The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	建築工事における点群データを利用した出来形計測に関する研究
Author(s)	池田, 雄一
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92959
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

建築工事における点群データを利用した出来形計測に関する研究

池　田　雄　一

２０２３年　６月

大阪大学大学院工学研究科

目　　次

第 1 章　序論…… 1
1.1　研究の背景と目的……1
1.1.1　建設業を巡る状況とその課題……1
1.1.2　建築工事の施工管理業務の現状とその課題……1
1.1.3　建築工事における BIM の普及……3
1.1.4　建築工事における点群データの利用に関する問題点……4
1.1.5　点群データを有効活用する一方策……5
1.1.6　研究の目的……6
1.2　論文の構成……8
第 2 章　点群データの利用に関する既往の研究……11
2.1　点群データの取得方法…… 11
2.2　点群データの利用・分析方法の分類…… 13
2.3　点群データを利用した各種検知や計測に関する研究…… 14
2.4　点群データを利用した数量計測に関する研究…… 15
2.5　本研究の新規性…… 16
2.5.1　杭芯計測に関する研究…… 16
2.5.2　耐火被覆工事のロボット施工における目標厚さの設定に関する研究…… 17
第 3 章　点群データを利用した杭芯計測手法……19
3.1　従来の杭芯計測と本章の概要…… 19
3.1.1　従来の杭芯計測…… 19
3.1.2　本章の概要…… 20
3.2　提案した計測手法…… 21
3.2.1　手動計測手法…… 21
3.2.2　自動計測手法…… 22
3.3　杭芯計測実験…… 24
3.3.1　対象工事の概要…… 24
3.3.2　対象エリアの点群データの取得…… 24
3.4　実験結果…… 29
3.4.1　手動計測の結果…… 29
3.4.2　自動計測の結果…… 30
3.5　考察…… 34

3.5.1　実際の建築工事での利用について…… 34
3.5.2　マーカー等を利用した杭芯の計測精度の向上策…… 34
3.5.3　SfM ソフトウェアで生成した点群データの計測精度…… 35
3.5.4　点群データの取得方法…… 35
3.5.5　生産性向上効果…… 35
3.6　まとめ…… 36
第 4 章　点群データを利用した耐火被覆工事のロボット施工における目標厚さの設定手法……37
4.1　従来の耐火被覆吹付け厚さの計測管理手法と本章の概要…… 37
4.1.1　従来の耐火被覆吹付け厚さの計測管理手法…… 37
4.1.2　本章の概要…… 39
4.2　提案した耐火被覆吹付け厚さの計測管理手法…… 40
4.2.1　点群データの取得方法…… 40
4.2.2　提案した自動計測手法…… 40
4.3　耐火被覆吹付けロボットの開発…… 43
4.3.1　耐火被覆吹付けロボットの開発の背景…… 43
4.3.2　耐火被覆吹付けロボットの開発…… 43
4.4　耐火被覆吹付けロボットの吹付け品質…… 47
4.4.1　ロボットの制御と吹付け厚さの調整…… 47
4.4.2　ロボットの吹付け品質の確認…… 47
4.4.3　自動計測と手動計測の相違について…… 49
4.5　技能工の吹付け厚さの分析とロボット施工の目標厚さの設定…… 51
4.5.1　技能工の吹付け厚さの分析…… 51
4.5.2　ロボット施工の目標吹付け厚さの設定の諸条件…… 53
4.5.3　ロボット施工の目標吹付け厚さの設定…… 54
4.6　ロボットによる吹付け施工とその結果…… 56
4.7　考察…… 58
4.7.1　生産性とデータの即時性の比較…… 58
4.7.2　目標設定に標準偏差 2σを採用した理由…… 58
4.7.3　吹付け後の表面押さえについて…… 58
4.8　まとめ…… 60
第 5 章　結論……61
5.1　本論文のまとめ…… 61
5.2　今後の課題と展開…… 63
参考文献……65
謝辞……73

第 1 章　序論

1.1　研究の背景と目的

1.1.1　建設業を巡る状況とその課題

国土交通省が発表した 1976 年（昭和 51 年）度から 2021 年（令和 3 年）度までの建設投資，建設許可業者数および建設就業者数の推移において，建設投資額が建設就業者数を上回った年度は相対的に工事量が多く，繁忙であることを示している。過去にさかのぼると，1987 年から 1999 年は工事量が多かったバブル前後の時期である。次に，2015 年から 2021 年も同様に工事量が多い状況であることがわかる[1)]。また，2021 年度の建設投資のうち，公共工事／民間工事および土木／建築工事の割合については，土木工事の割合が 38.7%，建築工事の割合が 61.3%となっており，建築工事の繁忙がより顕著であることがわかる。ここ最近であっても建設投資額は大きく変動していない。一方，高齢の就業者の割合が非常に高い建設業では，今後，就業者数が減少する可能性が高いため,工事量が多い状況は 2023 年度の現在も続いていると推察できる。

工事量が多い状況では，建設労働者および建設会社の施工管理要員の一人あたりの施工消化高が高いレベルにある。このような状況下では，施工を効率良く消化するための方策として，生産性の向上に資する技術の開発が求められ，国土交通省を始めとする関係諸機関がそれらの取組みを推進している。

こうした状況下において，DX（Digital Transformation：デジタル変革）化の推進により，生産性の向上を図る動きが出てきた[2)]。最も大きな動きが，国土交通省が提唱した i-Construction の取組みであり，土木工事では，対象の工種が年々増えて行っている。一方，建築工事は民間工事が主であり，DX 化の取組みは施工を請け負った会社が個社ごとに対応する場合が多く，一時的になりがちである。さらに，働き方改革により建設業界は，2024 年度から残業時間を大幅に短縮しなければならない状況にある。こうした状況に対応するため，建設各社は，自社の施工管理業務の生産性を向上させる取組みをすでに開始している。そこで，本研究では,施工管理業務の生産性向上を図るため,施工管理業務の DX 化に焦点を充てることとし，次項では，施工管理業務の DX 化の動きについてまとめる。

1.1.2　建築工事の施工管理業務の現状とその課題

建築工事の施工管理業務では，施工進捗の把握および測定や撮影による出来形計測を求めら

れることが多い。施工進捗の把握は工程管理の一例であり，測定や撮影による出来形計測は品質管理の一例である。施工管理の分野においても働き方改革に対応するため，旧来の施工管理手法に変わり，DX 化の動きが徐々に増え始めている。例えば，施工進捗を自動的に把握，または，記録する主な手段として印字したコード類を利用する手法[3]や AI を利用した画像認識などの手法[4]などの取組みがある。コード類のうち，2 次元コードを利用した鉄骨工事向けの工程管理システム[5]の一例を図 1.1 に示す。当該システムは，鉄骨部材等に貼付された 2 次元コードを管理したい工程（ここでは，鉄骨建方）が終了するごとに読取り，その進捗を専用ソフトウェア上の BIM（Building Information Modeling）データに終了／未了を色分け表示するシステムである。

一方，出来形を計測する主な手段は，測量器を利用した計測，手測りを始めとする簡易測量および写真撮影である。測量器を利用した計測の代表例が鉄骨建入れ精度の計測である[6]。その一例を図 1.2 に示す。同図は，あらかじめ測定箇所に測量用の反射シートを貼り付け，TS（3 次元測量器：Total Station）により現場座標系で計測し，建入れ精度を確認している状況である。また，簡易測量および写真撮影の代表例が配筋検査である[7),8]。配筋検査写真の一例を図 1.3 に示す。同図では，配筋の適正な箇所に検測ロッドを配置し，写真上でも配筋ピッチ等を確認できるようにしている。しかし，これらの出来形計測では，位置情報や正確な寸法情報が欠落する場合があり，出来形計測を正確かつ効率良く行うためには不十分なことが多い。また，これらの出来形計測は DX 化が進んでいるとは言えない。すなわち，BIM データの利用や連携はしていない場合が多い。

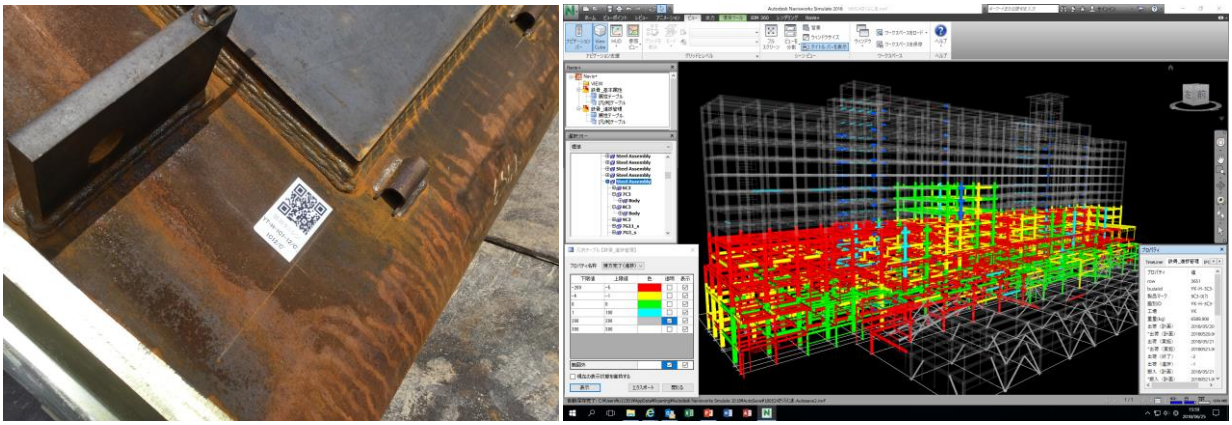


図 1.1　2 次元コードを利用した工程管理システムの例

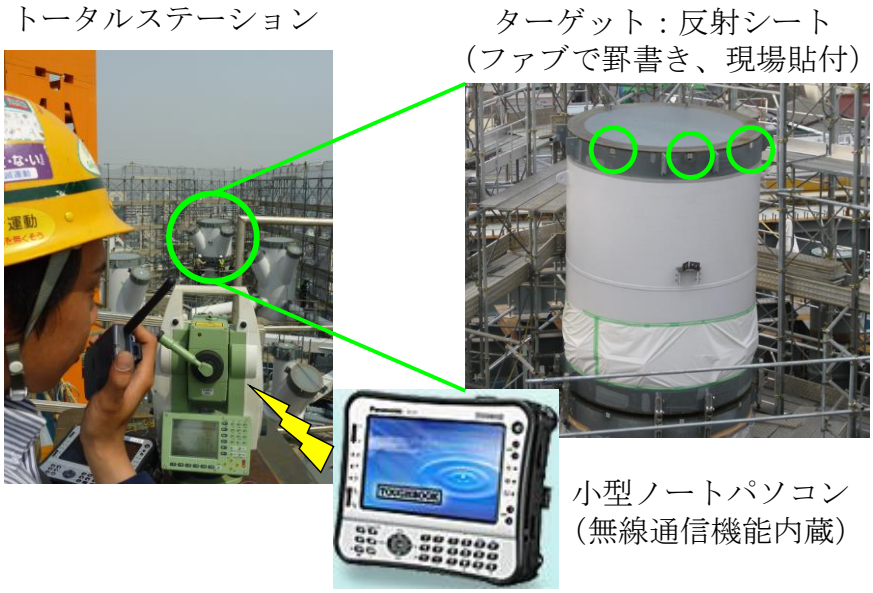


図 1.2　鉄骨建入れ精度の計測の例

図 1.3　配筋検査写真の例

1.1.3　建築工事における BIM の普及

建築工事において，BIM の利活用が急速に増加している。BIM データでは，各部材がオブジェクト指向のソリッドモデルとして表現され，幾何学形状のみならず属性情報を持ち，材料，部位，重量，規格など多くの有益な情報を付与できるからである[9), 10)]。例えば，ドアの場合，ドアの寸法や重量の他，関連する工事の施工数量に関する情報も付与される。

1.1.4　建築工事における点群データの利用に関する問題点

近年，建設工事では，土木工事を中心に点群データを活用する事例が増えてきている。写真は物体の色情報と相対的な位置情報・寸法情報しか持たないが，点群データは物体の色・位置・寸法情報のすべてを持っている。したがって，出来形計測業務において，点群データは写真より有効活用できる可能性が高いと考えられる。しかし，その取得手間や費用，データ容量に起因する制約のため，土木工事での活用例は増えている[11]が，建築工事での活用例はそう多くない。都市空間で行う土木工事では，周辺に既存インフラが多数存在する場合が多い。一方，地方で行う土木工事では，元々ある自然環境に手を加えることが多い。したがって，既存インフラや自然環境を把握しながら，工事を進める必要がある。周辺環境の点群データを取得し，CIM（Construction Information Modeling）データと比較することで，干渉チェックや施工数量を把握することができることから，点群データの活用例が増えていると考えられる。

一方，建築工事では，改修工事に対して新築工事の割合が高く，既存インフラや自然環境を把握しながら施工する状況が少ない。新築工事ではすべてが新築部材となるため，BIM データが準備されていれば，BIM ソフトウェア上で各種の干渉チェックが可能である。改修工事の場合，既存建屋などの現況把握が必要であるが，構造躯体は仕上げ材に隠れている，配管類が入り乱れている，などの理由から容易に点群データを取得しにくい環境にある。また，点群データを利用した現況把握の費用が工事費に組み込まれておらず，実施できない場合が多い。こうしたことから，建築工事では，点群データの活用が増えて行かない状況にある。

また，点群データは BIM・CIM ソフトウェア上では一まとまりで表示されることが多く，大量にある各点は互いに何の関係性も持たない。BIM ソフトウェア上での点群データを図 1.4 に示す。同図は，Autodesk 社の Navisworks Manage 2019 で表示した例である。点群データを開いて未選択の状態では，カラーの点群データが表示されているが，点群データを選択すると一様に青色に変わり，属性情報を確認すると一体のものとして扱われていることがわかる。

こうした状況から，国土交通省は点群データについて，計測箇所をピンポイントで計測できない，取得データの密度にばらつきがある，との留意点を示した上で出来形検査要領をまとめている[12]。そこで，点群データに適切な情報処理を施し，分割，または，適切な情報を付与することによって，施工進捗の把握や出来形検査をはじめとする施工管理業務において BIM と同等に扱いやすくなり，さらに有効活用できる可能性が高まると考えられる。

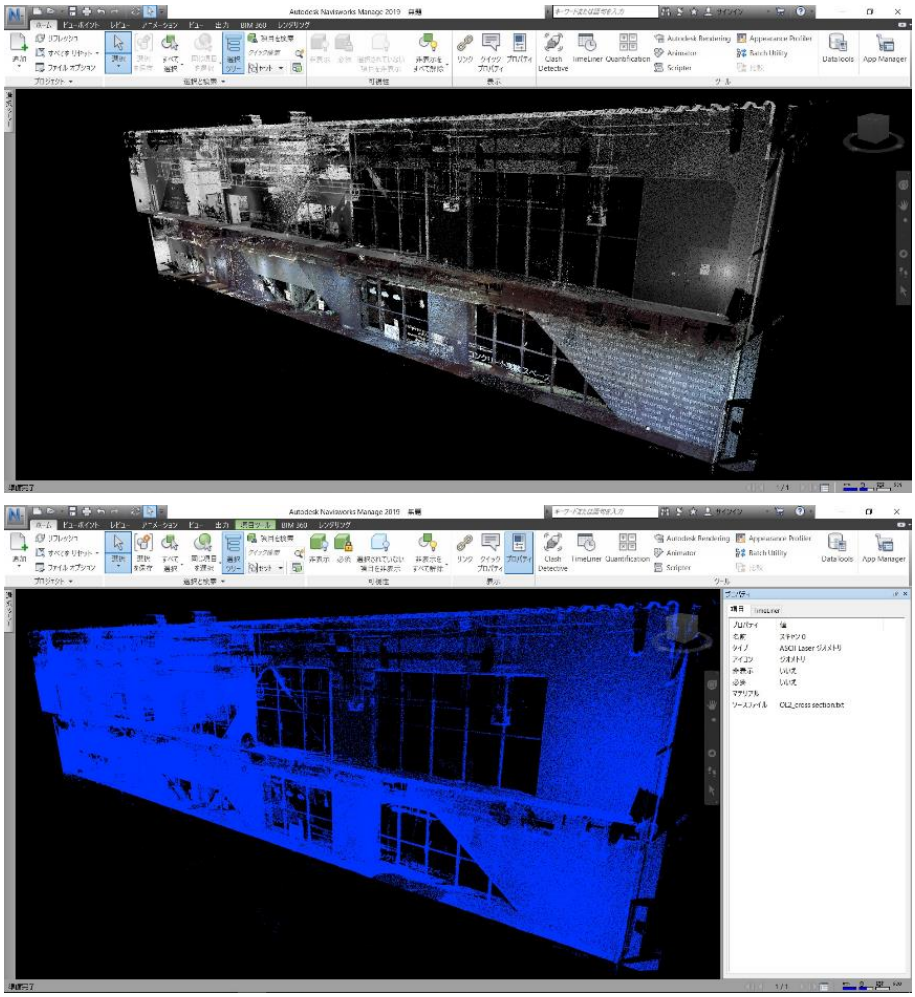


図 1.4　BIM ソフトウェア上での点群データ
（上：未選択状態，下：選択状態）

1.1.5　点群データを有効活用するための一方策

本項では，BIM ソフトウェア上で一体と表示される点群データを少しでも有効に活用する場合の一方策について検討する。例えば，点群データを意味のある内容で分割・区分し，それらに適切な情報を付与することで，現状より扱いやすくなると考えられる。その一例を図 1.5 に示す。同図は，社内施設で取得した点群データを柱，梁，床，壁などの部位ごとに区分けした一例である。区分けとして，部位ごとの点群データにファイルを分割することが考えられるが，点群データの配列を通常の（x，y，z，R，G，B）から（x，y，z，R，G，B，i）（i = 0，1，2，…：部位を表す id 番号）とすることで，一つのファイルに収めることができる。

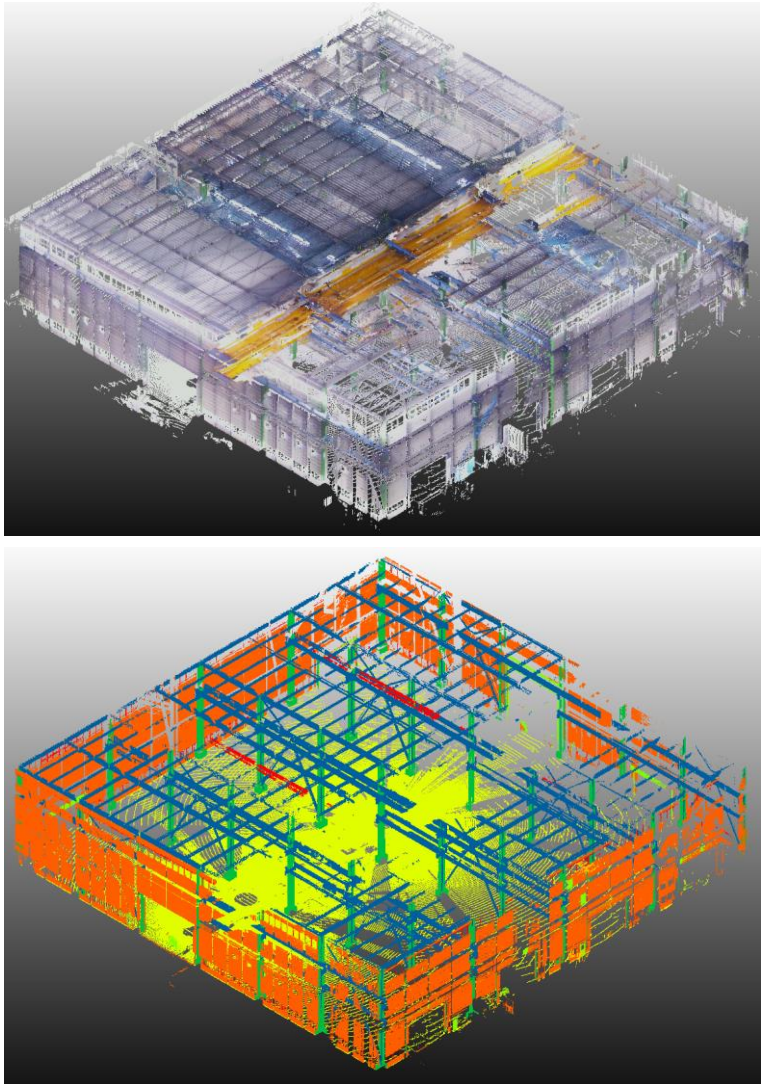


図 1.5　部位ごとに区分した点群データの一例
（上：取得したカラーの点群データ，下：部位ごとに色分けした点群データ）

1.1.6　研究の目的

本研究では，出来形計測といった建築工事の施工管理業務において，BIM と比較してこれまで広く活用されてこなかった点群データを活用できる手法を考案し，その有効性を検証することを目的とする。

