進捗程度を確認する方法が確立していないこと挙げられる。図 5-15 に情報交換シートを示す。図 5-15 は、今回の検証を踏まえて現場と支援部門との事前と作業段階でのデータの連携内容と確認方法を参考に取りまとめた。連携情報の内容は、関係者間での必要な情報を整理して効率的な情報交換方法を検討する必要がある。

情報交換シート * 該当箇所を記入したら□に✓を入れる * 共有フォルダに情報交換シートを保存して図イメージ ⇒ 別途、野帳等の記入メモでも可

◎基本情報

・日付

作業予定日：2020年00月00日 00:00~00:00

作業実施日：2020年00月00日 00:00~00:00

データ保存日：2020年00月00日 00:00

データ受領日：2020年00月00日 00:00

修正データ依存日：2020年00月00日 00:00

修正データ受領日：2020年00月00日 00:00

情報交換連絡手段：メールにて下記担当者へ都度連絡

作業所担当者：A担当者 080-0000-0000 ○○-○@○.co.jp

B担当者 080-0000-0001 ○○-○@○.co.jp

支援部門担当者：C担当者 080-0000-0002 ○○-○@○.co.jp

D担当者 080-0000-0003 ○○-○@○.co.jp

・場所

作業場所：○○作業所

作業箇所：試験No, ○

撮影者：A担当者

撮影範囲：長辺0m×短辺0m×深さ0m

撮影箇所：照明設置⇒□有 □無

撮影特徴点：連絡事項あれば

・データ形式

データ保存先：共有NASクラウド：¥00_00工事¥0_0¥00_0

○¥00_試験調査¥試験No_00

写真機材：デジタル_000

静止画・動画：静止画

写真画素 (3M以上)：0000×0000 (3M)

写真枚数 (3枚/m)：00枚

(例：周長10m⇒30枚目安)

座標系：□世界測地系 □相對座標系 □現場座標系

標定・検証点：データシート記入

測距者：A担当者

概略スケッチ図作成者：B担当者

二次元CAD仕様：AutoCAD LT 2000版 dwg形式

(平面図・断面図) AutoCAD以外⇒○○CADソフト dxf形式

補正二次元図面：AutoCAD LT 2000版 dwg形式

画像添付：画像同一フォルダに保存

補正図作成者：C担当者

担当 check

作業所

作業所

作業所

支援部門

支援部門

作業所

作業所

支援部門

作業所

作業所

作業所

作業所

作業所

作業所

作業所

支援部門

支援部門

支援部門

◎参考概略スケッチ図 (図示は、基本手書き下記は作図イメージ) ⇒ 別途、野帳等の記入メモでも可

種類	形状	土盛り h
埋①	Φ200mm	1.4m
埋②	Φ150mm	1.3m
埋③	幅400mm	1.4m
埋④	Φ100mm×9	1.0m

◎基準点及び検証点座標

	X	Y	Z
角①			
角②			
角③			
角④			
標定点①			
標定点②			
標定点③			
標定点④			
検証点①			
検証点②			
検証点③			
検証点④			

図 5-15 情報交換シート

6. 簡易計測による三次元モデルを用いた二次元図面補正手法の活用方法

5章では、我々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の静止画像を用いて、地下埋設物の簡易な三次元モデル生成の既存手法を改善し、得られた三次元モデルを用いて既存二次元図面を補正する更新手法を提案した。その結果、生成した三次元モデルから画像データを抽出し、既存二次元図面と重ね合わせると迅速な図面の補正が可能であることを確認した。しかし都市土木の地下構造物の工事では、工事に影響する構造物として地下構造物（地下埋設物含む）以外にも近接する建築物（山留壁含む）や従前の工事などで使用された仮設構造物の残置物などが存在する。地下部の残置物を図 6-2 に示す。図 6-2 のような残置物は、工事に施工に支障となり工事進捗に影響があることから残置物の大きさや規模を即時に把握し対策方法を検討する必要がある。残置物の大きさや規模を把握する方法としては、本研究で提案する三次元モデルの生成手法が活用できる可能性がある。

本章では、本研究で提案した簡易計測による三次元モデルを用いた二次元図面の補正する手法の活用方法として、実現場において地下埋設以外の地下構造物に適用し、簡易計測による三次元モデルの生成手法の有用性を検証した。



アースアンカー受台コンクリート



既設地下構造物受台鋼材



残置鋼材受根巻コンクリート



既設構造物山留壁（SMW）

図 6-1 地下部に存在する残置物

6.1. 簡易計測による三次元モデルを用いた既存構造物の二次元図面との重ね合せ検証

6.1.1. 検証内容

(1) 検証対象

本章では、対象物を地下埋設物以外の地下構造物である地下連続壁（SMW）の垂直面とした。

(2) 検証場所および目的

検証（撮影）箇所を図 6-2 に示す。図 6-2 の検証箇所は、地下連絡通路工事の覆工板下の立坑内（地表面より 10m 下）で地下鉄への新設地下連絡通路から都市再開発の新築ビルへの接続部である。本検証の目的は、三次元モデルを用いて SMW の凹凸の形状から将来的に撤去する SMW の解体数量を算出することであった。



図 6-2 検証（撮影）箇所

(3) 検証内容

簡易計測による三次元モデルの生成手法の有用性を検証するため地上レーザスキャナ（TLS）での三次元モデルと簡易計測により生成された三次元モデルとを比較し、二次元図面の重ね合わせと解体の数量の比較した。

(4) 検証条件

撮影機材・撮影パターンを表 6-1、静止画の撮影状況を図 6-3、3D TLS の計測状況を図 6-4 に示す。撮影範囲は、新設構造物の地下接続部の 3~4m 四方で、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は、撮影範囲周囲（四隅など）および対象壁面に設置

した。そして、撮影機材・撮影パターン（表 6-1 参照）、静止面の撮影方法（図 6-3 参照）を設定した。三次元モデルの生成には、Pix 4D mapper (Pix4D 社製)を用いた。TLS の計測状況（図 6-4 参照）は、対象箇所の正面方向の 3 箇所から計測した。

静止画および 3D TLS の撮影および計測方法を図 6-5 に示す。図 6-5 の静止面の撮影方向は、地下埋設物の場合はほぼ下向きの撮影となるが、今回の対象物の場合は撮影方向に対してほぼ正面と上向き、下向き方向の撮影になる。

三次元モデルの精度は、TS で測量した標定点・検証点の実測データを正解値とし、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⁸²⁾に準じた±5cm とした。

表 6-1 撮影機材・撮影パターン

No.	種別	機種	モード	画像サイズ	3D position accuracy	枚数
6-1	スマートフォン	iPhoneX	静止画	4032×3024		31秒
6-2	デジタルカメラ	OLYMPUS TG-1 4・5	静止画	1280×960 (1M)		7枚
6-3	3D TLS	FOCUS S350			10m: 4mm	

