



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	大規模構造物に対する3次元現況反映型モデル生成のための高精度モデリング手法と最適撮影計画手法の開発
Author(s)	森谷, 亮太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第14597号
Issue Date	2021-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14597
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81601
Type	doctoral thesis
File Information	Moritani_Ryota.pdf



**大規模構造物に対する
3次元現況反映型モデル生成のための
高精度モデリング手法と最適撮影計画手法の
開発**

森谷 亮太

2021 年 2 月

北海道大学 大学院情報科学研究科
システム情報科学専攻

本論文は北海道大学大学院情報科学研究科の
博士（情報科学）授与の要件として提出した博士論文である。

森谷 亮太

審査委員：	主査	金井 理	教授
	副査	小野里 雅彦	教授
		近野 敦	教授
		伊達 宏昭	准教授

大規模構造物に対する 3 次元現況反映型モデル生成のための 高精度モデリング手法と最適撮影計画手法の開発*

森谷 亮太

概要

我が国のインフラ建造物の多くは、高度経済成長期に集中的に建設・整備されており、半世紀近く経った現在、老朽化が加速的に増加している。そのため、膨大なインフラ建造物の戦略的な維持管理および更新することが強く求められており、その解決の切り札として、3 次元モデルの活用が期待されている。維持管理作業において、対象物上の変状とその位置を正確に把握することが重要であるが、従来の 2 次元図面では、即座に把握することが困難である。一方近年、TLS（地上型レーザスキャナ）で計測した 3 次元点群や、カメラで撮影した画像から、3 次元 as-is（現況反映型）モデルを自動で生成する技術が現れており、それらを活用し効率的な維持管理作業を行うことが期待されている。そのため、インフラ建造物の現況形状を反映した 3 次元 as-is モデルを、高精度かつ効率的に生成する技術が求められている。

インフラ建造物の現況形状を反映した 3 次元 as-is モデルを高精度かつ効率的に生成するには、対象や 3 次元モデルの使用目的によって適切な計測手法の選択と、抜けや漏れのない対象表面の計測と高精度なモデル化が必要だが、現状、次のような問題が解決されておらず、技術普及の障害となっている。(1) 3 次元計測点群統合時において、誤差の重畳により精度が低下する問題。点群とは TLS で計測された点集合であり、座標値(xyz)と色情報(RGB)を持ち、一回の計測で数千万点の計測点が得られる。一方、物体背後はレーザ光の遮蔽により、計測できずに点群の欠損部となる。このため、欠損部を補完する複数箇所からの計測を行い、計測位置を高精度に推定する点群のレジストレーションと、点群に数学的な曲面を当てはめるモデリングという二つの処理が必要となる。しかし、このレジストレーションとモデリングで各々発生する誤差が重畳し、最終的な 3 次元 as-is モデルの要求精度(例：誤差 5mm 以内)を満足せず、実業務に使用できない場合がある。(2) 写真計測(SfM-MVS)において、3 次元モデルの生成効率が低下する問題。カメラで撮影された複数の画像から 3 次元モデルを生成するには、タイポイント（画像上の対応点を 3 次元復元した疎な点群）とカメラポーズ（位置・姿勢）とを推定する SfM (Structure from Motion)と高密度な 3 次元モデルを生成する MVS (Multi-View Stereo)が必要である。しかし、どの位置から何枚画像を撮影すれば、

高精度なモデルが生成可能かの事前推定が困難である．そのため，撮影した画像の位置や枚数が不適切であると，カメラポーズの正しい推定が行えない場合や，モデル上に非再構成領域(穴)や大きな形状誤差をもつ品質低下領域を含んだ高密度なモデルが生成される．またこの問題を避けるために，過剰に画像を撮影すると MVS 処理に膨大な処理時間がかかってしまう．

上記，2 つの問題点に対して，本研究では大規模構造物に対する 3 次元現況反映型モデル生成のための高精度モデリング手法と最適撮影計画手法の開発を目的とし，主に 3 つの観点から，問題解決を行う．(1) プラント設備に対して，3 次元点群から高精度な 3 次元 as-is モデルを生成するために，単一点群からプラントに多く含まれる円筒配管を抽出し，円筒配管自身をマーカーとして利用した計測点群のレジストレーションと円筒モデリングの同時処理手法を開発することで，それぞれの処理で生じる誤差の重畳を防止し，高精度なモデリングを可能とする．(2) コンクリート製建造物に対して，画像集合から高精度な 3 次元 as-is モデルを生成するために，MVS 処理を行わずに最終的に得られるであろう 3 次元 as-is モデルの形状品質を SfM の出力結果から短時間で予測し，さらに，その品質予測結果を基に，低品質と予測される領域の自動抽出を行い，品質を改善できるような追加撮影用のカメラポーズを事前に推定・提示できる技術を開発する．(3) (2)で開発した最適撮影計画手法，ならびにスマートフォンとクラウドシステムを活用した，高精度な 3 次元モデルを効率的に作成可能な写真計測システムを開発し，工事現場の写真撮影から 3 次元モデル生成までをその日のうちに完了するワンデーレスポンスの実現を目指す．

以上の手法を，擬似計測点群やプラント設備を計測した実計測点群に適用し，本手法のロバスト性検証や従来手法とのモデリング精度比較を行った．また，実際の橋脚や建造物を撮影した画像集合に対して，本手法を適用し，その有効性を検証した．最後に，実際の工事現場において，ワンデーレスポンスの実現可能性を処理時間の観点から考察した．

キーワード：3 次元モデリング，as-is モデル，レーザ計測，レジストレーション，点群，写真計測，SfM，MVS，撮影計画

*北海道大学 大学院情報科学研究科システム情報科学専攻, 博士論文, SSI-DT79185034, 2021 年 2 月 12 日

Development of high-precision modeling and optimum view planning methods for 3D as-is model reconstruction of large-scale structures[†]

Ryota Moritani

Abstract

Many of infrastructures in Japan were intensively constructed during the period of rapid economic growth. Nearly half a century has passed since then, the aging infrastructures are increasing exponentially. Therefore, there is a strong demand for strategic maintenance and updating of enormous infrastructure buildings, and the use of 3D models is expected as a solution to this problem. In maintenance tasks, it is important for an administrator to understand the correct locations of the deformed region and, however, it is difficult to immediately grasp them in conventional 2D drawing. On the other hand, recently, technologies have been developed to automatically generate 3D as-is models from 3D point clouds measured by TLS (Terrestrial Laser Scanner) and images captured by a camera. Their technologies are expected to be used for efficient maintenance tasks. Thus, there is a need for a technology to generate 3D as-is models that reflect the current geometry of infrastructure buildings with high accuracy and efficiency.

To generate 3D as-is models of infrastructures with accuracy and efficiency, it is necessary to select appropriate scanning approaches and measure object surface without occlusions according to the object or purpose of use, but the following problems prohibit the progress of the technologies; (1) there is the problem that modeling accuracy decreases due to the overlap error in point clouds integration. Point clouds mean a set of points captured by TLS and include coordinate values (xyz) and color information (RGB), tens of millions of points can be measured at one time. Whereas, since the region behind the object cannot be measured, the point clouds include the occlusions. Therefore, we require two processes: registration which estimates the scanning positions for the point clouds captured from multiple locations, and modeling which fits a mathematical surface against the point clouds. However, the final as-is model does not satisfy the required accuracy (e.g., error within 5 mm), and the 3D model may not be utilized in practice because the errors of registration and modeling are overlapped; (2) there is the problem that efficiency of the model generation in photogrammetry. SfM (Structure from Motion), which

estimates tie points and camera pose, and MVS (Multi-View Stereo), which generates a high-density 3D model, are necessary to generate a 3D model from many images captured by a camera. However, it is difficult to pre-estimate which camera pose and how many images are needed to reconstruct an accurate model. Therefore, if camera position or the number of images is inappropriate, the correct camera poses cannot be estimated, and the dense model with the degraded region (holes) and low-quality region is generated. Moreover, to avoid this problem, MVS processing takes an enormous amount of processing time when redundant images are captured.

For above two problems, the purpose of this research is to develop a high-quality modeling method and view planning method for generating 3D as-is model reconstruction in large-scale environments. We solve the problems from the following three approaches; (1) To generate accurate 3D as-is models of plant facilities from point clouds, we first extract cylindrical pipes in the plant from a plant point cloud, and develop a method of simultaneous registration and modeling using the cylindrical pipes as markers. The method is able to prevent the overlapping of the errors in each process and reconstruct high-accuracy models: (2) To generate accurate 3D as-is model from a set of images of a concrete building, we predict the geometric quality of 3D as-is model which will be obtained without MVS process only from the SfM result in a short time. Moreover, based on the quality prediction, we develop the algorithm for extracting the regions which are predicted as low-quality and estimating the additional camera poses which can improve the quality in advance: (3) we develop the photogrammetry process which can efficiently generate high-quality 3D models by integrating a smartphone, cloud service, and computer-assisted best-view guidance for optimal camera poses developed in (2). The system aims to achieve a one-day response that completes the process from photography to 3D model generation on the same day.

We applied the above methods to pseudo point clouds and actual point clouds of plant facilities to verify the robustness of the method and to compare with conventional methods about modeling accuracy. Moreover, we also applied the method to a set of images captured from concrete bridge columns and buildings and verified effectiveness of our study. Finally, the feasibility of one-day response in an actual construction site is discussed in terms of processing time.

Key Word: 3D Modeling, As-is Model, Laser Scanning, Registration, Point Clouds, Photogrammetry, SfM, MVS, View Planning

† Doctoral Thesis, Division of Systems Science and Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, SSI-DT79185034, February 12, 2021

目次

大規模構造物に対する 3 次元現況反映型モデル生成のための高精度モデリング手法と最適撮影計画手法の開発	i
---	---

Development of high-precision modeling and optimum view planning methods for 3D as-is model reconstruction of large-scale structures	iii
--	-----

目次	vi
----	----

図目次	xi
-----	----

表目次	xvi
-----	-----

第 1 章 結論	1
----------	---

1.1 研究背景	1
1.2 研究課題	5
1.3 本研究の目的と特徴	7
1.3.1 本研究の目的	7
1.3.2 本研究の特徴	8
1.4 本論文の構成	8

第 2 章 円筒オブジェクト一致制約を利用した精密レジストレーションとモデリングの同時処理手法の開発	11
--	----

2.1 研究背景	11
2.2 レーザ計測点群からの 3 次元 as-is モデリングの関連研究とその問題点	12
2.2.1 レジストレーションとモデリングの既存プロセスとその問題点	12
2.2.2 レジストレーションの関連研究とその問題点	14
2.3 本手法の目的と特徴	16
2.4 提案するレジストレーションとモデリングプロセスの全体概要	17
2.5 Efficient RANSAC を用いた選択的円筒ラフ抽出手法	18
2.5.1 概要	18
2.5.2 床面上計測点群およびノイズ点群の除去	18
2.5.3 法線ベクトルの推定	20
2.5.4 Efficient RANSAC を用いた近似円筒パラメータの推定	20

2.5.5	レジストレーションに用いる円筒の選択	21
2.6	円筒を用いた RANSAC によるラフレジストレーション	22
2.6.1	概要	22
2.6.2	3次元ハッシュ表の生成	23
2.6.3	RANSAC によるラフレジストレーション	24
2.7	精密レジストレーションおよびモデリングの同時処理	25
2.7.1	概要	25
2.7.2	提案する精密レジストレーションおよびモデリング手法の基本概念	26
2.7.3	半径方向の誤差評価式	27
2.7.4	レーザ照射方向の誤差評価式	29
2.7.5	修正 Marquardt 法を用いた収束処理	30
2.8	スキャナ外部パラメータと円筒パラメータの精緻化手法	33
2.8.1	円筒半径値の定数化	33
2.8.2	繰り返し重み付き最小二乗法	33
2.8.3	たわみを考慮した円筒分割	35
2.8.4	入射角フィルタリング	36
2.9	擬似計測点群を用いたレジストレーションおよびモデリング結果とその評価	36
2.9.1	概要	36
2.9.2	擬似計測点群の生成	37
2.9.3	簡易的な CAD モデルを用いたレジストレーションおよびモデリング結果	37
2.9.3.1	概要	37
2.9.3.2	異なる誤差評価式と入射角フィルタリングの効果	41
2.9.3.3	円筒半径値定数化の効果	44
2.9.3.4	擬似計測点群の密度変化の効果	45
2.9.3.5	擬似計測点群の誤差の標準偏差変化の違いの効果	49
2.9.3.6	繰り返し重み付き最小二乗法における重み関数の変数の違いの効果	51
2.9.3.7	繰り返し重み付き最小二乗法における重み関数の違いの効果	53
2.9.3.8	従来の as-is モデリング手法との精度比較	56
2.9.4	中規模プラントの擬似計測点群を用いたレジストレーションおよびモデリング結果	58
2.9.5	重複のない擬似計測点群を用いたレジストレーションおよびモデリング結果	61
2.9.6	考察	62

2.10	実計測点群データを用いたレジストレーションおよびモデリング結果とその評価.....	63
2.10.1	概要.....	63
2.10.2	冷暖房空調設備プラントを対象としたレジストレーションおよびモデリング結果.....	64
2.10.3	水処理プラントを対象としたレジストレーションおよびモデリング結果.....	68
2.10.4	考察.....	72
2.11	まとめ.....	73

第3章 SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画支援手法の開発 75

3.1	研究背景.....	75
3.2	SfM-MVS による 3 次元モデル生成プロセスにおける関連研究とその問題点.....	76
3.2.1	SfM-MVS 手法による 3 次元モデル生成プロセスとその問題点.....	76
3.2.2	最適撮影計画手法 (View Planning) の既存研究とその問題点.....	78
3.2.3	最適画像選択手法 (Image Selection) の既存研究とその問題点.....	81
3.3	本手法の目的と特徴.....	83
3.4	提案する最適撮影計画プロセスの全体概要.....	84
3.5	近似物体表面モデルの生成.....	86
3.5.1	概要.....	86
3.5.2	Delaunay 四面体分割とレイトレーシング.....	86
3.5.3	四面体削除による高精度化.....	87
3.6	品質予測手法.....	91
3.6.1	概要.....	91
3.6.2	品質予測指標.....	91
3.6.3	品質予測指標と高密度モデルとの定量的評価実験.....	96
3.6.3.1	概要.....	96
3.6.3.2	評価結果.....	97
3.6.3.3	考察.....	99
3.6.4	品質予測指標の正規化.....	100
3.7	低品質領域の選択手法.....	100
3.7.1	概要.....	100
3.7.2	数理計画法を用いた定式化.....	101
3.7.3	近傍点の選択条件.....	102

3.8	追加撮影カメラポーズの推定手法	104
3.8.1	概要.....	104
3.8.2	撮影位置候補の生成.....	104
3.8.3	最適撮影カメラポーズの推定.....	106
3.8.4	複数カメラポーズの推定.....	107
3.9	画像追加終了条件	107
3.9.1	カメラ位置集合間のレジストレーション.....	108
3.9.2	画像追加の終了条件候補.....	108
3.9.3	終了条件の検討実験と考察.....	109
3.10	最適撮影カメラポーズ推定結果とその評価.....	111
3.10.1	概要.....	111
3.10.2	橋脚を対象とした最適撮影カメラポーズ推定結果.....	112
3.10.2.1	概要	112
3.10.2.2	画像追加による効果	112
3.10.2.3	低品質領域の選択結果.....	114
3.10.2.4	追加カメラポーズの推定結果	116
3.10.2.5	TLS 点群との精度比較結果	118
3.10.2.6	初期画像集合に対する依存性	120
3.10.2.7	終了条件の検証実験①.....	123
3.10.3	建物を対象とした最適撮影カメラポーズ推定結果.....	126
3.10.3.1	概要	126
3.10.3.2	従来手法との比較結果.....	126
3.10.4	家屋を対象とした最適撮影カメラポーズ推定結果.....	128
3.10.4.1	概要	128
3.10.4.2	従来手法との比較結果.....	128
3.10.4.3	終了条件の検証実験②.....	130
3.10.5	考察.....	132
3.11	まとめ	133
第 4 章	スマートフォンとクラウドシステムを活用した最適撮影計画支援システム の実作業 as-is モデル記録への応用	135
4.1	研究背景	135
4.2	SfM-MVS による 3 次元 as-is モデルの実現場応用における問題点	137
4.2.1	最適撮影計画支援手法の実現場応用の問題点.....	137
4.2.2	施工現場における 3 次元計測プロセスの現状とその問題点.....	137
4.3	本手法の目的と特徴	139

4.4	提案する最適撮影計画支援システムの全体概要	140
4.5	As-is モデル生成結果とその評価	141
4.5.1	概要	141
4.5.2	トンネル覆道に対する適用結果	142
4.5.3	護岸工事現場に対する適用結果	146
4.5.4	考察	148
4.6	まとめ	149
第 5 章	結論と今後の課題	151
5.1	結論	151
5.2	今後の課題	152
参考文献		155
謝辞		162
発表実績		165

図目次

図 1.1	国内のエチレン生産設備の造設来の経年数[1]	1
図 1.2	平成元年以降の一般事故発生件数（事故種別ごとの推移） [2].....	1
図 1.3	橋梁の現状[4]	2
図 1.4	過去 10 年の一般事故における要因別発生件数の推移[2].....	2
図 1.5	3 次元 as-is モデルの生成例[5]	4
図 2.1	TLS による冷暖房空量設備の計測	11
図 2.2	レジストレーションおよびモデリングプロセス概要	12
図 2.3	レジストレーションおよびモデリングプロセス概要	13
図 2.4	平面ターゲットを用いたレジストレーション手法[13].....	14
図 2.5	球ターゲットを用いたレジストレーション手法[14].....	15
図 2.6	ICP[10]概要	15
図 2.7	物体属性付き地面上特徴点を用いた位置合わせ手法[18].....	16
図 2.8	レジストレーションとモデリング同時手法の概要	17
図 2.9	ヒストグラムによる床面上計測点群除去	19
図 2.10	セル分割による低密度点集合の除去	19
図 2.11	Efficient RANSAC による円筒抽出	20
図 2.12	Efficient RANSAC による円筒誤抽出例	22
図 2.13	円筒選択条件	22
図 2.14	3 次元ハッシュ表の生成の概要	24
図 2.15	ペアラフレジストレーションの概要	25
図 2.16	精密レジストレーションの概要	27
図 2.17	半径方向誤差評価式の概要	28
図 2.18	レーザ照射方向誤差評価式の概要	29
図 2.19	各重み関数	34
図 2.20	距離 d と入射角度 α に依存した誤差平均 μ と標準偏差 σ	37
図 2.21	簡易的配管系統 CAD モデル	38
図 2.22	生成した擬似計測点群 (3 スキャン)	38
図 2.23	1 スキャンの点群に対する選択的円筒ラフ抽出結果	38
図 2.24	ラフレジストレーション結果	39

図 2.25 選択した円筒配管 (6 本).....	41
図 2.26 精密レジストレーション結果 (条件 II)	42
図 2.27 異なる誤差評価式を用いた場合の円筒軸間距離誤差[mm].....	43
図 2.28 異なる誤差評価式を用いた場合の円筒軸間角度誤差[deg]	43
図 2.29 異なる誤差評価式を用いた場合の円筒半径値の絶対値の誤差[mm]..	44
図 2.30 円筒半径値定数化の有無における円筒軸間相対距離誤差[mm].....	45
図 2.31 円筒半径値定数化の有無における円筒軸間相対角度誤差[deg]	45
図 2.32 選択した円筒配管 (10 本).....	46
図 2.33 点密度の違い (左 : 3.1mm@10m, 右 : 24.5mm@10m).....	47
図 2.34 異なる点密度を用いた場合の円筒軸間距離誤差[mm].....	47
図 2.35 異なる点密度を用いた場合の円筒軸間角度誤差[deg]	48
図 2.36 異なる点密度を用いた場合の円筒半径値の絶対値の誤差[mm].....	48
図 2.37 点数と処理時間の関係	49
図 2.38 誤差の標準偏差が異なる擬似計測点群.....	49
図 2.39 異なる誤差標準偏差を用いた場合の円筒軸間距離誤差[mm].....	50
図 2.40 異なる誤差標準偏差を用いた場合の円筒軸間角度誤差[deg]	50
図 2.41 異なる誤差標準偏差を用いた場合の円筒半径値の誤差[mm].....	51
図 2.42 異なる重み関数の変数を用いた場合の円筒軸間距離誤差[mm].....	52
図 2.43 異なる重み関数の変数を用いた場合の円筒軸間角度誤差[deg]	52
図 2.44 異なる重み関数の変数を用いた場合の円筒半径値の絶対値の誤差 [mm]	53
図 2.45 異なる重み関数を用いた場合の円筒軸間距離誤差[mm].....	54
図 2.46 異なる重み関数を用いた場合の円筒軸間角度誤差[deg]	54
図 2.47 異なる重み関数を用いた場合の円筒半径値の絶対値の誤差[mm].....	55
図 2.48 従来手法との比較における円筒軸間距離誤差[mm].....	56
図 2.49 従来手法との比較における円筒軸間角度誤差[deg]	57
図 2.50 従来手法との比較における円筒半径値の絶対値の誤差[mm].....	57
図 2.51 円筒配管 CAD モデル	58
図 2.52 生成した擬似計測点群 (4 スキャン).....	58
図 2.53 提案手法による精密レジストレーション結果.....	59
図 2.54 中規模プラントCAD モデルを用いた場合の円筒軸間距離誤差[mm].....	59
図 2.55 中規模プラントCAD モデルを用いた場合の円筒軸間角度誤差[deg]	60
図 2.56 中規模プラント CAD モデルを用いた場合の円筒半径値の絶対値の誤差 [mm]	60
図 2.57 円筒配管 CAD モデル	61
図 2.58 手動ラフレジストレーション後の擬似計測点群.....	61