第 2 章において，既往の研究を通じて，現状の課題を整理した。

第 3 章では,杭工事のうち,杭芯計測について点群データを利用した計測手法を二つ考案し，それらの手動計測および自動計測の結果について TS を使用した在来計測の結果と比較分析を行った。建築の杭工事では，測量工が常駐しないケースが多く，一週間に 1 日だけ作業し，工区単位でまとめて計測する場合が多い。したがって，費用を掛けず，タイムリーに杭芯を計測

したいニーズは高い。

第 4 章では，耐火被覆工事の吹付け厚さの品質管理手法を考案した。将来の技能工不足に対応して開発した耐火被覆吹付けロボット（以下，ロボット）および技能工が吹付けた耐火被覆の厚さを計測し，分析した。その結果を基にロボットで吹付ける厚さの目標値を設定し，現場施工を行い，考案した品質管理手法について評価した。

これらの結果を通じて，点群データを利用することで，建築工事の出来形計測における精度面の検証の他，生産性向上に寄与することを示すことについても本研究の目的である。

1.2　論文の構成

本論文は，全 5 章で構成する。本論文の構成を図 1.6 に示す。

第 1 章では，研究の背景として，建築工事において，BIM が普及する一方で点群データの利用が進まなかった現状と課題を整理し，研究の目的を述べる。

第 2 章では，既往の研究および本研究の新規性について述べる。点群データの取得方法および様々な点群データの利用・分析方法を目的ごとに整理した。それらを踏まえて，既往の研究に対する本研究の新規性を述べる。

第 3 章では，杭工事のうち杭芯計測について，点群データを利用した手動計測および自動計測の手法を考案した。カメラ撮影画像から生成した点群データを使い，在来計測方法に対する手動計測の精度および手動計測と自動計測の計測結果の差異について述べる。考案した計測手法の計測精度は，点群データの生成精度に依存することがわかった。

第 4 章では，耐火被覆工事の省人化のために開発したロボットの吹付け厚さの目標値を定めるため，点群データを利用した自動計測手法を考案した。その計測手法にて，ロボットの吹付け厚さおよび技能工の吹付け厚さを計測した。これらの分析結果より，ロボット施工の目標値を定め，それに基づいてロボットで吹付け施工した結果について述べる。

第 5 章では，結論を述べる。

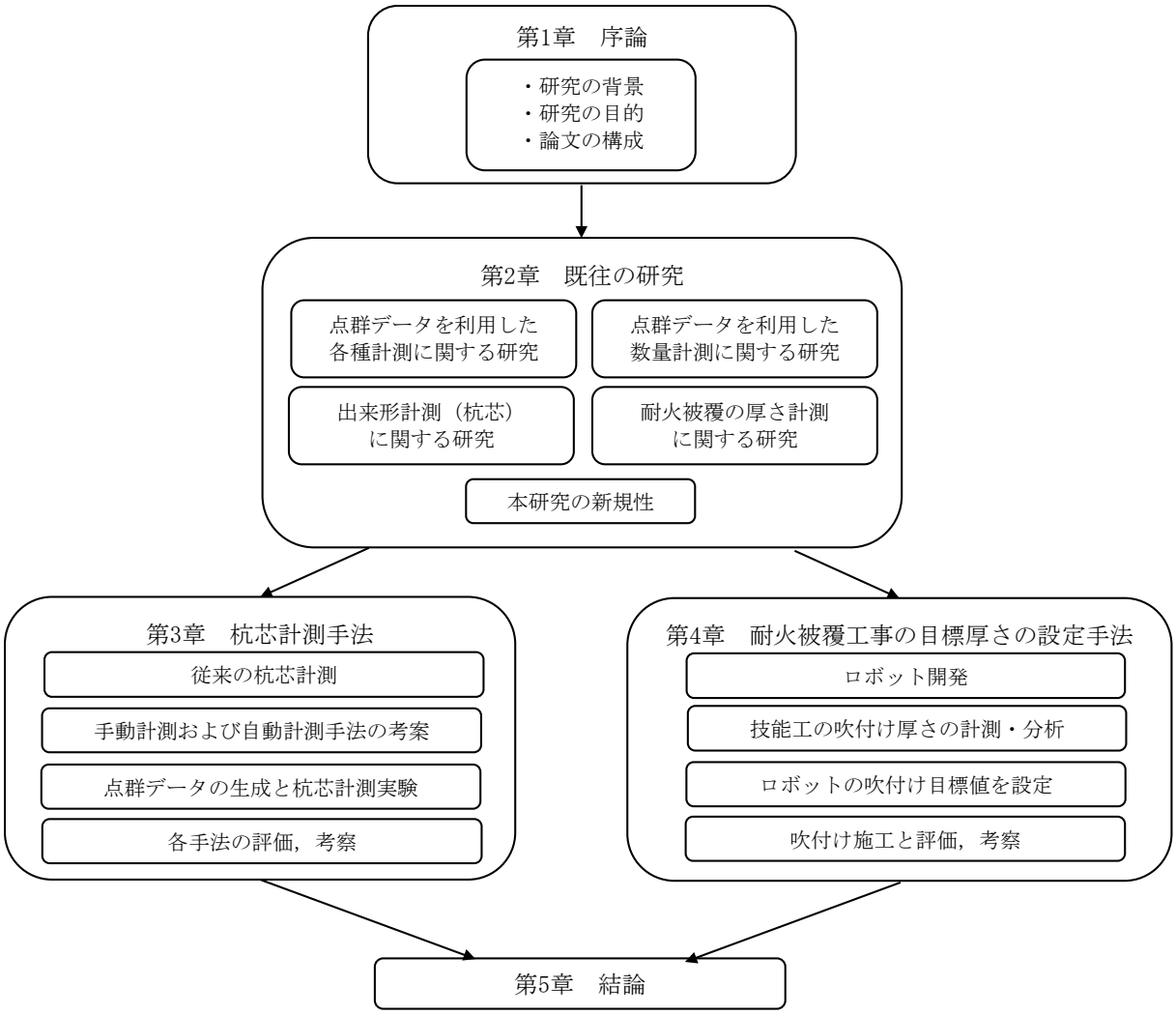

第1章　序論
・研究の背景
・研究の目的
・論文の構成
第2章　既往の研究
点群データを利用した
各種計測に関する研究
点群データを利用した
数量計測に関する研究
出来形計測（杭芯）
に関する研究
耐火被覆の厚さ計測
に関する研究
本研究の新規性
第3章　杭芯計測手法
従来の杭芯計測
手動計測および自動計測手法の考案
点群データの生成と杭芯計測実験
各手法の評価，考察
第4章　耐火被覆工事の目標厚さの設定手法
ロボット開発
技能工の吹付け厚さの計測・分析
ロボットの吹付け目標値を設定
吹付け施工と評価，考察
第5章　結論

図 1.6　本論文の構成

第 2 章　点群データの利用に関する既往の研究

2.1　点群データの取得方法

建築工事で点群データを取得するための装置や手法には，カメラで撮影した画像を利用する方式と地上型レーザースキャナー（以下，TLS：Terrestrial Laser Scanner）を利用する方式が主流である。近年，ハンディ式のレーザースキャナーや距離センサーを備えたカメラが安価に販売されるようになり，建築工事においてもより手軽に点群データを取得できるようになった。カメラ撮影画像を利用する方式では，フォトグラメトリ法のうち，SfM（Structure from Motion）の計算手法に基づく専用ソフトウェア（以下，SfM ソフトウェア）を利用して，点群データを生成する方法が一般的である。使用するカメラの撮影距離，画素数，画角，ステレオカメラでは基線長によって計測対象の大きさが変わる。SfM ソフトウェアはステレオ相関に基づいてカメラ撮影位置を計算するため，画像処理上の特徴点[注 1)]が少ない計測対象では，点群データが満足に生成できない場合がある。また，計測対象の奥行き方向の形状変化が大きいと，図 2.1 に示すように，その形状を忠実に表現できない場合がある[13)]。同図は，UAV（Unmanned Aerial Vehicle）によって撮影された画像を SfM ソフトウェアにて生成された点群データのうち，駐車された自動車群の点群データを抽出し，その断面を見た図である。自動車と地面の境界部の点群データがエッジのない形状になっているのが確認できる。すなわち，点群データのうち奥行き方向の形状が表現できていない。一方，TLS は，利用する機種の測定可能距離に応じて計測対象の大きさや 1 回で計測できる範囲が変わる。広い範囲を計測する際は，TLS を何回も移動させて，複数のデータを取得し，作業後に専用ソフトウェア等でレジストレーション（Registration：データの統合）を行う。

筆者らはこれらの過去の経験に基づいて，また，各種点群データの取得方法の特徴から，図 2.2 に示すような実務における建築工事向けの点群データ取得方法の実用的な選定フローを作成した。様々な状況（対象の形状・大きさ，要求される精度，データを得るまでの時間，コストなど）を総合的に判断し，目的に応じて点群データを取得する方法を選定している[14)]。

注 1）画像処理上の特徴点とは，輝度や色変化の大きい箇所，面の角度が変化する線（エッジ）などのことを言う。

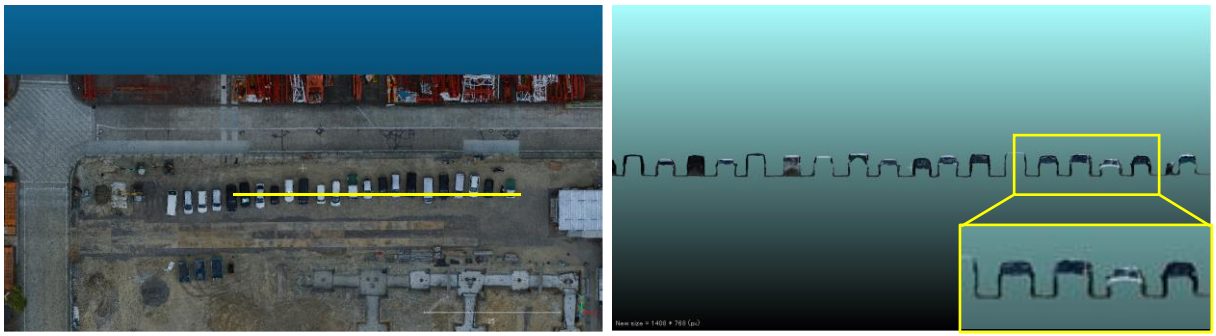


図 2.1　SfM ソフトウェアで生成した点群データの詳細
（左：真上から見た点群データ，右：左図の下方向から見た側面図）

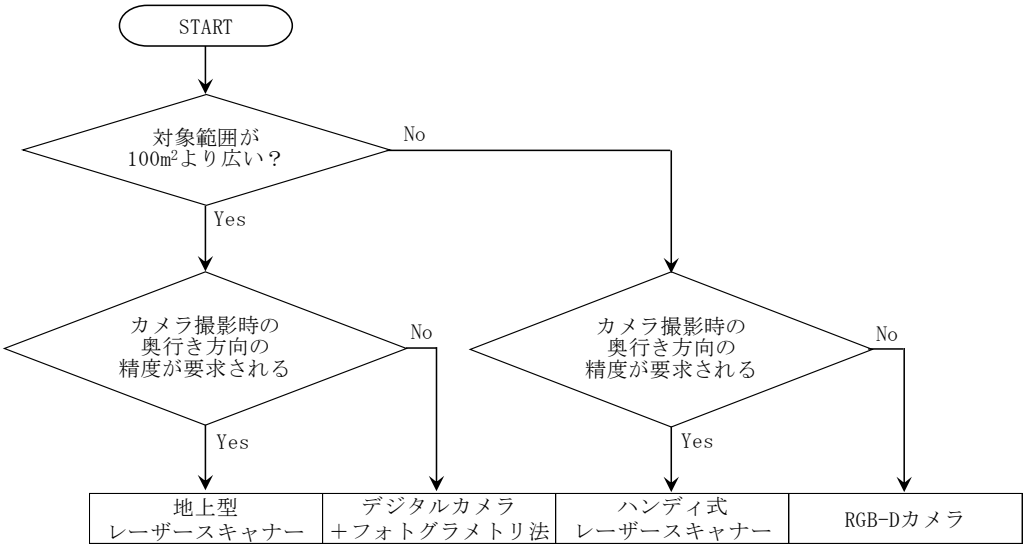


図 2.2　実務における建築工事の点群データ取得方法の実用的な選定フロー

2.2　点群データの利用・分析方法の分類

建築工事の出来形計測において，点群データに施す適切な情報処理のうち，特に重要と考えられる事項を以下に示す。

(1)大量の点群データから意味のあるデータを抽出すること

(2)抽出した部分に新たな意味を付与すること

(3)物体の納まりや出来形，または，数量を計測すること

(1)については，図 2.3 にその一例を示す。同図は，鉄骨の柱・梁の点群データ（左）から当該フロアの柱脚部分を抽出した点群データ（右）である。(2)については，例えば，抽出した点群データに柱脚というファイル名を付けることで，新たな意味を付与することができる。図 2.3 の右図のうち，2 本の柱を抽出し，真上から見た点群データを図 2.4 に示す。(3)については，同図からその建入れ精度（位置）を計測すると出来形を計測したことになる。

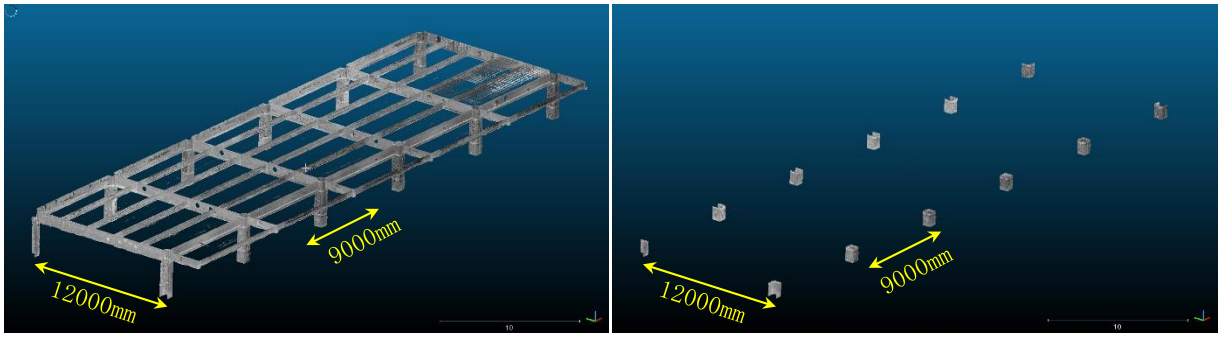


図 2.3　柱・梁の点群データ（左）と柱脚部分を抽出した点群データ（右）

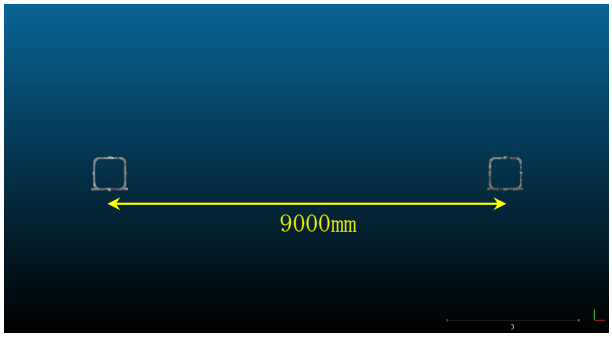


図 2.4　柱脚の建入れを計測

2.3　点群データを利用した各種検知や計測に関する研究

本節では，2.2 節で示した点群データに施す情報処理のうち，各種の検知や計測に関する既往研究をまとめる。(1)に関しては,Munoz ら[15]が形状の特徴から点群データを区分する研究を，Ntiyakunze ら[16]が建物の構造要素を区分する,すなわち,構造体を部位ごとに区分する研究を，嘉納ら[17]が工事進捗を自動認識する施工進捗把握の研究を行っており，Reja[18]らが建築の構造体の進捗監視の研究を行っている。嘉納らの研究では，施工進捗を把握するため，工事前および工事後の点群データから新規に建方されたプレキャストコンクリート部材の点群データを抽出した。その一例を図 2.5 に示す。(2)に関しては，Stilla[19]らが都市の物体の変化の検出に関する研究を，目黒ら[20]が異なる時刻における変化の抽出とデータの更新に関する研究を行っており，谷本ら[21]は目標に対する差分計算を行う研究を行っている。さらに，井筒ら[22]が抽出した点群データを領域に分割する研究を,Bahreini ら[23]がコンクリートの表面から欠陥を抽出して分割する研究を行っている。(3)に関しては，中村ら[24]が樹木の形状計測を行う研究を，Wu ら[25]が躯体工事で使用する型枠システムの設置間隔を自動測定する研究を,石田[26]が鉄筋の本数・位置を計測する研究を行っている。これらの研究事例では，点群データを計算しやすいように適切に処理し，各種の検知や計測に重きが置かれている。しかし，実工事での出来形計測や検査において，日常的に工事で活用される状況には発展していない。

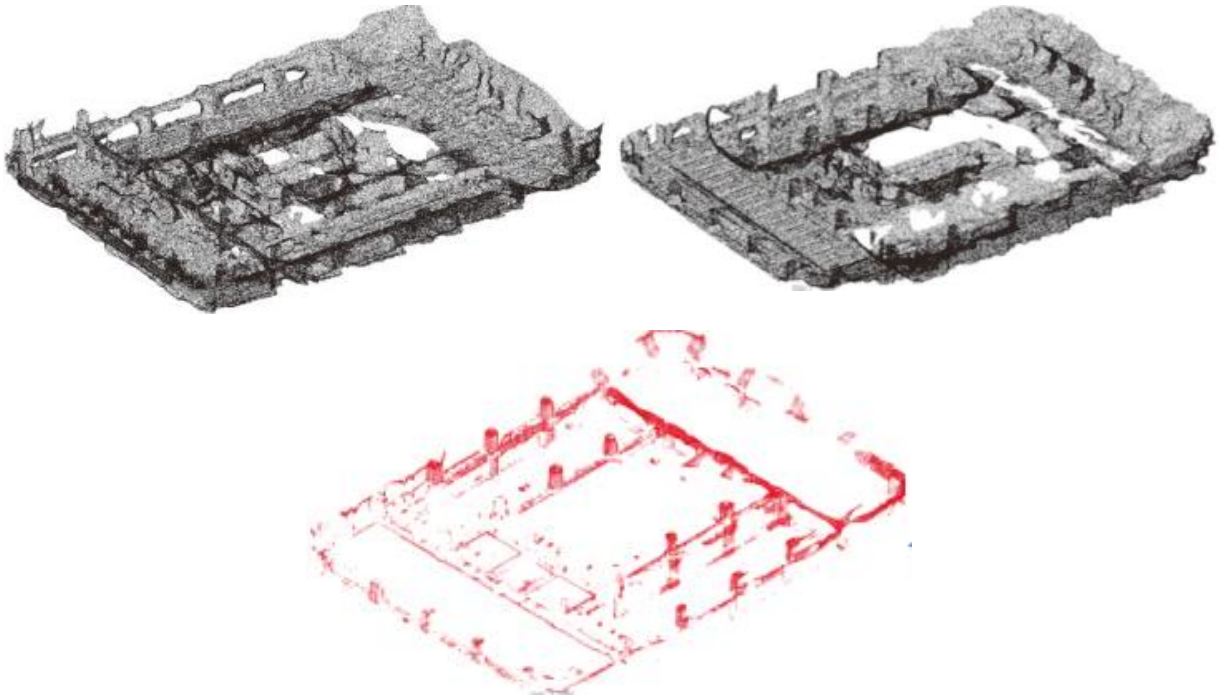


図 2.5　工事前後の点群データ（上）と抽出した新規部材の点群データ（下）

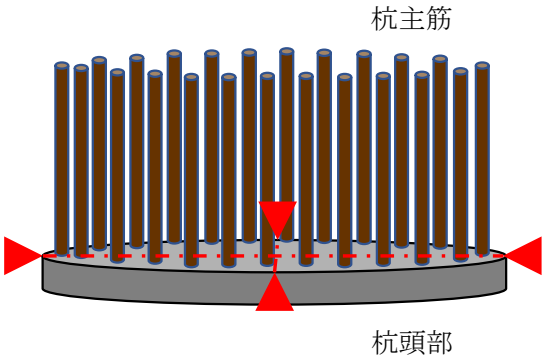
2.4　点群データを利用した数量計測に関する研究

本節では，2.2 節で示した点群データに施す情報処理のうち，数量計測に関する研究をまとめる。(1)および(2)については，異なる時期に取得した点群データを対象に織田ら[27]の巨礫の移動を抽出する研究，山口ら[28]の橋梁の形状変化から損傷部を抽出する研究，中村ら[29]の標識・照明等の道路ストックの管理の効率化に関する研究，が挙げられる。次に(3)に関しては，藤田ら[30]が異なる時期に取得した点群データを対象に河川に堆積した土砂体積量の算出に関する研究を，須佐美ら[31]や塩崎ら[32]がトンネル形状の点群データを取得し，設計値に対するトンネル巻厚のコンクリート打込み数量に関する研究を行っている。トンネルの吹付けコンクリート施工後に取得した点群データとトンネルの設計断面の差分から巻厚量を得ている。さらに，安達[33]が建物の外側と内側から取得した点群データから既存建物の壁厚の推定に関する研究を行っている。多くの研究が異なる時期あるいは異なる場所で取得した点群データから厚さ等の数量測定を行い，厚さの分布等の管理を行っているのみである。それらの結果を分析する，あるいは，統計処理等を行い，その後の施工に活かすような処理は行っていない。すなわち，得られた出来形情報をフィードバックして，次の工区の施工に活かすための指標を作る，などの具体的な取組みは既往研究からは見出せなかった。