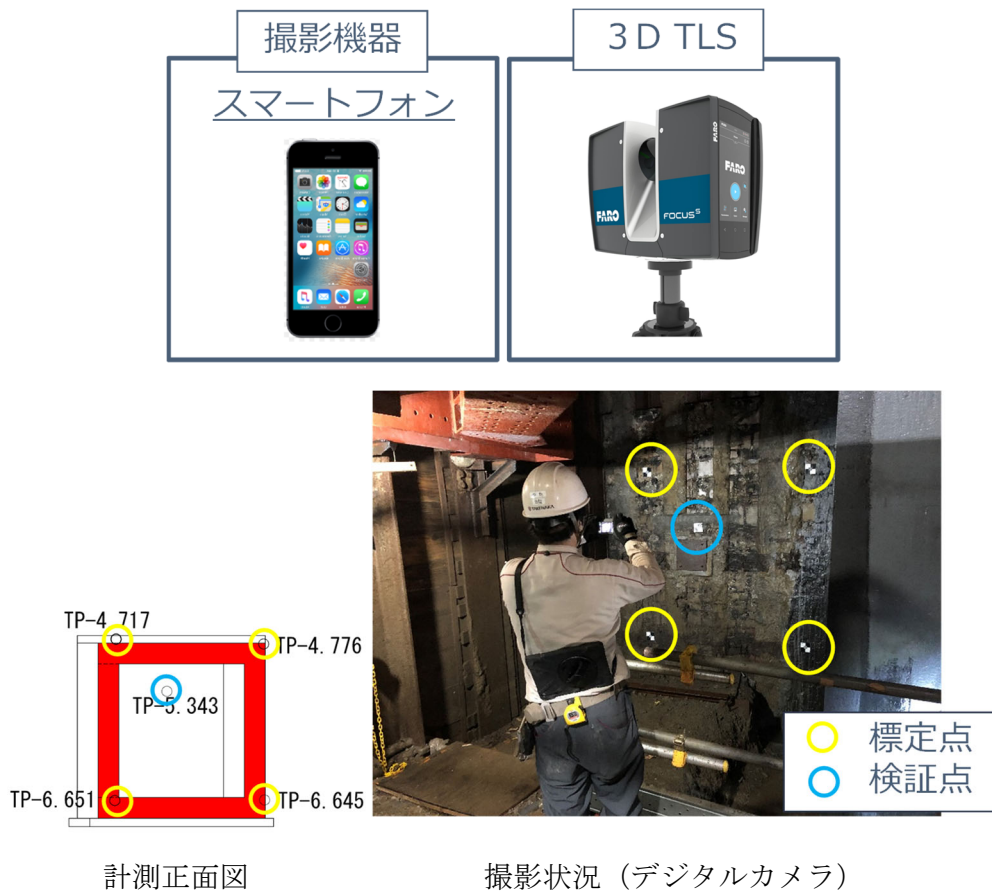


図 6-3 静止面の撮影状況



図 6-4 3D TLS 計測状況

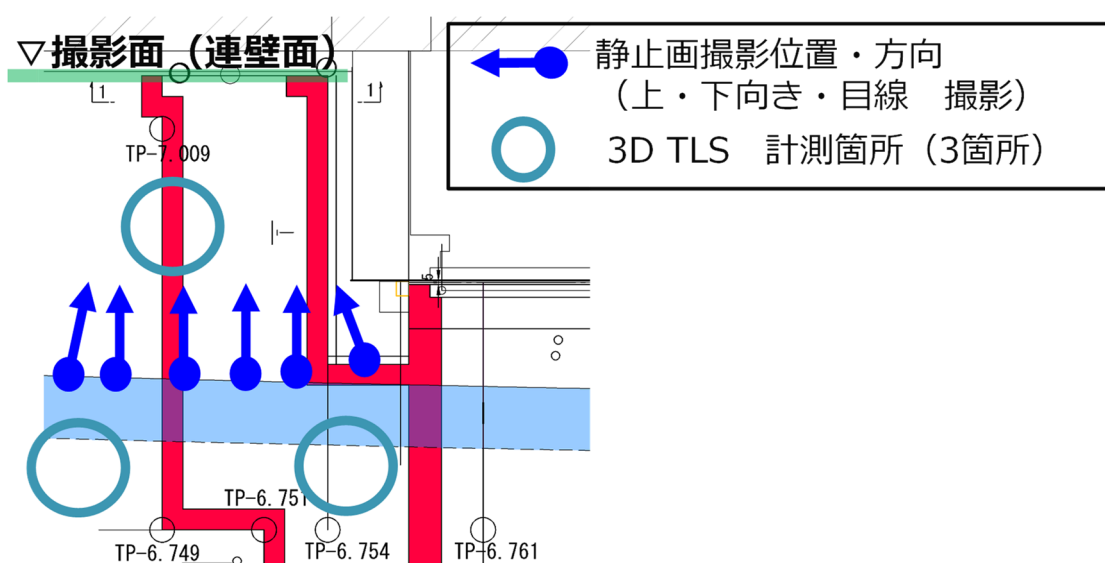


図 6-5 静止画撮影方法および 3D TLS 計測方法 (平面図)

6.1.2. 検証結果

(1) 三次元モデル生成比較

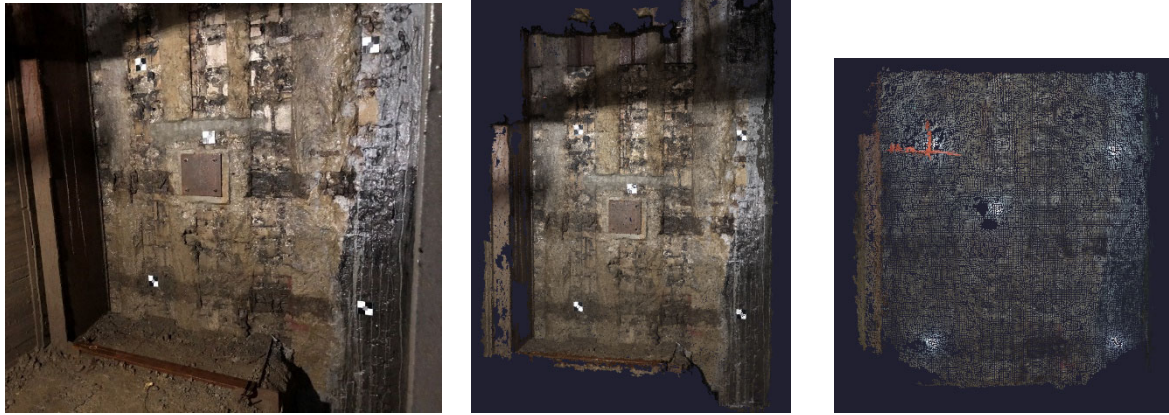
検証箇所での撮影および計測データにより生成した三次元モデルの形状および位置精度の検証結果を以下に示す。撮影および計測データより生成された検証箇所の静止画より生成した三次元モデルの生成状況を図 6-6 と 3D TLS より生成した三次元モデルの生成状況を図 6-7, 実現場での三次元モデルの精度検証結果を表 6-2, 静止画 (No.6-1) と TLS の三次元モデルの任意測点による座標比較結果を表 6-3 に示す。

目視確認の結果, 検証箇所において No.6-2 のデジタルカメラ (画素数 1M 程度) 以外では概ね三次元モデルが再現されており (図 6-6 参照), 図 6-7 では広範囲のデータ取得できていた。

図 6-6 より No.6-2 のデジタルカメラ (画素数 1M 程度) 結果より地下埋設物と同様に三次元モデルの生成条件 (画素数および写真枚数) が不足すると三次元モデルの形

状および二次元図面の補正に影響することがわかった。

表 6-2 より静止面の三次元モデルの精度検証として2ケースとも1mm以内の精度を確保していること, 表 6-3 より静止面と TLS の任意測点の三次元モデルの座標値比較で10mm以内の精度を確保していたことから二次元図面の重ね合わせや撤去数量を算出には適用可能であることがわかった。