図 2.59 各手法による精密レジストレーション結果	62
図 2.60 冷暖房空調設備計測点群データ初期姿勢 (6 スキャン分).....	65
図 2.61 冷暖房空調設備計測点群データ例	65
図 2.62 冷暖房空調設備計測点群のラフレジストレーション結果	66
図 2.63 冷暖房空調設備計測点群の精密レジストレーション結果	66
図 2.64 冷暖房空調設備計測点群の円筒モデリング結果	67
図 2.65 冷暖房空調設備計測生データの精密レジストレーション結果	67
図 2.66 水処理プラント計測点群データ初期姿勢 (12 スキャン分).....	68
図 2.67 水処理プラント計測点群データ例	69
図 2.68 水処理プラント計測点群のラフレジストレーション結果	69
図 2.69 水処理プラント計測点群の精密レジストレーション結果	70
図 2.70 水処理プラント計測点群の円筒モデリング結果	70
図 2.71 水処理プラント計測生データの精密レジストレーション結果	71
図 2.72 確認された問題点	73
図 3.1 地方公共団体管理下の橋梁における現状[33].....	75
図 3.2 SfM-MVS による 3 次元モデル生成の流れ	77
図 3.3 既存研究における写真計測向け撮影計画の処理手順	78
図 3.4 <i>explore-then-exploit</i> による最適撮影計画[44]	79
図 3.5 2 次元マップからの事前知識を用いた最適撮影計画[49].....	80
図 3.6 カメラネットワークを用いた最適撮影計画[50].....	80
図 3.7 Online SfM による品質予測 (左から, 入力画像例, 表面メッシュ上 の可視なカメラ数評価結果, 表面メッシュ上の GSD 評価結果)[52]	81
図 3.8 効率的なメッシュ生成のための画像選択手法[63].....	82
図 3.9 ビュークラスタリングに基づく画像選択手法[67].....	82
図 3.10 提案する最適撮影計画プロセスの概要	85
図 3.11 近似物体表面モデルの生成手法	87
図 3.12 メッシュフィルタリング	87
図 3.13 広い境界を張る三角形のフィルタリング	88
図 3.17 品質予測指標の概要図	95
図 3.18 品質予測指標の定量的評価実験の概要	96
図 3.19 低品質領域の選択の概要	101
図 3.20 近傍点の選択条件	103
図 3.21 撮影位置候補の生成方法	105
図 3.22 最適撮影位置評価指標	106
図 3.23 実験対象	109
図 3.24 近似物体表面モデルの変位 (条件 a).....	109

図 3.25 品質予測指標平均値間の差分 (条件 b).....	110
図 3.26 低品質領域における品質予測指標値の改善度 (条件 c).....	110
図 3.27 モデル化対象	112
図 3.28 タイポイントとカメラポーズ.....	113
図 3.29 画像追加による品質向上効果.....	113
図 3.30 画像追加前の品質予測結果	114
図 3.31 画像追加後の品質予測結果	114
図 3.32 画像追加前のタイポイントとカメラポーズ.....	115
図 3.33 予測した品質	115
図 3.34 k-ring を用いた低品質領域選択結果.....	115
図 3.35 平均 FOV 高さをを用いた低品質領域選択結果.....	116
図 3.36 画像追加後のタイポイントとカメラポーズ.....	116
図 3.37 画像追加前後の高密度メッシュモデル.....	116
図 3.38 品質予測および追加カメラポーズ推定結果.....	117
図 3.39 最終的な高密度メッシュモデル.....	117
図 3.40 一回目画像追加後の高密度メッシュモデル.....	118
図 3.41 高密度メッシュモデルの平均誤差の推移.....	118
図 3.42 カメラポーズと高密度メッシュモデル.....	119
図 3.43 高密度メッシュモデルと点群との誤差比較結果.....	120
図 3.44 各初期画像集合におけるタイポイントと高密度メッシュモデル.....	121
図 3.45 画像追加後カメラポーズと高密度メッシュモデル.....	122
図 3.46 TLS 点群との誤差比較結果	122
図 3.47 初期画像集合 10 に対する品質予測結果と高密度モデル(画像枚数 30 枚).....	123
図 3.48 低品質領域における指標の改善度.....	124
図 3.49 画像集合 16 に対する品質予測結果と高密度モデル(画像枚数 61 枚)	125
図 3.50 画像集合 15 に対する品質予測結果と高密度モデル(画像枚数 57 枚)	125
図 3.51 画像追加前の高密度メッシュモデル.....	127
図 3.52 従来手法による品質予測結果.....	127
図 3.53 提案手法による品質予測結果.....	127
図 3.54 画像追加後の高密度メッシュモデル.....	128
図 3.55 タイポイントとカメラポーズおよび高密度モデル.....	129
図 3.56 高密度メッシュモデルの TLS 点群との誤差比較結果.....	130
図 3.57 初期画像集合を用いた結果 (画像枚数 30 枚).....	131
図 3.58 画像追加 7 回後の画像集合を用いた結果 (画像枚数 77 枚).....	132
図 4.1 点検実施者の保有資格や研修受講歴.....	135

図 4.2	ICT の全面的な活用 (ICT 土工) の概要[78].....	136
図 4.3	施工現場における SfM-MVS による 3 次元計測プロセスの現状	138
図 4.4	計算機支援による最適撮影位置指示技術を用いたワンデーレスポンス対応の写真計測プロセス	140
図 4.5	自動指示の処理概要	142
図 4.6	大別苅トンネル覆道	143
図 4.7	初期画像例	143
図 4.8	覆道に対する最適撮影計画結果 (初期・1 回目).....	144
図 4.9	覆道に対する最適撮影計画結果 (2 回目・3 回目).....	145
図 4.10	豊浦工区護岸ブロック工事現場の初期画像例	146
図 4.11	護岸工事現場に対する最適撮影計画結果 (初期・追加①).....	147
図 4.12	護岸工事現場に対する最適撮影計画結果 (追加②・追加③).....	147
図 4.13	処理時間の比較結果	149

表目次

表 1.1	建設後 50 年以上経過する社会資本の割合[3].....	3
表 1.2	非接触型の 3 次元測量手法	4
表 1.3	計測対象と 3 次元計測手法との関係.....	5
表 2.1	計算機仕様ならびに用いたライブラリ	36
表 2.2	2.9 節における実験目的とその条件.....	40
表 2.3	誤差評価式の違いによる精度分析の実験条件.....	42
表 2.4	各スキヤンの擬似計測点群の点数.....	42
表 2.5	点密度とその総点数	47
表 2.6	異なる重み関数の変数を用いた場合の円筒モデリング誤差の平均値 と最大値	53
表 2.7	異なる重み関数を用いた場合の円筒モデリング誤差の平均値と最大 値	55
表 2.8	従来手法との比較における円筒モデリング誤差の平均値と最大値...	57
表 2.9	中規模プラント CAD モデルを用いた場合の円筒モデリング精度検証結 果	60
表 2.10	重複のない点群を用いた場合の円筒モデリング精度検証結果.....	62
表 2.11	2.10 節における実験対象環境と条件.....	64
表 2.12	冷暖房空調設備における精密レジストレーション精度評価結果.....	68
表 2.13	精密レジストレーション精度評価結果.....	71
表 2.14	水処理プラント計測点群データにおける円筒モデリング精度の検証 結果	72
表 3.1	実験に用いたカメラと対象	97
表 3.2	定量評価結果	98
表 3.3	計算機仕様ならびに用いたライブラリ	111
表 4.1	用いた計算機とアプリケーション.....	141
表 4.2	画像追加枚数と処理時間 (本手法で必要な処理時間を太字で表記)	146
表 4.3	画像追加枚数と処理時間 (本手法で必要な処理時間を太字で表記)	148

第1章 緒論

1.1 研究背景

我が国のインフラ建造物の多くが高度経済成長期に集中的に建設・整備されており、半世紀近くを迎えた現在、建設から50年を経過する設備の割合は加速度的に高くなることが予想されている。この50年という数字はあくまでも目安であるが、建設経過年数が増加すればするほど、事故などの異常は増加することが予想されるだけでなく、維持管理作業の頻度やコストも同時に増加することが容易に考えられる。

図1.1に示すように、インフラ建造物のうち、化学プラントの多くは高度経済成長期に集中的に建設され、2025年までにエチレンの生産能力の80%が稼働年数40年を超えることが予想されている。一般的に、高経年化が進むほど事故などの異常が発生する可能性が高まるとされている[1]。事実、図1.2に示すように、消防庁による石油コンビナート等特別防災区域内の特定事業所における事故概要[2]によると、1989年(平成元年)以降、火災件数や漏洩事故件数が増加の一途をたどっている。また、図1.4に示すように、それらの事故における発生要因として、維持管理不十分や操作確認不十分などといった人的要因だけではなく、腐食疲労等劣化といった物的要因が増加している。これらの推移から、設備の老朽化が事故を誘発する一因となっていると考え

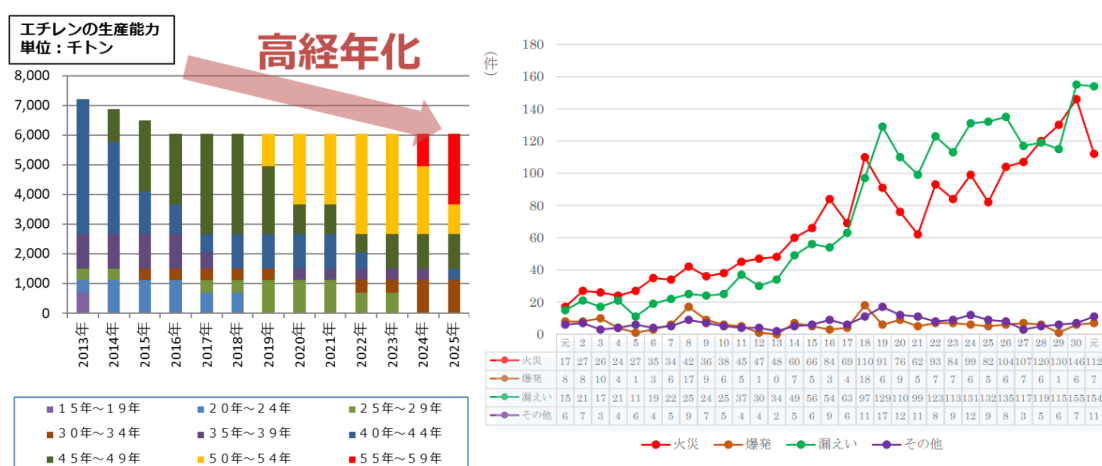


図1.1 国内のエチレン生産設備の
造設来の径年数[1]

図1.2 平成元年以降の一般事故発生件数(事故
種別ごとの推移) [2]

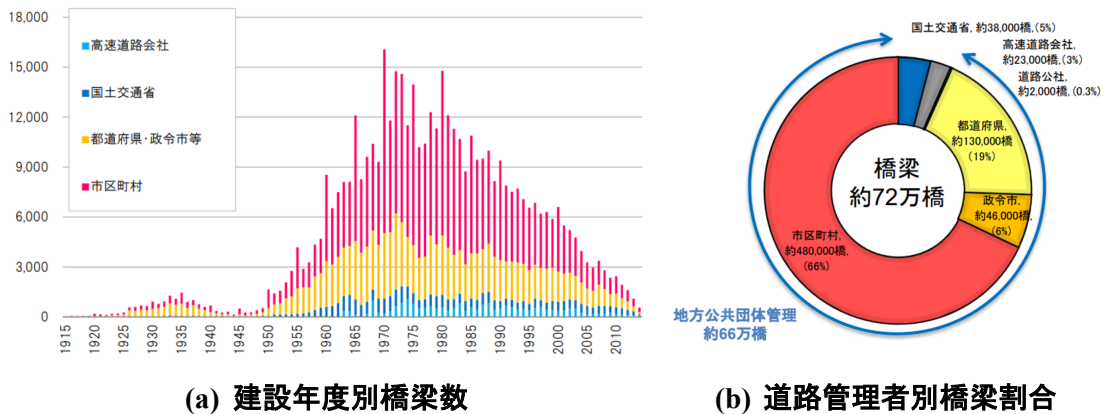


図1.3 橋梁の現状[4]

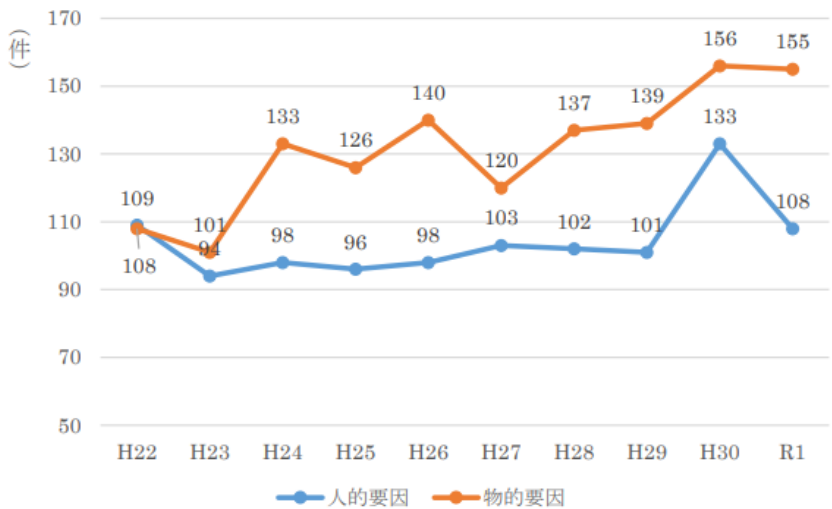


図1.4 過去 10 年の一般事故における要因別発生件数の推移[2]

られる．さらに，設備異常が頻発すると，運転の安定性が低くなり，設備コストの増大や製品品質の不安定化へと悪循環につながる．

また，同様のインフラ建造物の老朽化問題は石油コンビナートだけではなく，表 1.1 に示すような，高度成長期以降に整備された，橋梁，トンネル，河川管理施設，下水道管渠，港湾岸壁などの社会資本に関しても，今後 20 年で建設後 50 年以上経過する設備の割合が加速度的に増加することが予想されている．

特に，橋梁に注目すると，日本国内には約 73 万橋の橋梁が存在し，図 1.3 に示すように，高度経済成長期以降から建設ラッシュを迎えていることがわかる[4]．また，橋梁約 73 万橋のうち，約 66%にあたる約 48 万橋が市区町村の地方公共団体の管轄下である．都市部に比べ，地方では少子高齢化の進行により，維持補修を支えてきた熟練技術者の世代交代に伴う技術の継承問題が顕著であり，今後，技術・人手・予算の面から，膨大な数の橋梁をより戦略的に維持・補修を行っていくことが強く求められる．

表1.1 建設後 50 年以上経過する社会資本の割合[3]

	2018 年 3 月	2023 年 3 月	2033 年 3 月
橋梁：約 73 万橋(橋長 2m 以上) ※ 建設年度不明橋梁約 23 万橋を除く	約 25%	約 39%	約 63%
トンネル：約 1 万 1 千本 ※ 建設年度不明トンネル約 400 本を除く	約 20%	約 27%	約 42%
河川管理施設：約 1 万施設 ※ 建設年度不明約 100 施設を含む	約 32%	約 42%	約 62%
下水道管渠：総延長約 47 万 km ※ 建設年度不明約 2 万 km を含む	約 4%	約 8%	約 21%
港湾岸壁：約 5 千施設 ※ 建設年度不明湾岸約 100 施設を除く	約 17%	約 32%	約 58%

さらに、73 万橋以外にも建設経過年数が不明な橋梁が約 23 万橋存在しており、過去の維持管理が適切に行われておらず、戦略的な点検作業の妨げになっていると考えられる。

このようなインフラ建造物の老朽化問題は、日本国内だけではなく、世界でも発生している。特にアメリカでは、1920 年代のニューディール政策以降、大規模なインフラの整備が進められてきた[6]。日本よりも早くインフラ整備が行われたアメリカでは、老朽化問題が早くに顕在化している。1980 年代には、インフラの老朽化問題が深刻化し、例として、スクールバスで通学する学童が橋梁の重量制限のため、迂回路を通らねばならなかったり、橋の手前でスクールバスを降りて橋を渡らなければならなかったりといった様子が記録されており、人々の生活に影響を及ぼした。これらの状況は「荒廃するアメリカ」として、インフラ老朽化を象徴する表現となっている。

以上のことから、この先、老朽化を迎えるインフラ建造物を戦略的に維持管理・更新することが強く求められており、その解決の切り札として、IT 技術の活用が期待されている。近年ではドローン等のセンシング技術を活用し、インフラ設備の現況を正確かつ迅速に計測でき、情報の一元化や集約化がより簡易になると考えられる。さらに、これらの情報の集約が進めば、劣化診断などのデータ分析技術が進み、従来の紙ベースなどの記録・管理がより簡易になり、地方公共団体でも、インフラ設備の維持管理が効率的で、将来的な負担も軽減されることが考えられている。また、センシングデータから復元した 3 次元モデルを活用することで、現況を実環境に行かなくても、オフィスで確認できるメリットもある。

こうした IT 化に向けたデジタル基盤のために、図 1.5 に示すように、対象の現況形状を正確に反映した 3 次元 as-is (現況反映型)モデルを生成することが求められている。



図1.5 3次元 as-is モデルの生成例[5]

表1.2 非接触型の3次元測量手法

	レーザ計測			写真計測	
	地上型	バックパック・UAV 搭載型		手持カメラ	UAV 搭載型
					
計測データ形式	3次元点群 ＋反射強度 ＋点の RGB	3次元点群＋反射強度 ＋時系列情報＋点の RGB 情報		RGB 画像	RGB 画像 ＋時系列情報
計測システムコスト	高価なスキャナ・ソフトウェア			安価なカメラ・ソフトウェア	
計測時間	数 min/スキャン	数時間動作	数十分/飛行	数秒/撮影 ※多数の画像必須	数十分/飛行
モデル生成処理	点群レジストレーション	SLAM		SfM-MVS or SLAM	
計測精度	数 mm	数 mm-数 cm	数 cm	数 cm- 数 10cm	数 cm- 数 10cm
インフラ維持管理で使える情報	3D CAD モデル生成，構造体の経年変形，スケーリング，剥落			3D CAD モデル生成，表面クラック，遊離石灰，錆，剥落などの変状	

3次元 as-is モデルを生成するには, 環境を計測するスキャナが必要であり, 現在では, 表 1.2 に示すような大きく分けて 2 種類の計測手法が存在する.