2.5　本研究の新規性

2.5.1　杭芯計測に関する研究

杭はそれ自体が地中に埋まっているため，工事進捗後にその出来形や納まりを確認することはできない。したがって，タイミング良く各種施工記録を確実に残すこと，施工管理の透明性の確保などが求められている [34]。そこで筆者らは，杭工事の施工管理業務について DX 化により生産性を向上させるため，点群データを活用する方法について研究を始めた。既往研究は，点群データの処理について検証を進めた事例が主であった。その中で，建築分野において，井上ら [35] が 2 次元レーザーを用いた杭芯計測に関する出来形計測手法の研究を試みているが，在来測量と計測形式が大きく変わらず，研究段階であるため工事では活用されていない。また，土木分野において，国土交通省が公募した建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクトにて，点群データを活用して場所打ち杭の杭芯および杭径を計測した事例 [36] が試行された。当該事例では，杭頭部最外周の 4 箇所（0，90，180，270°の方向）の点群データの座標を手動で確認し，それらの座標値から杭芯および杭径を算出したと推察される [37]。同研究における杭芯および杭径の計測イメージを図 2.6 に示す。この手法であると，計測したい箇所に点群データがない場合があること，4 点のピンポイントのデータから杭芯を算出するため，算出誤差が大きくなると予想される。また，杭芯計測では BIM/CIM データの利用や自動計測は実施していないと推察される。以上から，本研究は取得した点群データを処理し，これまで事例のない建築分野の杭工事において杭頭部の点群データを全体的に利用して出来形計測を手動および自動で行った点において新規性，および，正確性が高いと考える。



※本図は文献[36]，[37] の図をもとに筆者が描いたものである

図 2.6　既往研究 [36]，[37] における杭芯計測のイメージ

2.5.2　耐火被覆工事のロボット施工における目標厚さの設定に関する研究

国内の耐火被覆工事では，材料コストが安価であることから，半乾式吹付けロックウール工法が最も主流である[38]。しかし，同工法は施工環境が粉塵環境下であることから，技能工は全身を防護する必要がある。技能工の吹付け状況を図 2.7 に示す。特に夏場は，粉塵環境により空調服のファンが詰まりやすくなり満足に機能しない。このような劣悪な作業環境となることから，新たな成り手が現れず，年々，技能工は減少し続けている。そこで筆者らは，耐火被覆工事の省人化を目的として，半乾式吹付けロックウール工法のロボット施工について研究を始めた。ロボット施工の性能評価を定量的に行うため，新たな被覆厚さの計測手法が必要となった。既往研究では，点群データを利用した数量計算や施工管理に重きが置かれており，平均値や標準偏差の算出等の統計処理を行い，施工に向けた分析までは行っていない。

そこで本研究では，点群データを耐火被覆工事の吹付け厚さの品質管理へ応用することとした。まず，ロボットおよび技能工が吹付けた耐火被覆の厚さを計測し，統計データを算出し，分析した。次に，得られた統計データから開発したロボットで吹付ける厚さの目標値を設定し，現場施工を行った。その結果，規定厚さを下回ることなく，吹付けを行えたことがわかった。以上から，異なるタイミング（施工前・後）で取得した点群データを差分計算して，出来形計測を行い，その統計データを分析して，ロボット施工の目標値を設定し，その吹付け厚さの評価をした研究内容について，新規性が高いと考える。

図 2.7　技能工による耐火被覆吹付け作業

第 3 章　点群データを利用した杭芯計測手法

3.1　従来の杭芯計測と本章の概要

3.1.1　従来の杭芯計測

次の工程の基礎工事の準備のため，杭頭周辺部を掘削した後の状況を図 3.1 に示す。同写真のように杭天端から 50mm ほど杭頭が現れた状況で杭芯を計測する。また，従来の杭芯計測の例を図 3.2 に示す。同写真は，自動追尾式の TS を使用した杭芯計測の例であり，通常，TS に 1 名，杭芯部にプリズムを持った相番者 1 名の計 2 名一組で杭を 1 本ごとに計測する。

図 3.1　杭頭周辺部の状況

図 3.2　従来の杭芯計測の状況

3.1.2　本章の概要

本章では，これまで測量器を利用して 2 名 1 組で計測していた杭芯計測について，点群データを利用して計測する手法を提案し，その計測精度を検証する。提案した計測手法には，手動計測と自動計測がある。手動計測は，杭の簡易な BIM データを作成し，その形状全体が目視で最もマッチングしたときの杭芯を計測する方法である。自動計測は，図 3.1 で示したように杭頭部が盛り上がった状況を加味して，その盛り上がりの中心位置を杭芯とみなして自動計算する手法である。ここで，点群データは点群のうち一点を単独で計測すると，誤差を含んでいる可能性が高いが，点群データを全体的に捉えることで，その誤差を極力小さくし，正確性を高める提案内容である。

3.2　提案した計測手法

3.2.1　手動計測手法

図 3.1 に示した杭頭部は，点群データでは図 3.3 のように表示される。この杭芯を計測するため，図 3.4 に示すように設計値通りに杭の簡易 BIM データを作成し，点群データと杭の簡易 BIM データ（緑線）を重ね合せて手動で杭芯座標を計測した。まず，図 3.4 の右下の拡大図 1 のように BIM データを設計座標から点群データの杭頭の位置へ水平（x，y）方向に動かし，杭頭部の点群データに位置決めした。なお，在来の杭芯計測の結果は mm 単位でまとめるため，mm 単位で BIM データを動かした。その後，図 3.4（拡大図 2）のように BIM データを高さ（z）方向に mm 単位で動かし，既成コンクリート杭のコンクリート天端と同一レベルに位置決めする。そのときの BIM データの天端芯の座標が求める杭芯座標となる [39]。なお，本手法は，場所打ち杭や鋼管杭の他の杭種であっても杭頭部の点群データが同様に得られれば適用可能である。

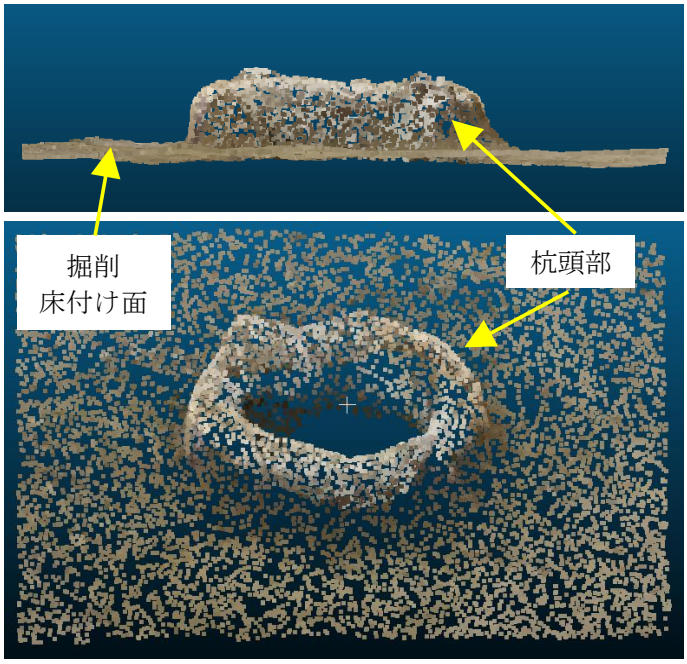


図 3.3　杭頭部周辺の点群データの一例
（上：側面図，下：斜め上からの図）

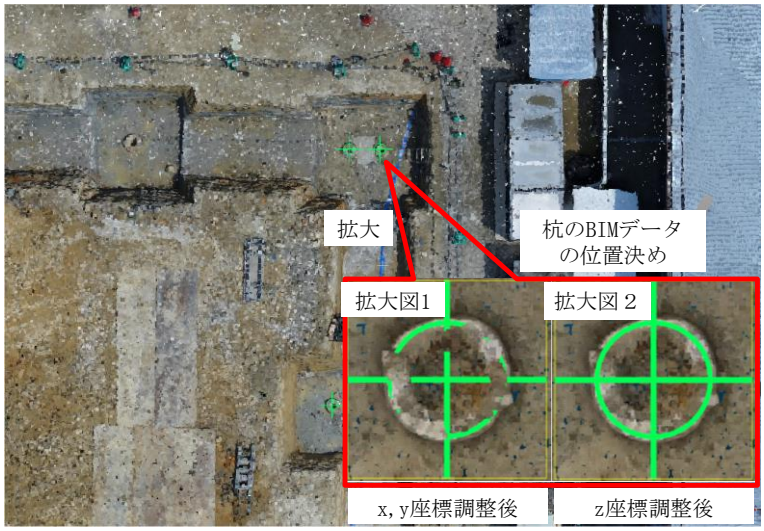


図 3.4　BIM データを利用した手動計測

3.2.2　自動計測手法

前項でまとめた手動の計測手法に対して，自動計測手法を提案した。提案した自動計測手法の計算フローを図 3.5 に示す。杭頭部は，図 3.3 で示したように周囲の地盤面に対して，凸型に高くなっていたことから，自動計測ではこの特徴を利用した。杭頭部付近の点群データを切り出し，杭径+b を一辺とする正方形（以下，窓）で囲んだ範囲内の点群データの z 座標の平均値を求める。ここで，合計値ではなく平均値としたのは，点群データの配置が等間隔ではなくランダムであったことから，窓内に存在する点群数に左右されにくいようにしたためである。また，b は既成コンクリート杭の製品誤差や杭頭部に付着した土などの影響を加味して，例えば 5mm などとした。窓を x 方向と y 方向に例えば 1mm 単位で移動させ，z 座標の平均値が最大となる正方形の中心座標（x，y）が杭芯座標となると考えられる [40]。すなわち，窓が杭頭部に最もフィットした位置では，杭頭部分の点群データが最も多く含まれ，点群データの z 座標の平均値が最大となると考えられる。ここで，走査範囲は図 3.5 で示したように広範囲ではなく，設定した窓が杭頭部の一部を含む範囲から走査させることにより計算時間を短縮できる。また，図 3.1 と図 3.3 では杭頭の土の状態が大きく異なっていた。すなわち，既成コンクリート杭の中心部に土がある状態と除去された状態があった。杭頭の状況が統一されていなかったことから，杭芯の z 座標は算出しないことにした。

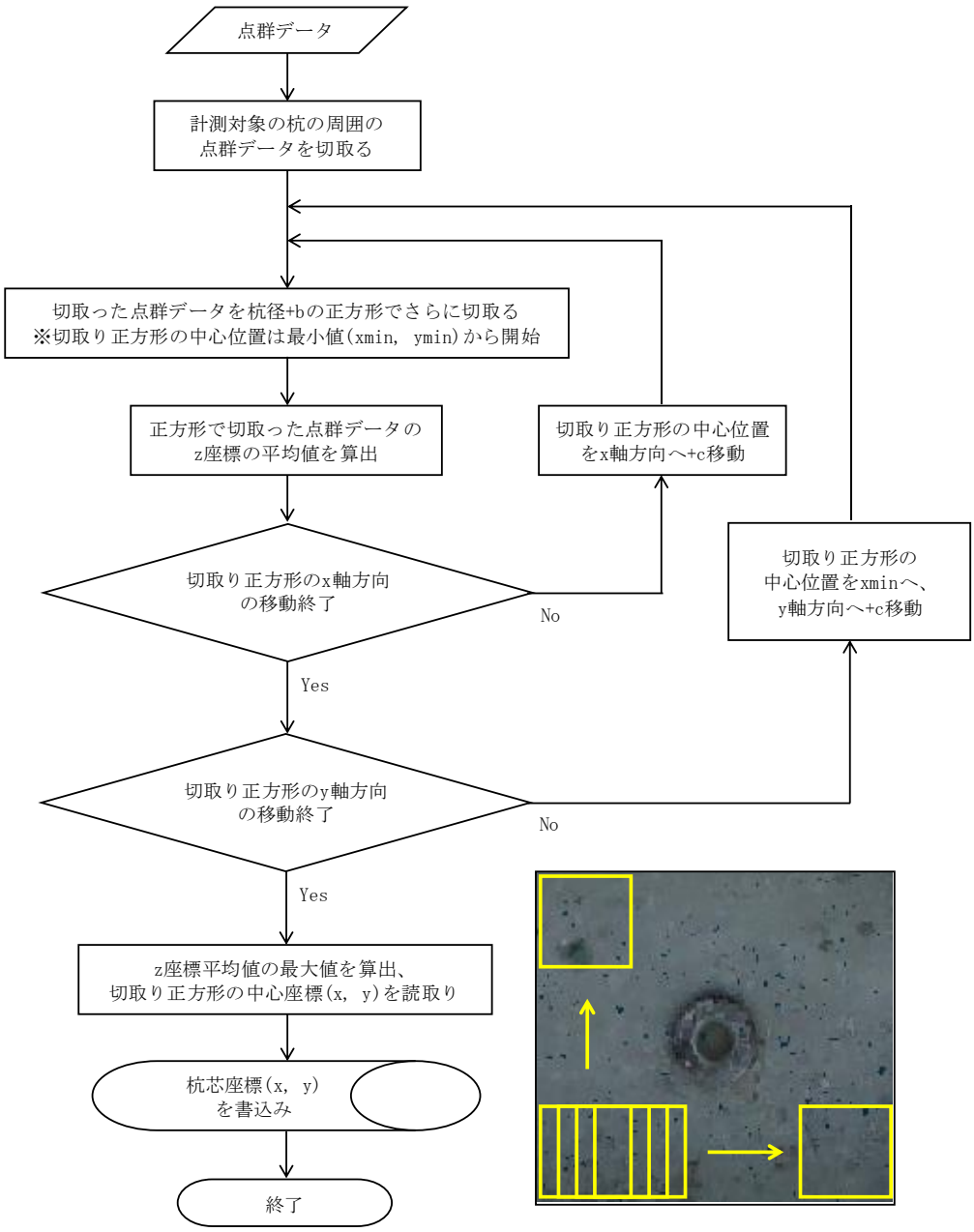


図 3.5　自動計測のフロー

3.3　杭芯計測実験

3.3.1　対象工事の概要

対象工事は建設機械･工器具類を整備する施設の新築工事である。工事概要を表 3.1 に示す。対象建物は整備棟であり，その杭は既成コンクリート杭であった。次の工程の基礎工事の準備のため，杭頭周辺部を掘削した後の状況を図 3.1 に示した。同写真のように杭天端から 50mm ほど杭頭が現れた状況で杭芯を計測した。

表 3.1　工事概要

	事務所棟	整備棟
建物用途	事務所	整備場
構造	鉄骨造+RC造	鉄骨造
建物規模	地上2階	地上2階
敷地面積	76462.7m^2	
建築面積	967.1m^2	5513.2m^2
延床面積	1845.1m^2	5949.4m^2
最高高さ	9.2m	15.9m
工期	2015年2月～2016年6月（17ヵ月）	

3.3.2　対象エリアの点群データの取得

点群データは，他の目的でも使用するため，対象エリアが事務所棟と整備棟の 2 棟を網羅する広い範囲であったことと，対象範囲の形状変化が大きくなかったことから，図 3.6 に示すようにカメラで撮影した画像から対象エリアの点群データを生成することとした。写真撮影は，UAV（Unmanned Aerial Vehicle）を飛行させて行った。工事の進捗に対応して，計 3 回飛行させた。計 3 回の計測概要を表 3.2 に示す。また，2 回目の飛行で使用した UAV を図 3.7 に示す。同写真は，海外メーカー製の 4 枚翼の UAV である。個別の飛行計画は UAV メーカーの専用ソフトウェア上において，飛行高度・速度，カメラの画角，各画像のラップ率などを入力すると飛行ルートが自動生成される。飛行計画例を図 3.8 に示す。同図内の赤線枠で示した約 200×100m エリアが飛行エリアであり，飛行エリア内の黄色線が飛行ルート，緑の丸がウェイポイント（UAV がターンする場所）を示す。飛行高度は 40m に設定した[注 2)]。各画像の進行方向のラップ率（オーバーラップ）と隣の列とのラップ率（サイドラップ）は，デフォルト値のそれぞれ 80%，60% に設定した。この結果，各飛行における画像の地上分解能は表 3.3 に示す値となった。

注 2）計測範囲内にある最も大きい建物の屋根の点群データがきちんと生成でき，かつ，できるだけ低い高度に設定した。事前に飛行高度を 30m で試行したところ，屋根のみの画像が出現し，特徴点が少ないため，点群データがきちんと生成できなかった。

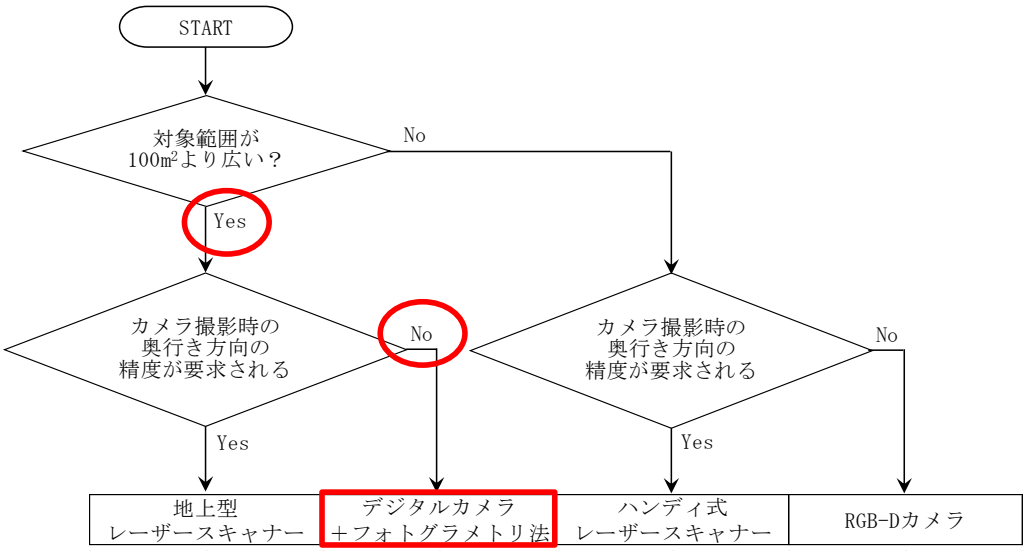


図 3.6　実務における建築工事の点群データ取得方法の実用的な選定フロー

表 3.2　計測概要

	1回目	2回目	3回目
カメラ画素数	7360×4912画素	6000×4000画素	7360×4912画素
撮影枚数	457枚	402枚	397枚
コントロールポイント	20箇所	25箇所	23箇所
得られた点群数	約4億1千万点	約2億4千万点	約3億6千万点

図 3.7　飛行させた UAV

図 3.8　飛行計画例

表 3.3　画像の地上分解能

	第1、3回飛行	第2回飛行
カメラ画素数	7360×4912画素	6000×4000画素
平面分解能	7.0mm	9.8mm
奥行き分解能	13.6mm	16.6mm