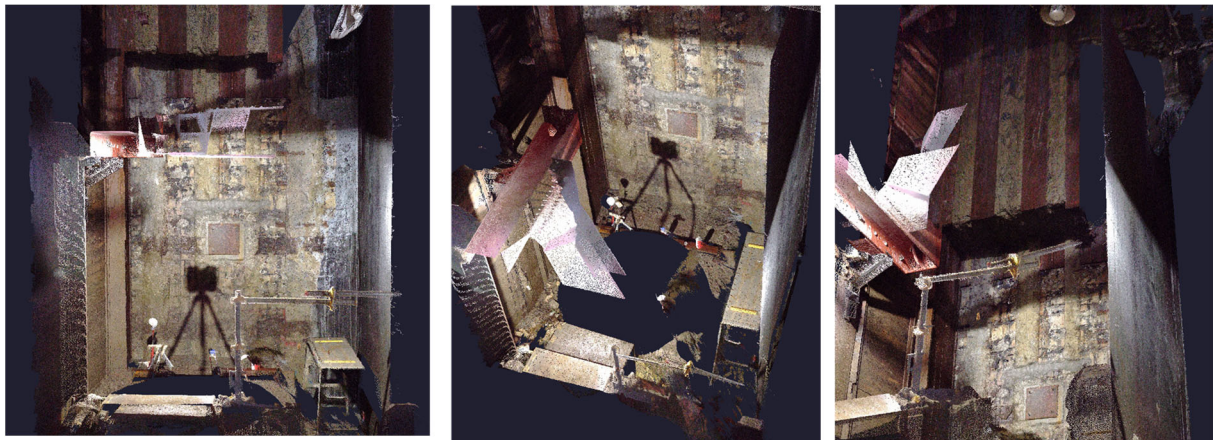


静止画 (写真 No.6-1)

三次元モデル (No.6-1)

三次元モデル (No.6-2)

図 6-6 静止画による三次元モデル生成状況



正面

上から下方向

下から上方向

図 6-7 3D TLS による三次元モデル生成状況

表 6-2 静止画の三次元モデルの精度検証結果

撮影ケース		No. 6-1			No. 6-2		
		X誤差 (mm)	Y誤差 (mm)	Z誤差 (mm)	X誤差 (mm)	Y誤差 (mm)	Z誤差 (mm)
P-1	GCP	-1	1	0	-1	26	6
P-2	GCP	1	-1	0	4	-3	-1
P-3	GCP	0	-1	0	2	0	-2
P-4	GCP	-1	1	-1	-4	-6	4
RMS 誤差		0.7	0.9	0.5	5	13	3
P-5	CHECK POINT	0.7	-1.1	-0.1	0.4	0.7	-0.7

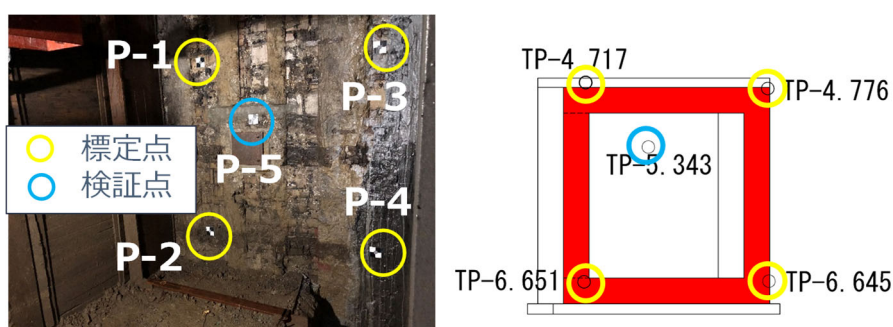
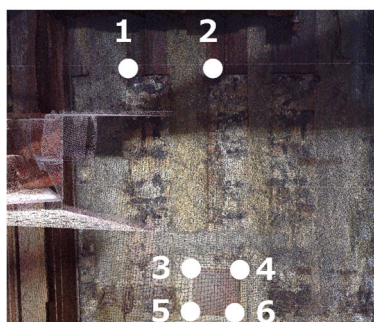


表 6-3 静止画および TLS による三次元モデルの座標値比較結果

測点	① 静止画 (No. 6-1)			② 3D TLS			①-②		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X誤差	Y誤差	Z誤差
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(mm)	(mm)	(mm)
1	0.11	5.519	-4.034	0.103	5.514	-4.031	7	5	3
2	0.707	5.49	-4.027	0.71	5.499	-4.03	-3	-9	-3
3	0.573	5.493	-5.47	0.577	5.49	-5.474	-4	3	-4
4	0.915	5.506	-5.48	0.919	5.504	-5.482	-4	2	-2
5	0.569	5.489	-5.816	0.57	5.486	-5.814	-1	3	2
6	0.915	5.511	-5.823	0.919	5.505	-5.821	-4	6	2



(2) 三次元モデルと二次元図面との重ね合わせ

生成した三次元モデルと二次元図面（断面図）と重ね合わせを比較し、地中連壁壁面凹凸からH鋼表面の体積を比較検証した。なお、平面図および断面図の重ね合わせには点群処理解析ソフト(ReCap Autodesk 社)、三次元CADソフト(AutoCAD Autodesk 社)を使用した。検証は、静止画およびTLSにより生成された三次元モデルと構造物の二次元図面とを重ね合わせ、各断面箇所凹凸を目視で確認した。静止画による三次元モデルと既存二次元図面の重ね合わせ状況を図6-8に示す。また、撤去数量である静止画とTLSにおける凸部の体積比較を表6-4に示す。図6-8により各断面の標定点および検証点位置は、ほぼ合致しており三次元モデルの形状は再現されている。表6-4により凸部の静止画とTLSとの体積差は、ほぼ 0m^3 であったことから静止画と高精度のTLSとの三次元モデル形状は同程度であったことが確認できた。