レーザ計測による環境計測方法では, 計測対象にレーザ光を照射し, 返ってきたレーザ光との時間差もしくは位相差から対象物までの距離を算出し, 照射点の座標値を得る. これを全方位に行うことで, スキャナ周囲の相対的な位置情報を 3 次元の点群

として取得することが可能となる。また、バックパックや UAV (Unmanned Aerial Vehicle) にレーザスキャナを搭載し、GPS などを用いて、自己位置推定と環境地図作成を同時に行う SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)[7][8] 技術から環境の計測を行う場合もある。レーザ計測は、計測精度が数ミリ程度と、高精度な計測が可能で、対象物の経年変形を細部まで計測可能であるという利点がある。一方で、レーザスキャナ自体やモデルを生成するソフトウェアが高価であり、手軽に環境計測を行うことが困難である。

また、写真計測では、画像間に重複部を含む大量の画像を撮影し、ステレオマッチングを行うことで3次元モデルを生成する SfM (Structure from Motion)-MVS (Multi-View Stereo) 技術が用いられており、UAV に搭載することによって、さまざまな環境下で対象の3次元モデルを生成できる。写真計測は、カメラ1台のみで計測が可能であり、処理ソフトもフリーなものから安価なものまでであるため、導入障壁が低い利点がある。また、レーザ計測とは異なり、コンクリート表面のテクスチャを鮮明にモデルに反映することが可能となる。しかしながら、モデル生成に膨大な処理時間を要し、スケールが現実と異なり、調整が必要となる。さらに、モデル生成精度が対象の表面素材によって、ばらつきが大きくなってしまう課題もある。

1.2 研究課題

前節で述べた様々な環境下において、高精度な3次元モデルを生成するためには、3次元モデルの使用目的や対象によって要求される事項が異なるため、計測に使用する機器を適切に選択する必要がある。

表1.3 計測対象と3次元計測手法との関係

	レーザ計測 数ミリオーダーの計測が可能	写真計測 変状をテクスチャとして 計測可能
プラント設備 (数ミリオーダー精度を 伴ったモデリングを要求)	 TLS を用いることで 高精度な形状計測が 可能	 配管等の低テクスチャが多く存在し、 高精度なモデリング が困難
建造物 (変状の画像と対象全体の 大まかなモデリングを要 求)	 高精度な計測が可能 だが、損傷部の鮮明 な反映が困難	 損傷部を鮮明に反映 したモデリングが可 能

プラント設備における維持管理を考えた際に、改修工事や増設のために現況形状や配置の把握が主な目的であることが多く、配管同士の相対的な配置や、方向、配管径やたわみ具合等を正確に把握することが重要となる。そのため、数ミリオーダーの精度を伴った 3 次元形状が必要となるため、写真計測ではなく、レーザスキャナによる計測が適当であると考えられる。また、SLAM によるレーザ計測では、自己位置推定と環境地図作成を同時に行える利点がある一方で、誤差の重畳が起こりやすく、TLS (Terrestrial Laser Scanner: 地上型レーザスキャナ)で計測し 3 次元モデルを生成するプロセスと比べ、精度がやや低下する場合がある。そのため、安定的にプラント設備の高精度な形状情報を取得するためには TLS が最良であると考えられる。

TLS は、一回の計測で数千万点の計測点が一度に得られる一方で、物体背後はレーザ光の遮蔽により計測できずに点群の欠損部になる。そのため、TLS を用いた 3 次元 as-is モデルを高精度かつ効率的に生成するには、抜けや漏れのない対象表面の複数箇所からの計測を行い、計測位置を高精度に推定するレジストレーション[10]と、合成した点群に対して数学的な局面を当てはめ、円筒パラメータを推定する円筒配管モデリング[11]という二つの処理が必要となる。しかしながら、下記の問題点から高精度なモデリングが行えない場合がある。

- (1) 一般的に用いられる ICP[10]によるレジストレーション手法では、計測した点群間に十分な重複がない場合や小さい場合に、誤差が増大する場合がある。さらに、点群間の重複部分は、計測誤差が潜在的に大きい計測点であるため、位置合わせ精度の低下にもつながりやすい。
- (2) レジストレーションと円筒モデリングの各々の処理で発生する誤差が伝播し、最終的に生成される 3 次元モデルの精度が低下し、要求精度(例：誤差 5mm 以内)を満足せず、実業務に使用できない場合がある。

次に、橋梁などの社会インフラ建造物の 3 次元モデルでは、変状箇所や損傷部の位置、および、その状態を把握することが求められ、点検情報の保存のためにテクスチャを正確に反映できる画像を捉えることが重要となる。レーザスキャナによる計測の場合、全体形状情報を高精度に取得できる一方で、損傷部のテクスチャを 3 次元モデルに鮮明に反映させることができない。そのため、写真計測による 3 次元 as-is モデル生成が適当であると考えられる。また、UAV による画像撮影では様々な角度からの画像計測が可能だが、熟練した操縦技術が必須であるだけでなく、機器自体のコストが高く、財政力に限度がある地方公共団体にとって導入障壁が高い。そのため、建造物の 3 次元モデル生成のためには、手持ちカメラによる SfM-MVS 手法が最良であると考えられる。

SfM-MVS による 3 次元モデル生成では、画像間に十分な重複を持つ画像集合に対し

て、画像上の自然特徴点を 3 次元に復元した疎な点群であるタイポイントと、撮影したカメラポーズ(位置・姿勢)を推定する SfM と、SfM で推定したカメラポーズに対して、ステレオマッチングを行うことによって、高密度な 3 次元モデルを生成する MVS が必要となる。しかしながら、下記の問題点から、高精度な 3 次元モデル生成が行えない場合がある。

- (1) 高精度な 3 次元モデルを生成するために、どのカメラポーズで画像を撮影すれば良いかの事前推定が困難であり、適切な位置・方向から対象を撮影しなければ、生成されるモデル形状の再現性が低下してしまう場合がある。
- (2) 上記(1)を避けるために、対象に対して抜けがないように過剰もしくは冗長な画像撮影が行われてしまった場合に、MVS 処理に膨大な時間がかかってしまい、効率的な 3 次元モデル生成が行えない問題がある。
- (3) SfM-MVS で生成されるモデルの品質や形状は、長時間の MVS 後でないと確認できないため、レーザ計測と異なり、計測現場で確認し、低品質な領域を改善できるような追加計測を逐次的にできない問題がある。
- (4) 計算機内で最適な追加撮影用カメラポーズを推定できたとしても、撮影環境において、推定した位置から撮影できない場合や、推定した撮影位置が正確に断定することが困難で、どこから撮影するかを指示する手法が明らかではない問題がある。

1.3 本研究の目的と特徴

1.3.1 本研究の目的

そこで本研究では、前節で述べた課題の解決のために、大規模構造物に対する 3 次元現況反映型モデル生成のための高精度モデリング手法と最適撮影計画手法の開発を目的とする。具体的には次の 3 つに関して研究を行う。

- (1) 3 次元点群からの高精度な 3 次元 as-is モデル生成のため、配管を対象とした計測点群の位置合わせと円筒モデリングとを同時に処理し、それぞれの処理の誤差重畳を防止した高精度なレジストレーションおよびモデリング手法の開発。
- (2) 画像集合からの高精度な 3 次元 as-is モデル生成のため、MVS 処理の前に最終的に得られるであろう 3 次元 as-is モデルの形状品質を短時間で予測し、さらに、その品質予測結果を基に、低品質と予測される領域の自動抽出を行い、品質を

改善できるような追加撮影用のカメラポーズを事前推定可能な技術の開発.

- (3) (2)で開発した最適撮影計画手法, および, スマートフォンとクラウドシステムを活用し, 高精度な 3 次元モデルを効率的に生成可能な写真計測システムの開発.

1.3.2 本研究の特徴

本研究の特徴として, 下記の 3 点が挙げられる.

- (1) 従来別々であった, 点群のレジストレーションと円筒モデリングを, 1 つの非線形最適化問題に帰着させ, 計測誤差の重畳を防止し, さらにロバスト統計学に基づき, 誤差に頑健なレジストレーションとモデリングを同時に処理する手法を開発した. この手法により, モデリングの大幅な精度向上を可能とした.
- (2) 短時間で処理可能な SfM で得られるタイポイントとカメラポーズのみから, MVS を行わずに最終的に得られるであろう 3 次元高密度モデルの品質を予測し, 数値計画法により, 特に低品質と予測される領域の自動抽出手法を開発した. また, 低品質領域をカバーする次の追加撮影カメラポーズを推定する最適撮影計画手法も開発した.
- (3) (2)で開発した最適撮影計画手法と, スマートフォンとクラウドシステムを活用した高精度な 3 次元モデルを効率的に作成可能な写真計測システム, ならびに, 現場の画像撮影者へ最適な追加撮影目標点をオンラインで迅速に指示可能なシステムを開発し, 工事現場での写真撮影から 3 次元モデル生成までをその日のうちに完了するワンデーレスポンスを実現した.

1.4 本論文の構成

本論文は 5 つの章で構成される, 2 章以降の概要を以下に示す.

第 2 章 円筒オブジェクト一致制約を利用した精密レジストレーションとモデリングの同時処理手法の開発

2 章では, 円筒オブジェクト一致制約を利用した精密レジストレーションとモデリングの同時処理手法について述べる. まず, 本手法の関連研究とその問題点について述べ, 本手法の特徴に述べる. 本手法は大きく分けて 3 つに分かれており, 計測した点群からレジストレーションに用いる円筒パラメータの抽出手法, 抽出した円筒パラメータを用いて, 円筒同士が空間で一致する幾何制約を利用した, ラフレ

ジストレーション手法，ならびに，精密レジストレーションとモデリングの同時処理手法について詳細に述べる．その後，配管系統 CAD モデルから，偶然誤差評価実験より得られた誤差モデルに従った偶然誤差を持つ擬似計測点群を生成するスキャンシミュレーションソフトを用いて，提案手法の有用性検証および従来手法との精度比較を行う．また，実化学プラントの配管 CAD モデルや，恣意的に重複のない擬似計測点群を用いた，提案手法の有用性検証結果についても述べる．最後に，冷暖房空調設備と水処理プラントを計測した実計測点群データに対する本手法の有用性検証とその精度検証結果について述べる．

第 3 章 SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画支援手法の開発

3 章では，SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画支援手法について述べる．まず，本手法の関連研究とその問題点について述べた後，本手法の特徴に触れる．本手法は大きく分けて 4 つに分かれており，SfM 出力結果であるカメラポーズとタイポイントを用いて，近似物体表面モデルの生成手法，品質予測手法，追加撮影すべき低品質領域の選択手法，ならびに，追加撮影用カメラポーズの推定手法について詳細に述べる．その後，橋脚，建物，家屋を対象に撮影した画像集合に対して提案手法を適用し，その有用性検証結果を述べる．

第 4 章 スマートフォンとクラウドシステムを活用した最適撮影計画支援システムの実作業 as-is モデル記録への応用

4 章では，スマートフォンとクラウドシステムを活用した最適撮影計画支援システムの実作業 as-is モデル記録への応用について述べる．まず，3 章で述べた最適撮影計画支援手法の実現場適用における問題点について述べ，本手法の特徴について触れる．その後，本手法で提案する最適撮影計画支援システムの概要について述べた後，実際の工事現場での適用結果と評価について述べる．

第 5 章 結論と今後の課題

5 章では，本研究の結論と今後の課題を述べる．

第2章 円筒オブジェクト一致制約を利用した 精密レジストレーションとモデリング の同時処理手法の開発

2.1 研究背景

物体表面の 3 次元データを非接触で計測する方法として，図 2.1(a)のような TLS (Terrestrial Laser Scanner：地上型レーザスキャナ) が，近年普及している．レーザスキャナは，レーザ光を対象物に照射し，照射光と反射光との位相差や時間差から対象物までの距離を算出する．さらにレーザの照射方向を用いることにより，照射点の座標値を算出することが出来る．これを全方位に行うことで，周囲の環境内にある物体形状を 3 次元計測点群として，高速かつ容易に取得することができる．こうして取得した 3 次元計測点群は，環境の現況形状を正確かつ効率的に把握できるため，インフラや設備環境などでの保守点検や改修工事など活用が広がってきている．

発電所や製鉄所，石油化学プラント設備の老朽化やライフサイクルの短命化に伴い，改修や保守点検の頻度が増加してきている[9]．プラントの改修や点検の際には，系統図と呼ばれる施工時における円筒配管系統の設計図面を参考に，作業が行われる．し



(a) 地上型レーザスキャナ(TLS)



(b) 冷暖房空調設備の 3 次元計測点群

図2.1 TLS による冷暖房空調設備の計測

かしながら、小規模改修工事や増設工事等により、図面情報と現況形状とに齟齬が生じる場合が多く、人手による設計情報の更新といった、生産性の低下を招く問題がある。このような問題に対して、TLS を用いて、図 2.1(b)に示すような設備環境の 3 次元計測点群を取得し、この計測点群から現況形状を反映した 3 次元 as-is モデルを生成することにより、改修工事や点検業務の効率化を図る期待が高まってきている。特に、円筒配管が複雑に交差するプラント設備においては、目視による点検作業を大幅に効率化する期待がある。

2.2 レーザ計測点群からの 3 次元 as-is モデリングの関連研究とその問題点

2.2.1 レジストレーションとモデリングの既存プロセスとその問題点

3 次元計測点群から、3 次元 as-is モデルを生成する既存手法では、図 2.2 に示すような、複数点群を位置合わせするレジストレーションとプリミティブ形状を抽出するモデリングという二つのプロセスが必要となる。

レジストレーションとは、複数のスキャナ位置から計測された点群データから、点群間の対応する点を合わせる座標変換を求め、一つに統合する処理のことである。TLS は、レーザ光の届く範囲しか計測できないため、遮蔽によって物体背後に計測できない欠損部分を必ず含む。そのため、一度の計測で環境すべてを網羅することはできず、スキャナの計測位置を変えて複数回計測を行う必要がある。特に計測対象や環境が大規模かつ複雑な場合は、計測回数が増加する。さらに、計測点群は TLS からの相対的な座標値や距離値を算出するので、複数点群間の相対的な位置関係を算出する必要がある。これらの複数点群同士の相対的な位置合わせを行う処理をレジストレーション

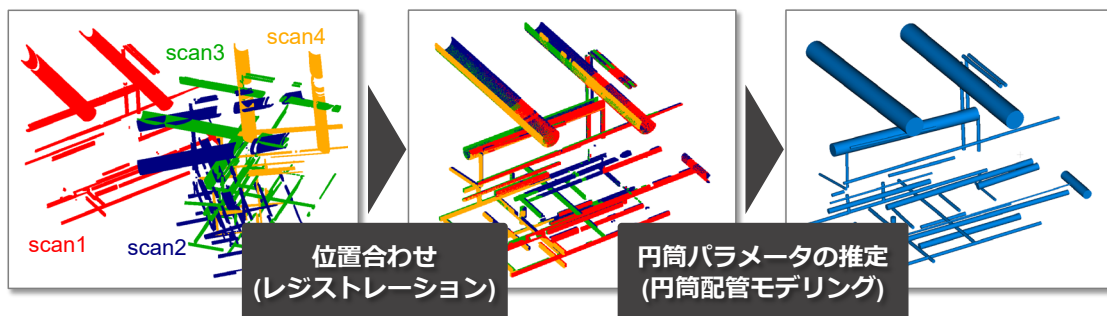


図2.2 レジストレーションおよびモデリングプロセス概要

とよばれ、レジストレーションプロセス内では、一般的におおよその位置合わせを行うラフレジストレーションと、ラフな位置合わせを精緻化する精密レジストレーションに分かれる。

次に、モデリングとは、レジストレーションした点群に対して、モデル形状を定義する曲面稜線とそのパラメータを算出する処理のことである。点群は、座標値(x, y, z)や色情報(r, g, b)、レーザ光の反射強度を表す輝度値等といった情報しか持たない。そのため、円筒の場合だと、円筒軸上の一点、円筒軸の方向ベクトル、円筒半径値および円筒長さのようなモデル形状を定義するパラメータを、点群内から算出する必要がある。

以上のように3次元 as-is モデルを生成するためには、これら2つのプロセスが必要となる。しかしながら、この手法によって生成されたプラント配管系統のCADモデルでは、例として、円筒軸間距離誤差 $\pm 5\text{mm}$ 以内という改修工事等で用いる施工要求精度を満たせていない場合がある。この原因として、図2.3ならびに以下に示す2つの問題点が考えられる。

(a) レジストレーションプロセスとモデリングプロセスの独立処理

TLSによって取得した計測点群は、計測距離約10mで $\pm 1\text{mm}$ という系統的測定誤差を必ず含む[12]。この誤差の影響により、レジストレーションやモデリングの各処理には、必ず誤差が重畳する。そして、これら二つの処理の誤差が蓄積することで、最終的に生成される3次元 as-is モデルの精度が悪化してしまう問題がある。

(b) Iteratively Closest Point (ICP)[10]によるレジストレーション

ICPとは、2スキャンの点群に対して、対応する点間距離の二乗和を最小化することで、レジストレーションする手法であり、点群間に十分な重複と妥当な初期姿勢

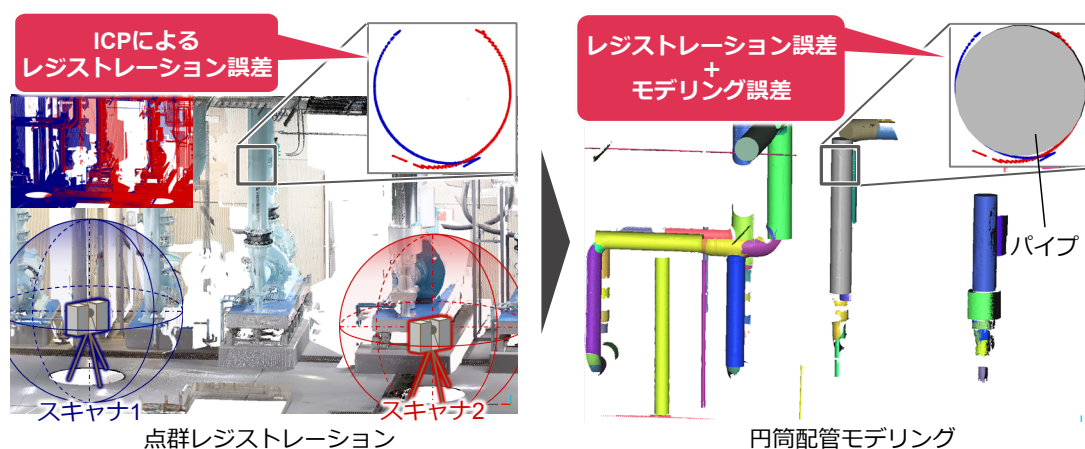


図2.3 レジストレーションおよびモデリングプロセス概要

が必要となる．そのため、重複がない場合や重複部分が十分に存在しない場合では、レジストレーションが正常に動作しない問題がある．また、設備環境の計測において、点群間の重複部は、計測点のレーザ入射角度が大きい場合が多い．入射角度が大きい計測点というのは、標準偏差は正規分布に従い、誤差の平均が大きくなる傾向があり、特に、入射角度が 60 deg 以上の計測点は、その傾向が顕著である．ICP は、このような系統誤差を含む、潜在的に誤差が大きい部分同士で位置合わせを行っているため、レジストレーションによる誤差を含みやすくなる問題もある．さらに配管が複雑に交差するプラント設備における点群レジストレーションでは、円筒配管上点群を多く含むため、その形状の特徴故にその傾向が顕著である．

2.2.2 レジストレーションの関連研究とその問題点

レジストレーションに関する研究は、多くの手法が提案されている．大きく分けると、環境内に基準となるターゲットを設置し、そのターゲットを用いて位置合わせを行うマーカーベースレジストレーション手法と、環境内から特徴を抽出し、それを用いて位置合わせを行うマーカーレスレジストレーション手法の二つが挙げられる．

Akca[13]は、図 2.4 のような平面ターゲットを、Zhang[14]は、図 2.5 のような基準球を用いてレジストレーションを行う手法を提案した．まず異なるスキャン間で計測が行えるように、環境内にターゲットを設置する．次に、計測した点群内からターゲットを抽出し、対応するマーカー同士を一致させるように点群の座標変換を行うことで、レジストレーションを行う．これらの手法は、高い精度とロバスト性をもつレジストレーションが可能となる．しかしながら、環境内にターゲットを設置するのは、大きな労力と時間を要し、計測作業効率の低下を招く．さらに、円筒配管が複雑に交差するプラント設備においては、各スキャナ位置から計測できる箇所にターゲットを設置することは、大きな危険性を伴う作業となりえる．また、ターゲットを設置する箇所と数は、計測作業によって異なるため、レジストレーションの精度に大きく依存する問題がある．

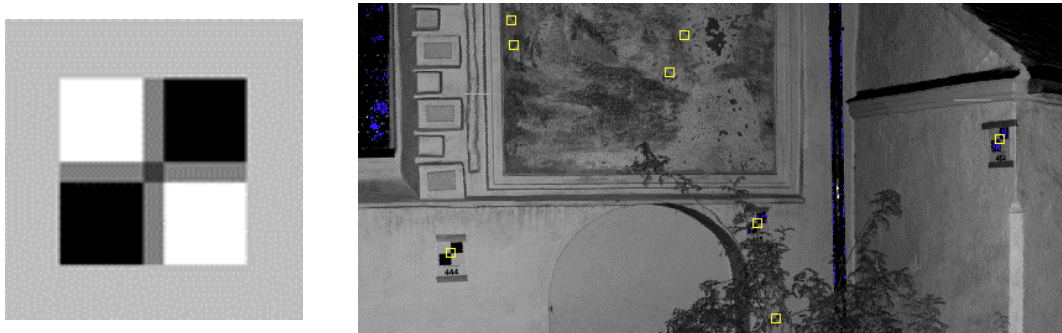


図2.4 平面ターゲットを用いたレジストレーション手法[13]

次に、マーカーレスの精密レジストレーション手法では、ICP[10]がよく知られている。ICPは、Beslらによって提案された3次元形状モデル間のレジストレーションを行う手法であり、その汎用性の高さから点群レジストレーションに広く用いられている。ICPは、初めにラフレジストレーションを行い、おおよその初期値を求めてから、図2.6に示すような対応点間距離の二乗距離和を最小化することで、位置合わせを行っている。このため、上述したようにスキャン間に十分な重複を必要とする問題がある。また、他のマーカーレスレジストレーション手法として、計測環境内から、図2.7に示すような点[15]や線[16]、平面[17]や物体属性付き地面上特徴点[18]等の自然特徴を抽出し、それらを用いて位置合わせを行う手法も提案されている。しかしながら、これらの手法の目的はラフレジストレーションであるため、精密レジストレーションとモデリングが必要となる。