点群データの生成には，SfM ソフトウェアの一つである Smart 3D Capture [注 3)]を使用した。同 SfM ソフトウェアで計算したカメラ撮影点の算出結果例を図 3.9 に示す。いずれの飛行においても対象エリア内に約 20 箇所の地上コントロールポイント（以下，GCP）を設定した。工事着手前に TS を用いた敷地内の測量を実施しており，その際に GCP の 3 次元座標を取得していた。SfM ソフトウェア上で各 GCP の 3 次元座標を入力し，画像上に写っている GCP を SfM ソフトウェア上でそれぞれ指定することで，生成される点群データに工事で使用している座標を付与することができる。その設置例を図 3.10，配置例を図 3.11 に示す。計 3 回の飛行では，それぞれ約 400 枚の画像から点群データを生成した。得られた点群データ（第 2 回飛行時）を図 3.12 に示す。同図内に整備棟のエリア（約 80m×70m）を示した。生成された点群データは各飛行とも 2 億点以上であったため，点群データを点群処理ソフトウェア Cloud Compare [注 4)]にてランダムに間引いて約 5 千万点のデータとして使用した[注 5)]。

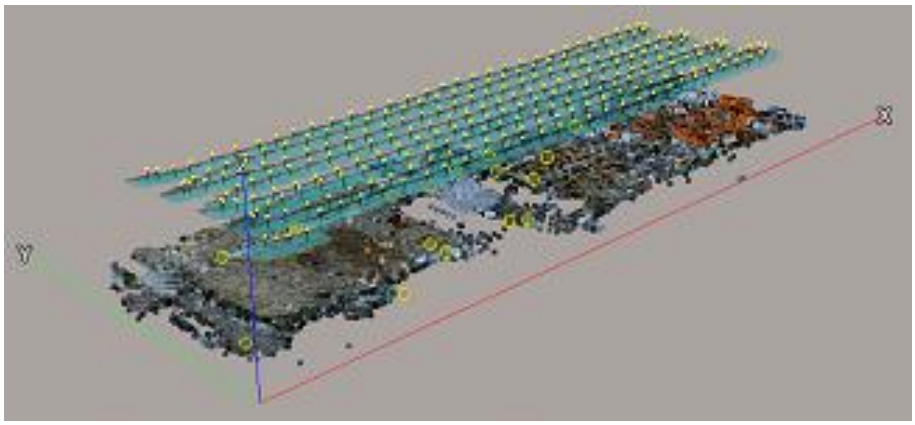


図 3.9　カメラ撮影位置の計算結果例

注 3) Smart 3D Capture とは，仏国の Acute 3D 社が開発した SfM による点群データ生成ソフトウェア。Acute 3D 社は，2015 年に米国の Bentley 社に買収され，Context Capture に名称が変わった。筆者が本論文に使用した点群データを生成したのは，2015 年であるが，しばらく Smart 3D Capture を使い続けた。

注 4) 仏国製のフリーの点群処理ソフトウェア。多くの機能があり，自前のプログラムを組込めるようになったことから，使用する研究者が近年増加している。

注 5) Cloud Compare では，点群データの間引く際，ランダム法，空間法，八分木法による手法が選択できるが，空間法や八分木法では点群データの位置や配列が変わる可能性があったため，ランダム法を選択した。

図 3.10　地上コントロールポイント

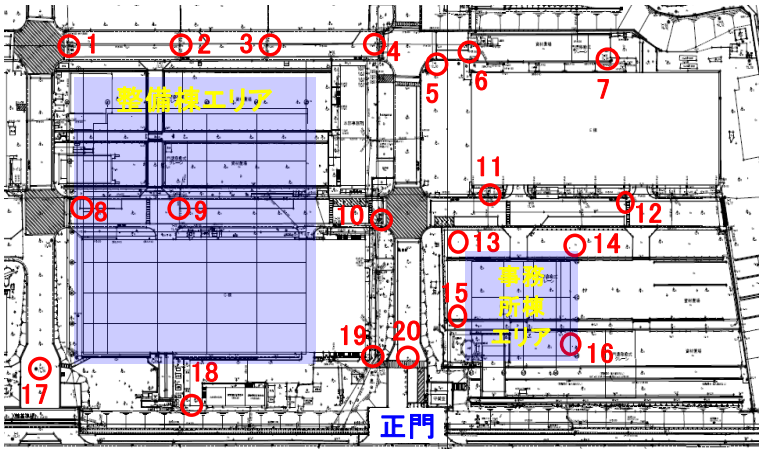


図 3.11　地上コントロールポイントの配置例

図 3.12　生成した点群データ

3.4　実験結果

3.4.1　手動計測の結果

全部で 121 本の杭に対して，点群データから杭芯を計測できたのは 93 本であった。計測できなかったのは，基礎工事が始まったことにより杭頭が見えなくなったことが主な理由で，点群データの生成に不備があったわけではない。なお，在来測量は TS で計測した。

まず，在来測量の計測結果に対する点群データから手動計測した結果の差異のまとめを表 3.4 に，差異のヒストグラムを図 3.13 に示す。同表の平均値は，エリア内の点群データ生成時の座標の誤差成分（平行移動量）を，標準偏差はそのばらつきを示し，おおよそ手動計測の計測精度を表す。したがって，点群データを利用した杭芯の手動計測の精度は概ね 30mm となった。この結果は，RTK-GNSS と同等の精度であり [41]，建築工事では，在来測量に置き換えるレベルには達していないことがわかった。

表 3.4　在来測量の結果と手動計測の結果の差異に関するまとめ

（単位：mm）

平均値（誤差成分）			標準偏差（ばらつき）		
Ex	Ey	Ez	σ x	σ y	σ z
22.2	-16.0	19.1	24.1	30.9	33.2

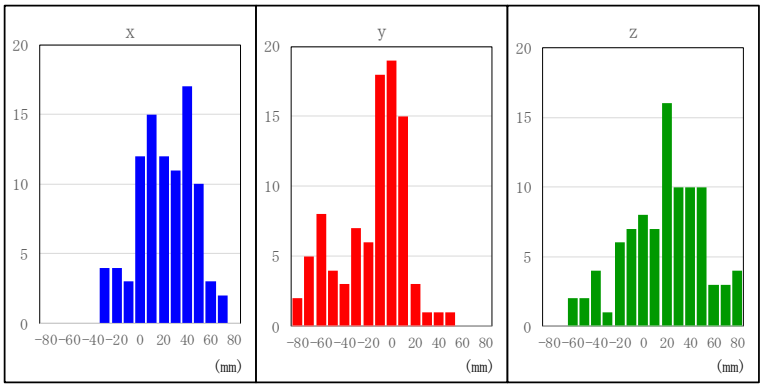


図 3.13　在来測量の結果に対する手動計測の結果の差異のヒストグラム

次に，生成した点群データの精度についてまとめる。一般に，SfM ソフトウェアにより生成された点群データの位置精度は，撮影画像の分解能，GCP の配置・数とその座標精度，撮影時のラップ率の確保などに左右される [42]。GCP 付近では実際の座標近くに補正されるため，位置精度が最も高く，それ以外の場所では SfM ソフトウェアの画像処理の結果に左右される。点群データの位置精度のばらつきは，GCP 付近で撮影画像の分解能の 1～2 倍，それ以外で同 1～3 倍程度になると言われている [43]。本論文の対象の工事エリア内で事前に行っていた在来測量結果に対する点群データの位置精度を検証した結果のまとめを表 3.5 に示す。なお，計測点数は

GCP 付近で 15 箇所, GCP 付近以外で 10 箇所である。その差異の標準偏差は GCP 付近で 10～25mm 程度，GCP 付近以外で 20～35mm 程度であった。特に GCP 付近以外での標準偏差と杭芯計測結果の標準偏差はほぼ一致した。

上記の結果から，在来測量と点群データによる杭芯計測との差異は，点群データ生成誤差と同等であることが確認できた。また，本論文の撮影では，画像分解能が平面 7.0～奥行 16.6mm であった。表 3.5 と比較すると，画像分解能より GCP 付近の標準偏差の方が大きな値を示している。以上から，概ね，SfM ソフトウェアによる点群データの生成精度は，ほぼ理論値通りであったことを確認した。

表 3.5　点群データの位置精度

（単位：mm）

GCP付近					
平均値（誤差成分）			標準偏差（ばらつき）		
Ex	Ey	Ez	σ x	σ y	σ z
3.9	-0.4	2.9	13.5	22.7	14.5
GCP付近以外					
平均値（誤差成分）			標準偏差（ばらつき）		
Ex	Ey	Ez	σ x	σ y	σ z
14.3	3.3	8.0	24.5	23.2	33.2

3.4.2　自動計測の結果

自動計測の結果の一例を図 3.14 に示す。窓のサイズは杭径であり（b=0），窓の移動量 c を 100mm，10mm，1mm と変化させ，徐々に細かく動かした。各段階において，z 座標の平均が最大値を示した近傍を重点的に計算した結果である。同図で最大値を示したのは窓の左下の座標であるため，窓サイズの半分の値（300mm）を足して，杭芯座標は，(x, y) = (17206, 72797)（単位：mm）と読み取れる。比較のため，窓サイズが b=5mm のとき，図 3.14 と同様の杭で自動計測した結果を図 3.15 に示す。同図では，窓の移動量 c=100mm までは同様の結果であったが，c=10mm および c=1mm で異なる結果となったため，c=10mm と c=1mm のみを示す。窓サイズの半分の値（302.5mm）を足して，杭芯座標は，(x, y) = (17229, 72790)（単位：mm）となった。窓のサイズを 5mm 大きくして数本の杭で同様に自動計測を試行したが，杭芯座標はそれ以上に大きく変動した。杭頭に付着した土や地面の点群データが計測結果に影響を及ぼしていると推察できる。以上の結果から，現状では，窓のサイズは杭径と同一サイズで計算した方が良いことがわかった。

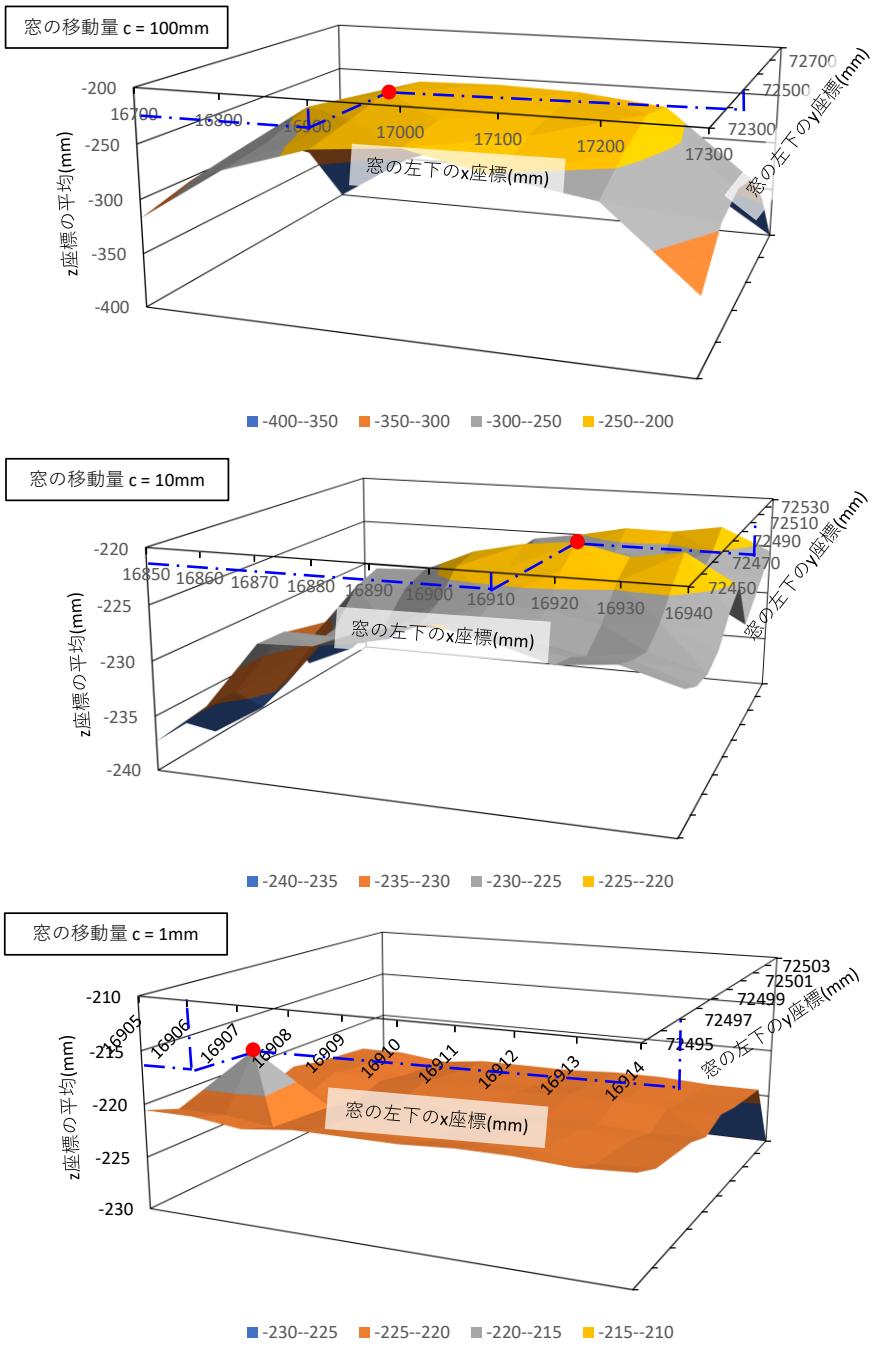


図 3.14　自動計測の結果例（b=0mm）

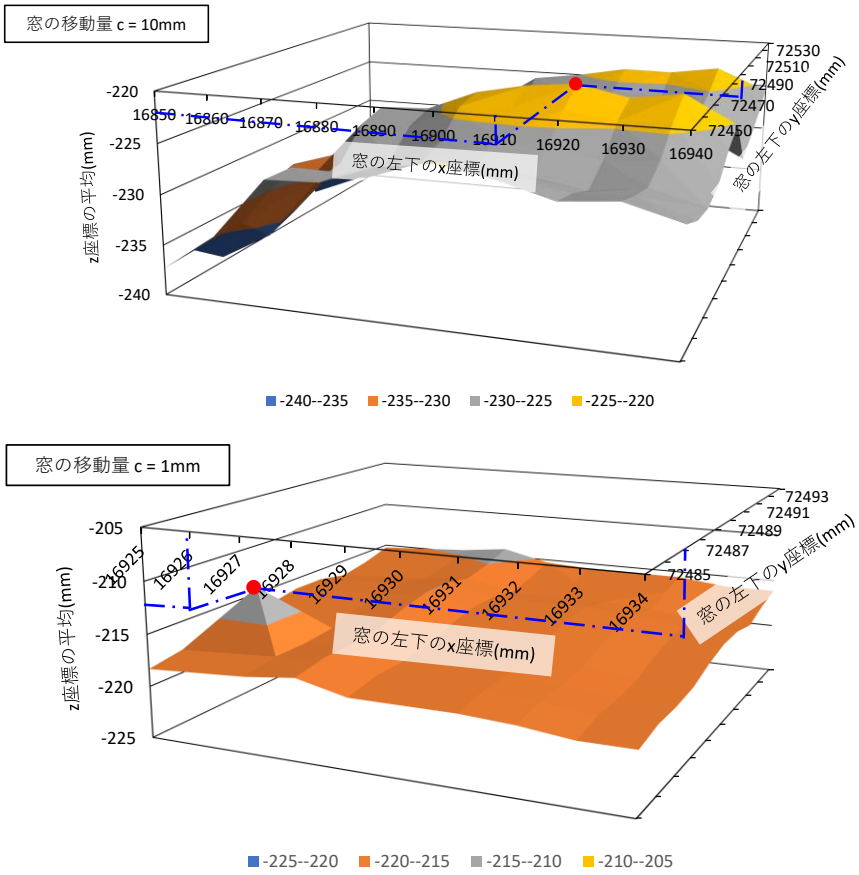


図 3.15　自動計測の結果例（b=5mm）

次に，自動計測（窓サイズ b=0）と手動計測の差異をまとめた結果を表 3.6 に，差異のヒストグラムを図 3.16 に示す。図 3.1 や図 3.3 を見ると，杭頭に除去しきれなかった土が付着していた。この付着した土が自動計算においてノイズになったと推察する。杭頭への土の付着状況はランダムであったため，Ex，Ey は 0 に近い値を示したが，σx，σy は土の付着状況に応じてばらついた値となった。今後，自動計測をする際は，掘削後に杭頭部へ付着した土を清掃することで，計測値が手動計測の値に近づくと考えられる。

表 3.6　手動計測と自動計測の差異

（単位：mm）

平均値（誤差成分）		標準偏差（ばらつき）	
Ex	Ey	σ x	σ y
−0.2	0.3	6.8	7.0

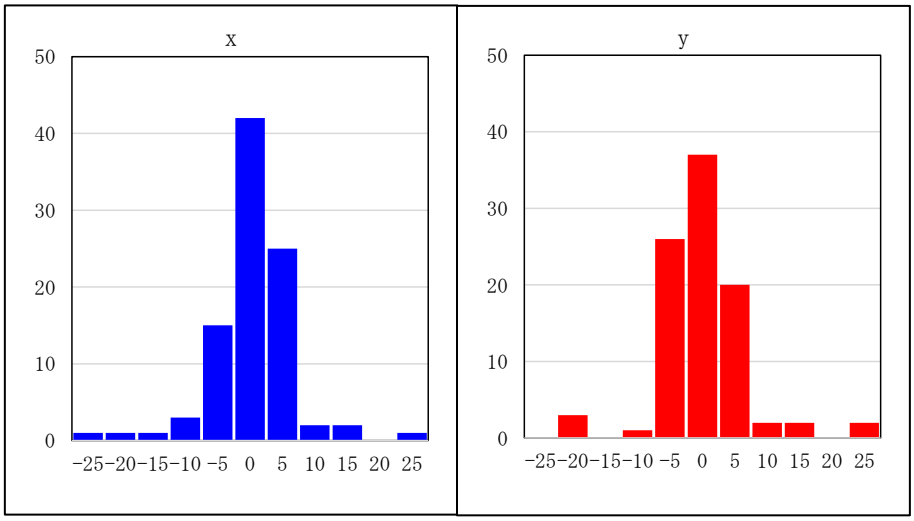


図 3.16　手動計測と自動計測の差異のヒストグラム

3.5　考察

3.5.1　実際の建築工事での利用について

本章で提案した杭芯計測手法（手動計測）の計測精度は，30mm 程度であった。一方，建築工事の標準仕様書では，既成コンクリート杭の芯ずれ量の目安値は，D/4，かつ，100mm 以下（D：杭径）とすることが望ましいとされている[44]。また，施工時の管理目標精度は，目安値の半分程度とすることが望ましいとされている。3.3 の実験において計測した既成コンクリート杭の径は 600mm であったため，杭の芯ずれ量が 100mm を超えた場合，設計者や監理者と協議し，躯体に補強を追加するなどの対策が必要になる場合が多い。在来の杭芯計測では，通常，計測精度が 5mm 以内の測量器を使用している。もし，計測精度が 30mm 程度の計測手法により杭芯計測を行うことになった場合，その計測誤差が不利な方に生じた場合を想定すると，杭芯ずれを 70mm 以内にしないと計測結果が 100mm を超えてしまう可能性が生じる。これらの理由により，現状の測量器と同程度の計測精度にならないと，建築工事では利用できないと考えている。すなわち，提案した杭芯計測手法の計測精度が 5mm 以内にならないと，在来の杭芯計測手法には置換えられないと考えている。

3.5.2　マーカー等を利用した杭芯の計測精度の向上策

マーカー等を利用した杭芯の計測精度の向上策についてまとめる。すなわち，マーカーを杭芯付近に配置した場合について考察する。二通りの方法が考えられ，一つ目は座標を付与しない方法であり，二つ目は座標を付与する方法である。

一つ目の座標を付与しない方法については，SfM ソフトウェアでの計算において，マーカーが特徴点になりやすいため，画像処理性能の向上に寄与すると思われる。しかし，点群データの生成精度，すなわち，杭芯の計測精度を向上させる効果は期待できないと考えられる。

二つ目の座標を付与する方法については，GCP と同じ役目をすると考えられる。その場合，本論文の条件では，点群データの生成精度，すなわち，杭芯の計測精度は，表 3.5 で示したように 20～30mm 程度から 10～20mm 程度に向上すると推察される。ただし，杭芯付近で座標を測量するため，杭芯を直接計測した方が計測精度や生産性は高くなると考えられる。