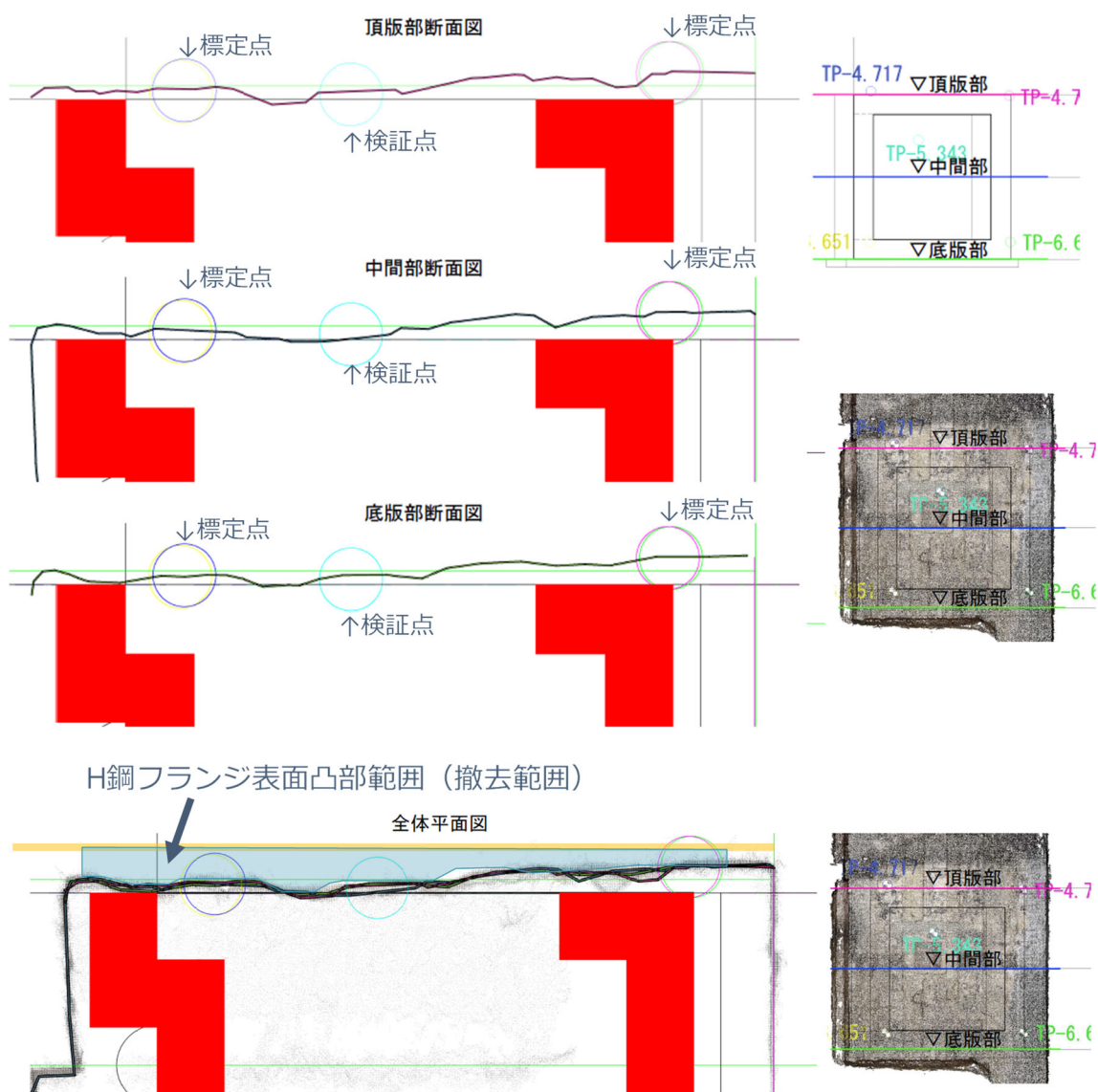


図 6-8 静止画による三次元モデルと構造物の二次元図面の重ね合わせ状況

表 6-4 静止画と TLS における凸部の体積比較

H鋼フランジ表面突部体積 (m ³)		
①静止画 (No. 6-1)	③3D TLS	①-③
0.43	0.43	0
②静止画 (No. 6-2)	③3D TLS	②-③
0.47	0.43	0.04

6.1.3. 考察および課題

今回の検証結果によると、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。また目視の結果および凸部の体積比較結果、モデルの三次元形状も良好であった。また三次元モデルの精度と三次元モデルと二次元図面の重ね合わせ状況から撤去数量を算出するデータとして適用可能である。

デジタルカメラでの静止画は、三次元モデル生成不足（画素数（1M）や撮影枚数が少）より三次元モデルの形状の再現状況は目視の結果、良好ではなかった。また TLS との凸部の体積比較では 10%程度の誤差が生じていた。地下埋設物同様に三次元モデルの生成条件を適用することで三次元モデルの精度を高めることが可能である。

6.2. 結論と課題

本章では、本研究で提案した簡易計測による三次元モデルを用いた二次元図面の補正する手法の活用方法として、実現場において地下埋設以外の地下構造物に適用し、簡易計測による三次元モデルの生成手法の有用性を検証した。まず対象物を地下埋設物以外の地下構造物である地下連続壁（SMW）の垂直面とし、簡易計測による三次元モデルの生成手法の有用性を検証するため地上レーザスキャナ（TLS）での三次元モデルと簡易計測により生成された三次元モデルとを比較し、二次元図面の重ね合わせと解体の数量の比較をする。その結果、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三次元モデルの形状は良好であった。また三次元モデルの精度と三次元モデルと二次元図面の重ね合わせ状況から撤去数量を算出するデータとして適用可能である。

検証結果から広範囲では無く局所的な範囲での構造物や仮設物の出来高や出来形にも提案手法の活用の可能性がある。

7. 結論と今後の課題

7.1. 結論

本研究では、地表面（道路面）より下の部分の上下水道，ガス，電力，通信などの地下埋設物（地下構造物も含む）に着目して，簡易計測による三次元モデルを用いて設計・施工段階で使用される地下埋設物を含む既存の二次元図面を効率的に補正する手法を提案した．そして提案手法である三次元モデルの生成手法を用いて実現場で得られた三次元モデルから既存の二次元図面を効率的に補正する更新手法の有用性の検証結果と考察および今後の展開をとりまとめた．

(1) 簡易計測による三次元モデルを用いた地下埋設物の二次元図面補正手法の提案

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の撮影動画・静止画像を用いて簡易計測による地下埋設物の三次元モデルを生成し，得られた三次元モデルから既存の二次元図面の補正手法を提案した．ケーススタディを通じて，考案手法に則して生成した三次元モデルを目視で形状および位置精度検証した結果，十分な精度を有していることがわかった．次に，三次元モデルと既存の二次元図面との重ね合わせを試行した結果，既存の二次元図面の補正が可能であることから提案手法の有用性が確認できた．さらに，二次元図面の補正に適した三次元データの点群密度および形状を取得するための撮影機器および埋設管の明るさに関する条件を検証し，提案手法を適用した地下埋設物の三次元データの生成を通して，二次元図面の補正に適した三次元データの生成条件を明らかにした．

(2) 簡易計測による地下埋設物の三次元モデルを用いた二次元図面補正システムの開発

既存二次元図面の補正効率化のためのシステムを開発し，開発したシステムを用いた既存二次元図面の補正手法を提案した．具体的には，既存手法の課題であった三次元モデルと既存二次元図面との重ね合わせの手動作業を効率化し，既存の二次元図面を簡易に補正する手法を考案し，同手法に則したシステムを開発した．次に実現場の2現場において複数の撮影者の撮影データにより考案手法に則して生成した三次元モデルの形状確認および位置精度を検証した結果，十分な精度を持っていることがわかった．さらに，実現場データの三次元モデルと開発したシステムを用いて二次元図面との重ね合わせを試行した結果，改良手法の既存二次元図面が効率的に補正可能であり有用性が確認できた．

(3) 簡易計測による地下埋設物の二次元図面更新手法の実証的検証

まず都市土木における二次元図面の補正の従来手法の手順と施工者の実態調査を実施し施工現場における課題を確認し．施工者の若手技術者における残業時間の実態から本研究の提案手法の適用の可能性を整理した．次に考案した地下埋設物の簡易な三次元モデル生成手法を改善し，得られた三次元モデルから既存の二次元図面を効率的に補正する更新手法を提案した．具体的には，実現場において補正効率化のため開発

したシステムを用いて二次元図面の更新手法を試行し、実用化に向け従来手法と考案した更新手法の作業時間とを比較検証した。その結果、実現場の撮影データにより更新手法に則して既存二次元図面の補正は、生成した三次元モデルが十分な精度があり、二次元図面の補正が可能であった。また現場施工管理技術者の職員の残業時間が削減できるツール一助となる可能性があることや図面補正を支援部門の CAD オペレータが代替することでコストが削減できることから提案手法の有用性の確認ができた。

7.2. 本研究が切り開いた新しい展開

本節では、本研究で得た成果が切り開いた展開を論ずる。

(1) 簡易計測による二次元図面補正の省力化

都市土木の地下埋設物の試掘調査では、夜間工事や施工範囲が限定される場合が多い。その中で二次元図面の補正の従来手法では、現場施工管理技術者が現場作業（外業）として地下埋設物の位置や情報を把握するため人力にて基準線からのオフセット測量やスケッチ図の作成などが行われ、内業として試掘調査結果から二次元図面の補正作業が行われ、その作業には手間と時間を要していた。解決策として提案する簡易計測（スマートフォンやデジタルカメラなど）による三次元モデルの生成手法を用いることで都市部の輻輳した地下埋設物でも位置精度の高い三次元モデルの生成を可能にした。また提案手法により施工管理技術者の現場での作業内容の縮減と図面補正の作業の時間短縮ができ、二次元図面の補正の省力化を可能とした。