さらに、マーカーベースおよびマーカーレス、いずれのレジストレーション手法もモデリングのプロセスが別途必要であり、レジストレーションとモデリングの各誤差が重畳する問題は避けられない。そのため、プラント改修工事における配管系統CADモデル生成時の要求精度(例：配管端部の位置誤差 $\pm 5\text{mm}$ 以内)に応えられていない場合がある。

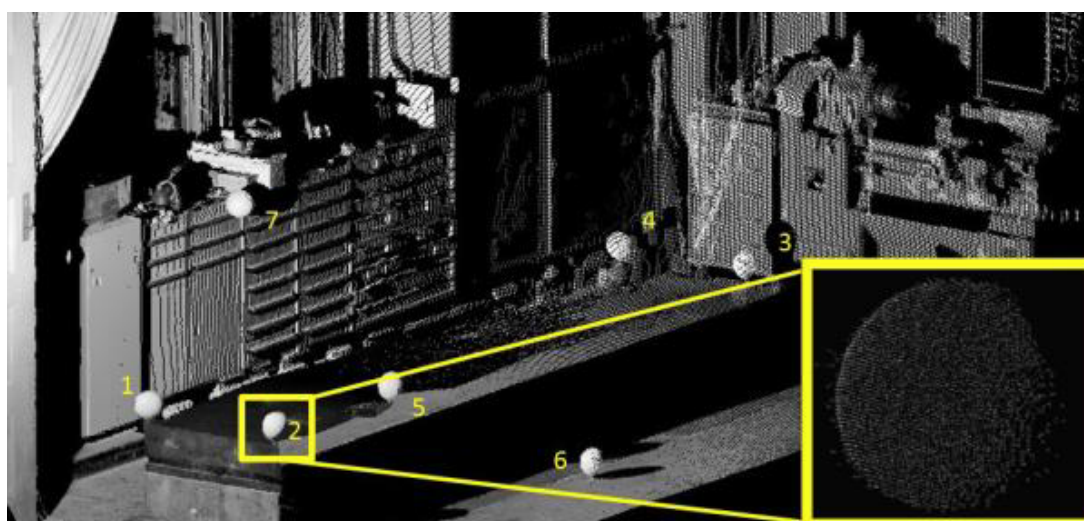


図2.5 球ターゲットを用いたレジストレーション手法[14]

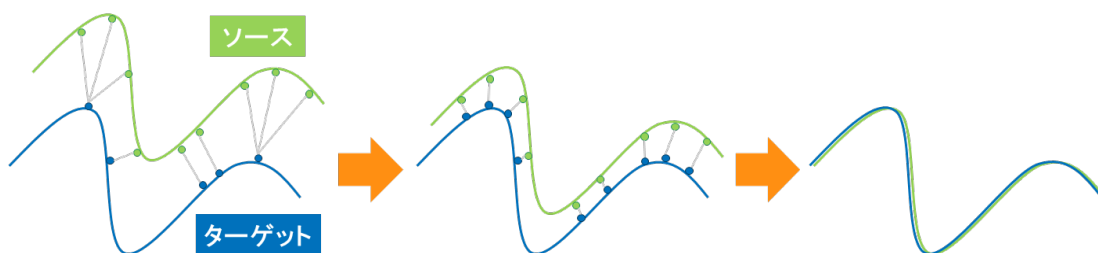
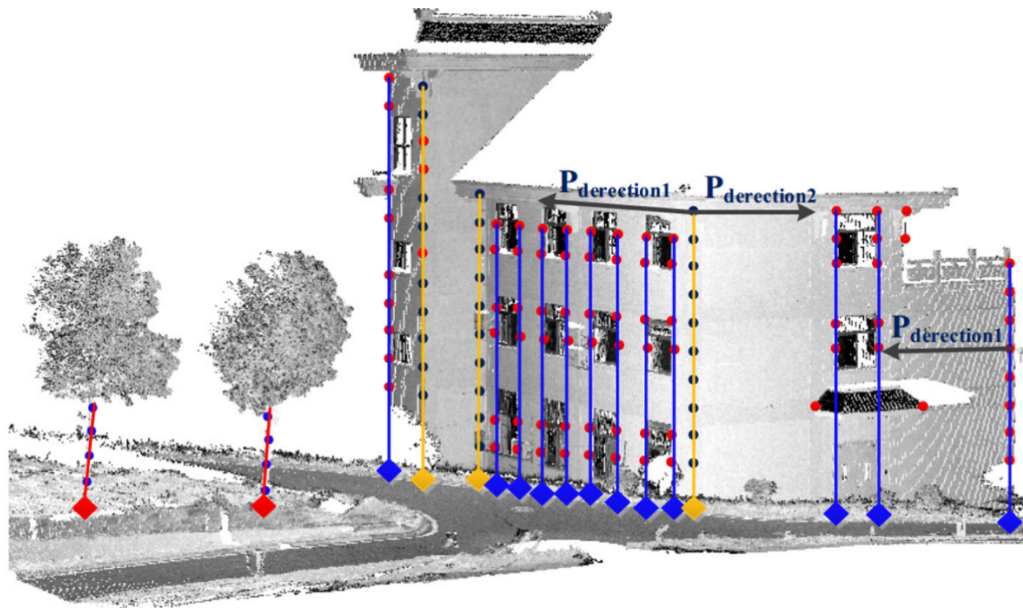


図2.6 ICP[10]概要



- || The vertical feature lines derived from pole-like points, vertices and intersections.
- ◆ ◆ The corresponding semantic feature points of vertical feature lines.

図2.7 物体属性付き地面上特徴点を用いた位置合わせ手法[18]

2.3 本手法の目的と特徴

以上の問題点から、プラント改修工事における配管系統 CAD モデル生成時の要求精度を満たすために、高精度なレジストレーションおよび円筒モデリング手法の開発を目的とする。本手法は、プラント設備に多く存在する円筒パイプ自身をマーカーとして利用したレジストレーション手法である。

本手法の特徴を下記に挙げる。

- (1) 円筒配管自身を精密な円筒マーカーとして利用して、精密レジストレーションと円筒モデリングを同時に処理することで、各処理で発生する誤差の重畳を防止している点。
- (2) 従来のレジストレーションの際に必要な点群間の重複がなくとも、高精度なレジストレーションと円筒モデリングが可能である点。
- (3) 精密レジストレーションと円筒モデリングを行うための初期値を求めるために、円筒配管自身を円筒マーカーとして利用したラフなレジストレーション手法を提案している点。

2.4 提案するレジストレーションとモデリングプロセスの全体

概要

本手法は、環境内に円筒配管系統が多く含まれるプラントを対象とする。まず、プラントを計測した単一の計測点群から、ラフな円筒配管を抽出する。次に、複数点群間で、対応する円筒オブジェクトが空間的に一致する制約を用いて、ラフな位置合わせを行う。最後に、フィッティング円筒面からの誤差を最小化する大規模連立方程式を解くことによって、高精度なレジストレーションおよび円筒モデリングを同時に処理する技術の開発を行う。図 2.8 に本手法の概要を示し、以下に各プロセスの概要を述べる。

A1 選択的円筒ラフ抽出

法線計算と円筒抽出処理の効率化のために、3次元計測点群に対して、床面上計測点群や外れ値等の除去を行う。その後、主成分分析(PCA: Principal Component Analysis)による法線計算を行い、法線付き点群を用いて、Efficient RANSAC (Random Sample Consensus)による平面および円筒の同時抽出を行う。抽出された円筒の中から、レジストレーションに有効な円筒のみを選択することで、円筒の近似パラメータ集合と各円筒上の計測点群を抽出する。

A2 ラフレジストレーション

抽出した円筒を用いて、ラフレジストレーションを行う。まず、効率的な円筒探索を行うために、ターゲットとなる円筒集合の3次元ハッシュ表を生成する。次に、ハ

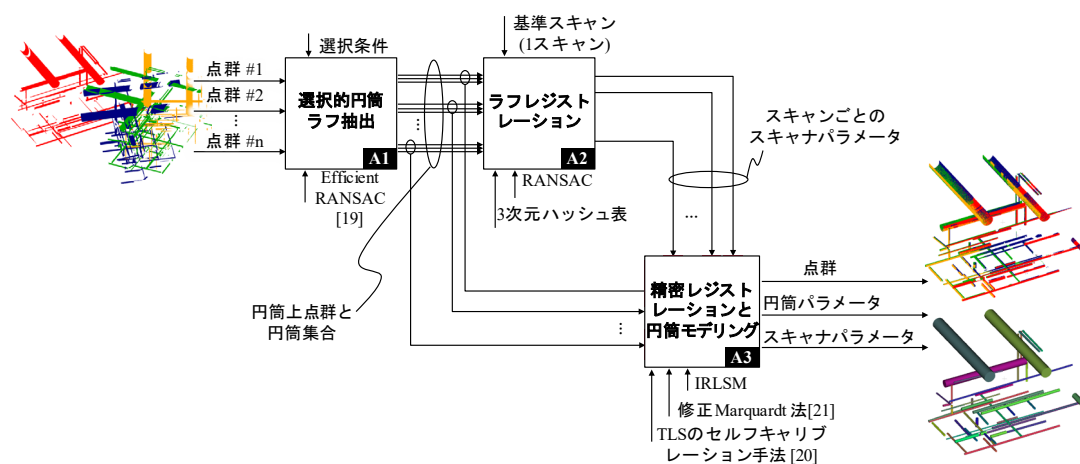


図2.8 レジストレーションとモデリング同時手法の概要

ツッシュ表と円筒を用いた RANSAC によるペアラフレジストレーションを行う。ペアラフレジストレーションをすべてのスキャン点群に対して行うことで、円筒軸がほぼ一致した複数スキャナの初期位置および姿勢パラメータを求める。

A3 精密レジストレーションと円筒モデリング

Chan らが提案した TLS のセルフキャリブレーション手法[20]を拡張して、精密レジストレーションと円筒モデリングを行う。複数点群間での円筒が空間で一致する制約の下で、ラフレジストレーションで求めたスキャナ外部パラメータ、円筒の近似パラメータを初期値とした非線形大規模連立方程式を修正 Marquardt 法[21]より、最適化することで、精緻なスキャナ外部パラメータと円筒パラメータを同時に算出する。

2.5 Efficient RANSAC を用いた選択的円筒ラフ抽出手法

2.5.1 概要

計測点群から、レジストレーションに用いる円筒上の点および近似的な円筒パラメータ（円筒軸上の一点の座標値、円筒軸の単位方向ベクトル、円筒半径値）を抽出する。以下に手順を述べ、次項より各処理について詳しく述べる。

- 1) 床面上点群とノイズ点群を、セルを用いて除去する。
- 2) 1)の点群に対して、法線を推定する。
- 3) 法線付き点群に対して、Efficient RANSAC[19]を用いて、円筒上点群および円筒パラメータを抽出する。
- 4) レジストレーションに有効な円筒のみを選択的に抽出する。

2.5.2 床面上計測点群およびノイズ点群の除去

法線計算および Efficient RANSAC の処理時間短縮のために、計測点群の大部分を占める床面上計測点群や点密度が低い部分点群集合、およびレーザ光のスポット割れ等による外れ値の除去を行う。

はじめに図 2.9 に示すように、計測点群の z 値が鉛直上向きであるという仮定の下、計測点群の鉛直方向の点分布ヒストグラムを作成し、ヒストグラムの最頻値を抽出する。計測点群の中で、床面上の計測点群が最も支配的であるという仮定の下で、最頻値の周辺点集合と最頻値より鉛直下方向に存在する計測点群を床面上計測点群として

除去する．

また，偶然誤差評価実験結果[22]より，スキャンから計測距離が長い計測点は，偶然誤差が増大し，さらに計測密度が小さく，円筒上の計測点数が少なくなる．そこで一般的なスキャナの計測精度を反映し，計測距離が τ_d [m]以上の計測点を除去する．本手法では， $\tau_d = 30$ とした．

次に図 2.10 に示すように，床面上計測点群等を除去した点群に対して，Octree を用いて，セルの最小辺長さが τ_l [mm]となるように空間分割を行う．各セル内の点数が閾値 τ_N 以下となる点集合を低密度計測点群として，除去する．本手法では， $\tau_l = 20$ ， $\tau_N = 50$ とした．

以上の処理を，点群処理フリーソフトウェアである CloudCompare[23]にプラグインとして追加実装を行った．

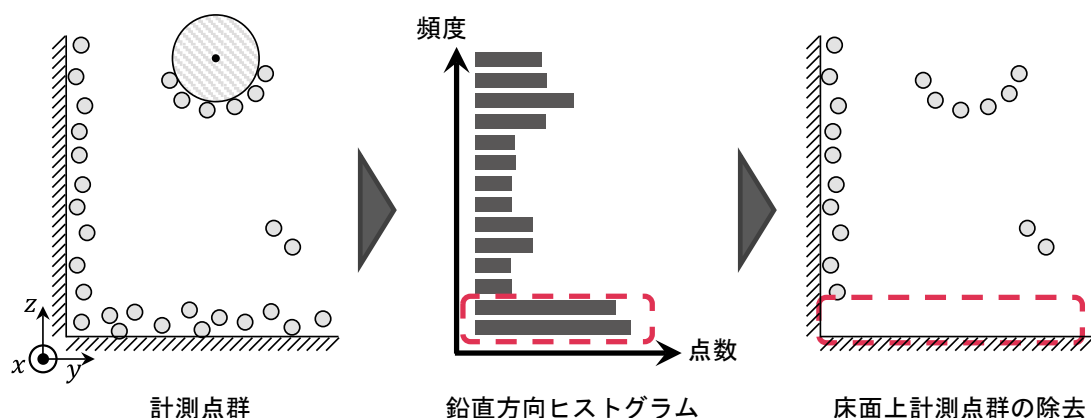


図2.9 ヒストグラムによる床面上計測点群除去

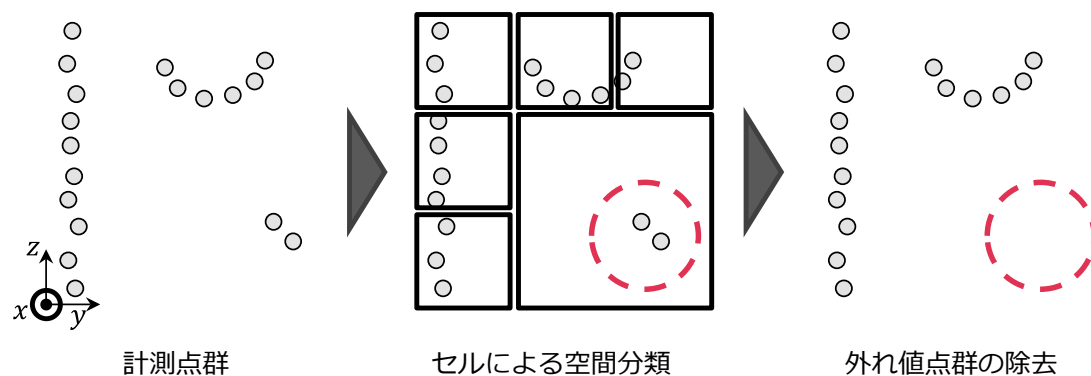


図2.10 セル分割による低密度点集合の除去

2.5.3 法線ベクトルの推定

床面上計測点群およびノイズを除去した計測点群に対して、法線ベクトルを主成分分析(PCA: Principal Component Analysis)を用いて推定する。

はじめに入力点群に対し、KD 木を作成する。次に、任意のクエリ点 $\mathbf{p}_i$ に対して、作成した KD 木を用いた k 近傍探索を行い、点集合 $N(i, k)$ を得る。そして、点集合 $N(i, k)$ に対して、式(2.1)より、分散共分散行列 $\mathbf{C}_i$ を求める。

$$\mathbf{C}_i = \frac{1}{|N(i, k)|} \sum_{\mathbf{p}_j \in N(i, k)} (\mathbf{p}_j - \bar{\mathbf{p}})^T (\mathbf{p}_j - \bar{\mathbf{p}}) \quad (2.1)$$

ただし、 $\mathbf{p}_j$ は点 j の座標値、 $\bar{\mathbf{p}}$ は $N(i, k)$ の重心点の位置ベクトルである。得られた分散共分散行列 $\mathbf{C}_i$ に対して、固有値解析を行い、固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$)に対応する単位固有ベクトル $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ を得る。 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ は平面の接線方向であり、 $\mathbf{e}_3$ は点 $\mathbf{p}_i$ の法線ベクトル $\mathbf{n}_i$ となる。本手法では、 $k = 30$ とした。

2.5.4 Efficient RANSAC を用いた近似円筒パラメータの推定

次に、計測点群内から、レジストレーションに用いる円筒の近似パラメータを、Efficient RANSAC[19]を用いて推定を行う。Efficient RANSAC は、Schnabel らによって提案された効率的なプリミティブ形状推定手法である。Efficient RANSAC は、サンプル点の点間距離に近いほど同一形状に属する確率が高くなる性質と計測点の法線ベクトルを用いて、従来の RANSAC[24]より効率的にかつ高速にプリミティブ形状を推定することを可能としている。図 2.11 および以下の手順によって、円筒などの近似パラメータを推定する。

- 1) Octree を用いたセル分割により、点群を分割する。

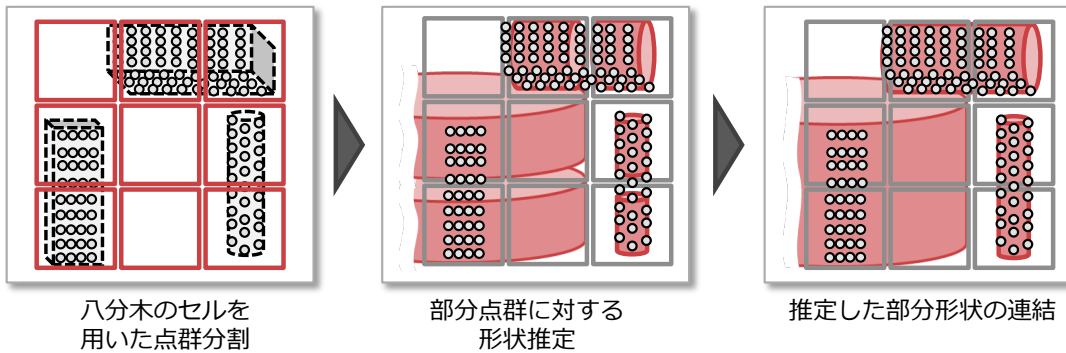


図2.11 Efficient RANSAC による円筒抽出

- 2) 部分点群に対する考えられる候補形状（平面および円筒）を当てはめ、コンセンサスが最大となる形状を推定する．
- 3) 各部分点群で、推定した部分形状を連結することで、最終的なプリミティブ形状を抽出する．

2.5.5 レジストレーションに用いる円筒の選択

前項で述べたように、Efficient RANSAC は、点群から円筒などのプリミティブ形状を効率的に抽出できる．しかしながら、プラントにおける円筒配管系統のモデル化を目的とした場合、図 2.12 に示すように、角ダクト底面やパイプラック等の平面を円筒配管規格[25]に当てはまらないような極端に円筒径が大きい円筒として誤抽出してしまう問題がある．この誤抽出により、ラフレジストレーションの処理時間の増大や、精緻化処理における円筒誤フィッティングを招く場合がある．

本手法では、図 2.12 に示すような円筒誤抽出を防ぐために、円筒長さや点数といった条件でレジストレーションに有効な円筒のみの選択的な抽出を行う．本手法では、図 2.13 および以下に示す条件すべてに該当する円筒のみを抽出した．

- (a) 円筒上の計測点数 N が、閾値 τ_N 以上．
- (b) 円筒の長さ $h[m]$ が、閾値 τ_h 以上．
- (c) 円筒半径値 $r[m]$ が、上下限值 $\tau_{r_{min}} \leq r \leq \tau_{r_{max}}$ 以内．
- (d) 円筒上の計測点群を、円筒軸に垂直な平面に投影し、平面上に投影された点群を、中心角が 10deg ごとになるように領域分けを行い、扇形領域内に点が存在しない領域を $free$ 、領域内の点数が円筒上計測点の全点数の 2.5%以上の領域を、 $occupied$ として分類を行い、 $occupied$ が連続する領域数 $N_{occupied}$ が閾値 $\tau_{N_{occupied}}$ 以上．

本手法では、 $\tau_N = 2500, \tau_h = 0.5, \tau_{min} = 0.03, \tau_{max} = 1.0, \tau_{N_{occupied}} = 12$ とした．