以上から，杭芯付近にマーカーを配置した場合，杭芯の計測精度の向上は期待できるが，生産性の向上は期待できないと考えられる。

3.5.3　SfM ソフトウェアで生成した点群データの計測精度

本章では，使用した点群データは，UAV で空撮した画像を基に生成したため，全方向に満遍なく分布していた。すなわち，得られた点群データの粗密の指向性は低かった。したがって，杭芯計測に適した点群データであったと推察できる。

一方，デジタルカメラは年々進化しており，現在では，約 1 億（11608×8708）画素の製品が市販されるようになった[45]。カメラの画素数が増加すると，表 3.3 の画像分解能は小さくなるため，仮に 1 億画素のデジタルカメラを使用した場合，画面分解能は平面で 2.4mm，奥行きで 4.2mm となる。この精度が確保できれば，TS の測量精度に近づくため，さらに利用価値が高まると考えられる。

3.5.4　点群データの取得方法

点群データを第 2 章の図 2.1 で示した他の取得方法で得た場合，すなわち，TLS で取得した場合について考えてみる。TLS の場合，TS と同様に距離に依存した誤差や複数箇所で取得した点群データを統合する際の誤差などがある[46]。使用する機種や取得した点群データの品質にもよるが，TLS で得られる点群データの精度は概ね 5mm 以内である[47]。TS を使用した場合，計測精度は 1～3mm 程度であるため[48]，TS とほぼ同等か若干下回る精度で杭芯計測結果が得られたと推察できる。杭芯計測等の位置精度が要求される本論文のケースでは，点群データの取得方法として TLS を選択した方が高精度な結果が得られたと考えられる。ただし，点群データの粗密の指向性を意識して，TLS を偏りのないように配置し，計測するのが好ましい。

3.5.5　生産性向上効果

在来の TS を利用した杭芯計測は 2 名で行うのが基本であり,その日のうちに計測結果が得られる。一方，本論文で提案した点群データを利用すると，ドローンを飛行させ，写真撮影し，点群データを生成して自動計測の結果が得られるまで,規模にもよるが最短で約 1 日を要する。近年，点群データの生成はクラウドサービスで行えるものもあり，ドローンの飛行は他の作業が行われていない時間帯に行えば，1 名で実施可能である。専用の自動計測プログラムを作成し，杭芯の自動計測を行えば，結果が得られるのは翌日ではあるが，作業員は 1 名で実施可能である。今後，クラウドサービスの進展などによって，これらの時間は短縮することが期待されるため，結果が得られるまでの時間は短縮していくと考えられる。計測精度の課題が解決すれば，本論文で提案した杭芯計測手法は，将来的に有効な計測手段に成り得ると期待できる。

3.6　まとめ

本章では，点群データを利用して杭工事における杭芯計測を行う方法論において，主に精度面の有効性を実験によって確認することができた。

まず，SfM ソフトウェアにより生成された点群データから手動で杭芯計測を行った場合の計測精度は GNSS 測量と同等であった。この計測精度は点群データの生成精度に依存することを明らかにした。ちなみに，この点群データの生成精度は撮影に用いたカメラの解像度や UAV の飛行高度に依存する。

次に，SfM ソフトウェアにより生成された点群データから自動で杭芯計測が行えることを実証した。杭頭部の点群データは円形であるため，その対称性から自動計測が容易であったと推察できる。計算範囲を絞り込み，段階的に計算することで効率良く算出できることがわかった。自動計測の結果は杭頭部に付着した土の影響で手動計測の結果に対して差異があったが，土の影響を排除すれば手動計測と同等の結果が得られると推察できた。

杭芯計測に使用した点群データは，UAV で空撮した画像を基に生成したため，全方向に満遍なく分布していた。すなわち，得られた点群データの粗密の指向性は低かった。したがって，杭芯計測に適した点群データであったと推察できる。

一方，デジタルカメラは年々進化しており，現在では，約 1 億（11608×8708）画素の製品が市販されるようになった。カメラの画素数が増加すると，表 3.3 の画像分解能はさらに小さくなるため，仮に 1 億画素のデジタルカメラを使用した場合（UAV の飛行高度は同一），画面分解能は平面で 2.4mm，奥行きで 4.2mm となる。この精度が確保できれば，TS の測量精度に近づくため，さらに利用価値が高まると考えられる。

第 4 章　点群データを利用した耐火被覆工事のロボット施工における目標厚さの設定手法

4.1　従来の耐火被覆吹付け厚さの計測管理手法と本章の概要

4.1.1　従来の耐火被覆吹付け厚さの計測管理手法

半乾式吹付けロックウール工法では，国土交通大臣の認定書により，材料・配合・かさ比重が定められている[49]。また，建築基準法と同認定書により，建築物の規模（階数）に応じた階ごとの主要構造部の耐火時間と規定厚さが定められている[50]。主要構造部である柱と梁についての建築物の階ごとの耐火時間と耐火被覆の規定厚さを表 4.1 に示す。通常，技能工が吹付けた耐火被覆の厚さを計測するには，図 4.1 に示すような厚さ確認ピンを使うことが多い[51]。その際の測定箇所（厚さ確認ピンを植込む箇所）を図 4.2 の左に示す。梁一本につき，施工面積 5m^2 ごとにウェブ面の両側 1 箇所ずつ，下フランジ下面 1 箇所，下フランジ小端の両側 1 箇所ずつを測定しながらピンを植込む[52]。ピンの頭部が被覆から浮いた場合は，当該箇所の厚さが不足していることになる。ピンポイントでの厚さ計測には向いているが，全体的な厚さの分布を把握するには，測定点の密度が低い。

そこで筆者らは，自主検査用に図 4.3 に示すような専用の測定器具[53]を用いて測定した。測定箇所を図 4.2 の右に示す。この方法では梁一本につき，上フランジ下面の両側 1 箇所ずつ，ウェブ面の両側を梁成に応じて 3～5 箇所，下フランジ上面の両側 1 箇所ずつ，下フランジ下面の 3 箇所，下フランジ小端の両側 1 箇所ずつを高所作業者に乗って測定する。その後，表計算ソフトウェアに手入力し，データ処理すると，平均値・標準偏差などの統計データが得られる[54]。しかし，この計測手法は，測定手間が掛かり，その後，表計算ソフトウェアへの入力およびデータ処理が必要なため，多大な工数を必要とする。

表 4.1　建築物の階ごとの耐火時間と規定厚さ

建築物の階	耐火時間	規定厚さ 柱	規定厚さ 梁
最上階および最上階から数えて階数が2以上、4以内の階	1時間	25mm	25mm
最上階から数えて階数が5以上、14以内の階	2時間	45mm	45mm
最上階から数えて階数が15以上の階	3時間	65mm	60mm

図 4.1　耐火被覆の厚さ確認ピン

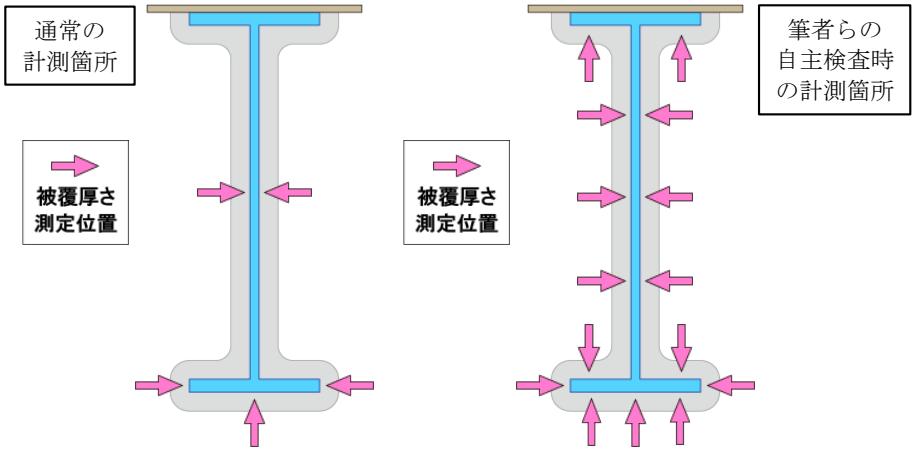


図 4.2　耐火被覆の厚さ測定箇所

図 4.3　自主検査用の耐火被覆の厚さ測定器具

4.1.2　本章の概要

本章では，DX 化を推進し，施工管理業務の生産性向上を図るため，点群データを耐火被覆工事における吹付け厚さの品質管理へ応用した内容についてまとめる。まず，TLS で耐火被覆の吹付け厚さを計測する自動計測手法を考案し，開発したロボットで吹付けを行った耐火被覆の厚さを計測した。別途行った手動計測の結果と比較し，ほぼ同様の結果が得られることを確認した。これにより，従来の手動計測が自動計測に置き換えられることがわかった。次に，技能工が吹付けた耐火被覆の厚さを自動計測し，分析した。規定厚さを下回ることなく，効率的に吹付けていることがわかった。技能工の吹付け厚さの結果に基づいて，開発したロボットで吹付ける耐火被覆の吹付け厚さの目標値を設定し，現場施工を行った。自動計測で吹付け厚さを計測した結果，規定厚さを大きく下回ることなく吹付けを行えた。これにより，ロボット施工の品質管理を確立したことを示す。

4.2　提案した耐火被覆吹付け厚さの計測管理手法

4.2.1　点群データの取得方法

建築工事で点群データを取得するための装置や手法には，カメラで撮影した画像を利用する方式と TLS を利用する方式が主流である。カメラ撮影画像を利用する方式では，フォトグラメトリ法のうち，SfM の計算手法を搭載した SfM ソフトウェアを利用して，点群データを生成する方法が一般的である。

筆者らは，過去の経験に基づくとともに，計測対象の形状・大きさ，要求される精度，データを得るまでの時間，コストなどの様々な状況を総合的に判断し，目的に応じて点群データを取得する方法を選定している。

耐火被覆の厚さの計測対象は鉄骨の梁であり，そのほとんどが H 形鋼で形成されているため，形状が複雑である。したがって，図 4.4 に示すように TLS で計測する手法を選択した。

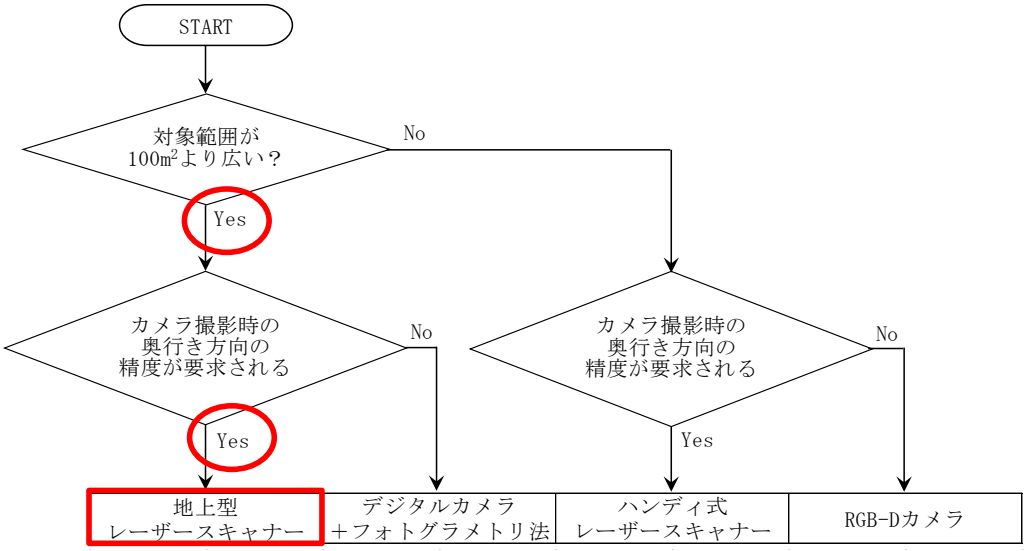


図 4.4　実務における建築工事の点群データ取得方法の実用的な選定フロー

4.2.2　提案した自動計測手法

吹付け厚さの自動計測では，点群データを取得する TLS として，図 4.5 に示すように FARO 製の Focus3D X330 を利用した。同 TLS の仕様を表 4.2 に示す。梁の下フランジ上面とウェブの入隅など死角となる箇所を減らすため，三脚を伸ばしてできるだけ高い位置に TLS を設置した。その後，図 4.6 に示すフローで点群データを処理した。なお，複数箇所で取得した点群データの統合や現場座標系に配置する作業は FARO 製の専用ソフトウェアで，また，ノイズ処理や間引

き等の作業は CloudCompare [注 6)] で行った。なお，本論文では，以後の点群データの下処理についても同様のフローで行った。自動計測では，下フランジ上面とウェブの入隅部の死角により，点群データが一部欠落する。この死角は，例えば，H-600×200×11×17 の小梁で面積の 5～10%に相当する。自動計測の全体データへの影響は小さいと推察されるが，手動計測と差が生じる可能性があるため，データの相違を確認する必要がある。

図 4.5　使用した TLS

表 4.2　使用した TLS の仕様

メーカー・機種	FARO製 Focus3D X330
大きさ	240×200×100mm
重量	5.2kg
測定範囲	0.6～330m
測定速度	122,000～976,000点／秒
測定誤差	±2mm
カメラ解像度	7000千万画素
レーザー	クラス1
波長	1550nm

注 6）仏国製のフリーの点群処理ソフトウェア。多くの機能があり，自前のプログラムを組込めるようになったことから，使用する研究者が近年増加している。

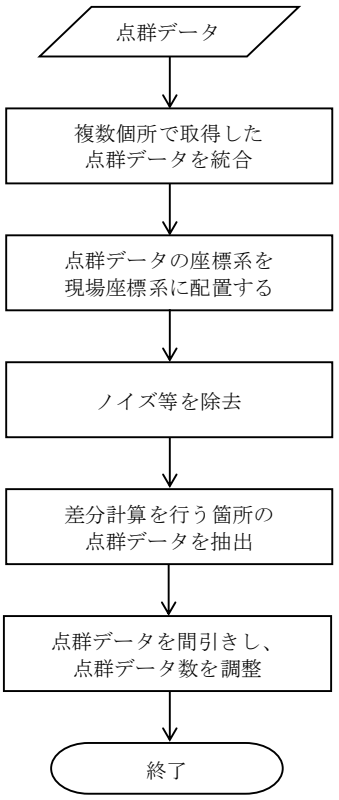


図 4.6　点群データの処理フロー

4.3　耐火被覆吹付けロボットの開発

4.3.1　耐火被覆吹付けロボットの開発の背景

半乾式吹付けロックウール工法の耐火被覆工事では，作業環境が劣悪であること等から，新たな成り手が現れず，年々，技能工は減少し続けている。そこで筆者らは，2.5.2 項で示したように耐火被覆工事の省人化を目的として，同工法のロボット施工について研究を始めた。

耐火被覆工事は，図 4.7 に示すように施工階における吹付け，表面押さえ・清掃，段取り・片付け，プラントにおける材料供給の各作業を，班体制を組んで分担して行う。このうち，吹付け作業は班の 1 名がほぼ専属で長時間行う。この吹付け作業が最も高い技能を必要とし，ロボット施工への置き換えによる省人化効果が特に高い。そこで筆者らは，吹付けを自動化するロボットを開発した。

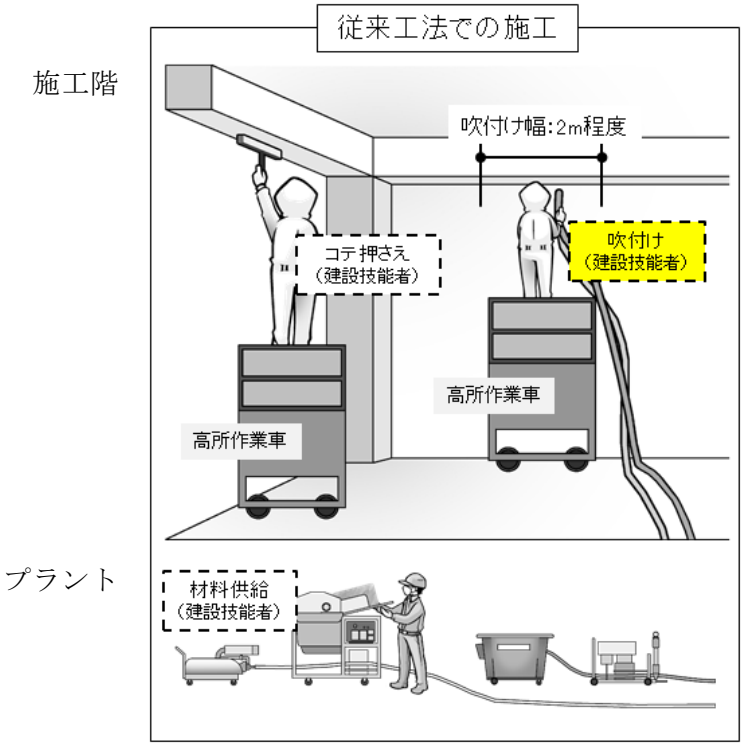


図 4.7　耐火被覆吹付け作業の体制

4.3.2　耐火被覆吹付けロボットの開発

吹付け対象は，中高層以上の事務所ビルの基準階とした。基準階としたのは，柱・梁の配置を含む平面プランや階高が一定で繰り返されることが多いため，ロボット施工に向いていると判断したからである。開発したロボットは 1 台であること，ロボットは吹付けできない箇所が

あることから，複数班いる技能工に加わる施工体制とした。事前に耐火被覆工事の作業を分析した結果，吹付け作業には高所作業車が必須であった。また，吹付け作業は，吹付けと高所作業車での移動・昇降に大別された。高所作業車での移動・昇降回数を削減すれば，実質の吹付け時間を長くできると推測した。対象部位は柱と梁に大別されるが，施工面積は，通常，梁の方が多い[注 7)]。以上から，ロボットの吹付け対象は主に梁とした[55)]。

開発したロボットを図 4.8 に，同仕様を表 4.3 に示す。ロボットは，走行装置，昇降装置，横行装置，産業用ロボットアームで構成される。高所の梁の吹付けを行うため，昇降装置は必要不可欠であり，H 形鋼の梁を効率良く吹き付けるには，その姿勢を柔軟に変えられる 6 軸の産業用ロボットアームが必要不可欠であった。また，梁の軸方向の作業エリアを拡げられると，ロボットの移動・昇降回数が減らせるため，梁の軸方向に移動が可能な横行装置を備えた。この結果，吹付け幅として，約 3.5m を確保できた。中高層の事務所ビルに多い 7.2m スパンの場合[注 8)]，大梁と大梁をつなぐ小梁の長さは 6.8～6.9m が多い。この長さであれば，図 4.9 に示すように軸方向の 2 箇所にロボットを設置すれば，小梁全体を吹付けられることになり，ロボットの移動・昇降回数を最小限にすることができる。ロボットアームの動作の制約から，梁芯に対して，オフセットして配置する必要があるため，梁の表面と裏面の吹付けをするには，それぞれの面で 2 箇所，合計 4 箇所に設置する必要がある。

注 7）いくつかの中高層事務所ビルの基準階における鉄骨面の吹付け面積を調べたところ，7～8 割程度が梁の吹付け面積であった。

注 8）中高層事務所ビルの 5 工事において，建物外周とコア部をつなぐロングスパンの大梁の配置間隔を調べたところ，すべての工事において 7.2m であった。

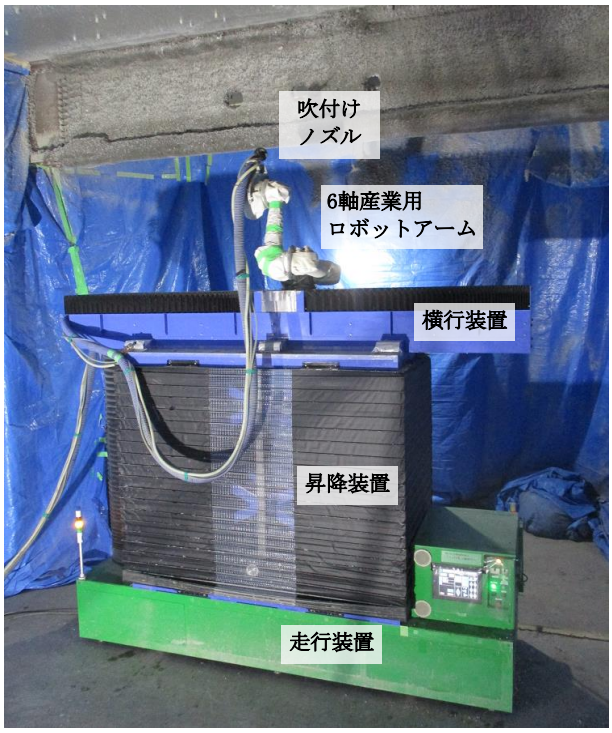


図 4.8　開発した耐火被覆吹付けロボット

表 4.3　開発した耐火被覆吹付けロボットの仕様

構成	走行装置，昇降装置，横行装置 6軸産業用ロボットアーム
サイズ	3.2×1.2×1.5 m
重量	2350 kg
対応可能階高	5.5 m以下
対応可能な梁せい	1.5 m以下
最大吹付け幅	3.5 m