(2) 地下埋設物の二次元図面補正手法に則したプロトタイプモデルの開発

既存二次元図面の補正では、提案手法を実現化したプロトタイプモデルの開発により、三次元モデルに不慣れな作業でも図面補正に使用する点群の画像化データ（平面・断面）を直感的な操作で出力でき、また出力した画像データは二次元 CAD 上で快適に作業可能な程度のデータサイズであることがわかった。これにより、図面補正に係る作業性の向上と手作業での効率化を可能にした。

(3) 二次元図面更新手法を用いた業務の効率化

開発したシステムを用いて更新手法に則した既存二次元図面の補正では、実現場のデータを用いた従来手法と提案手法との作業時間の比較による有用性の検証結果より現場施工管理技術者と支援部門（内勤部門）とが連携することで現場施工管理技術者の業務の効率化の可能性を確認できた。また試掘工事のような夜間の限られた時間の作業においては、更新手法を活用することで、作業時間や道路規制時間の 15 分から 30 分程度の短縮の可能性も確認できた。

(4) 提案手法を用いた地下埋設物以外の地下構造物への適用

本研究の提案手法の活用として都市土木において地下埋設物以外の地下施設に適用して、簡易撮影機材より生成した三次元モデルと固定レーザスキャナ（TLS）で生成した三次元モデルの形状や精度、二次元図面の重ね合わせ状況や表面体積量を確認し、異なる特性の三次元モデルを比較することで提案手法の活用の可能性を有らかにした。また高精度の三次元モデルから広範囲では無く局所的な範囲や中規模での範囲で構造物や仮設物の出来高や出来形管理、既設構造物への影響を把握するための計測管理、現場施工の安全管理などで提案手法が活用できる。

7.3. 今後の課題

本研究で得られた成果を踏まえて、本節では今後の課題を述べる。

(1) 簡易計測による三次元モデルを用いた二次元図面の補正の自動化

提案手法による地下埋設物の簡易な三次元モデル生成手法を用いて三次元モデルを生成し、提案手法の課題である生成した三次元モデルから二次元図面の補正作業のさらなる手動補正作業を効率化するための解決策として、既存の二次元図面補正手法の自動化アルゴリズムの確立が今後の課題である。具体的には、試掘調査などで得られた簡易計測による写真データと基本情報（標点点・検証点および地下埋設物の種類・大きさ・管種など）を直接クラウド上にアップロードして三次元点群データから三次元モデルを作成し、作成された三次元モデルから既存の二次元図面の補正を自動的に補正ができれば現場職員のさらなる業務効率化や時間短縮、簡素化、簡略化が期待できる。今後は、二次元図面の補正の自動化の実用化に向けたソフト開発に取り組んでいく。

(2) 提案手法の適用の拡大

地下空間モデルを形成する上で、本研究では都市部の地下埋設物に着目したが、活用事例として示した地下連続壁以外の地下構造物の残置物や想定外の地下構造物に対して十分な検証ができなかった。提案手法では、主に浅層部の地下埋設物を対象にしたことから施工時に行われる試掘作業範囲であり、簡易計測データの撮影や水準測量などの作業は道路（地表面）の安定した面での局所的な範囲であった。例えば 6 章で挙げた地下部分の工事における想定外の構造物を対象にした場合は、地下部分は足元が安定しない面が想定される。また簡易な三次元モデルを取得するための簡易計測データの撮影の場合は、地下埋設物では道路面からほぼ下向き撮影であったが、地下部分の地下構造物を対象として場合は、上下および左右（側面）方向からの撮影となることが想定される。これらの課題に対して安定した三次元モデルを生成する撮影方法や三次元モデルの基準となる基準点の設置方法など三次元モデルの生成条件の整理し実現場のデータによる有用性の検証に取り組んでいく。

(3) 地表面と地下部（地下埋設物）の三次元モデルの統合による維持管理手法の開発

今後の展望としては、都市土木の設計・施工および維持管理において安全・安心に都市機能を維持するために近年急速に整備されている地表面（道路）面以上の三次元モデルである地上空間モデルと本研究の提案手法である地表面以下の地下構造物（地下埋設物を含む）の局所的な範囲において簡易な方法により生成された三次元モデルや広範囲で取得した三次元モデルなどの地下空間モデルとを統合することで維持管理分野への活用が期待できる。地表面と地下部（地下埋設物）と重ね合わせを図 7-1 に示す。

図 7-1 は、3D TLS で計測した地表面の道路面および道路付属物と提案手法で考案した

簡易な手法で生成した三次元モデルの地下部分（地下埋設物）とを重ね合わせた状況である。地上および地下空間のモデルを統合による維持管理手法を開発する上で今後の課題としては、次のような課題を抽出した。

- 三次元モデルのデータ形式や座標関係（世界測地系・相対座標（ローカル座標））やスケール（単位）・三次元点群データであれば必要な点密度などが統一されていないことから、地上と地下部の空間モデル統合の実現に向けてデータ共有するための条件などの検討に取り組んでいく。
- 重ね合わせに際して 3D TLS で取得した高密度の点群などは、データ容量が多くなるので汎用性のあるパソコンなどでは操作性が劣ることが懸念される。汎用パソコンでも操作性が向上する手法の検討やソフト開発も必要である。
- 道路管理者や地下埋設物を管理する関係企業では、二次元図面にて管理されていることや二次元図面では把握可能である数値的な関係（各埋設との離隔寸法など）が三次元では基準軸が不明確になり寸法確認できない状況があり、今後も二次元図面の使用は想定される。課題としては、統合した三次元モデルから局所的な範囲ではなく工事エリアなどの中規模な対象範囲を二次元で抽出し、同一の基準点のないデータ同士が簡易に二次元図面（平面図、断面図）と統合することが可能になることで活用場面が広がる可能性がある。
- 統合した地上および地下空間のモデルでは、道路管理者や地下埋設物を管理する関係企業と設計・施工・維持管理に関わる関係者（発注者、設計者、施工者、維持管理従事者など）との連携により業務の効率化や地下埋設物の位置の把握や情報の共有化が期待できる。課題として初期データおよび工事や維持管理での更新データの連携方法が確立していないことが挙げられる。連携情報の内容は、関係者間での必要な情報を整理して効率的な情報交換方法を検討する必要がある。