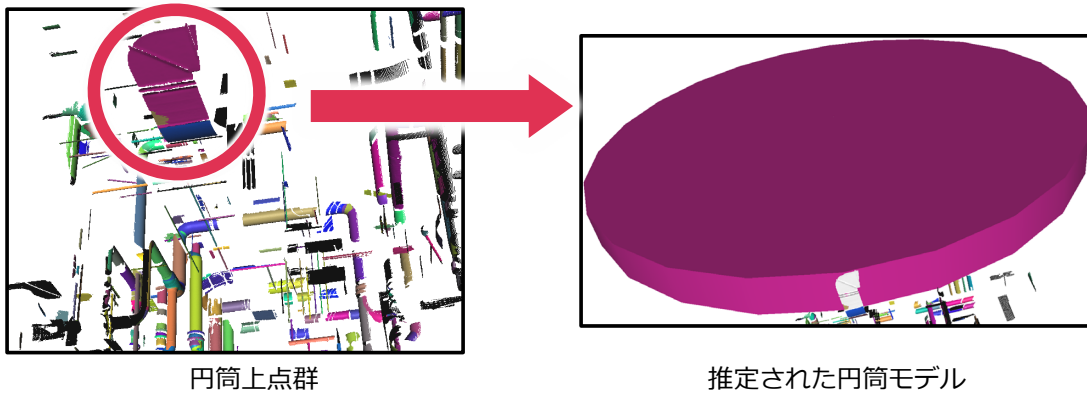


図2.12 Efficient RANSAC による円筒誤抽出例

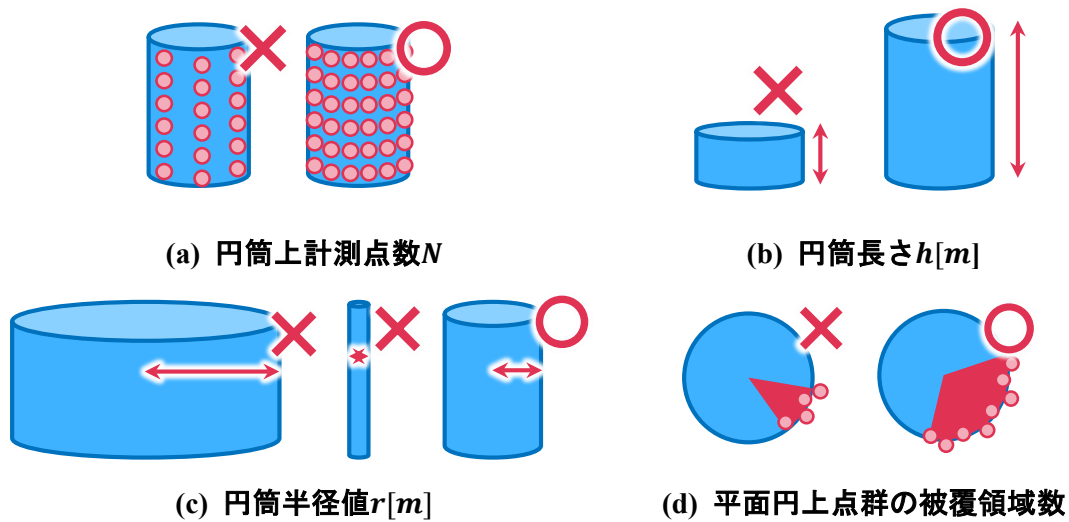


図2.13 円筒選択条件

2.6 円筒を用いた RANSAC によるラフレジストレーション

2.6.1 概要

ラフレジストレーションでは、精密レジストレーションを行うために必要である、基準スキャナから見た相対的なスキャナの外部パラメータおよび円筒パラメータの初期値を算出する。以下に手順を、次項より各処理について詳しく述べる。

- 1) 基準となるターゲット円筒集合を選択し、マンハッタンワールド仮説[26]の下、基準座標系 x 軸に水平円筒が合うように座標変換を行う。

- 2) 基準となる円筒集合を一つ選択し、ターゲット円筒集合とする．このターゲット円筒集合に対して、3次元ハッシュ表を生成する．
- 3) RANSAC を用いたペアラフレジストレーションを行い、ターゲットとソースの円筒集合を統合する．
- 4) すべての円筒集合を統合するまで、ペアラフレジストレーションを繰り返す．

2.6.2 3次元ハッシュ表の生成

ターゲットとソース円筒集合間において、対応する円筒ペアを効率的に探索するために、円筒軸間距離と円筒ペアの各半径値をキーとした 3次元ハッシュ表を生成する．

精密レジストレーションにおいて、各円筒をワールド座標系の直交 3 軸に平行な 3 つの円筒集合に分類する必要がある．その不確定さをなくすために、ターゲット円筒集合をワールド座標系の直交 3 軸と一致させる．まず、点群から抽出された各ターゲット円筒を、その軸が基準座標系 z 軸とのなす角 θ と閾値 τ_θ との比較により、鉛直円筒集合 C_V と水平円筒集合 C_H に分類する．本手法では、 $\tau_\theta = 45^\circ$ とした．次に、水平円筒集合 C_H に含まれる各円筒に対して、円筒軸方向ベクトル $\mathbf{a}$ をワールド座標系の x 軸正方向と同じ向きになるように修正し、各円筒の軸と x 軸とのなす角 θ_i を算出する．その後、なす角 θ_i に対するヒストグラムを作成し、最頻値となる角度 θ_m の抽出を行い、角度 θ_m を持つ円筒の軸と x 軸が一致するように、座標変換を行う．

次に、3次元ハッシュ表の生成を行う．図 2.14 に概要図を、以下に手順を述べる．

- 1) 各円筒集合 C_V, C_H から 1 本ずつ円筒を選択し、全円筒ペア (c_m, c_n) を生成する．ただし、 $c_m \in C_V, c_n \in C_H$ である．
- 2) c_m, c_n 間の円筒軸間距離 d_{mn} を計算し、 d_{mn} と各々の円筒半径値 r_m, r_n を式(2.2)より量子化したインデックスに変換する．ただし、 $\Delta d, \Delta r$ は距離および半径値解像度である．

$$I_{mn} = \left\lfloor \frac{d_{mn}}{\Delta d} \right\rfloor, I_{r_m} = \left\lfloor \frac{r_m}{\Delta r} \right\rfloor, I_{r_n} = \left\lfloor \frac{r_n}{\Delta r} \right\rfloor \quad (2.2)$$

- 3) 3次元インデックス $(I_{mn}, I_{r_m}, I_{r_n})$ をハッシュキーとして、対応する円筒ペア (c_m, c_n) をハッシュ表に格納する．
- 4) 円筒集合 C_V, C_H に含まれるすべての円筒ペアをハッシュ表に格納する．

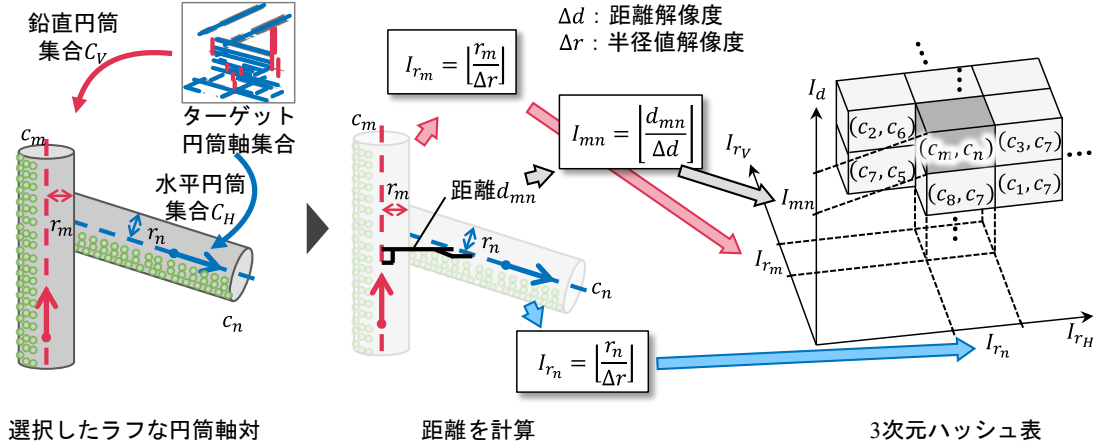


図2.14 3次元ハッシュ表の生成の概要

2.6.3 RANSAC によるラフレジストレーション

スキャナの外部パラメータのおおよその値を得るために、抽出した円筒を用いて RANSAC によるラフ位置合わせを行う。図 2.15 に概要図を、以下にアルゴリズムの手順を示す。

- 1) ソース円筒集合に含まれる各円筒を、その軸が基準座標系 z 軸となす角 θ と閾値 τ_θ との比較により、鉛直円筒群と水平円筒群の二つに分類する。本手法では、 $\tau_\theta = 45^\circ$ とした。
- 2) 各円筒群から 1 本ずつ選択し、非平行なソース円筒ペア (c_a, c_b) を生成する。
- 3) ソース円筒ペアの軸間距離 d_{ab} を計算する。距離 d_{ab} および各円筒の半径値 r_a, r_b を式(2.2)より量子化したインデックスに変換し、3次元ハッシュ表から等しいインデックスを持つターゲット円筒ペア (c_m, c_n) を探索する。
- 4) ターゲット円筒ペア (c_m, c_n) とソース円筒ペア (c_a, c_b) が一致する座標変換行列 $\mathbf{T}$ をソース円筒集合に適用する。
- 5) ターゲット円筒と平行かつ半径値以内に存在するソース最近傍円筒の総数 $S_{consensus}$ に応じた合致度を算出する。
- 6) 1)~5)までの処理を反復し、合致度が最大となる座標変換行列 $\mathbf{T}_{consensus}$ を算出し、ソース円筒集合に適用することで、ソース円筒集合とターゲット円筒集合を統合し、新たなターゲット円筒集合とする。

以上 1)~6)の処理をすべての円筒集合を統合するまで反復することで、複数点群の円筒軸線がほぼ一致した状態のスキャナの初期外部パラメータが得られる。

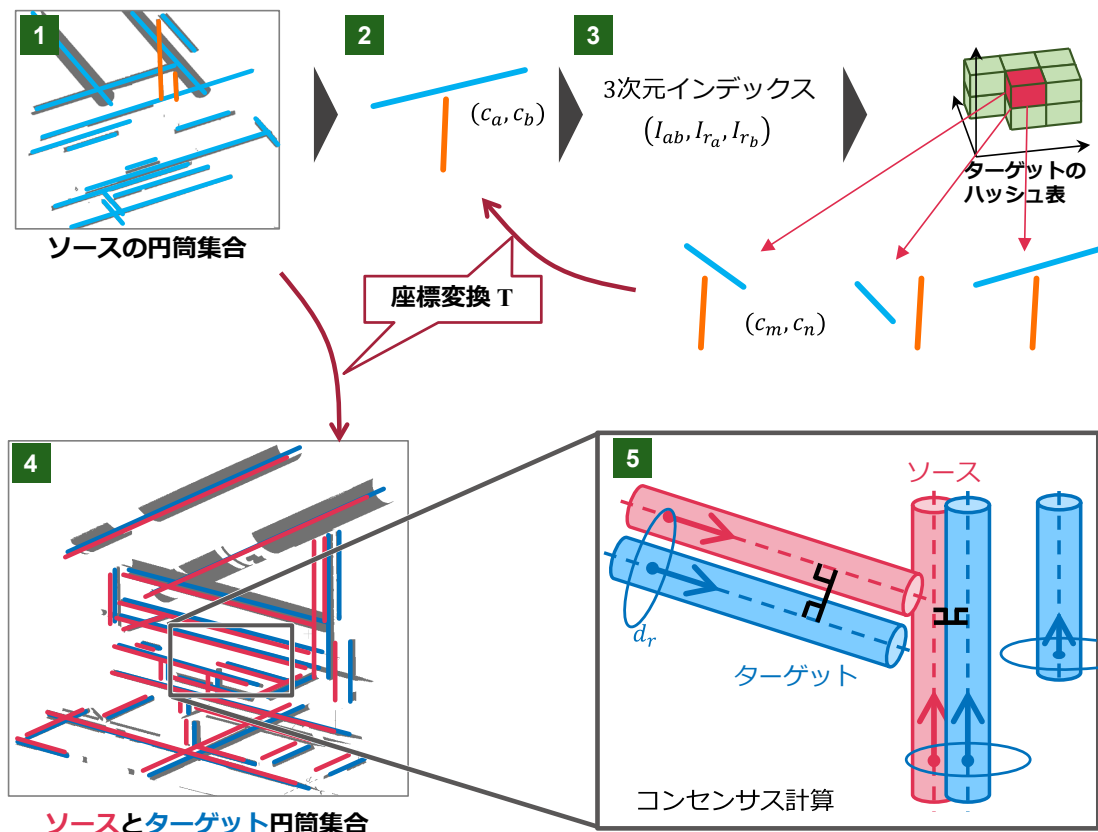


図2.15 ペアラレジストレーションの概要

2.7 精密レジストレーションおよびモデリングの同時処理

2.7.1 概要

Chan *et al.* [20]は、計測環境内に存在する円柱などの円筒形状を用いて、系統誤差パラメータ、スキャナの外部パラメータおよび円筒パラメータを変数とした非線形最適化問題を解くことにより、TLS の系統誤差の算出を行っていた。

本手法では、サブミリオーダーのスキャナ系統誤差を推定できる高精度さに注目し、複雑に交差するプラント施設環境における高精度レジストレーションのためのスキャナの外部パラメータおよび円筒パラメータ算出手法を提案する。この TLS 系統誤差算出を拡張することで、サブミリオーダーのレジストレーション誤差および円筒フィッティング誤差の推定が期待できる。

2.7.2 提案する精密レジストレーションおよびモデリング手法の基本概念

提案する精密レジストレーションおよびモデリング手法では、円筒面上の計測点と円筒面を空間で一致する制約の下、計測点群から円筒面上の距離を最小化することで行う。これにより、位置と姿勢で構成されるスキャナの外部パラメータと、軸上の一点、方向ベクトルおよび半径で構成される円筒定義パラメータを同時に算出する。本手法では、ラフレジストレーションで求めたスキャナのパラメータおよび円筒パラメータを初期値とする。最適化には、式(2.3)に示す目的関数を用いた。図 2.16 に概要図を示す。

$$\underset{\left\{ \begin{smallmatrix} \mathbf{x}_j^{Reg} \\ \mathbf{x}_k^{Cyl} \end{smallmatrix} \right\}}{\text{minimize}} \sum_{j \in B - t_0} \sum_{k \in C} \sum_{i \in P_k} w(e_i) \left[D_{jk}(i; \mathbf{x}_j^{Reg}, \mathbf{x}_k^{Cyl}) \right]^2 \quad (2.3)$$

ここで、 B はスキャナ集合、 t_0 は基準スキャナで、算出されるスキャナの外部パラメータは、 t_0 の相対的なパラメータとなる。 C は、すべてのスキャンで抽出された円筒集合 $\{s_j\}$ のうち、異なるスキャンで共通している円筒の集合、 P_k は円筒 k 上に存在する計測点群である。また、 $\mathbf{x}_j^{Reg} = \{\omega_j, \psi_j, \kappa_j, X_{s_j}, Y_{s_j}, Z_{s_j}\}$ は、スキャナ j の外部パラメータであり、 $\omega_j, \psi_j, \kappa_j$ は、それぞれ基準スキャナの座標軸周り回転角度、 $X_{s_j}, Y_{s_j}, Z_{s_j}$ は、それぞれ基準スキャナから見た座標値となる。 $\mathbf{x}_k^{Cyl}$ は、円筒 k のパラメータである。パラメータの詳細は、用いる誤差評価式により異なるため、次項で述べる。 $D_{jk}(i; \mathbf{x}_j^{Reg}, \mathbf{x}_k^{Cyl})$ は、スキャナ j から計測された円筒 k 上の計測点 i における符号付きフィッティング誤差評価式である。 $w(e_i)$ は重み関数であり、 e_i は計測点 i における重みを決定する変数であり、計測点 i の距離 $d_i(e_i = d_i)$ もしくはレーザ入射角度 $\alpha_i(e_i = \alpha_i)$ 、あるいは、フィッティング円筒面からの残差 $D_{jk}(i) (e_i = D_{jk}(i))$ のいずれかをとる。重み関数については次節で詳しく述べる。スキャナパラメータ $\mathbf{x}_j^{Reg}$ と円筒パラメータ $\mathbf{x}_k^{Cyl}$ の同時精緻化は、精密レジストレーション誤差が円筒フィッティング誤差に伝搬するのを防ぎ、高精度な円筒配管モデル化の実現を可能とする。

本手法では、異なる二つの誤差評価式、半径方向誤差評価式 $D_{jk}^o(i)$ とレーザ照射方向誤差評価式 $D_{jk}^b(i)$ を用いた。モデル化の精度とロバスト性はこの誤差評価関数に依存するため、2.9節で考察を行った。

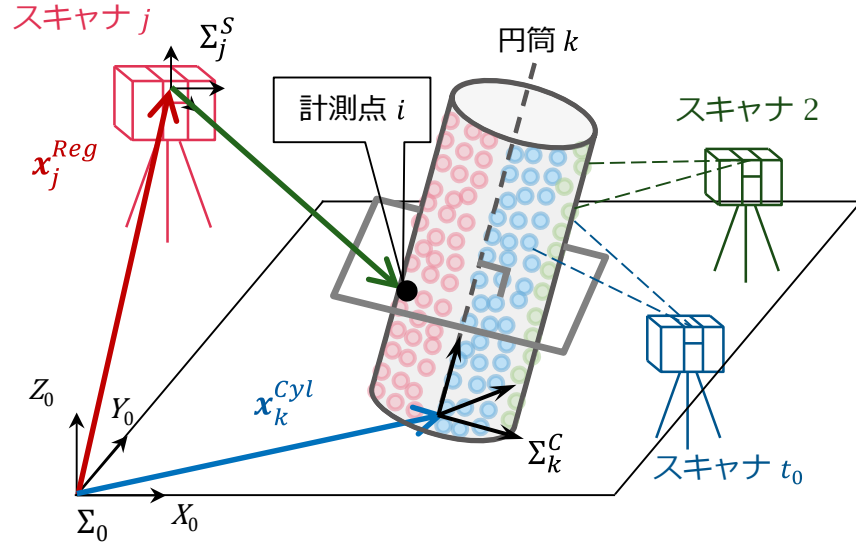


図2.16 精密レジストレーションの概要

2.7.3 半径方向の誤差評価式

半径方向の誤差評価式 $D_{jk}^O(i)$ は、対応する円筒面から各計測点の半径方向の距離を評価している。計算の簡略化のために、ラフレジストレーションで求めた円筒軸の方向で、モデル化する円筒群を、基準座標系 Σ_0 の3つの座標軸(X_0, Y_0, Z_0)に応じて分類する。この手法は、スキャナのセルフキャリブレーション手法で用いられている[20]。図2.17に示すように、円筒が Z_0 軸にほぼ平行な場合の誤差評価式 $D_{jk}^O(i)$ を式(2.4)に示す。

$$D_{jk}^O(i; \mathbf{x}_j^{Reg}, \mathbf{x}_k^{Cyl}) = \sqrt{p_{ix}'^2 + p_{iy}'^2} - r_k \quad (2.4)$$

$$\mathbf{p}_i' = \mathbf{R}_{Y_0}(\Phi_k) \mathbf{R}_{X_0}(\Omega_k) \{\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_k\} \quad (2.5)$$

ただし、 $\mathbf{p}_i = [p_{ix} \ p_{iy} \ p_{iz}]^T$ は基準座標系 Σ_0 における計測点 i の座標値、 $\mathbf{p}_i' = [p_{ix}' \ p_{iy}' \ p_{iz}']^T$ は、半径 $r_k (\in \mathbf{x}_k^{Cyl})$ となる円筒 k の座標系 Σ_k^C における点の座標値、 $\mathbf{q}_k = [q_{kx} \ q_{ky} \ q_{kz}]^T (\in \mathbf{x}_k^{Cyl})$ は、基準座標系 Σ_0 における平面 X_0Y_0 と円筒軸との交点、 $\mathbf{R}_{X_0}, \mathbf{R}_{Y_0}, \mathbf{R}_{Z_0}$ はそれぞれ X_0, Y_0, Z_0 軸周りの 3×3 の回転行列、 $\Omega_k, \Phi_k, \Psi_k (\in \mathbf{x}_k^{Cyl})$ は、それぞれ X_0, Y_0, Z_0 に関する回転角度である。これらの角度により円筒軸の方向が定められる。

円筒が X_0 軸および Y_0 軸にほぼ平行な場合に対しても、同様に誤差評価式 $D_{jk}^O(i)$ は式(2.6)～(2.9)で表現される。

X_0 軸にほぼ平行な場合：

$$D_{jk}^o(i; \mathbf{x}_j^{Reg}, \mathbf{x}_k^{Cyl}) = \sqrt{p_{iy}'^2 + p_{iz}'^2} - r_k \quad (2.6)$$

$$\mathbf{p}_i' = \mathbf{R}_{Z_0}(\Psi_k) \mathbf{R}_{Y_0}(\Phi_k) \{\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_k\} \quad (2.7)$$

Y_0 軸にほぼ平行な場合：

$$D_{jk}^o(i; \mathbf{x}_j^{Reg}, \mathbf{x}_k^{Cyl}) = \sqrt{p_{ix}'^2 + p_{iz}'^2} - r_k \quad (2.8)$$

$$\mathbf{p}_i' = \mathbf{R}_{Z_0}(\Psi_k) \mathbf{R}_{X_0}(\Omega_k) \{\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_k\} \quad (2.9)$$