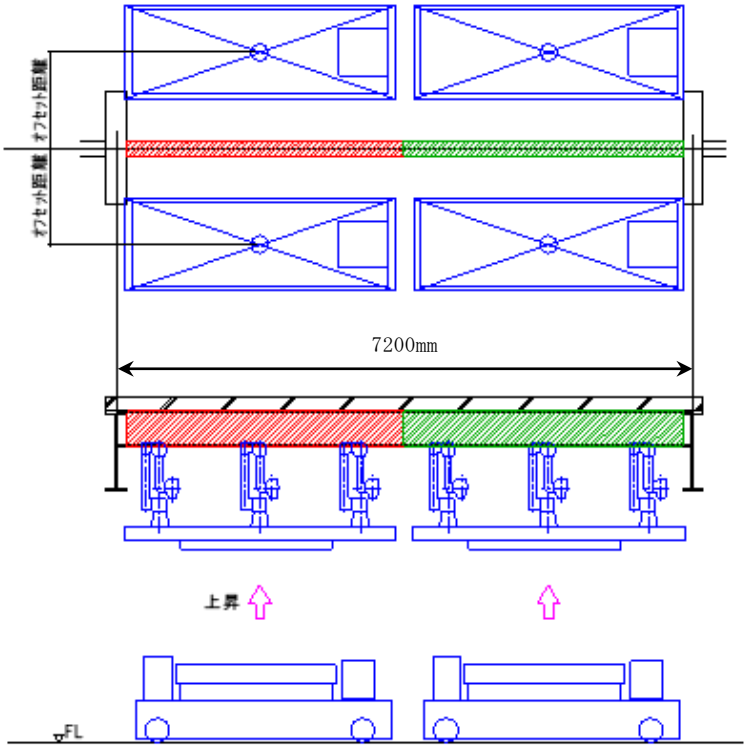


図 4.9　梁吹付け時のロボットの配置
（赤，緑斜線部は，吹付け対象の梁）

4.4　耐火被覆吹付けロボットの吹付け品質

4.4.1　ロボットの制御と吹付け厚さの調整

開発したロボットは，梁を認識しておらず，事前にスラブ上に墨出しをしておき，リモコン操作で所定の場所に停止させる。BIM や鉄骨図から梁のメンバーを読取り，あらかじめ準備した吹付けプログラムをタッチパネルのボタン操作で実行する。吹付け作業は，ロボットアームの先端に取り付けた吹付けノズルを梁の軸方向に移動させて耐火被覆材を吹付ける。ウェブ面への吹付け時のノズルの動きを図 4.10 に示す。作業エリアの端部から端部まで一列吹付けると，その列と平行な上の列へノズルを移動させ，前の列と逆方向へノズルを移動させる。隣の列への移動量をピッチと呼ぶ。以後，その繰り返しで下フランジ，ウェブ，上フランジの各面の吹付けを行う。耐火被覆材の供給量などの諸条件はほぼ一定値に設定し，ロボットの作業データはノズルの移動速度を一定速度に決め，ピッチを変化させて，各面ごとの往復数で吹付け厚さを調整した[56]。

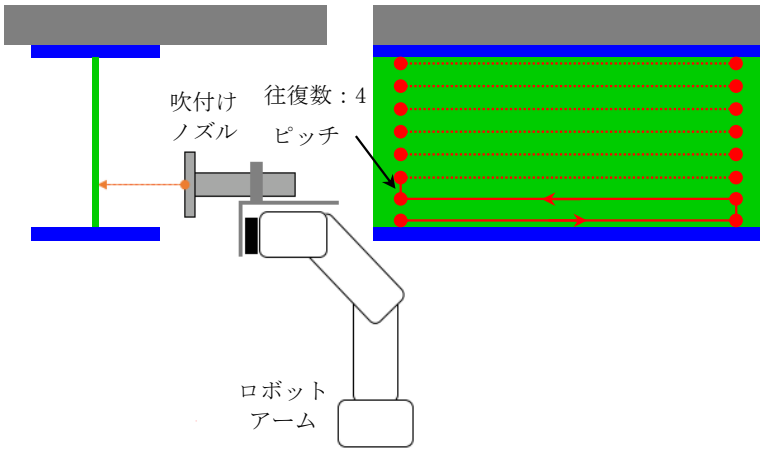


図 4.10　梁のウェブ面への吹付け時のノズルの動き

4.4.2　ロボットの吹付け品質の確認

ロボットの吹付け品質のうち，特に厚さを確認するため，吹付け実験を行った。実施した工事現場の概要を表 4.4 に示す。吹付けた梁は 4 本であり，その規定厚さは 2 時間耐火の 45mm であった。特に目標値を定めたわけではなく，規定厚さを超えるように吹付けた。吹付け厚さの計測は，4.1.1 項で示した手動計測と 4.2.2 項で示した TLS による自動計測で行った。なお，本論文では，以後の点群データの下処理についても図 4.6 で示したフローで行った。吹付けた梁 4 本のうち 1 本の吹付け前後の状況（点群データ）と差分計算した自動計測の結果を図 4.11

に示す。また，手動計測の統計データと度数分布を図 4.12 に，自動計測の統計データと度数分布を図 4.13 に示す。自動計測は吹付け前後で取得した点群データを差分計算して得た。ここで，吹付け前および吹付け後の点群データ数は 150 万点であった。本計算には，CloudCompare の Compute cloud/cloud distance コマンドを利用した。なお，本研究では，使用した PC の仕様の関係で差分計算は点群データの規模によって 100～1000 万点に間引いて計算した。自動計測および手動計測の結果から，規定値未満のデータが 20～25%程度あったことを確認した。目標厚さをしっかり定めずに吹付けを行うと，規定厚さを満足できない箇所が多数発生することがわかった。すなわち，目標厚さを具体的に設定して，吹付ける必要があることがわかった。

表 4.4　実験を行った工事現場の概要

実施場所	大阪府大阪市
建物用途	ホテル・駐車場
構造種別	鉄骨造
階　　数	地上14階、塔屋2階
建築面積	10,147m^2
延床面積	60,426m^2
最高高さ	GL+57m
施工対象階	1階の一部
耐火仕様	2時間耐火（規定厚さ45mm）
実施時期	2018年11月

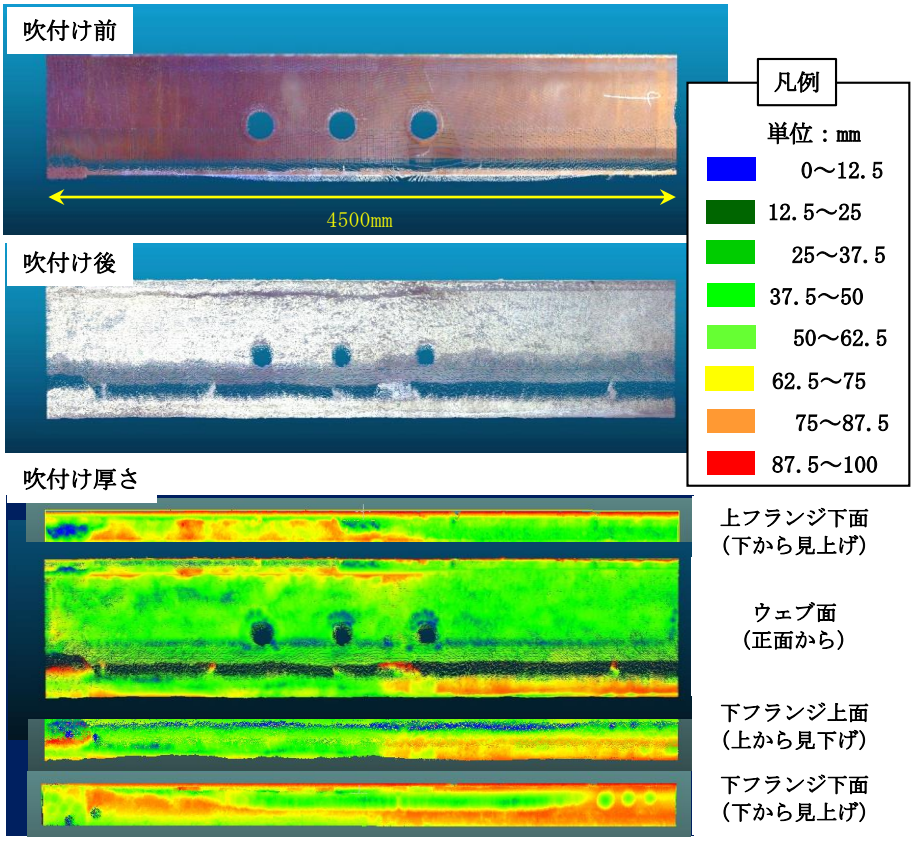


図 4.11　自動計測の結果

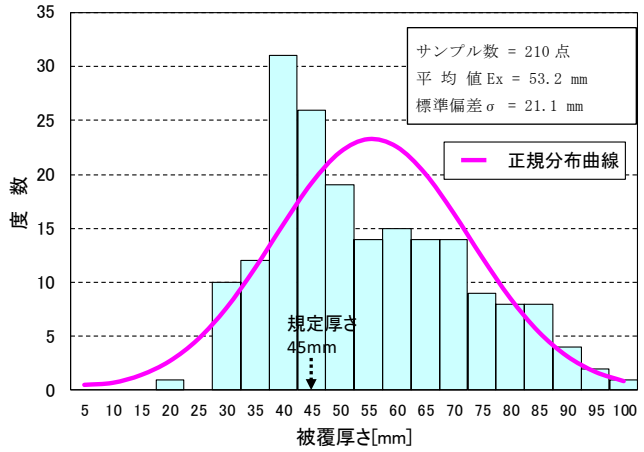


図 4.12　手動計測による吹付け厚さのヒストグラム

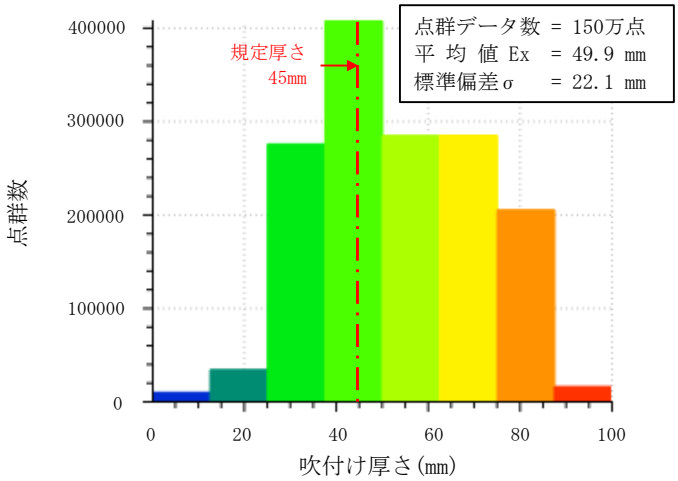


図 4.13　自動計測による吹付け厚さのヒストグラム

4.4.3　自動計測と手動計測の相違について

前項の結果において，手動計測ではほとんど存在しない厚さ 20mm 以下のデータが自動計測には存在していた。これは，手動計測では計測対象としなかった落綿を生じた箇所や比重を計測するためコア抜きした箇所の結果を反映したからである。その結果，自動計測は，手動計測より平均値が小さくなり，標準偏差が大きくなった。

詳細に比較するため，手動計測と自動計測のヒストグラムの各区間の累積度数を図 4.14 に示す。同図は，二種類の計測手法の度数の累計値を 1 としたときの手動計測と自動計測の相対累積度数を示している。なお，吹付け厚さとしてヒストグラムの各区間の最大値を入力した。同図から，手動計測と自動計測の相対累積度数は概ね一致していることがわかる。

さらに詳細に比較するため，手動計測と自動計測の相対累積度数同士の比較を図 4.15 に示す。

同図から，厚さの低い領域では，自動計測の方が手動計測よりデータ数が多いことが読み取れる。これは，先にも示した落綿を生じた箇所やコア抜した箇所の厚さの低い領域のデータを計測した自動計測と計測しなかった手動計測の違いによるものと考えられる。それ以外の領域では，相対累積度数は概ね一致したことが確認できた。

以上の結果から，TLS 計測の死角による影響は小さかったことがわかる。これにより，自動計測は手動計測に対して平均値と標準偏差に若干の差異が認められたが，両者のヒストグラムはほぼ一致し，梁全体の計測結果が得られるなどの利点が多いことから，その代用になり得ることが示された。

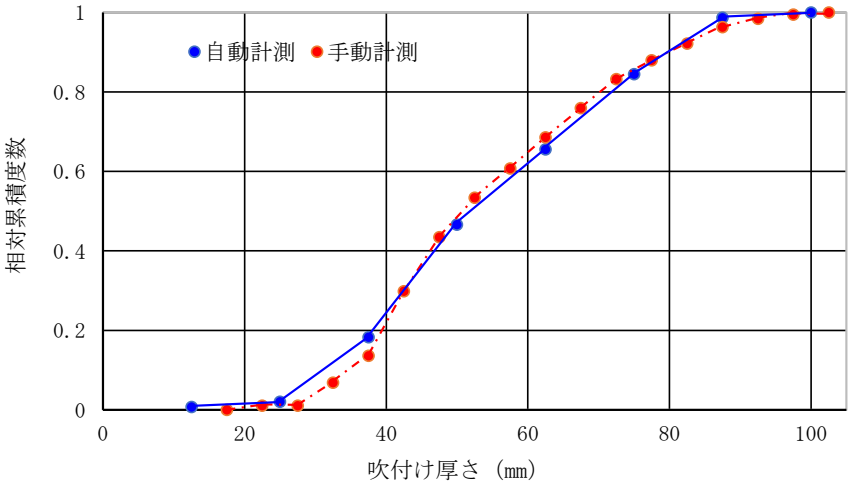


図 4.14　手動計測と自動計測の相対累積度数

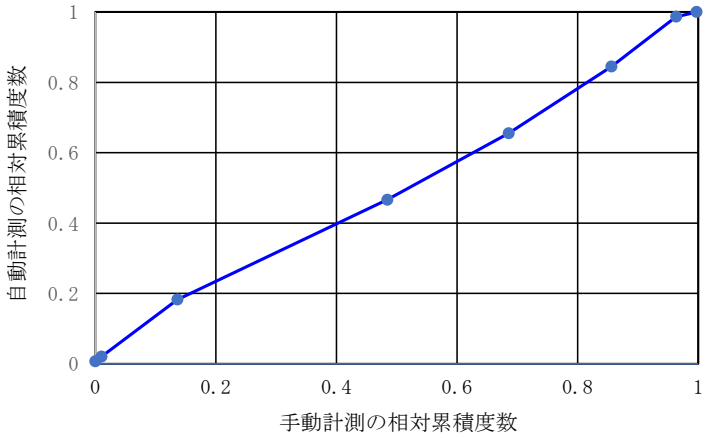


図 4.15　手動計測と自動計測の相対累積度数同士の比較

4.5　技能工の吹付け厚さの分析とロボット施工の目標厚さの設定

4.5.1　技能工の吹付け厚さの分析

ロボット施工の目標厚さを設定するにあたり，実際の技能工はどのような吹付けおよび厚さの管理を行っているかを定量評価するため，TLS を利用して自動計測を行った。計測した工事現場の概要を表 4.5 に示す。耐火被覆の規定厚さは 1 時間耐火の 25mm であった。取得した点群データの処理は，4.4.2 項で示した内容と同様であるが，計測エリアが広かったため，複数の箇所に TLS を設置し，点群データを取得した。吹付け後の計測時の設置場所を図 4.16 に示す。死角ができるだけ少なくなるように，TLS の設置場所に注意した。複数データを統合した後，座標系を現場座標系にした吹付け前と吹付け後の点群データを同様に差分計算し，吹付け厚さを得た。自動計測による対象エリアの吹付け厚さの結果を図 4.17 に示す。同図において，青（0～12.5mm）および赤（87.5～100mm）の部分は吹付けていない箇所のデータである。これらの点群数は相対的に少なかったため，そのまま統計処理に含めた。また，自動計測の統計データと度数分布を図 4.18 に示す。技能工とロボットの吹付け厚さの統計データに関する比較を表 4.6 に示す。双方の規定厚さが異なるため，標準偏差を平均値で除した変動計数[注 9)]で比較したところ，ロボットの変動計数は技能工の約 2.4 倍であった。すなわち，技能工の吹付け厚さのばらつきはロボットの約 40%であった。標準偏差が小さかったため，平均値が低い値であっても，規定厚さ未満の割合を最小限にできていることがわかった。また，度数分布は，左右非対称の分布を示しており，規定厚さ 25mm の直上の区分（25～37.5mm）で最頻値を示し，規定厚さの 2 倍以上となる 50mm 以上のデータが極端に少ないことがわかる。この結果より，技能工は材料を無駄にしないで,かつ,規定厚さ未満とならないように効率良く吹付けていることがわかった。

注 9）変動計数（Coefficient of Variation）は標準偏差を平均値で割った値であり，CV と表すことが多い。異なる単位や分布を示すデータのばらつきを比較する際に用いる無次元数である。

表 4.5　技能工の吹付け厚さを計測した工事現場の概要

実施場所	東京都八王子市
建物用途	研究施設
構造種別	鉄骨造、一部鉄骨鉄筋コンクリート造
階　　数	地下1階、地上4階、塔屋1階
建築面積	4,407m^2
延床面積	13,833m^2
最高高さ	GL+18.5m
施工対象階	2階の一部
耐火仕様	1時間耐火（規定厚さ25mm）
実施時期	2019年7～9月