図 7-1 地表面と地下部の重ね合わせ

(4) 三次元モデルと二次元モデルの適用区分

国土交通省では、新たな社会資本整備を見据えた三次元データを基軸とする建設生産・管理システムを実現するため BIM/CIM の取組を推進している。その中で具体的な例として業務全体を二次元図面から三次元モデルへの移行による業務変革やフロントローディングによって、合意形成の迅速化、業務効率化、品質の向上、生産性の向上などの効果が期待できる三次元モデルで展開する場合と本研究の地下埋設物の図面修正のような局所的な範囲で位置や関係性を明確な寸法（数値）で把握する二次元モデル（二次元図面）を展開する場合が考えられるが、今後想定される業務内容や使用場面および目的により二次元と三次元での取り扱い方や適用区分を提示することが課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 厚生労働省：「働き方改革」実現に向けて，<www.mhlw.go.jp/content/000332869.pdf>，（入手 2020.4.29）
- 2) 厚生労働省：「働き方改革」実現に向けて，参考資料，働き方改革～一億総活躍社会実現に向けて～，<www.mhlw.go.jp/content/000474497.pdf>，（入手 2020.4.29）
- 3) 国土交通省：BIM/CIM 関連，<www.mlit.go.jp/tec/t:ec_tk_000037.html>，（入手 2020.4.24）
- 4) 国土交通省：BIM/CIM 活用ガイドライン（案），2020.
- 5) 一般社団法人 日本建設連合会，公衆災害対策委員会，地下埋設物対策部会，建設三団体安全対策協議会：平成 28 年度中における建設工事に伴う地下埋設物・架空線事故の発生状況，2017.4.
- 6) 国土交通省 社会資本整備審議会・交通政策審議会：地下空間の利活用に関する安全技術の確立について 答申，<<https://www.mlit.go.jp/common/001200765.pdf>>，（入手 2020.9.19）
- 7) Frahm,J.-M., Fite-Georgel,P., Gallup,D., Johnson,T., Raguram,R., Wu,C., Jen,Y-H., Dunn,E., Clipp,B., Lazebnik,S. and Pollefeys, M. : Building Rome on a cloudless day, ECCV10, pp.368-381, 2010.
- 8) 織田 和夫：解説：Structure from Motion (SfM) 第一回 SfM の概要とバンドル調整，写真測量とリモートセンシング，vol55, No,3, 2016.
- 9) 布施 孝志：解説：Structure from Motion (SfM) 第二回 SfM と多視点ステレオ，写真測量とリモートセンシング，vol55, No,4, 2016.
- 10) 中野 一也：解説：Structure from Motion (SfM) 第第三回 SfM による三次元形状復元ソフトウェアについて，写真測量とリモートセンシング，vol55, No,5, 2016.
- 11) 早坂 寿人，大野 裕幸，大塚 力，関谷 洋史，瀧 繁幸：UAV による空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証，日本写真測量学会平成 27 年度年次学術講演会発表論文集，pp.1-4, 2015.
- 12) 北川 悦司，村木 広和，吉永 京平，山岸 潤紀，津村 拓実：UAV 空撮画像における 3 次元モデリング(SfM/MVS) ソフトウェアの形状特性比較に関する研究，土木学会論文集 F3 (土木情報学)，土木学会，Vol.74, No,2, pp.II_143-II_148, 2018.
- 13) 早川 健太郎，黒台 昌弘，西田 信幸，佐々木 剛：3 次元出来形計測を対象とした自動追尾型 TS を用いた UAV の現場実証，土木学会論文集 F3 (土木情報学)，土木学会，Vol.73, No,2, pp.I_380-I_387, 2017.
- 14) 櫻井 淳，田中 成典，中村 健二，窪田 諭，今井 龍一，重高 浩一：UAV の空中写真測量による施工管理のための計測手法の提案，土木学会論文集 F3 (土木情報学)，土木学会，Vol.72, No,2, pp.II_73-II_81, 2017.
- 15) 新名 恭仁，野中 秀樹，小林 裕介，長峰 望，西岡 英俊：多視点画像三次元モデルの土木構造物維持管理への適用に向けた提案と試行結果，土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)，土木学会，Vol.74, No,2, pp.I_19-I_30, 2018.
- 16) 長屋 佑美，菊 雅美：UAV-SfM/MVS 測量における構造物の再現性向上のための最適条件の検討，土木学会論文集 F3 (土木情報学)，土木学会，Vol.76, pp.32-41, 2020.
- 17) 浦田 昇尚，伊達 宏昭，金井 理，後藤 孝行，安田 星季：鋳造品の迅速リバースエンジニアリングに関する研究，精密工学会誌，Vol.83, No.5, pp.474-480, 2017.
- 18) 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)，土木学会，Vol.72, No,2, pp.I_209-I_218, 2016.
- 19) 櫻井 淳，田中 成典，中村 健二，窪田 諭，中原 匡哉，平 謙二：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)，土木学会，Vol.72, No,2, pp.I_219-I_230, 2016.
- 20) 北田 祐平，安室 喜弘，檀 寛成，松下 亮介，西形 達明：SfM と MVS に基づいた現場のモデル化によるレーザスキャン計画の最適化とその運用，土木学会論文集 F3 (土木情報学)，Vol.71, No,2, I_167-I_175, 2015.
- 21) Kawashima K., Kanai S., Date H. : As-built modeling of piping system from terrestrial laser-scanned point clouds using normal-based region growing, *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp.13_26, 2014.
- 22) Masuda H., Niwa T., Tanaka I. and Matsuoka R. : Recon-struction of Polygonal Faces from Large-Scale Point-Clouds

- of Engineering Plants, *Computer-Aided Design and Applications*, Vol.12, No.5, pp.555-563, 2015.
- 23) Chida A. and Masuda H. : Reconstruction of Polygonal Prisms from Point-Clouds of Engineering Plants, *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol.3, No.4, pp.322-329, 2016.
 - 24) Nurunnabi, A, Sadahiro Y. and Roderik, L. : Robust cylinder fitting in three-dimensional point cloud data, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.42-1/W1, pp.63-70, 2017.
 - 25) 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)*, 土木学会, Vol.73, No.2, pp.I_219-I_225, 2017.
 - 26) 塚田 義典, 田中 成典, 窪田 諭, 中村 健二, 岡中 秀騎 : 点群データを用いた橋梁の3次元モデルの生成に関する研究, *知能と情報, 日本知能情報ファジィ学会*, Vol.27, No.5, pp.796-812, 2015.
 - 27) 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)*, 土木学会, Vol.73, No.2, pp.II_1-II_6, 2017.
 - 28) 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)*, 土木学会, Vol.71, No.2, pp.I_106-I_113, 2016.
 - 29) 江守 央, 佐田 達典, 今村 一紀, 小川 達也, 岩上 弘明 : 手押し台車型 MMS を用いた歩道空間の計測に関する実験, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.71, No.2, pp.II_86-II_91, 2015.
 - 30) 奈良部 昌紀, 佐田 達典, 江守 央 : 屋内型 MMS を用いた世界測地系に基づく点群データによる屋内空間の3次元モデル作成, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.74, No.2, pp.II_48-II_54, 2018.
 - 31) 国土交通省 : ICT 導入協議会 (第 6 回) 資料 3-1 H30 年度より開始する事項, 2018.3.6.
 - 32) 一井 康二, 玉木 徹, 藤井 堅 : 「写真画像から形状復元した3次元点群データによる構造物の変状把握」報告書, (一財)日本建設情報総合センター研究助成事業, 2014.
 - 33) 内堀 大輔, 高橋 宏行, 田中 航, 望月 章志, 川端 一嘉 : デジタルカメラ画像を用いたマンホール鉄蓋の段差と摩耗の点検方法, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.72, No.1, pp.1-10, 2016.
 - 34) 井上 裕貴, 安室 喜弘, 檀 寛成, 小林 晃 : 三次元画像計測による点群データからのパイプラインの変形量の取得, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.71, No.2, pp.I_72-I_78, 2015.
 - 35) 河村 圭, 児玉 聖治, 村上 慧季, 塩崎 正人, 中村 秀明 : コンクリート壁面画像からのひび割れ抽出処理における抽出点指示手法, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.72, No.2, pp.I_93-I_102, 2016.
 - 36) 廣田 彰久, 西山 哲, 菊地 輝行 : 構造物モニタリングのための画像計測法の研究, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.72, No.2, pp.I_103-I_111, 2016.
 - 37) 中庭 和秀, 矢吹 信喜, 河崎 翔太, 西 乃輔 : トータルステーションとデジタル画像を組み合わせたひび割れ計測手法の開発, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.73, No.2, pp.I_173-I_189, 2017.
 - 38) 塚田 義典, 窪田 諭, 田中 成典, 梅原 喜政 : モバイルセンシングユニットを用いた3次元計測結果と SLAM による高精度化に関する研究, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.74, No.2, pp.II_110-II_117, 2018.
 - 39) 窪田 諭, 今井 龍一, 中村 健二, 櫻井 淳, 田中 成典 : 複数計測機器の点群データを基とする3次元地形データの表示と作成に関する研究, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.74, No.2, pp.II_99-II_109, 2018.
 - 40) 田中 成典, 窪田 諭, 今井 龍一, 中村 健二, 山本 雄平, 塚田 義典, 谷口 寿俊, 中原 匡哉 : 土工の施工管理における UAV 搭載型レーザスキャナによる計測方法と計測誤差に関する研究, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.74, No.2, pp.II_125-II_135, 2018.
 - 41) 近藤 弘嗣, 森川 博邦, 藤島 崇, 椎葉 祐士 : i-Construction における UAV を用いた土工出来形管理の基準類の策定及びカイゼン, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, Vol.73, No.2, pp.I_74-I_82, 2017.
 - 42) 山岡 大亮, 青山 憲明, 川野 浩平, 重高 浩一, 関谷 浩孝 : 維持管理での活用を目的とした橋梁の CIM モデル作成コストの検証, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.72, No.2, pp.I_21-I_28, 2016.
 - 43) 神崎 恵三 : 建設生産システムへの3次元モデルの活用計画・施工・維持管理への活用事例, *土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)*, 土木学会, Vol.73, No.4, pp.I_55-I_63, 2017.
 - 44) 永富 大亮, 藤澤 泰雄, 鷺見 英吾, 竹重 和馬 : 三次元モデルを利用した横断歩道橋の落下防止設計法の検討, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, 土木学会, Vol.71, No.2, pp.I_56-I_63, 2015.