スキャナのキャリブレーション手法[20]では、式(2.4)、(2.6)および(2.8)において、距離の二乗の誤差を評価していた．そのため最小二乗による目的関数の最小化の際に、四乗和を最小にしていることになり、最小化の際に、算出されるパラメータが各点の誤差の大小に過敏に影響されると推察される．そこで本手法では、式(2.4)、(2.6)および(2.8)で示されるように、距離誤差を評価するように改良を行った．

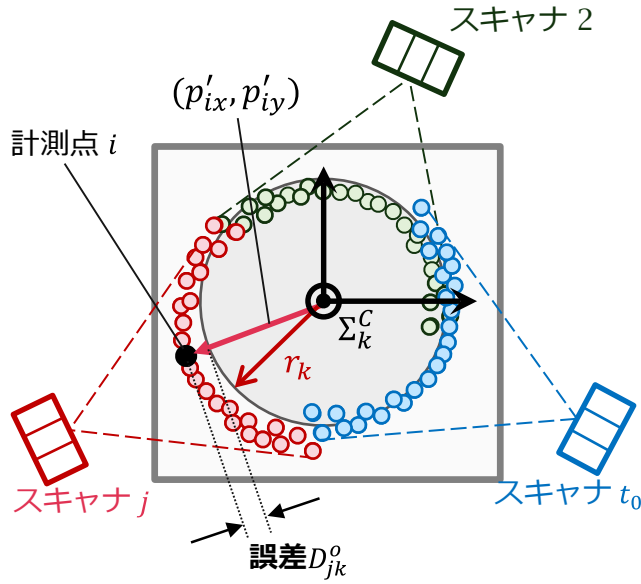


図2.17 半径方向誤差評価式の概要

2.7.4 レーザ照射方向の誤差評価式

TLS によって計測された計測点の標準偏差に従った偶然誤差は、レーザ照射方向に沿って生じるため、式(2.4), (2.6)および(2.8)で表現される半径方向の誤差とは齟齬が見られる。そこで、図 2.18 に示すように、円筒 k 上の計測点 i における、スキャナ j から照射されたレーザ方向に沿った誤差を評価する[27]。レーザ照射方向の誤差評価式 $D_{jk}^b(i)$ を式(2.10)に示す。

$$D_{jk}^b(i; \mathbf{x}_j^{Reg}, \mathbf{x}_k^{Cyl}) = \frac{(\lambda - \sqrt{\lambda^2 - \kappa\mu})}{k} - d_i \quad (2.10)$$

ここで、

$$\kappa = 1 - (\mathbf{a}_{jk} \cdot \mathbf{v}_{ijk})^2, \lambda = \rho_{jk}(\mathbf{v}_{ijk} \cdot \mathbf{n}_{jk}), \mu = \rho_{jk}^2 - r_k^2 \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{jk} &= R(\kappa_j)R(\phi_j)R(\omega_j)\mathbf{a}_k, \\ \mathbf{n}_{jk} &= \mathbf{u}'_{jk}/\rho_{jk}, \\ \rho_{jk} &= \|\mathbf{u}'_{jk}\|, \\ \mathbf{u}'_{jk} &= R(\kappa_j)R(\phi_j)R(\omega_j)\mathbf{u}_{jk} \end{aligned} \quad (2.12)$$

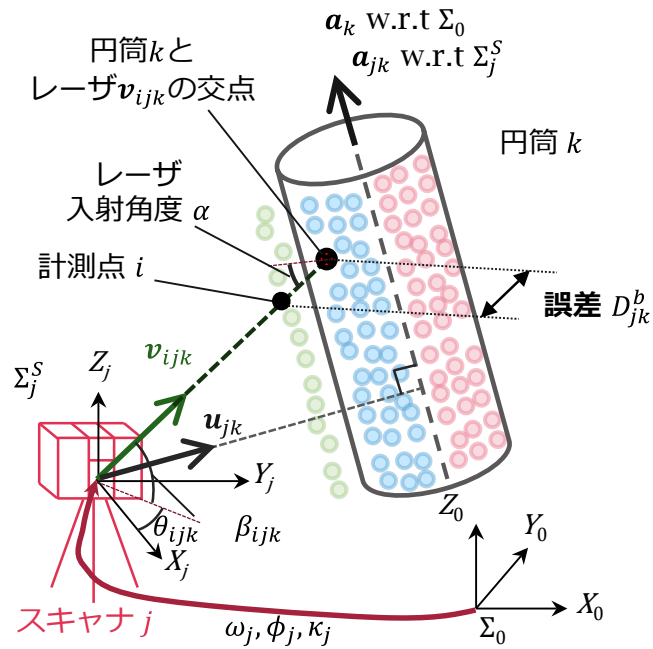


図2.18 レーザ照射方向誤差評価式の概要

ここで、 $\mathbf{a}_k$ および $\mathbf{a}_{jk}$ は、それぞれワールド座標系 Σ_0 およびスキャナ座標系 Σ_j^S におけるスキャナ j からの円筒 k の軸方向ベクトル、 $\omega_j, \phi_j, \kappa_j$ は、ワールド座標系 Σ_0 から見たスキャナ座標系の軸 X_j, Y_j, Z_j の軸周りの回転角度である。 $\mathbf{v}_{ijk} = [\cos \beta_{ijk} \cos \theta_{ijk} \quad \cos \beta_{ijk} \sin \theta_{ijk} \quad \sin \beta_{ijk}]^t$ は、スキャナ j から円筒 k 上に計測された計測点 i へのレーザの単位方向ベクトルであり、 θ_{ijk} と β_{ijk} はそれぞれ、スキャナ座標系 Σ_j^S におけるレーザの方位角と仰角である。 $\mathbf{u}_{jk} = [u_{jkx} \quad u_{jky} \quad u_{jkz}]^t$ は、スキャナ座標系 Σ_j^S の原点からの円筒 k の軸上の最近点である。

式(2.10)の解は、入射角が 90° 付近で不安定になる。そこで、式(2.10), (2.11)および(2.12)から、推定される円筒 k 面とレーザ光との入射角度 α として、式(2.13)のようにコサイン値を定義する。

$$\cos \alpha = \sqrt{\lambda^2 - \kappa\mu}/r_k, \quad \chi = \cos^2 \alpha \quad (2.13)$$

$\chi = 0$ となるのは、レーザ光が円筒に接する場合で、 $\chi < 0$ は実数解を持たない。式(2.10)の導関数は、 $\chi = 0$ に近づくとき $\sqrt{\lambda^2 - \kappa\mu}$ が0に近づくため、不安定になる。そこで、式(2.13)を用いて、式(2.10)を次式のように再定義する。

$$D_{jk}^b(i; \mathbf{x}_j^{Reg}, \mathbf{x}_k^{Cyl}) = \begin{cases} (\lambda - \sqrt{\lambda^2 - \kappa\mu}) / \kappa - d_i & (\chi > \varepsilon_c) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (2.14)$$

ただし、 ε_c は入射角のコサイン値の二乗の閾値であり、偶然誤差評価実験[22]の結果より、 $\varepsilon_c = \cos^2 60^\circ$ とした。

2.7.5 修正 Marquardt 法を用いた収束処理

式(2.4), 式(2.6)と式(2.8)から成る誤差評価式 $D_{jk}^0(i)$ および、式(2.10)からなる誤差評価式 $D_{jk}^b(i)$ を用いて、式(2.3)の最適化問題を解くことにより、スキャナの外部パラメータ $\{\mathbf{x}_j^{Reg}\}$ と円筒パラメータ $\{\mathbf{x}_k^{Cyl}\}$ を求める。各誤差評価式 $D_{jk}(i)$ は符号付フィッティング誤差であり、理論上ゼロになるため、式(2.3)の最小化により、非線形最適化問題に収束する。また、2.5節で述べた円筒パラメータラフ抽出手法と2.6節で述べたスキャナの外部パラメータを初期値とする。

式(2.3)の最適化には、修正 Marquardt 法[21]を用いた。修正 Marquardt 法は、Levenberg-Marquardt 法[11]の Levenberg-Marquardt パラメータの直感的決定法を修正した手法である。

はじめに Levenberg-Marquardt 法の擬似コードを下記に示す。ただし、 $\mathbf{A}$ は、 $D_{jk}(i)$ のヤコビ行列であり、 λ は、Levenberg-Marquardt パラメータである。

Algorithm 1 Return $\mathbf{x}_0$ that minimize J	
1	Input $\mathbf{x}_0$
2	$\lambda = 0.001$
3	REPEAT
4	$\lambda = \lambda/10;$
5	$\mathbf{U} = \mathbf{A}^t \mathbf{A}; \quad \mathbf{v} = \mathbf{A}^t \mathbf{D}(\mathbf{x}_0); \quad J_0 = \Sigma[D_{jk}(i; \mathbf{x}_0)];$
6	REPEAT
7	$\lambda = \lambda * 10;$
8	$\mathbf{H} = \mathbf{U} + \lambda(\mathbf{I} + \text{diag}(\mathbf{U}))$
9	Solve $\mathbf{H}\Delta\mathbf{x} = -\mathbf{v}$
10	$\mathbf{x}_{new} = \mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x}; \quad J_{new} = \Sigma[D_{jk}(i; \mathbf{x}_{new})]^2$
11	IF converged THEN
12	$\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_{new};$
13	RETURN with $\mathbf{x}_0;$
14	ENDIF
15	UNTIL $J_{new} < J_0$ OR an iteration limit is reached
16	IF $J_{new} < J_0$ THEN
17	$\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_{new};$
18	ENDIF
19	UNTIL an iteration limit is reached

Levenberg-Marquardt 法は、非線形最適化問題を解くために用いられる解法であり、 λ の値を変化させることで、勾配法と Gauss-Newton 法を切り替えていく。解から遠く離れている場合は、勾配法を用いて、確実に最適解へ近づいていき、解に近づくにつれて、Gauss-Newton 法に切り替え、安定かつ素早く解を求めていく。つまり、 $\lambda = 0$ ならば Gauss-Newton 法、 $\lambda \gg \|\mathbf{U}\|$ ならば勾配法となる。しかしながら、 λ に関して、1/10 倍や 10 倍といった増減方法については、必ずしも必然性があるわけではなく、種々決定法がなされている。さらに Levenberg-Marquardt 法では、Gauss-Newton 法が二次的収束するのに対し、 λ の値が 0 にならないため、一次の収束しかない。

これらの問題点を克服するために提案されたのが修正 Marquardt 法である。この手法は、 λ の初期値を 0 として、Gauss-Newton 法から出発し、目的関数 J の変化を線形化した模型 $\Delta\bar{J}$ と、実際の非線形模型 ΔJ とを比較して λ を増減させる。また、 λ の臨界値 $\lambda_c = 1/\text{trace}(\mathbf{U}^{-1})$ を設定し、 $\lambda = 0$ から λ を増加させる場合は λ_c を基準にし、 $\lambda = \lambda_c$ より λ を減少させる必要がある場合は、 $\lambda = 0$ とする。また、単に λ を減少させる場合は $\lambda/2$ とし、増加させる場合は、式(2.15)の非線形性の目安 ratio から決定する。実際の目的関数の変化 ΔJ と線形化した場合の予想変化量 $\Delta\bar{J}$ との比は式(2.15)、(2.16)および(2.17)で表現され

る.

$$ratio = \Delta J / \Delta \bar{J} \quad (2.15)$$

$$\Delta J = J(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) - J(\mathbf{x}) \quad (2.16)$$

$$\Delta \bar{J} = -\Delta \mathbf{x}^t \mathbf{H} \Delta \mathbf{x} - \lambda \|\Delta \mathbf{x}\|^2 \quad (2.17)$$

$ratio$ を非線形性の目安として、次の4つの場合に分けて、 λ を調節する.

- 1) $ratio \geq 0.75$ λ を半分にする.
- 2) $0.75 > ratio > 0.25$ λ は変化させない.
- 3) $0.25 \geq ratio \geq 0$ λ を増大する.

以上の場合は、 $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_{new}$ として、擬似コード5行目からのヤコビ行列を計算し、次の反復に移る.

- 4) $ratio < 0$ λ を増大し、擬似コード8行目から、再び $\Delta \mathbf{x}$ を計算

ただし、3)および4)における λ を増大させる場合は、式(2.18)で示す2~10の値 u を $ratio$ に関係させて与える.

$$u = \max(2, \min(2 - ratio, 10)) \quad (2.18)$$

$\lambda = 0$ から増大させる場合は、 $\lambda = \lambda_c \times u/2$ を、 $\lambda > 0$ の場合は、 $\lambda = \lambda \times u/2$ を与える.

次に、収束判定に関して、判定条件を厳しすぎる場合では無限ループに入ってしまう場合がある. 一方で緩くすると、真の解に到達する前に、反復が終了する. 本手法では、次式で示す二乗和の減少量 ΔJ と、修正ベクトル $\Delta \mathbf{x}$ によって収束を判定する[28].

$$\begin{cases} \Delta J \leq (1 + J(\mathbf{x})) \times 10^{-4} \\ \|\Delta \mathbf{x}\| \leq \hat{\sigma}_{\mathbf{x}} \times 10^{-4} \end{cases} \quad (2.19)$$

ただし、 $\hat{\sigma}_{\mathbf{x}}$ は各パラメータの推定標準偏差である.

2.8 スキャナ外部パラメータと円筒パラメータの精緻化手法

2.8.1 円筒半径値の定数化

円筒配管の外径は、寸法許容差が規格で定められた離散値をとることが多く、定数化が可能である。そのため、式(2.3)を最適化することにより、求められる変数のうち、円筒パラメータ $\{x_k^{cyl}\}$ の半径値を規格値へと定数化することにより、変数を減らし、半径以外のパラメータの精緻化を行う。前節で述べた手法により、最適解を求めた後、半径値を最も近い規格値[25]へと置き換え、再度、修正 Marquardt 法により、最適解を求める。これにより、求める変数の数が $6 \times |B - t_0| + 5 \times |C|$ 個から、 $6 \times |B - t_0| + 4 \times |C|$ 個へと減少する。ただし、 B はスキャナ集合、 t_0 は基準スキャナ、 C はモデル化される円筒集合である。

2.8.2 繰り返し重み付き最小二乗法

式(2.3)を解くための繰り返し重み付き最小二乗法 (IRLSM: Iteratively reweighted least-squared method)の中で用いる重み関数に関して、重み関数、その変数ならびに調整パラメータの 3 つが最適解算出の精度に影響を及ぼすと考えられる。本論文ではそれらの決定方法について考察を行い、2.9 節で示す評価を行った。また、重み関数は種々に提案されており、本手法では、図 2.19、および式(2.20)から式(2.23)で表現される重み関数を用いた。

$$\text{Fair 型} \quad : \quad w(e_i) = \frac{1}{1 + |e_i|/c} \quad (2.20)$$

$$\text{Cauchy 型} \quad : \quad w(e_i) = \frac{1}{1 + (e_i/c)^2} \quad (2.21)$$

$$\text{Huber 型} \quad : \quad w(e_i) = \begin{cases} 1 & |e_i| \leq c \\ c/|e_i| & |e_i| > c \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\text{Tukey 型} \quad : \quad w(e_i) = \begin{cases} [1 - (e_i/c)^2]^2 & |e_i| \leq c \\ 0 & |e_i| > c \end{cases} \quad (2.23)$$

式(2.20)の Fair 型、および式(2.21)の Cauchy 型重み関数は、 $e_i = c$ のとき、重みが $1/2$ となるような重み関数である。Fair 型は、重みが 1 となる領域が非常に小さく、誤差

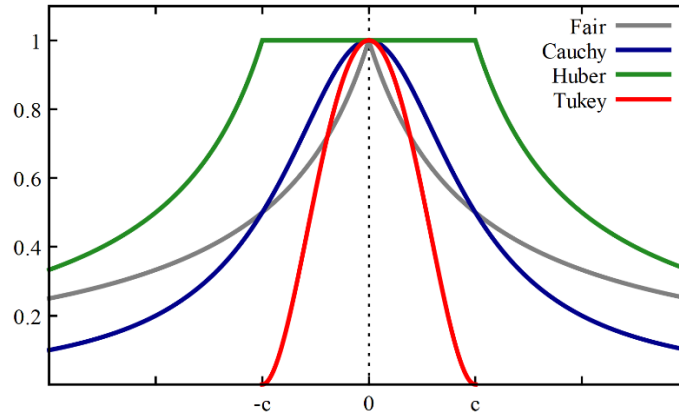


図2.19 各重み関数

が非常に小さい場合でも重み値が下がる．一方で，Cauchy 型は，誤差が小さい場合に含みを持たせ，誤差が大きくなると急激に重み値を下げていく関数である．式(2.22)の Huber 型，および式(2.23)の Tukey 型重み関数は，調整パラメータ c の値で場合分けを行っている．Huber 型は，調整パラメータ c 以内に存在する計測点は，重みが 1 となり，最小二乗法のように同等に扱われるが，裾が長く，重み値が 0 になることはない．そのため， c の値が大きい場合は，最適解が外れ値に影響されやすくなる．一方，Tukey 型重み関数は， $|e_i| > c$ の場合に，重み値がゼロとなるため，外れ値を完全に排除できる一方で，初期値依存性が高く，局所解に陥る可能性がある．

Huber 型および Tukey 型重み関数において，重要となるのが調整パラメータ c の決定方法である．調整パラメータ c の値によっては，最適解の精度が左右される場合がある．しかしながら，必然的な指標が存在するわけではなく，決め打ちで入れられることが多い．そこで重みの変数として，フィッティング誤差を適用した場合において，本手法に適した調整パラメータ c の決定方法を述べる．

まず，調整パラメータ c の決定方法として，誤差に関連した標準偏差の活用が考えられるが，本手法のラフ抽出において，任意の抽出円筒上点群にはフランジ部の点群や径が僅かに異なる円筒上の点群も同時に抽出してしまう問題がある．これらの点群は，ガウス分布に従った誤差とは言えず，外れ値として扱われる．そのため，調整パラメータとして，外れ値に過敏に反応する平均や標準偏差を用いた場合では，不偏的な指標を推定することは困難であると考えられる．そのため本手法では，標準偏差に代わる指標として，式(2.24)で定義される中央絶対残差 (MAD: the median absolute deviation about the median)に関連した指標を用いる[29]．

$$\text{MAD}(\mathbf{e}) = \text{MAD}(e_1, e_2, \dots, e_n) = \text{Med}\{|\mathbf{e} - \text{Med}(\mathbf{e})|\} \quad (2.24)$$

MAD は中央値を用いているため，大きなノイズの影響をあまり受けずに推定され

る．また，この MAD を正規化した MADN (MADN: the normalized MAD) を式(2.25)に定義する．

$$\text{MADN}(\mathbf{e}) = \frac{\text{MAD}(\mathbf{e})}{0.6745} \quad (2.25)$$

ただし，0.6745 は標準正規分布の確率変数である．MADN は，誤差が平均 μ ，標準偏差 σ の正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従う場合， $\text{MADN} = \sigma$ になる．本手法では，この MADN を用いて，調整パラメータ c を式(2.26)で定義する．

$$c = \alpha \text{MADN}(\mathbf{e}) \quad (2.26)$$

ただし， α は1~6の変数である．MADN は，IRLSM の反復 1 周ごとに再計算されるため，ラフレジストレーションによって求められた初期値に対して算出された場合，MADN は，大きな値をとり，収束が進むにつれて，徐々に小さな値へと自動調整される．

しかしながら，反復 1 周ごとに調整パラメータ c の値が再計算され，各計測点の重み値が変化することは，最適解の収束付近において，揺らぎを招き，最適解算出時間に大きく寄与する．そこで，重みの変化量を観察し，その変化量が十分小さくなれば，重み値の再計算を止め，重み値を一定にした．その条件式を式(2.27)に示す．

$$\sum_{i \in P_k} |w_{i_{\text{new}}} - w_{i_{\text{before}}}| < \sum_{i \in P_k} w_{i_{\text{new}}} \times 10^{-4} \quad (2.27)$$

2.8.3 たわみを考慮した円筒分割

本手法の精密レジストレーションおよび円筒モデリング手法では，上述したように，各円筒群を基準座標系の軸にほぼ平行な 3 つの円筒群で分類を行い，各円筒に垂直な平面上に各円筒上の計測点群を投影する．そして，その平面上で，投影点に対する円フィッティングを用いることで，スキャナの外部パラメータおよび円筒パラメータを求めている．しかしながら，実環境において，重力の影響によりたわんだ円筒配管や，湾曲した円筒配管などが存在した場合，投影される点群は理想的な円とは言い難く，それらの円筒を 1 本の円筒として，高精度にモデリングすることは，本手法では不可能である．そこで，円筒長さが閾値 $\tau_h[\text{m}]$ 以上の円筒に対しては，長手方向に円筒を n 個に分割し，精密レジストレーションを行うことで，レジストレーションおよび円筒モデリングの高精度化を行った．本論文では， $\tau_h = 1.5, n = 2$ とした．