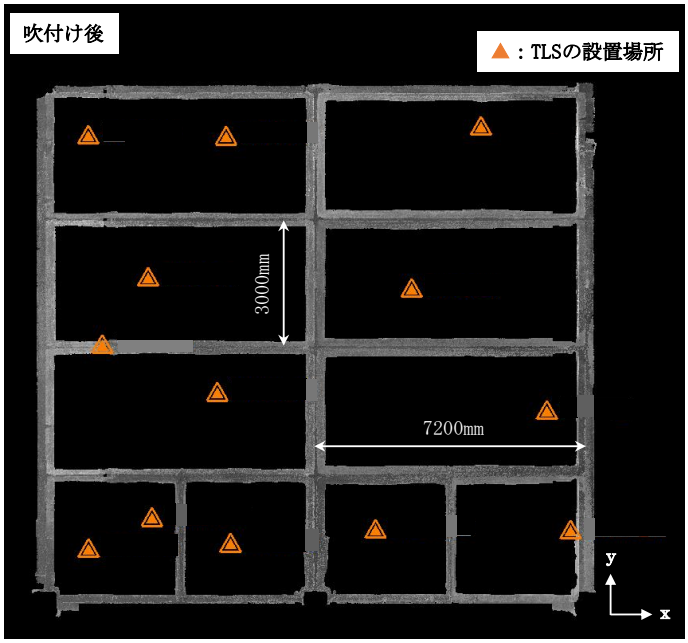


図 4.16　吹付け後の TLS の設置場所

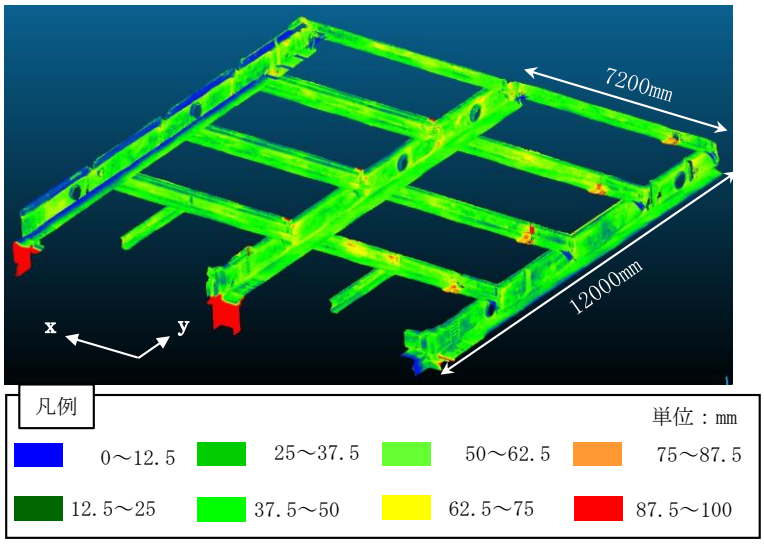


図 4.17　自動計測により得た技能工の吹付け厚さ自動計測により得た技能工の吹付け厚さ

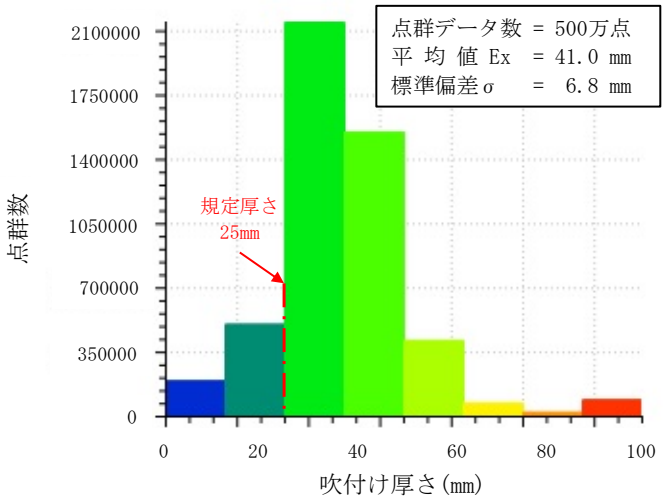


図 4.18　自動計測により得た技能工の吹付け厚さのヒストグラム

表 4.6　ロボットと技能工の吹付け厚さの統計データの比較

	技能工	ロボット
規定厚さ(mm)	25	45
平均値(mm)	41.0	49.9
標準偏差(mm)	6.8	22.1
変動計数	0.17	0.44

4.5.2　ロボット施工の目標吹付け厚さの設定の諸条件

ロボット施工の吹付け厚さの目標値を設定するにあたり，標準偏差に注目した。建築工事では，標準仕様書に沿って品質管理を行う[52]。その品質管理規準となっている管理許容差は，正規分布の 2σ に相当する誤差値に設定されている。この管理許容差を工程能力と呼ぶ。工程能力は，適切な条件下・工程下において生産できる能力を意味することから，工期を適性の半分に短縮すると，建築工事の品質は管理許容差を外れることが多くなる。また，施工誤差が，正規分布の 3σ に相当する誤差値に設定された限界許容差を超えた場合，監理者と協議を行うことになっている。

一方，製造業における製品管理では，3σ で品質管理をする場面が多い[57]。すなわち，3σ に入らない製品は不良品として扱われるケースが多い。工場のライン製造より，不安定な環境で施工する建築工事は，工業製品に準じた品質管理を求めることは難しい。

ところで，規定厚さを効率良く満足するには，規定厚さに 2σ を加えた値を平均値に設定すると，規定厚さ未満の割合は理論上約 2.3%となる。仮に規定厚さに σ を加えた値を平均値に設定すると規定厚さ未満の割合は理論上約 15.7%に，同様に 3σ を加えた値を平均値に設定すると規定厚さ未満の割合は理論上約 0.1%となる。σ の倍率を上げ，平均値を大きくすると，耐

火被覆は全般的に厚くなり，材料の過剰な使用[注 10)]が顕著になる。一方，σ の倍率を下げ，平均値を小さくすると，規定厚さ未満の割合が高くなり，補修吹付けのエリアが膨大となる。したがって，ロボット施工の初期段階の品質管理であることや規定厚さ未満の割合や材料使用量などを総合的に加味して，規定厚さに 2σ を加えた値を平均値となるように吹付けることが最適だと判断した。この考え方であると，ロボット施工の吹付け厚さの標準偏差を小さくできれば，すなわち，より平滑に耐火被覆を形成できれば，吹付け目標の平均値を小さくでき，材料の無駄使いをさらに減らすことができる。一方，数%ではあるが，規定厚さ未満になる可能性が残っているため，補修吹付けが必要となる。

4.5.3　ロボット施工の目標吹付け厚さの設定

1 時間耐火（25mm）の場合の目標値の概念を図 4.19 に示す。前項の考え方に基づく目標値の設定において，まず，予定されていた施工場所における耐火被覆の規定厚さが 1 時間耐火の 25mm であったため，図 4.13 で得られた 2 時間耐火の結果を補正し，目標値を計算した。すなわち，2 時間耐火の厚さの標準偏差に 1 時間・2 時間耐火の規定厚さの比（25/45）を掛けて仮想 1 時間耐火の厚さの標準偏差を得た。その計算の過程を表 4.7 に示す。その結果，目標の平均値が 49.6mm，標準偏差が 12.3mm と算出された。目標値としてわかりやすくするため，標準偏差を 12.5mm，目標の平均値を 50mm に設定した。

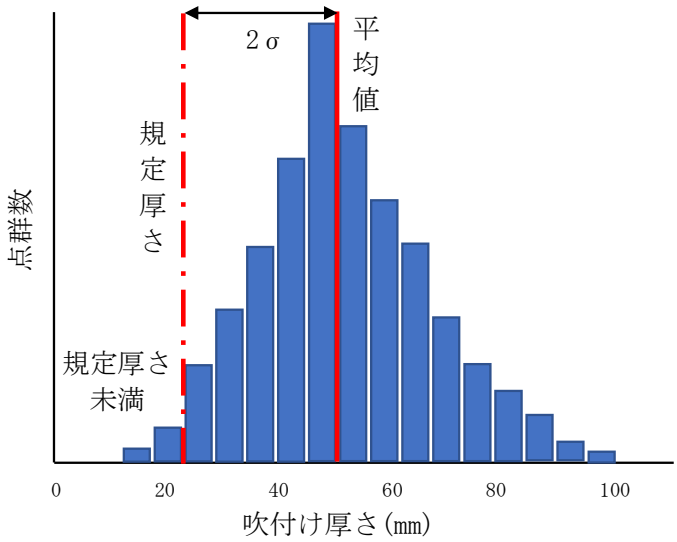


図 4.19　ロボット施工における目標値設定（1 時間耐火）の概念

注 10）協力会社は耐火被覆工事を請負うにあたり，表面押さえや落綿を加味して，規定厚さに 5～10mm 加えた厚さの材料を使用するとして，元請と契約することが多い。したがって，それ以上の厚さで吹付けると材料を過剰に使うことになる。

表 4.7　ロボット施工における吹付け厚さの目標値の算出過程

	ロボット 2時間耐火 （図4.13の結果）	ロボット 1時間耐火 （図4.13の結果 を補正）	ロボット 1時間耐火 （目標値）
規定厚さ(mm)	45	25	25
平均値(mm)	49.9	27.7	49.6
標準偏差(mm)	22.1	12.3	12.3

4.6　ロボットによる吹付け施工とその結果

前節で設定した目標値で吹付け施工を実施した工事現場の概要を表 4.8 に示す。また，平面配置を図 4.20 に示す。耐火被覆の規定厚さは 1 時間耐火の 25mm であった。吹付け後の状況を図 4.21 に示す。施工したエリアから抜粋したエリアの吹付け厚さ（吹付け前後の差分計算の結果）を図 4.22 に示す。なお，点群データの処理は，4.4.2 項および 4.5.1 項で示した内容と同様である。また，自動計測の統計データと度数分布を図 4.23 に示す。平均値は目標値を若干下回ったものの，標準偏差はほぼ目標値の結果となった。

表 4.8　吹付け施工を実施した工事現場の概要

実施場所	東京都あきる野市
建物用途	研究施設
構造種別	鉄骨造
階　　数	地上4階、塔屋1階
建築面積	15,358m^2
延床面積	47,335m^2
最高高さ	GL+28.0m
施工対象階	1階の一部
耐火仕様	1時間耐火（規定厚さ25mm）
実施時期	2019年11月

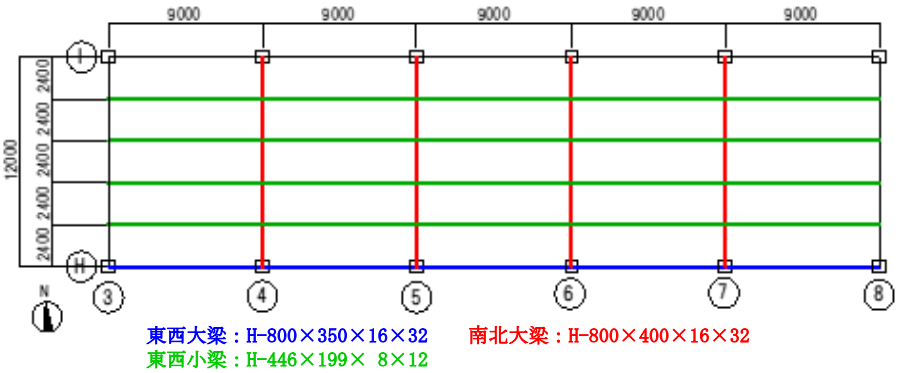


図 4.20　吹付け施工を実施した工事現場の平面配置

図 4.21　ロボットによる吹付け後の状況

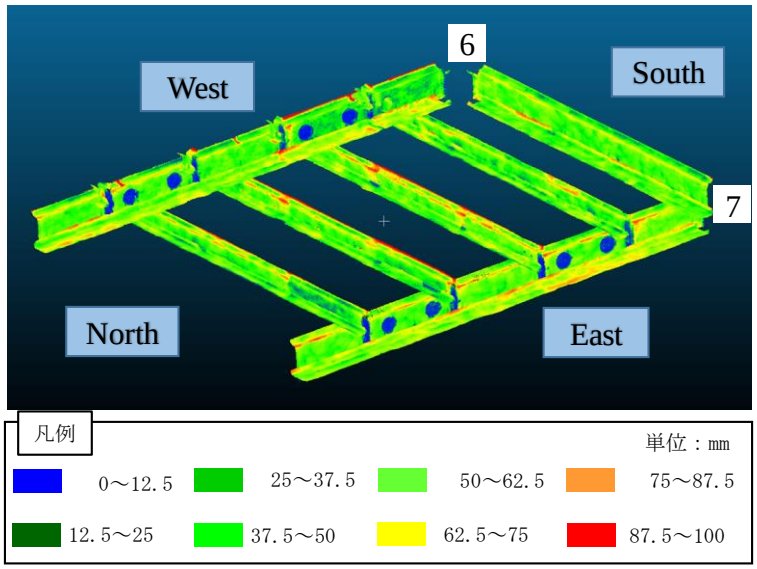


図 4.22　自動計測で得たロボットの吹付け厚さ

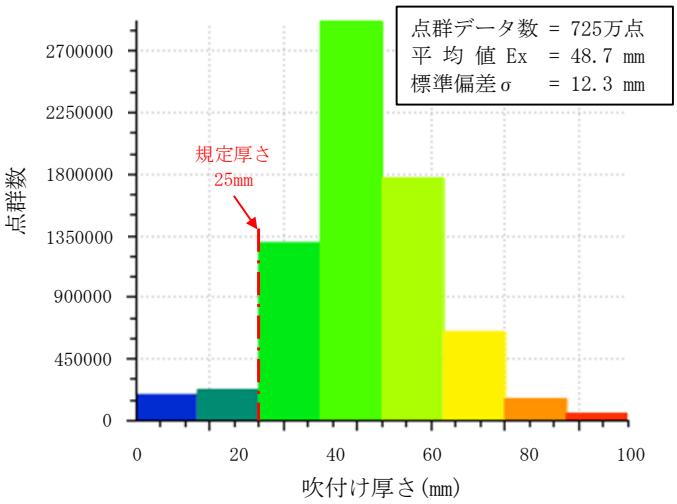


図 4.23　自動計測で得たロボットの吹付け厚さのヒストグラム

4.7　考察

4.7.1　生産性とデータの即時性の比較

耐火被覆の厚さ計測において,手動計測は梁一本単位での計測やその統計処理に適している。一方，TLS による自動計測は工区ごとやフロア単位などのまとまった計測やその統計処理に向いている。手動計測では人手によりほとんどのデータを入力・処理するが，自動計測では PC による処理が大部分を占め，人手はほとんど掛からないことがその理由である。しかし，現状の点群データの処理は，大容量になるほど時間を要し，データ処理の時間は使用する PC の性能に依存し，概ね即時性が低下する。したがって，現時点では，状況に応じて手動計測と自動計測を使い分けて行うのが良いと考える。近い将来，点群データの処理速度が向上すれば，自動計測の即時性はさらに向上し，主流になっていくと考える。

4.7.2　目標設定に標準偏差 2σを採用した理由

吹付け厚さの目標値を設定してロボットで吹付けを行った結果，規定厚さ未満の割合が約 5.5%となり，理論値の約 2.3%を上回った。平均値がもう少し高くなれば，規定厚さ未満の割合を理論値並みに下げられたと考えられる。以上のことから，本論文で示した目標厚さの設定手法は有効であったことが確認できた。

一方，今後，ロボット施工の品質がさらに向上・安定化すれば，製造業で主流の 3σ の品質管理に移行することが望ましいと考える。

4.7.3　吹付け後の表面押さえについて

半乾式吹付けロックウール工法では，吹付け作業後に表面押さえが必須となっている[43)]。表面押さえ作業を図 4.24 に示す。これは，毛羽立ちや浮遊成分を表面押さえすることで表面を一体化することが目的である。この表面押さえ作業によって，吹付け厚さは，概ね，5mm 程度小さくなる。本論文の 4.4.2 項および 4.5.1 項における吹付け厚さの計測は表面押さえ後に行っているため，最終の出来形で議論している。しかし，4.6 節のみ，その後の表面押さえを加味して，吹付け時の目標設定の平均値は，本論文に示した値に対して+5mm と設定した。

図 4.24　表面押さえ作業

4.8　まとめ

本章では，DX 化を推進し，施工管理業務の生産性を向上させるため，耐火被覆工事の品質管理における点群データを活用する方法論を確立した。具体的に，耐火被覆のロボット施工の品質管理について，従来の手動計測に変えて点群データを活用した自動計測を行い，その有効性を実施工において確認することができた。

まず，耐火被覆の吹付け前後の点群データを TLS でそれぞれ取得し，それらを差分計算することで耐火被覆の厚さを自動計測できることを示した。また，その結果から得られたヒストグラムや統計データは手動計測と概ね一致したことを確認した。

次に，技能工の吹付け厚さを自動計測して分析したところ，平均値と標準偏差がロボット施工より明らかに小さいことがわかった。吹付け材料の無駄使いを最小限にし，効率良く規定厚さを満足して吹付けていることがわかった。

さらに，ロボット施工の目標厚さの設定には，吹付け厚さの標準偏差 σ に注目し，規定厚さに 2σ を加えた値を目標平均値にする管理手法を考案した。この管理手法は，補修吹付けを前提とした場合，規定厚さ未満になる割合と材料ロスの点で最もバランスが良かった。

最後に，目標厚さを設定して耐火被覆のロボット施工を行った結果，規定厚さ未満の箇所を効率良く縮小でき，統計上，理論値に近い吹付け厚さを確保することができた。

耐火被覆の厚さ計測において，手動計測は梁一本単位での計測やその統計処理に適している。一方，TLS による自動計測は工区ごとやフロア単位などのまとまった計測やその統計処理に向いている。手動計測では人手によりほとんどのデータを入力・処理するが，自動計測では PC による処理が大部分を占め，人手が掛からないことがその理由である。しかし，現状の点群データの処理は，大容量になるほど時間を要し，データの即時性が低下する。したがって，現時点では，状況に応じて手動計測と自動計測を使い分けて行うのが良いと考える。近い将来，点群データの処理速度が向上すれば，自動計測の即時性はさらに向上し，主流になっていくと考える。

第 5 章　結論

5.1　本論文のまとめ

本論文では，まず，UAV を利用して撮影した写真を SfM ソフトウェアに入力し，生成された点群データを利用して杭工事における出来形計測のうち，杭芯計測を行う方法論を提案した。主に精度面の有効性を実験によって確認することができた。まず，SfM ソフトウェアにより生成された点群データから手動で杭芯計測を行った場合の計測精度は GNSS 測量と同等であった。この計測精度は点群データの生成精度に依存すると考えられる。点群データの生成精度は，GCP の測量精度（現地座標の信頼性）および撮影に用いたカメラの解像度や UAV の飛行高度などを含めた SfM ソフトウェアの計算精度に依存する。次に，SfM ソフトウェアにより生成された点群データから自動で杭芯計測が行えることを実証した。計算範囲を絞り込み，段階的に計算することで効率良く算出できることがわかった。自動計測の結果は杭頭部に付着した土の影響で手動計測の結果に対して差異があったが，杭頭部に付着した土の影響を排除すれば，手動計測と同等の結果が得られると推察できた。

使用した点群データは，UAV で空撮した画像を基に生成したため，全方向に満遍なく分布していた。すなわち，得られた点群データの粗密の指向性は低かった。したがって，杭芯計測に適した点群データであったと推察できる。

一方，デジタルカメラは年々進化しており，現在では，約 1 億（11608×8708）画素の製品が市販されるようになった。カメラの画素数が増加すると，表 3.3 の画像分解能は小さくなるため,仮に 1 億画素のデジタルカメラを使用した場合,画面分解能は平面で 2.4mm,奥行きで 4.2mm となる。この精度が確保できれば，TS の測量精度に近づくため，さらに利用価値が高まると考えられる。

本論文では次に,耐火被覆工事の品質管理における点群データを活用する方法論を提案した。具体的に，耐火被覆のロボット施工の品質管理に従来の手動計測に変えて，点群データを活用した自動計測を行い，その有効性を実施工において確認することができた。まず，耐火被覆の吹付け前後の点群データを TLS でそれぞれ取得し，それらを差分計算することで耐火被覆の厚さを計測できることを示した。また，その統計データは手動計測と概ね一致することを確認した。次に，技能工の吹付け厚さを分析したところ，平均値と標準偏差がロボット施工より明らかに小さく，材料の無駄使いを最小限にし，効率良く規定厚さを満足して吹付けていることがわかった。さらに，ロボット施工の目標厚さの設定には，厚さの標準偏差 σ に注目し，規定厚さに 2σ を加えた値を目標平均値にする手法を考案した。この手法は，補修吹付けを前提とした場合，規定厚さ未満になる割合と材料ロスの点で最もバランスが良かった。最後に，目標厚

さを設定して耐火被覆のロボット施工を行った結果,規定厚さ未満の箇所を効率良く縮小でき,統計上，理論値に近い吹付け厚さを確保することができた。

耐火被覆の厚さ計測において,手動計測は梁一本単位での計測やその統計処理に適している。一方，TLS による計測は工区ごとやフロア単位などのまとまった計測やその統計処理に向いている。手動計測ではデータをまとめるのは人手による作業が中心であるが，自動計測では PC による処理がほとんどを占め，人手はほとんど掛からないことがその理由である。さらに，点群データの処理は，大容量になるほど時間を要し，データの即時性が低下する。したがって，現状では，状況に応じて手動計測と自動計測を使い分けて行くのが良いと考える。近い将来，点群データの処理速度が向上すれば，自動計測の即時性はさらに向上し，主流になっていくと考える。

5.2　今後の課題と展開

本論文で提案した杭芯計測の手法は,それ以外の工種へも展開が可能だと考える。すなわち，出来形計測の対象部について，全方位から点群データを取得できていれば適用可能である。こうした観点から，長尺部材，かつ，柱状の建設部材への展開が向いていると思われる。具体的に，鉄骨柱やプレキャストコンクリート部材の柱の建入れ精度の出来形計測が適していると考える。一方，計測精度面において，実工事に適用するレベルには到達していないことが確認できた。この点については，高解像度のカメラを使用して SfM ソフトウェアにより点群データを生成する方法，または，TLS により点群データを取得する方法，によって点群データを取得することで TS の計測精度にかなり近づくことが，理論上，明らかである。したがって，機会があれば，実施する所存である。

また，本論文で提案した耐火被覆吹付け厚さの計測管理手法によって，耐火被覆の厚さの計測管理に点群データが活用できることを示した。二つの異なる場面において，現場の座標系で点群データを取得でき，差分計算を行えば，高精度に厚さ等の品質管理が可能になる。市中のソフトウェアを用いることで，平均値や標準偏差などの統計データもすぐに得られる。建築工事においては，厚さの品質管理が必要な場面は他にもあるため，今後は，他工事への展開を考えて行きたい。一方，耐火被覆のロボット施工においては，これで品質面の管理手法が確立できたため，今後は，歩掛りを含めた生産性の分析に注力し，技能工以上の生産性が得られるよう研究を継続していく。