- 45) 藤田 陽一, 星野 裕司, 小林 一郎, 水野 純生: 複数の既存データを併用した河川管理 CIM モデルの一考察, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.71, No.2, pp.I_79-I_86, 2015.
- 46) 宇津木 慎司, 中谷 匡志, 佐々木 照夫: 地質情報 CIM 管理システムの構築および施工現場への適用, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.72, No.1, pp._24-31, 2016.
- 47) 杉浦 伸哉, 後藤 直美: 紀勢線見草トンネル工事における施工 CIM から維持管理 CIM への取組み, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), 土木学会, Vol.71, No.4, pp.I_227-I_233, 2015.
- 48) 宮武 一郎, 田村 利晶, 盛 伸行, 岡井 春樹, 高岸 智紘: CIM を適用した築堤事業の施工段階における 3 次元モデルの作成・修正の支援に関する一考察, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), 土木学会, Vol.72, No.4, pp.I_145-I_154, 2016.
- 49) 宮武 一郎, 岡崎 仁司, 塚原 大輔, 栗山 卓也, 松田 寛志: 3 次元モデルを活用する堤防設計に関する一考察, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.72, No.2, pp.I_42-I_51, 2016.
- 50) 鈴木 紗苗, 宮森 保紀, 齊藤 剛彦, 山崎 智之, ムンフジャルガル ダンビーバルジル, 三上 修一: 鋼構造部材の 3 次元点群モデル構築と FEM データへの自動変換に関する検討, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.75, No.2, pp. I_141-I_149, 2019.
- 51) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究センター 社会資本情報基盤研究室: CIMモデル作成仕様 【検討案】 <道路編>, 2016,
< http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/yoryokijun/specification_road_cim_H28.pdf>, (入手 2020.9.6).
- 52) 榎谷裕輝, 三浦孝智, 今泉直也, 豊田貞光: ICT 技術を活用した地下鉄トンネル全般検査とその結果, 土木学会【一般投稿論文】_地下空間シンポジウム論文・報告書第 22 巻, A1-2_pp.11-15, 2017.
- 53) 小林 優一, 水野 純生, 小林 一郎, 緒方 正剛: 河川管理 CIM の基本フレームにおける Excel ベースのデータ管理に関する一提案, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), 土木学会, Vol.75, No.2, pp.I_31-I_40, 2019.
- 54) 保田 敬一, 趙 子健, 小西 英之, 山崎 元也: 点群データを用いた道路景観評価用画像の修正に関する一考察, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.76, pp.1-17, 2020.
- 55) 溝口 知広, 家村 享明, 藏重 裕俊, 水野 剣一, 谷口 修: 栈橋の維持管理を支援するテキスト付き 3D 簡略モデルの自動構築手法, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.75, No.2, pp.I_87-93, 2019.
- 56) 内山 庄一郎, 井上 公, 鈴木 比奈子: SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究, 防災科学技術研究所研究報告, 81, pp.37-60, 2014.
- 57) 櫻井 淳, 中村 健二, 田中 成典: 平常時と災害時における UAV 写真測量の解析パラメータの決定とその適用に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.73, No.2, pp.I_268-I_278, 2017.
- 58) Maarten Bassier, Christophe Sterkens, Maarten Vergauwen and Bjorn Van Genechten, Exploiting compensators for 3D AS-BUILT surveying with terrestrial laser scanning, *Proceedings of ICCBEI & CCACHE 2017*, pp.280-283, 2017.
- 59) Yeritza Perez-Perez, Mani Golparvar-Fard and Khaled El-Rayes, 3D solid geometric modeling of the built environment via semantically segmented point clouds, *Proceedings of ICCBEI & CCACHE 2017*, pp.284-287, 2017.
- 60) Eisuke Wakisaka, Satoshi Kanai and Hiroaki Date, optimum laser scan planning for AS-BUILT 3D modeling of hvac system with DIFFICULT-TO-MEASURE regions, *Proceedings of ICCBEI & CCACHE 2017*, pp.288-291, 2017.
- 61) Qian Wang, Jack C. P. Cheng and Hoon Sohn, Automatic dimensional quality assessment of rebars on reinforced precast concrete elements using laser scan data, *Proceedings of ICCBEI & CCACHE 2017*, pp.292-295, 2017.
- 62) 太田 耕介, 江守 央, 佐田 達典: MMS を用いた 3 次元点群データにおけるサイン評価への適応可能性の検討, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.74, No.2, pp.I_29-I_37, 2018.
- 63) 山本 耕平, 矢尾板 啓, 矢吹 信喜: 2 台のレール直上レーザスキャナを用いた鉄道建築限界モデル作成手法に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.74, No.2, pp.I_70-I_81, 2018.
- 64) Elena Ridolfi, Giulia Buffi, Sara Venturi and Piergiorgio Manciola, Accuracy Analysis of a Dam Model from Drone Surveys, *Sensors*, Vol.17(8), 1777, 2017.
- 65) Pepe M., Costantino D., Crocetto N. and Restuccia Garofalo A., 3D modeling of roman brige by the integration of terrestrial and UAV photogrammetric survey for structural analysis purpose, *6th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications*, pp.249-255, 2019.
- 66) F.Carraro, M. Monego, C. Callegaro, A. Mazzariol, M. Perticarini, A. Menin, V. Achilli, J. Bonetto and A. Giordano,