2.8.4 入射角フィルタリング

偶然誤差評価実験[22]の結果から、レーザスキャナは入射角度に依存した偶然誤差および系統誤差を持つことが既知である。このため、入射角度が大きい計測点は使わない方がよいが、従来のレジストレーション手法において、入射角度が大きい部分は、スキャン間の重複部分であることが多い。これにより、レジストレーション処理の重要な部分になるため、フィルタリング処理を施した点群の ICP による位置合わせは困難である。

一方、本手法手法では、円筒オブジェクトが空間上で一致する幾何拘束を用いているため、計測点同士の重複はなくてもレジストレーション処理が可能となる。この観点から、入射角度 60° 以上の点群に関して、レジストレーションおよび円筒モデリング処理には活用しないように、入射角度フィルタリングを行った。

2.9 擬似計測点群を用いたレジストレーションおよびモデリング結果とその評価

2.9.1 概要

本節では、任意の円筒配管 CAD モデルから、偶然誤差モデルに従った擬似計測点群を生成し、提案レジストレーションおよび円筒モデリング手法の有用性検証および定量評価を行った。用いた計算機の仕様ならびに開発に使用したライブラリを表 2.1 に示す。なお、開発環境は Visual Studio 2015 Professional, 開発言語は Microsoft Visual C++ を用いた。

表2.1 計算機仕様ならびに用いたライブラリ

計算機仕様		
OS	:	Windows 10 Pro
CPU	:	Intel® Core™ i7-5960X 3.0GHz
RAM	:	64.0 GB
PCL[30]	:	ver.1.8.0
Eigen[31]	:	ver. 3.3.4

2.9.2 擬似計測点群の生成

円筒配管 CAD モデルから生成される擬似計測点群は，レーザ照射方向に偶然誤差が重畳される．その際に用いた偶然誤差モデル[22]は，実環境において異なる外径からなる塩化ビニール製パイプを計測した実験から生成したものをを用いた．実験結果である，距離 d に依存した誤差平均 μ と標準偏差 σ ，ならびに，レーザ入射角度 α に依存した誤差平均 μ と標準偏差 σ を図 2.20 に示す．

この実験結果から測定距離 d と計測点におけるレーザ光の入射角度 α に依存した平均と標準偏差に準じた誤差モデルは， $\mathcal{N}(\mu(d, \alpha), \sigma^2(d, \alpha))$ となる．各計測点ごとにレーザ照射方向に誤差モデルに従った誤差を重畳させることで擬似計測点群を生成した．

2.9.3 簡易的な CAD モデルを用いたレジストレーションおよびモデリング結果

2.9.3.1 概要

提案精密レジストレーションと円筒モデリング手法において，2.8 節，2.9 節で述べた様々な条件下において，定量評価を行うために，図 2.21 に示す簡易的な配管系統

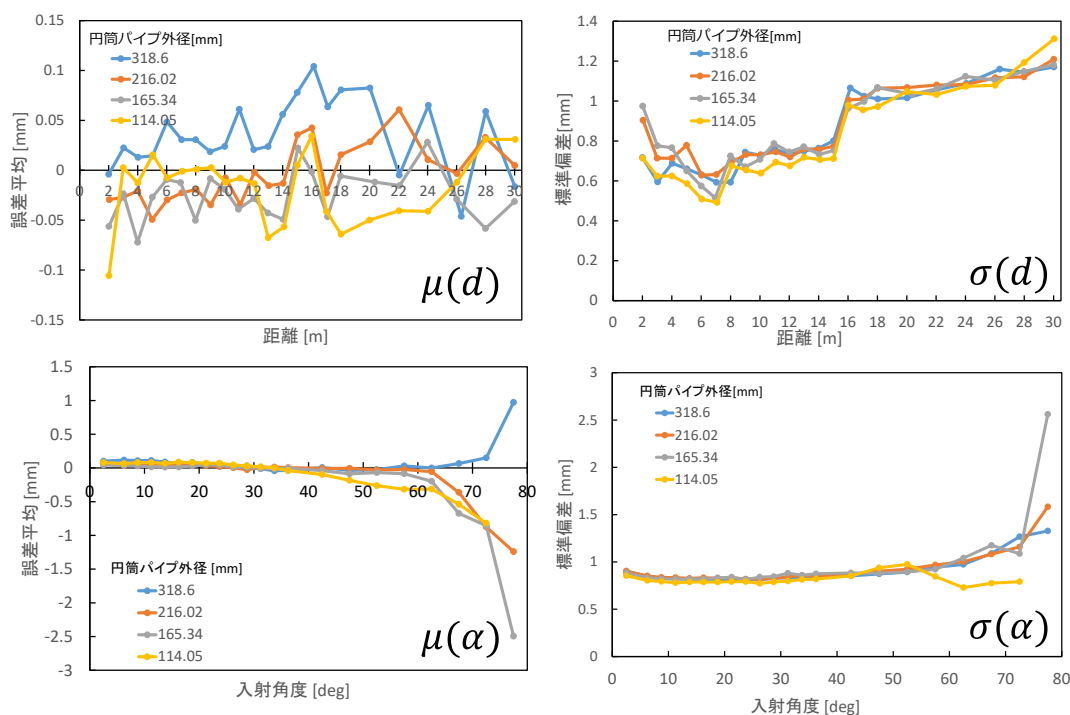


図2.20 距離 d と入射角度 α に依存した誤差平均 μ と標準偏差 σ

CAD モデルを用いて、円筒モデリング精度を比較した。

用いた配管系統 CAD モデルの寸法は $10\text{m} \times 15\text{m} \times 8\text{m}$ ，多くの円筒配管半径値は 0.3m であり，図中に示す3 スキャンの計測位置から擬似計測点群を生成した．擬似計測点群例を図 2.22 に示す．また，1 スキャン点群に対して，選択的円筒ラフ抽出を行った結果を図 2.23 に，抽出した円筒群を用いてラフレジストレーションした結果を図 2.24 に示す．

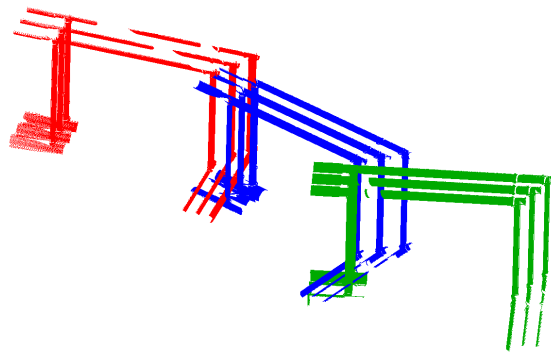
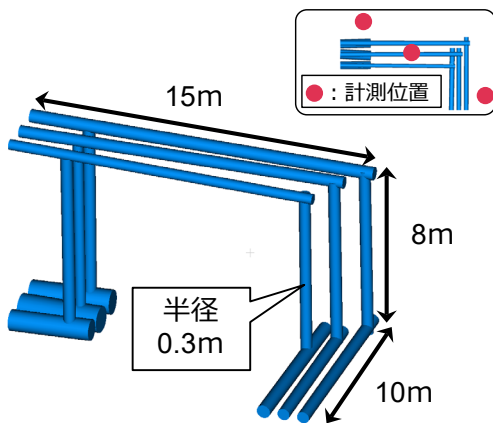


図2.21 簡易的配管系統 CAD モデル 図2.22 生成した擬似計測点群 (3 スキャン)

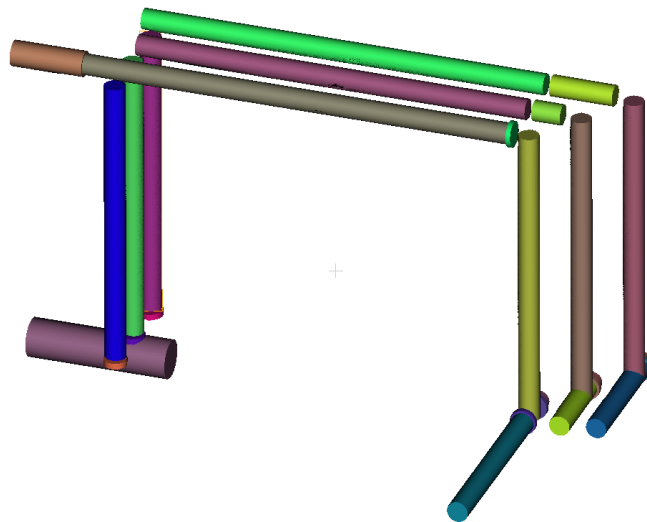


図2.23 1 スキャンの点群に対する選択的円筒ラフ抽出結果

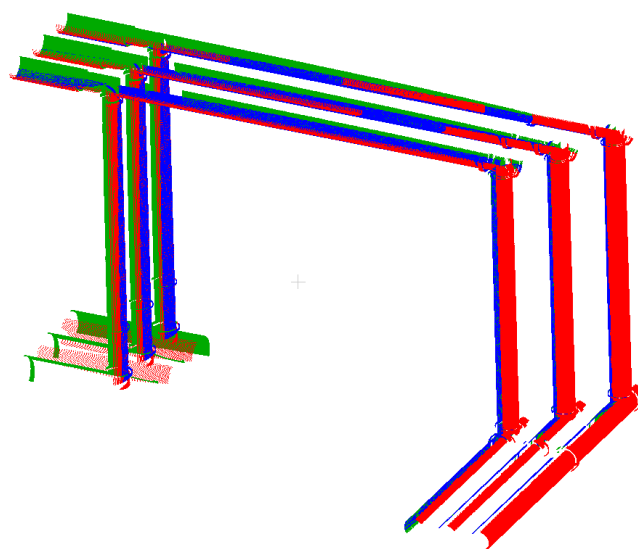


図2.24 ラフレジストレーション結果

次目より述べる実験では、これらの円筒ラフ抽出結果およびラフレジストレーション結果を用いて、精密レジストレーションおよび円筒モデリングを行い、その精度と効果について考察を行った。各実験の目的および条件を表 2.2 に示す。

表2.2 2.9 節における実験目的とその条件

実験目的	誤差評価式	円筒本数	入射角フィルタリングの有無	総点数 (入射角フィルタリングの有無) [万点]	重みの変数	重み関数	調整パラメータ c			
誤差評価式の違い (2.9.3.2 目)	$D_{jk}^o(i)$ or $D_{jk}^b(i)$	6	有	無 : 190		$w = 1$				
				有 : 159						
半径値定数化の有無 (2.9.3.3 目)	$D_{jk}^o(i)$			無	190		$w = 1$			
点密度の違い (2.9.3.4 目)			33~2,295			$w = 1$				
誤差の標準偏差の違いによる影響 (2.9.3.5 目)			565			$w = 1$				
重み関数の変数の違い (2.9.3.6 目)								計測距離	Fair 型	16
								入射角度		60
								Fitting 誤差		
重み関数の違い (2.9.3.7 目)								Fitting 誤差	Fair 型	1
									Cauchy 型	
		Huber 型							1MADN	
									3MADN	
	6MADN									
	Tukey 型	1MADN								
3MADN										
6MADN										
従来手法との比較 (2.9.3.8 目)		Fitting 誤差	Tukey 型		6MADN					
中規模プラント CAD モデルへの適用 (2.9.4 項)	$D_{jk}^o(i)$	50	有	無 : 848		$w = 1$				
				有 : 674						
重複のない計測点群への適用 (2.9.5 項)	$D_{jk}^o(i)$	8	有	無 : 163		$w = 1$				
				有 : 141						

2.9.3.2 異なる誤差評価式と入射角フィルタリングの効果

精密レジストレーションおよび円筒モデリングの非線形問題最適化を行うにあたって、2.7.3 項で述べた円筒面からの半径方向の誤差評価式(2.4), (2.6)および(2.8)と、2.7.4 項で述べたレーザ照射方向の誤差評価式(2.10)との違いによる精度検証を行った。また、同時に、入射角フィルタリングによる効果についても検証を行った。収束過程において、重み関数は用いず、一般的な最小二乗法を用いた。

図 2.25 に示す 6 本の円筒配管を選択し、表 2.3 に示す 3 つの条件下で精密レジストレーションおよび円筒モデリングを行った。実験条件 I は、半径方向の誤差評価式を用いて、全計測点を使用した場合。条件 II は、実験 I と同様に半径方向の誤差評価式を用いて、レーザ入射角度 60° 以上の計測点を手動で除去した場合、条件 III は、レーザ照射方向の誤差評価式を用いて、レーザ入射角度 60° 以上の計測点を手動で除去した場合である。なお、レーザ照射方向の誤差評価式を用いて、全計測点群を使用し、精密レジストレーションおよび円筒モデリングを行った場合、解が収束せずに最適解が算出できなかった。円筒選択後の各スキャンで計測された点数を表 2.4 に示す。

条件 II の下で精密レジストレーションした結果を図 2.26 に示す。円筒 CAD モデルのパラメータを真値として、算出した円筒パラメータとの比較し、誤差を算出した。各パラメータの誤差の結果を図 2.27、図 2.28 および図 2.29 に示す。

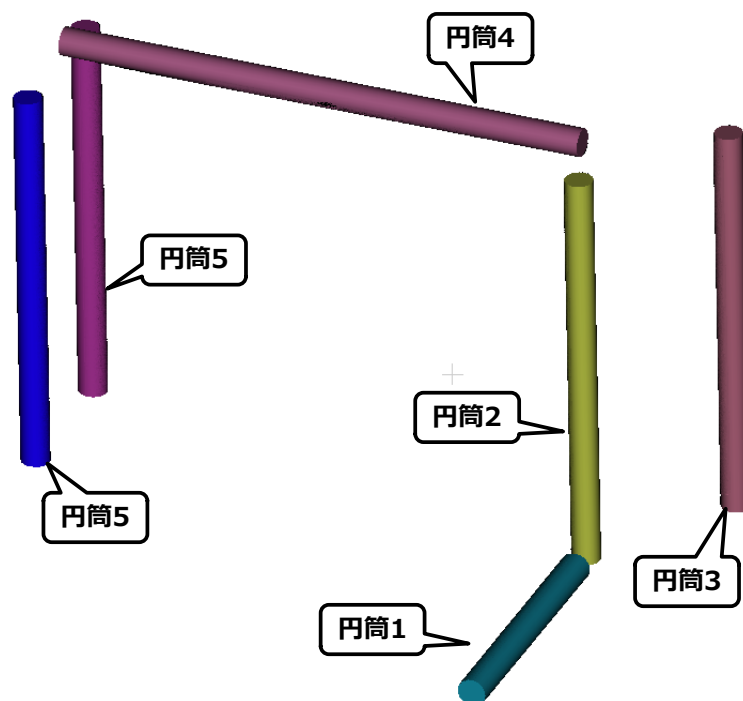


図2.25 選択した円筒配管 (6 本)

表2.3 誤差評価式の違いによる精度分析の実験条件

	誤差評価式	入射角フィルタリング
条件 I	半径方向誤差	無
条件 II	半径方向誤差	有
条件 III	レーザ照射方向誤差	有

表2.4 各スキヤンの擬似計測点群の点数

	フィルタリングなし	フィルタリングあり
スキャン 1 (赤)	25 万点	20 万点
スキャン 2 (青)	154 万点	129 万点
スキャン 3 (緑)	10 万点	9 万点

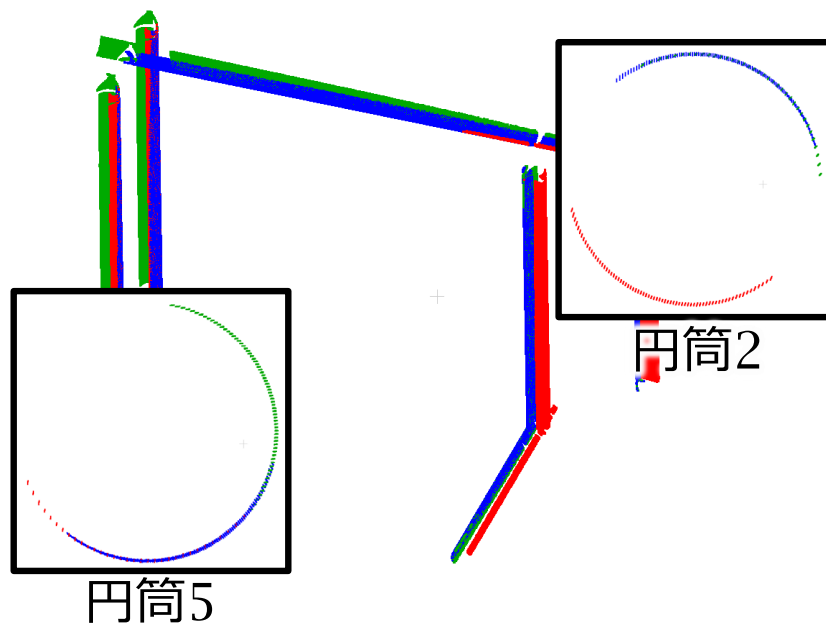


図2.26 精密レジストレーション結果 (条件 II)

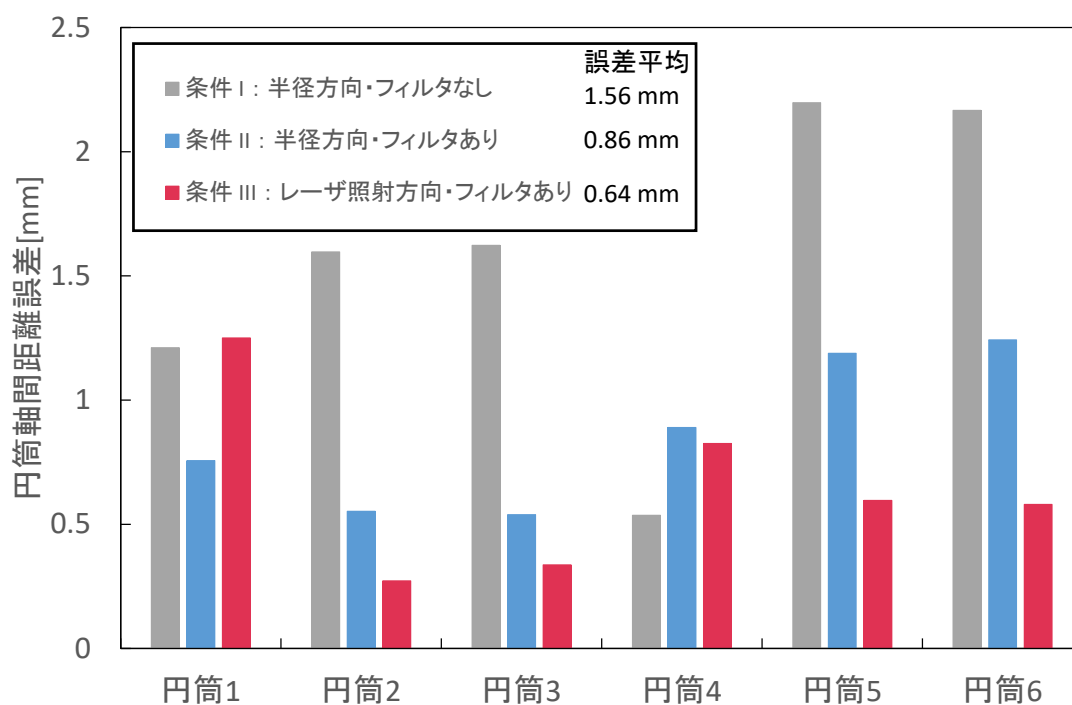


図2.27 異なる誤差評価式を用いた場合の円筒軸間距離誤差 [mm]

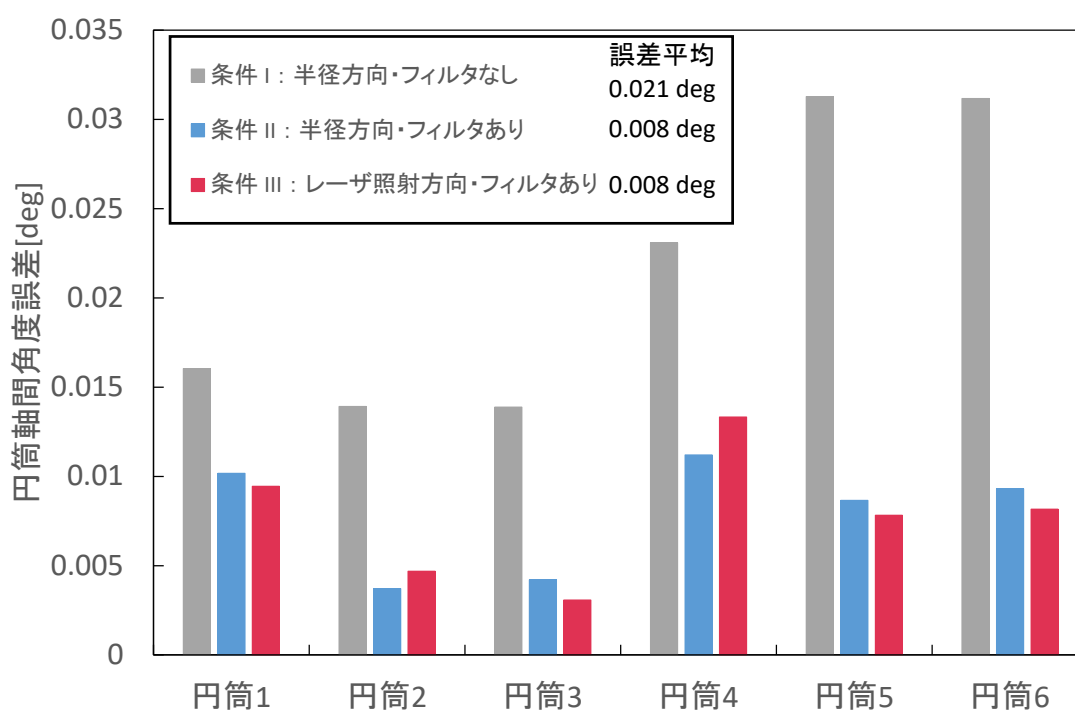


図2.28 異なる誤差評価式を用いた場合の円筒軸間角度誤差 [deg]