参考文献

1）Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Regarding the Recent Situation of the Construction Industry, https://www.mlit.go.jp/tochi_fudousan_kensetsugyo/const/content/001493958.pdf, accessed 2023.4.13
国土交通省 最近の建設業を巡る状況について, https://www.mlit.go.jp/tochi_fudousan_kensetsugyo/const/content/001493958.pdf, 参照 2023.4.13

2）Promotion of Digital Transformation (DX) by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, https://www.jacic.or.jp/kenkyu/22/data/r02_6_hirose.pdf, accessed 2023.4.13
国土交通省における DX（デジタルトランスフォーメーション）の推進について, https://www.jacic.or.jp/kenkyu/22/data/r02_6_hirose.pdf, 参照 2023.4.13

3）T. Kaneko, T. Shiokawa, S. Uchida and Y. Nishida: Improvement and Application of a Virtual Construction System, Proceedings of the 10th Symposium on Construction Robotics in Japan, pp.247-252, 2004.9
金子智弥，汐川孝，内田茂，西田雄三：パソコンを利用した仮想建設システムの改良と適用－無線 LAN を利用した躯体工事実績の収集，第 10 回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.247-252, 2004.9

4）T. Nakabayashi, M. Suzuki and T. Kaneko: Development of Construction Photograph Recognition System Part2: Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A-1 Material and Construction, pp.1011-1012, 2016.8
中林拓馬，鈴木理史，金子智弥：工事写真自動認識システムの開発　その２）深層学習を利用した工程認識機能，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1 材料施工，pp.1011-1012, 2016.8

5）The Nikkan Kogyo Simbun Morning Edition, The Process Management for Each Member Using 3D Models, pp. 14, 2018.7.5
日刊工業新聞朝刊, 3D モデルで部材管理, pp. 14, 2018.7.5

6）Y. Ikeda: The Latest Building Construction Technology to Open up a New Age “ Efforts to Improve Accuracy Control Technology for Steel Frames and PCa Members ”, Monthly Building Technology, No.743, pp.68-75, 2011.12
池田雄一：新時代を拓く最新施工技術「鉄骨・PCa 部材の精度管理技術の高度化に関する取組み」，月刊建築技術，No.743, pp.68-75, 2011.12

7) T. Kaneko, M. Suzuki, T. Morioka and K. Hamada: Development of Inspection Support Tool for Reinforcing Bar Work Part1, 2, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A-1 Material and Construction, pp.1291-1294, 2009.8
金子智弥，鈴木理史，森岡徹，浜田耕史：配筋検査支援システムの開発　その１，２，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1 材料施工，pp.1291-1294, 2009.8
8) Y. Ikeda, H. Sakagami and K. Hamada: Development of Automated Bar Arrangement Checking System, Proceedings of the Symposium on Construction and Construction Machinery, pp.77-82, 2014.11
池田雄一，坂上肇，浜田耕史：配筋自動判定システムの開発，建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，pp.77-82, 2014.11
9) T. Kaneko, S. Kawaguchi, M. Fukushi, K. Wada, H. Tenma and H. Onojima: Application of BIM to Redevelopment of the Technical Research Institute, Research of Obayashi Corporation Technical Research Institute, No.74, 2010.12
金子智弥，川口晋，福士正洋，和田克明，天満秀明，小野島一：技術研究所再整備における BIM の利用，大林組技術研究所報，No.74, 2010.12
10) H. Furuya, N. Tsuji, J. Imai, K. Ina and K. Nakano: Inflection of Product Model in Public Construction, Research of Obayashi Corporation Technical Research Institute, No.78, 2014.12
古屋弘，辻奈津子，今井淳一郎，伊奈啓輔，中野孝二：土木工事におけるプロダクトモデルの活用-ICT および CIM の活用による施工の合理化への試み-，大林組技術研究所報，No.78, 2014.12
11) K. Kanzaki: Utilization of the Three-dimensional Model to a Construction Production System, Journal of Japan Society of Civil Engineers, F4 Construction Management, Vol.73, No.4, pp.I_55-I_63, 2017.10
神﨑恵三：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），Vol.73, No.4, pp. I _55- I _63, 2017.10
12) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: As Built Management Procedure Using Terrestrial Laser Scanner (Geotechnical Engineering), 2016.3
国土交通省：レーザースキャナーを用いた出来形管理要領（土工編），2016.3
13) Y. Ikeda, H. Sakagami and T. Kaneko: Verification of Application Effect of Using 3D Point Cloud Data in Building Construction, Research of Obayashi Corporation Technical Research Institute, No.80, 2016.12
池田雄一，坂上肇，金子智弥：建築工事における 3 次元点群データの活用効果の検証，大林組技術研究所報，No.80, 2016.12
14) Y. Ikeda and N. Yabuki: Study on Utilization of Point Cloud Data for Pile Center

Position Measurement in Pile Construction, Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, Vol.88, No.805, pp.347-355, 2023.03
池田雄一，矢吹信喜：杭工事における杭芯計測への点群データの活用に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.88, No.805, pp.347-355, 2023.3

15） D. Munoz, N. Vandapel and M. Hebert: Directional Associative Marcov Network for 3-D Point Cloud Classification，Proceedings of 4th International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission，2008.6

16） J. Ntiyakunze and T. Inoue: Segmentation of Structural Elements from 3D Point Cloud Using Spatial Dependencies for Sustainability Studies，Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute，2023.2

17）N. Kano, Y. Ikeda and K. Hamada: Automated Recognition of Work Progress at a Construction Site, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), Architectural Institute of Japan, Vol.80. No.715, pp.2081-2090, 2015.9
嘉納成男，池田雄一，浜田耕史：点群データに基づく工事進捗の自動識別に関する研究 PCa 工事における出来形の判定，日本建築学会計画系論文集，Vol.80, No.715, pp.2081-2090, 2015.9

18）V. Reja, P. Bhadaniya, K. Varghese and Q. Ha: Vision-Based Progress Monitoring of Building Structures Using Point-Intensity Approach, 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.349-356, 2021.10

19）U. Stilla and Y. Xu: Change Detection of Urban Objects Using 3D Point Clouds, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS, Vol.197, pp.228-255, 2023.2

20）J. Meguro, K. Ishikawa, M. Hatayama, J. Takiguchi, Y. Amano and T. Hashizume: Development of Phased Earthquake Data Collection System by Cooperation of Mobile Robots and the Spatial Temporal GIS, Journal of the Society of Institute and Control Engineers, Vol.41, No.12, pp.981-988, 205.12
目黒淳一，石川貴一朗，畑山満則，瀧口純一，天野嘉春，橋詰匠：ロボットと時空間 GIS の連携による段階的な震災データ収集システムの開発，計測自動制御学会論文集，Vol.41, No.12, pp.981-988, 2005.12

21）K. Tanimoto and T. Noritsugu: Development of a Grinding Robot for Weld Beads to Create a Free-Form Surface, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.23, No.7, pp831-838, 2005.10
谷本圭司，則次俊郎：自由曲面を目標形状とする溶接ビード仕上げロボットの開発，日本ロボット学会誌，Vol.23, No.7, pp.831-838, 2005.10

22）R. Izutsu, N. Yabuki and T. Fukuda: As-build Detection of Steel Frame Structures Using Deep Learning, Journal of Japan Society of Civil Engineers, F3 Civil Engineering Informatics, Vol.75, No.2, pp.I_94-I_105, 2019.10

井筒竜宇，矢吹信喜，福田知弘：深層学習を用いた鋼骨組構造における出来形検出に関する基礎的検討，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.75, No.2, pp. I _94- I _105, 2019.10

23）F. Bahreini and A. Hammad: Point Cloud Semantic Segmentation of Concrete Surface Defects Using Dynamic Graph CNN, 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.379-386, 2021.10

24）A. Nakamura, K. Toda and H. Maenaka: A Terrestrial Laser Scanning Survey of Cycas Revoluta Thunb. Designated as Natural Monument, Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology, Vol.35, No.1, pp63-68, 2009.7
中村彰宏，戸田健太郎，前中久行：地上型レーザスキャナを用いた天然記念物に指定されたソテツの形状計測，日本緑化工学誌，Vol.35, No.1, pp.63-68, 2009.7

25）K. Ishida: Development of Construction Process by a 3D Scanner in Building Construction, Journal of Development Engineering, Vol.35, No.1, pp.9-12, 2015.5
石田航星：建築工事における３次元スキャナの活用，開発工学，Vol.35，No.1，pp.9-12, 2015.5

26）K. Wu, S. Prieto and B. Soto: Measuring the Spacing of Formwork System Members Using 3D Point Clouds, Proceedings of the Creative Construction e-Conference 2022, pp.396-404, 2022.7

27）K. Oda, T. Takayama and S. Hattori: Point Cloud Generation and Differential Analysis Using Images Obtained by UAV, Advanced Surveying Technology, Association of Precise Survey and Applied Technology, No.107, pp.22-24, 2015.11
織田和夫，高山陶子，服部聡子：UAV 画像を利用したポイントクラウドの生成と差分解析，先端測量技術，日本測量調査技術協会，No.107, pp.22-24, 2015.11

28）A. Yamaguchi, K. Seki and S. Kubota: Heatmap Display of Bridge Damages Using 3D Point Cloud Data, Proceedings of the 83rd National Convention of IPSJ, pp.4-599-4-600, 2021.3
山口愛加，関和彦，窪田諭：3 次元点群データを用いた橋梁の損傷ヒートマップ表示，情報処理学会第 83 回全国大会講演論文集，pp.4-599-4-600, 2021.3

29）K. Nakamura, R. Imai, Y. Tsukada, S. Tanaka and Y. Umehara: Development of Point Cloud Browser "3D Point Studio" to Streamline the Management of Public Structures, Construction, Japan Construction Engineers' Association, Vol.65, pp.61-64, 2021.2
中村健二，今井龍一，塚田義典，田中成典，梅原喜政：公共構造物の管理効率化のための点群ブラウザ 3D Point Studio の開発，月刊建設，全日本建設技術協会，Vol.65, pp.61-64, 2021.2

30）Y. Fujita, Y. Hoshino, I. Kobayashi and R. Nagasaki: Construction of Sedimentation Amount Calculation System Using Point Cloud Data, Proceedings of the 40th Civil Engineering Informatics, Vol.40, pp.133-136, 2015.10

藤田陽一，星野裕司，小林一郎，長崎怜：点群データを用いた堆積量算出システムの構築，第 40 回土木情報学シンポジウム講演集，Vol.40, pp.133-136, 2015.10

31）A. Susami and T. Kyomen: Examples of Using Laser Scanners in Mountain Tunnels Construction, Summaries of Technical Papers of National Convention, Japan Society of Civil Engineers, Vol.35, No.1, 2020.9
須佐見朱加，京免継彦：山岳トンネルにおけるレーザースキャナの活用事例，土木学会全国大会学術講演梗概集，Vol.35, No.1, 2020.9

32）M. Shiozaki, F. Ando and T. Okamoto: Application Example of 3D Laser Scanner for Tunnel Construction Management, Construction Planning, Japan Construction Machinery and Construction Association, pp.20-25, 2007.11
塩崎正人，安藤文彦，岡本隆：3 次元レーザースキャナーのトンネル施工管理への適用事例，建設の施工企画，日本建設機械化協会，pp.20-25, 2007.11

33）M. Adachi: Using Point Cloud Data for Building Design, Kenchikushi, Japan Federation of Architects and Building Engineers Associations, pp.42-45, 2020.1
安達基朗：点群データの設計への利用，建築士，日本建築士会連合会，pp.42-45, 2020.1

34）Japan Federation of Construction Contractors: Quality Control Points for Cast-in-place Concrete Piles, 2017.6
日本建設業連合会：場所打ちコンクリート杭の品質管理のポイント，2017.6

35）F. Inoue, S. Doi, H. Xiangqi, H. Tamura, T. Sasaki and H. Hashimoto: A Study on Position Measurement System Using Laser Range Finder and its Application for Construction Work, Proceedings of 5th International Conference on Advanced Mechatronics，2010.10

36）https://www.mlit.go.jp/common/001259526.pdf, Document No.2 from Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Introduction of Trial Contents (Outline) of a Project Related to the Introduction and Utilization of Innovative Technologies to Dramatically Improve Productivity at Construction Sites, accessed 2022.9.21
https://www.mlit.go.jp/common/001259526.pdf，国土交通省発表資料 2，建設現場の生産性を飛躍的に向上させるための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト 試行内容（概要）の紹介，参照 2022.9.21

37）https://www.nikkan.co.jp/releases/view/93698, The Nikkan Kogyo Simbun Online edition, accessed 2022.9.21
https://www.nikkan.co.jp/releases/view/93698，日刊工業新聞電子版，参照 2022.9.21

38）T. Yamamoto, S. Kuriki and N. Ichikawa: Study on Ammonia Emission from Fireproof Covering Materials, Research of Toda Corporation Technical Research Institute, No.43, pp.8-1-8-4, 2017.11
山本拓弥，栗木茂，市川菜奈絵：耐火被覆材から放散するアンモニアに関する研究，戸田建

設技術研究報告，No.43, pp.8-1-8-4, 2017.11
39）Long Member Positioning Method and Long Member Positioning Support Device, Patent Gazette, Patent No.6601180, 2019.11
長尺材測位方法及び長尺材測位支援装置，特許公報，特許第 6601180 号，2019.11
40）Long Member Positioning Support Device, Patent Gazette, Patent No.6601181, 2019.11
長尺材測位支援装置，特許公報，特許第 6601181 号，2019.11
41） https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi45009.html, Geographical Survey Institute, accessed 2021.6.1
https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi45009.html，国土交通省国土地理院ホームページ, 参照 2021.6.1
42） K. Oda: Commentary of Structure from Motion, Journal of Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.55, No.3, pp.206-209, 2016.6
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，Vol.55, No.3, pp.206-209, 2016.6
43）H. Muraki: Verification of High-definition 3D Point Cloud Data and DSM / Ortho Using the Digital Camera Mounted on the UAV, Lecture Materials for the 1st UAV Utilization Forum, 2015.11
村木広和 : UAV に搭載されたデジタルカメラを用いた高精細 3 次元点群や DSM・オルソの検証，第 1 回 UAV 活用フォーラム講演資料，2015.11
44）Japanese Architectural Standard Specification / JASS3 Earthwork and Construction of Retaining for Excavation JASS4 Construction of Pile and Foundation, Architectural Institute of Japan, pp.216-217, 2009.10
建築工事標準仕様書・同解説 JASS3 土工事および山留め工事 JASS4 杭・地業および基礎工事，日本建築学会，pp.216-217, 2009.10
45）https://www.nationalphoto.co.jp/2F/phaseone/NP-Web-IQ-Digital-Back-Range_270818.pdf, accessed 2023.3.8
https://www.nationalphoto.co.jp/2F/phaseone/NP-Web-IQ-Digital-Back-Range_270818.pdf, 株式会社ナショナル・フォートホームページ，参照 2023.3.8
46） J. Sakurai, S. Tanaka, K. Nakamura, R. Imai, S. Kubota and K. Shigetaka: Development of Technique for Selecting Point Cloud Data With High Precision in Multipoint Measurement with Laser Scanner, Journal of Japan Society of Civil Engineers, F3 Civil Engineering Informatics, Vol.72, No.2, pp.I_209-I_218, 2016.10
櫻井淳，田中成典，中村健二，今井龍一，窪田諭，重高浩一：レーザスキャナを用いた多地点計測における高精度な点群データの選択技術の開発，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.72, No.2, pp. I _209- I _218, 2016.10
47）N. Yabuki: CIM Primer - Transformation of Construction Production System -, Riko

Tosho, pp.98-103, 2021.2
矢吹信喜：CIM 入門－建設生産システムの変革－，理工図書，pp.98-103, 2016.1
48）Topcon: Series of LN-100,
https://www.topcon.co.jp/positioning/products/pdf/LN-100_series_J.pdf, accessed 2021.5.28
株式会社トプコン：杭ナビ LN-100 シリーズ
https://www.topcon.co.jp/positioning/products/pdf/LN-100_series_J.pdf，参照 2021.5.28
49）Certificate from Minister of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, No.2145, 2002.5
国土交通大臣認定書 国住指第 2145 号，2002.5
50）Building Standard Law Enforcement Order,
http://best.life.coocan.jp/k-rei/rei04/rei_107.html, accessed 2023.1.4
建築基準法施行令，http://best.life.coocan.jp/k-rei/rei04/rei_107.html，参照 2023.1.4
51）Steel Work Technical Guidelines / Steel Work in Building Construction Site, Architectural Institute of Japan, 2018.1
鉄骨工事技術指針・工事現場施工編，日本建築学会，pp.429-431, 2018.1
52）Japanese Architectural Standard Specification / JASS6 Steel Work, Architectural Institute of Japan, 2018.1
建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事，日本建築学会，pp.58-59, 2018.1
53）http://taika-a-coop.com/service/inspection/, Fireproof Coating Industry Cooperative Association, accessed 2023.1.4
http://taika-a-coop.com/service/inspection/，耐火被覆工業協同組合，参照 2023.1.4
54）H. Segawa, Y. Ikeda, H. Sakagami, M. Nakamura and S. Ida: Study on Automated Spraying of Fire Protection Part3, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A-1 Material and Construction, pp.877-878, 2020.8
瀬川紘史，池田雄一，坂上肇，中村允哉，井田慎太郎：耐火被覆吹付け作業の自動化に関する研究　その３）耐火被覆吹付けロボットの現場実験施工，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1 材料施工，pp.877-878, 2020.8
55）Y. Ikeda, H. Segawa and N. Yabuki: Development and Application of a Fire Resistive Covering Spraying Robot to Building Construction Site, 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.1464-1471, 2020.10
56）Y. Ikeda and N. Yabuki: Setting Target Thickness of Robotic Fireproof Coating Spraying Work by Using Point Cloud Data, Architectural Institute of Japan, Vol.88, No.809, pp.1072-1081, 2023.03
池田雄一，矢吹信喜：点群データを用いた耐火被覆工事のロボット化における目標厚さの設定，日本建築学会構造系論文集, Vol.88, No.809, pp.1072-1081, 2023.7

57）JIS Z 9020-2, 2016.12
日本工業規格 Z 9020-2, 2016.12

謝辞

本論文をまとめるにあたり，直接の御指導，御鞭撻を頂き，お世話になりました主査の大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻矢吹信喜教授に謹んで感謝の意を表します。また，副査の紀伊雅敦教授，福田知弘准教授に深く感謝いたしております。

研究を支えて頂きました日髙菜緒様，山本耕平様をはじめとする同研究室の博士後期課程卒業生の皆様や同課程の現役の皆様，全ての方にここに感謝申し上げます。

また，本研究の遂行に際し，多大な御協力と有益な御意見および御討論を頂いた，(株)大林組 飯田邦博氏，小林正和氏，大木秀彦氏，森泰志氏，佐藤正明氏，坂上肇氏，遠藤直人氏，笹田秀幸氏，藤堂大輔氏，新留栄一郎氏，白熊哲也氏，平林宏章氏，藤枝雅昌氏，菅大輔氏，瀬川紘史氏，中村允哉氏，井田慎太郎氏，大野湧人氏，油井郁郎氏，土師大樹氏，新田大和氏，の各位には，深甚なる謝意を表します。点群データの取得にあたり，(株)小林コンサルタント 小林佳人様，伊藤星也様，(有)タイム社 土屋一勝様，ルーチェサーチ(株) 有田正俊様，岩崎一幸様，(株)チャコール東海 石松克典様，の各位の御協力に深く感謝いたします。さらに，耐火被覆吹付けロボットの開発や現場実験にあたり，メルシェア(株) 永井達夫様，ビットバード(株) 中西法彦様，(有)清和工業 久保雅尚様，佐野弘樹様，(株)テス・コット 佐久間雅夫様，(株)エスケー 松永まこと様，花田浩一様，岡三機工(株) 濵地孝行様の各位の御協力に深く感謝いたします。

研究生活にわたって，研究や会社業務の面で，多くの支援および激励を頂いた元(株)大林組 一瀬賢一氏，小川晴果氏，小野英雄氏，(株)大林組 浜田耕史氏に心よりお礼申し上げます。また，精神面で応援してくれた，妻や子供たちに感謝致します。

本研究は，以上の方々を始め，多数の方々の御指導，御協力のもとに達成できたものであり，ここで関係各位の皆様に感謝致します。