- The 3D survey of the roman brige of San Lorenzo in Padova(ITALY), A comparison between SfM and TLS methodologies applied to the arch structure, *27th CIPA International Symposium* , pp.255-262, 2019.
- 67) Yue Pan , Yiqing Dong , DaleiWang, Airong Chen and Zhen Ye, Three-Dimensional Reconstruction of Structural Surface Model of Heritage Bridges Using UAV-Based Photogrammetric Point Clouds, *Remote Sens*, 1204, 2019.
 - 68) Cosmin Popescu, Björn Täljsten, Thomas Blanksvärd and Lennart Elfgrén, 3D reconstruction of existing concrete bridges using optical methods, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.15, No.7, pp.912-924, 2019.
 - 69) Xujie Zhang, Pengcheng Zhao, Qingwu Hu, Hean Wang, Mingyao Ai and Jiayuan Li, A 3D Reconstruction Pipeline of Urban Drainage Pipes Based on Multiview Image Matching Using Low-Cost Panoramic Video Cameras, *Water*, Vol.11, 2101, 2019.
 - 70) 久保田 誠, 柴中 雄仁, 金井 和哉, 大森 高樹: 東京メトロの地下鉄駅改修計画・設計における点群データによる BIM モデルの構築と活用, 土木学会【一般投稿論文】, 地下空間シンポジウム論文・報告書.第22 卷, A1-1_pp.7-10.
 - 71) 中村 栄治, 山本 義幸, 成 澤守, 大森 高樹: 地下街の 3 次元レーザ計測と点群データの利活用, 土木学会【一般投稿論文】, 地下空間シンポジウム論文・報告書.第22 卷, A2-3_53-58, 2017.
 - 72) 廣瀬 詢, 安室 喜弘, 檀 寛成, 窪田 諭, 尾崎 平: レーザスキャンデータを用いたマーカレス AR による地下空間浸水予測の可視化, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.73, No.2, pp.I_365-I_371, 2017.
 - 73) 中村 健二, 寺口 敏生, 梅原 喜政, 田中 成典: 完成平面図に基づいた点群データの地物抽出技術に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.73, No.2, pp.I_424-I_432, 2017.
 - 74) 中村 健二, 塚田 義典, 田中 成典, 梅原 喜政, 中畑 光貴: 完成平面図に基づいた点群データの地物抽出技術の高精度化に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.75, No.2, pp. I_160-I_169, 2019.
 - 75) 姜 文淵, 山本 雄平, 中村 健二, 田中 成典: MMS を用いた道路中心線形の自動生成技術の実証研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.73, No.2, pp.I_327-I_337, 2017.
 - 76) 田中 成典, 北川 悦司, 姜 文淵, 安彦 智史, 川野 浩平: 道路橋上部工の維持管理のための 3 次元現況図の自動生成に関する研究, 土木学会論文集 F3 集, VOL.68, No.2, pp.I_181-I_189, 2012.
 - 77) 姜 文淵, 田中 成典: 高架道路橋上部工の維持管理のための SXF 図面の自動生成に関する研究, 土木学会論文集 F3 集, VOL.70, No.2, pp.I_319-I_327, 2014.
 - 78) 田中 成典, 中村 健二, 山本 雄平, 今井 龍一, 窪田 諭, 姜 文淵: MMS 点群を用いた高架道路橋の線形の自動生成に関する研究, 知能と情報, 知能情報ファジイ学会, VOL.28, No.5, pp.826-845, 2016.
 - 79) 田中 成典, 今井 龍一, 中村 健二, 窪田 諭, 梅原 喜政: LP データと過年度の河川定期横断測量成果を用いた横断図生成手法に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.70, No.2, pp.I_283-I_292, 2014.
 - 80) 久保寺 貴彦, 那須 充, 草野 克己, 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), 土木学会, Vol.71, No1, pp. 30-42, 2015.
 - 81) 国土交通省: UAV を用いた公共測量マニュアル (案), 2017.
 - 82) 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.
 - 83) 国土交通省 北陸地方整備局: 基準・要領・ガイドライン, 良くわかる設計と工事の図面, <www.hrr.mlit.go.jp/gijyutu/yokuwakaru/sekkei-kouji-zumen_H2906_v2.pdf>, (入手 2020.4.29)

業績

学術論文（査読有）

- ・岡本 健, 今井 龍一, 新名 恭仁, 加古川 尚: 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研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.74, No.2, pp.I_59-I_69, 2018.
 - ・岡本 健, 今井 龍一: 簡易計測による三次元モデルを用いた地下埋設物の二次元図面更新手法の実証的研究, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), 土木学会, Vol.77, 2020. (掲載予定)
- 【2020年12月 建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会 発表済】

国際会議

- ・T.Okamoto, R.Imai, Y.Niina : Consideration for Supporting Creation of 3-D model of Underground Structure, *CECAR8*, 2019.

学術論文（査読無）

- ・岡本 健, 新名 恭仁, 高橋 恭子, 今井 龍一: 簡易計測データを元にした地下埋設物の三次元モデルの精度検証, 全国大会年次学術講演会, 土木学会, Vol.73, VI-638, 2018.
- ・岡本 健, 新名 恭仁, 高橋 恭子, 今井 龍一: 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, 土木情報学シンポジウム講演集, 土木学会, Vol.43, No.47, pp.185-188, 2018.
- ・岡本 健, 今井 龍一, 新名 恭仁: 簡易三次元モデルを用いた地下埋設物の二次元図面補正, 土木情報学シンポジウム講演集, 土木学会, Vol.44, No.74, pp.293-296, 2019.
- ・岡本 健, 今井 龍一, 新名 恭仁: 簡易計測による地下埋設物の三次元モデルを用いた二次元図面補正システムの開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.75, No.2, pp. II_43-II_52, 2019.
- ・石橋 拓海, 今井 龍一, 岡本 健: 地下埋設物の三次元モデル及び二次元図面の重ね合わせ手法に関する一考察, 全国大会年次学術講演集, 土木学会, Vol.75, VI-252, 2020.

2021年1月27日時点

謝辞

本研究を遂行するにあたり、法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科今井龍一教授には、研究テーマの模索時期から懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました。先生の温かく時には厳しいご指導がなければ論文を完成させることはできませんでした。心より深甚なる感謝の意を表します。

東京都市大学 建築都市デザイン学部 都市工学科 皆川勝教授、五艘隆志准教授、秋山祐樹准教授ならびに株式会社竹中土木 技術・生産本部本部長 森田英仁様、技術・設計部長 武智修様には、貴重なご助言を賜り、博士論文の完成度を高めることができました。心より深く御礼申し上げます。

東京都市大学卒業生 加古川尚様、石橋拓海様および東京都市大学大学院 松浦弦三郎様には簡易計測による三次元モデル生成の検証・分析に多大なご協力をいただきいただきました。深く感謝いたします。

東京都市大学大学院博士後期課程への進学を促していただきました、株式会社竹中土木 技術・設計部 技術グループ部長 安藤慎一郎様、誠にありがとうございました。

アジア航測株式会社 松井晋様、新名恭仁様、森貴章様には、研究テーマの模索時期から討議に参加していただき、提案手法の現場実証実験から地下埋設物の二次元図面補正補助ツールのプロトタイプの開発でご協力いただきました。株式会社竹中土木作業所の関係者の皆様には、本研究の現場検証にご協力いただき、深く感謝いたします。

私一人では博士論文を完成させることは到底できませんでした。本研究に関与していただいた皆様のご指導ご鞭撻を賜ることができたため、本論文を完成することができました。心より深甚なる感謝の意を表する次第です。

最後に勉学への意欲に対して深く理解を示してくださり、日々の生活を支え、私に活力を与えてくれた妻 友美と長男 遼大、長女 心寧には心から感謝いたします。

2021年3月