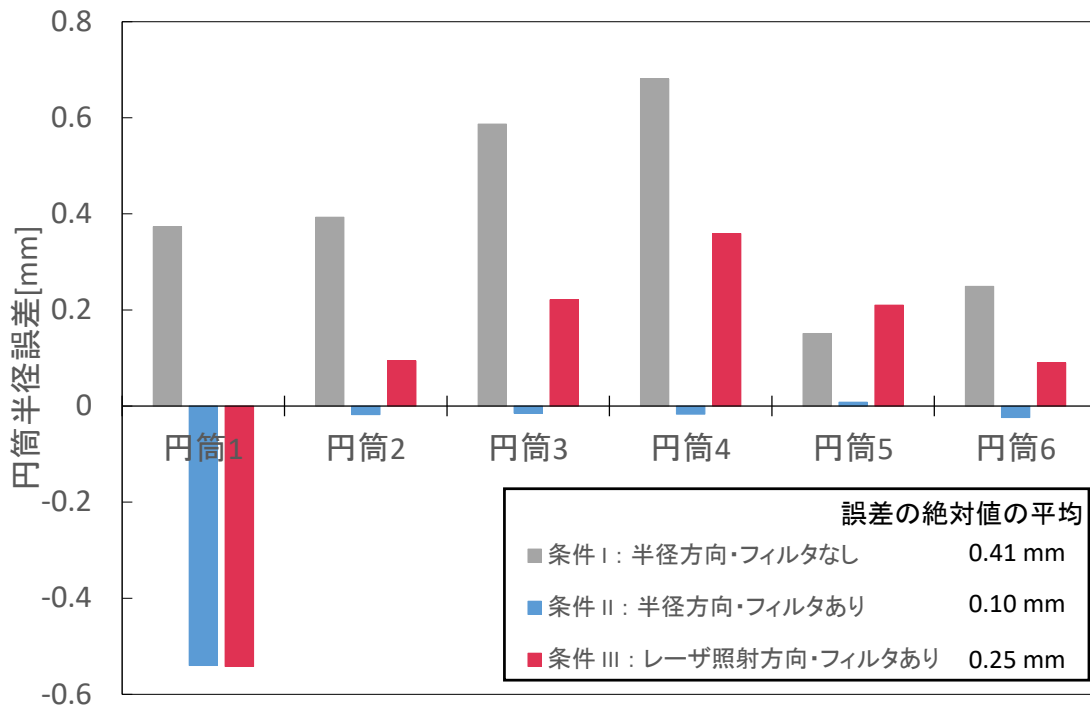


図2.29 異なる誤差評価式を用いた場合の円筒半径値の誤差[mm]

これらの結果から、円筒配管のモデリング精度に関しては、レーザ照射方向を用いた誤差評価式ならびに半径方向の誤差評価式、どちらも要求精度である $\pm 5\text{mm}$ 以内を満たしている。しかしながら、収束性に関して、レーザ照射方向の誤差評価式では最適解を求められない場合もあり、半径方向の誤差評価式の方が優位であるといえる。レーザ照射方向の誤差評価式の最適解が収束しない要因として、レーザ照射方向を用いた場合では、円筒パラメータの自由度が増加してしまい、収束性が不安定になったと考えられる。

入射角フィルタリングに関しては、ノイズが多い計測点群を排除できるため、ある程度の精度向上の効果があることを確認した。

2.9.3.3 円筒半径値定数化の効果

2.8.1 項で述べた円筒半径値の定数化の精度検証を行った。前目同様の6本の円筒配管を選択し、半径方向の誤差評価式を使用し、重みなし最小二乗法を用いて、精密レジストレーションおよび円筒モデリングを行った。本実験では、精度比較として、算出した円筒軸間の相対的な誤差を算出した。円筒配管 CAD モデル内で、任意の円筒を2本選択し、円筒2軸間の距離および角度を求め、これを真値とする。提案手法に対しても同様に相対距離および相対角度を算出し、真値と比較した。

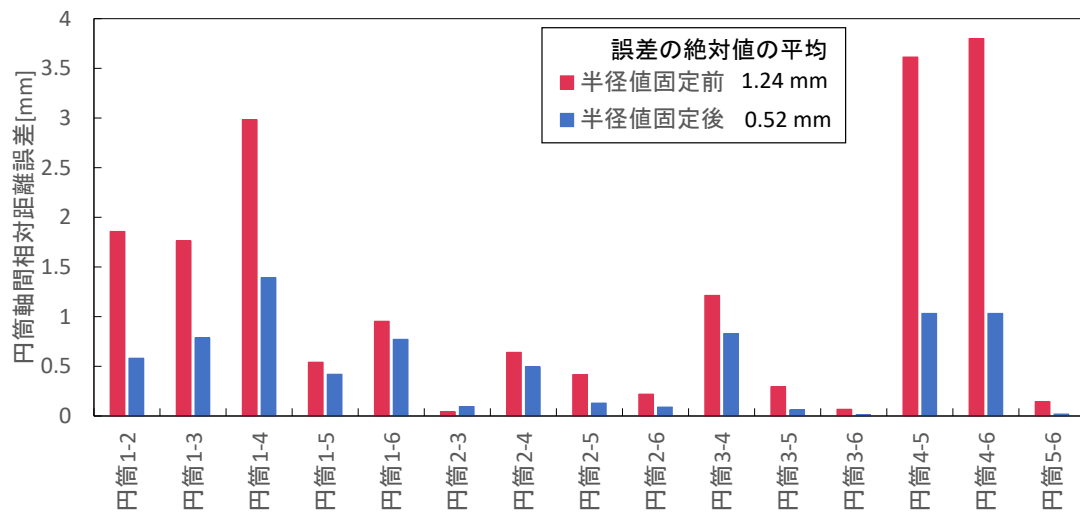


図2.30 円筒半径値定数化の有無における円筒軸間相対距離誤差[mm]

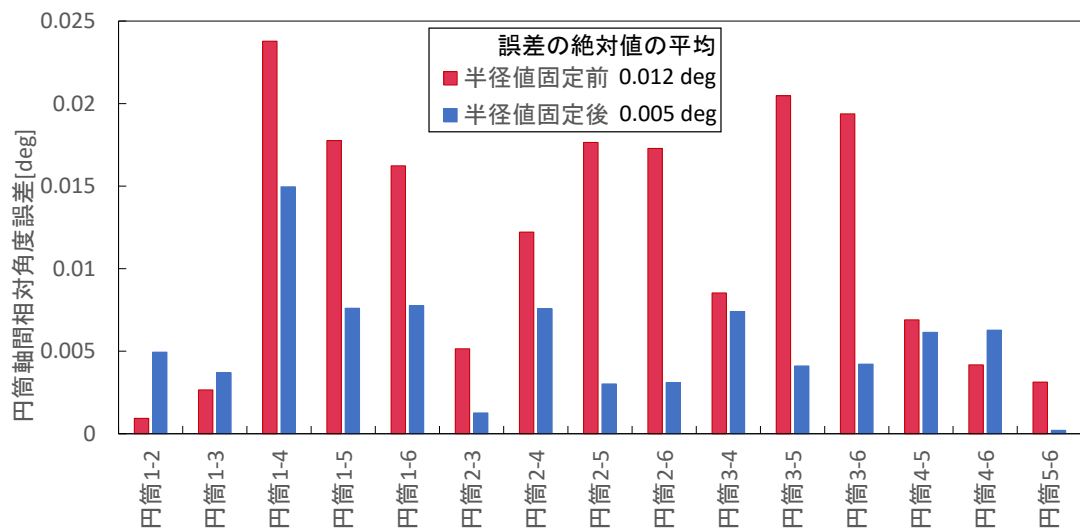


図2.31 円筒半径値定数化の有無における円筒軸間相対角度誤差[deg]

相対軸間距離誤差，相対軸間角度誤差の半径値定数化前後の結果を図 2.30 および図 2.31 に示す。結果より，半径値を規格値へと置き換え，定数化することにより，円筒軸パラメータの精度を向上させることを確認した。

2.9.3.4 擬似計測点群の密度変化の効果

擬似計測点群生成ソフトウェアを用いて，点群の密度を変化させ，提案精密レジストレーションおよび円筒モデリング手法のロバスト性の検証を行った。

2.9.3.1 目で述べた選択的円筒ラフ抽出結果およびラフレジストレーション結果から，

図 2.32 に示す円筒 10 本を使用し、半径方向の誤差評価式を用いた。表 2.5 および図 2.33 に示すように、10m 先の点間距離を変化させ、提案レジストレーションおよびモデリング手法を適用した。

各点密度における、円筒間の軸間距離誤差、軸間角度誤差、半径値誤差の平均と標準偏差を比較した精度検証結果を図 2.34、図 2.35 および図 2.36 に示す。また、本実験において、提案手法の処理時間に関する変数のうち、円筒パラメータとスキャン数を固定したまま、点数のみを増減させているため、処理時間の単純比較が可能となる。点数と処理時間の関係性を図 2.37 に示す。

これらの結果より、点密度の変化に伴う誤差の変化が確認されたが、すべての点密度において、許容要求精度を満足することを確認した。また、提案手法の処理時間は、点数に対して、線形に増加することを確認した。

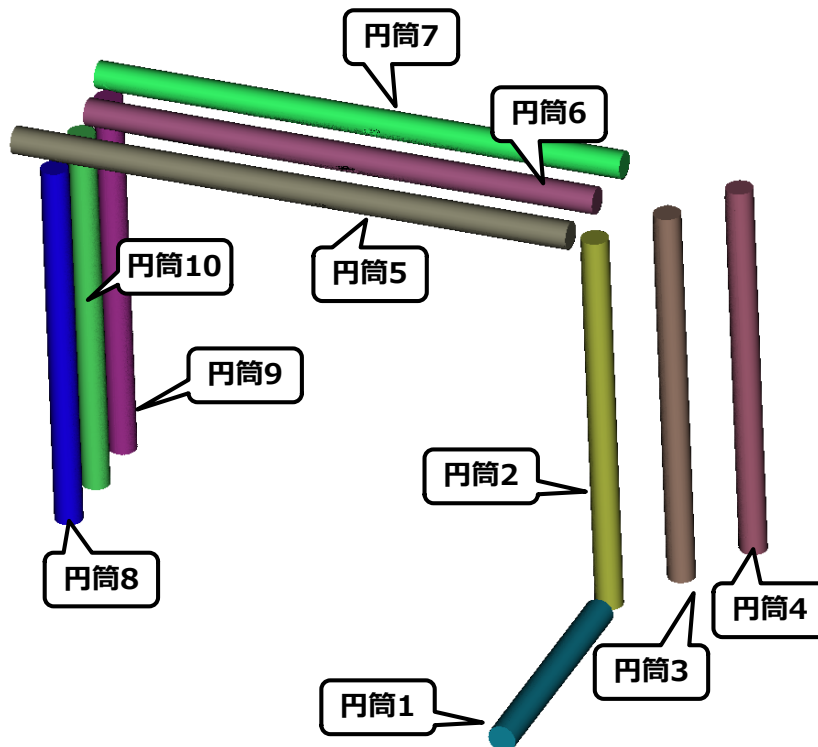


図2.32 選択した円筒配管 (10 本)

表2.5 点密度とその総点数

点間距離@10m	総点数[万点]
3.1 mm	2295
6.1 mm	565
7.7 mm	367
12.3 mm	143
15.3 mm	91
24.5 mm	33

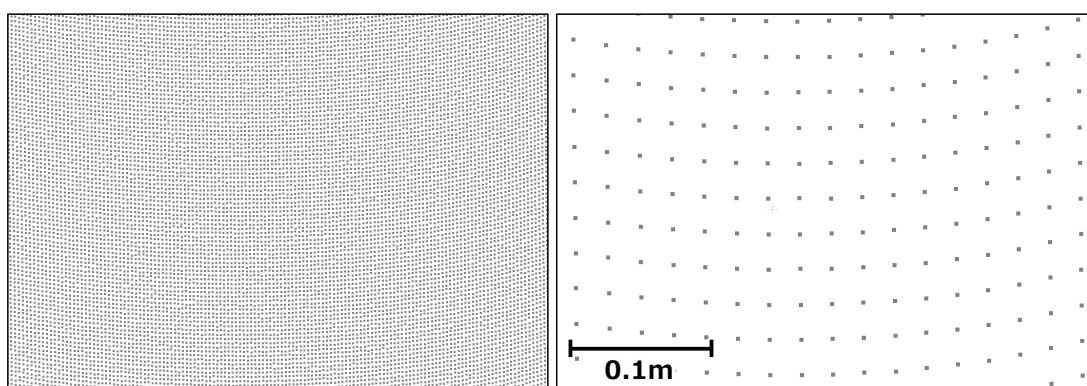


図2.33 点密度の違い (左 : 3.1mm@10m, 右 : 24.5mm@10m)

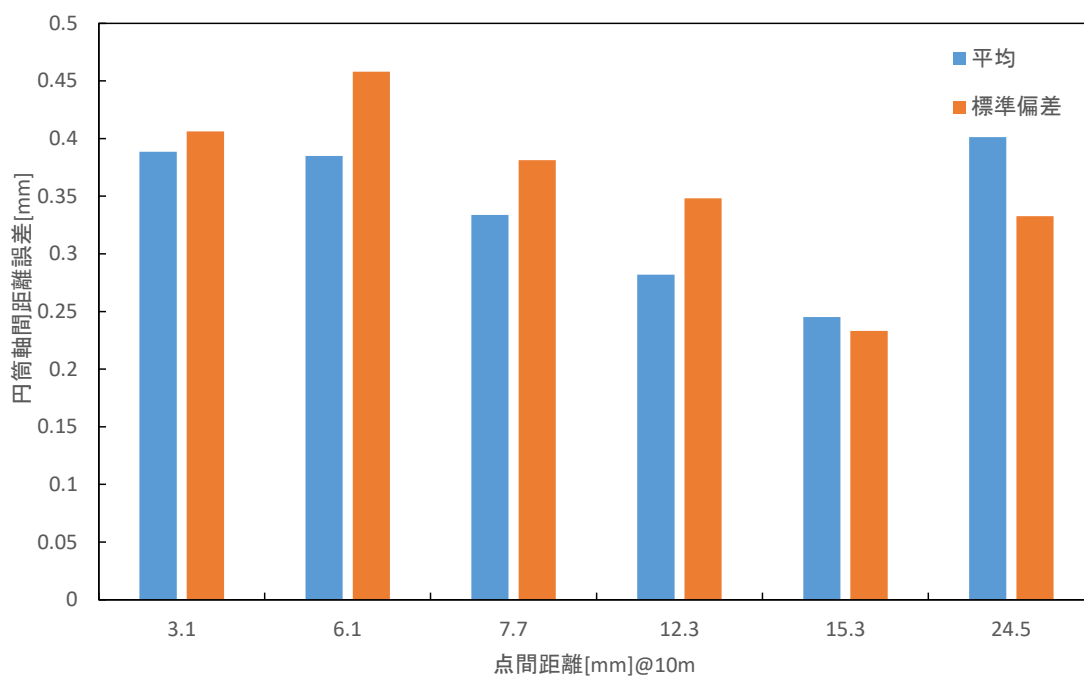


図2.34 異なる点密度を用いた場合の円筒軸間距離誤差[mm]

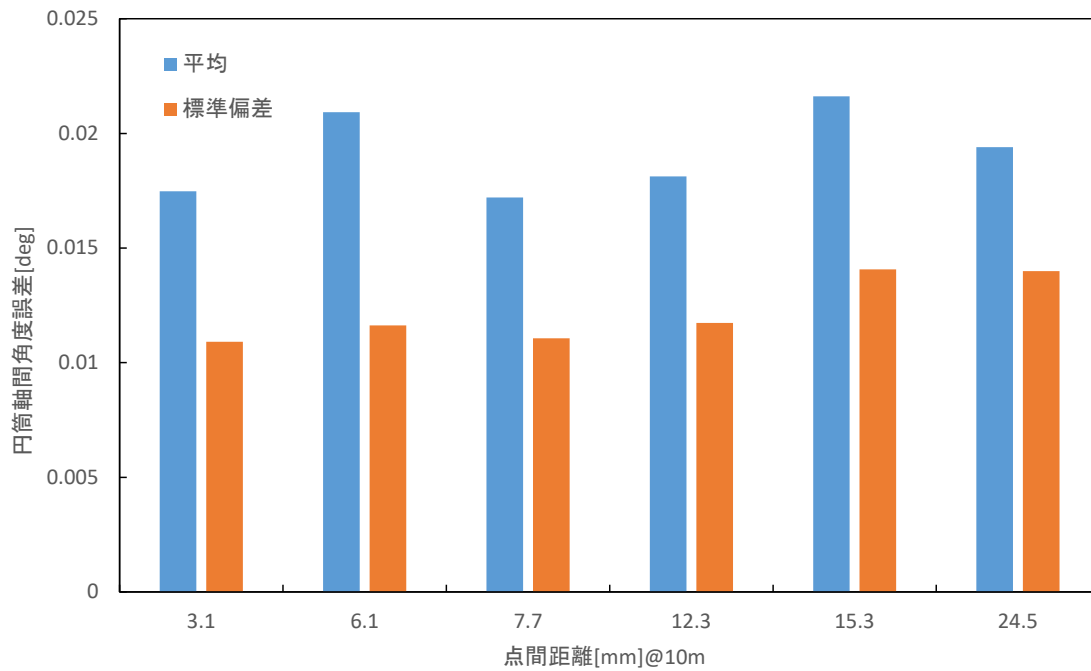


図2.35 異なる点密度を用いた場合の円筒軸間角度誤差[deg]

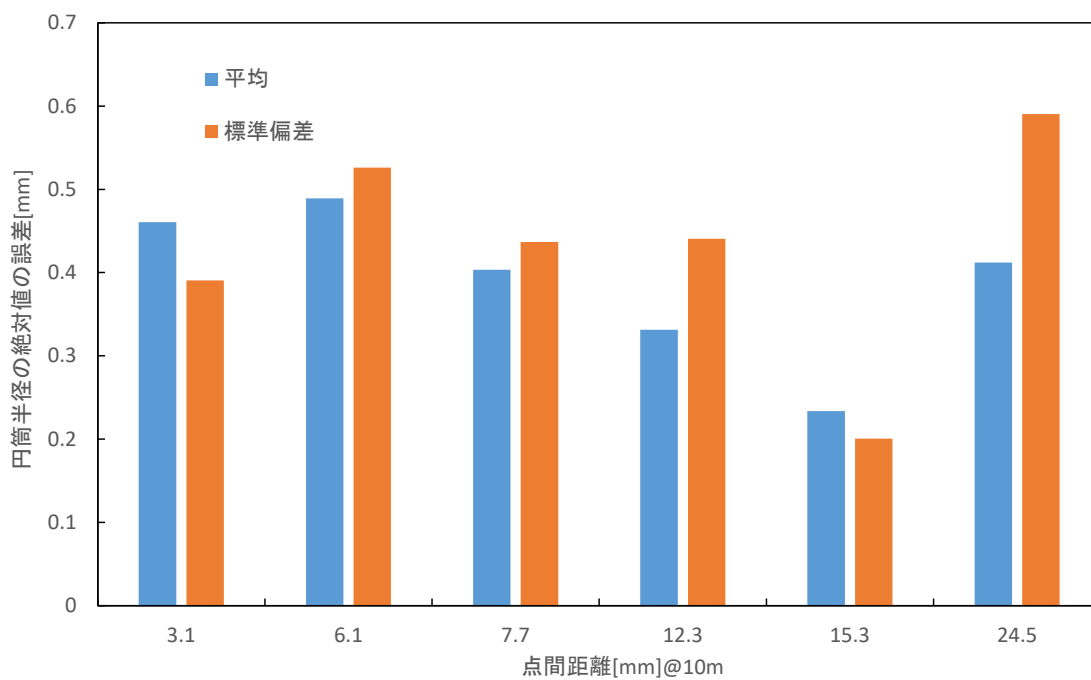


図2.36 異なる点密度を用いた場合の円筒半径値の絶対値の誤差[mm]

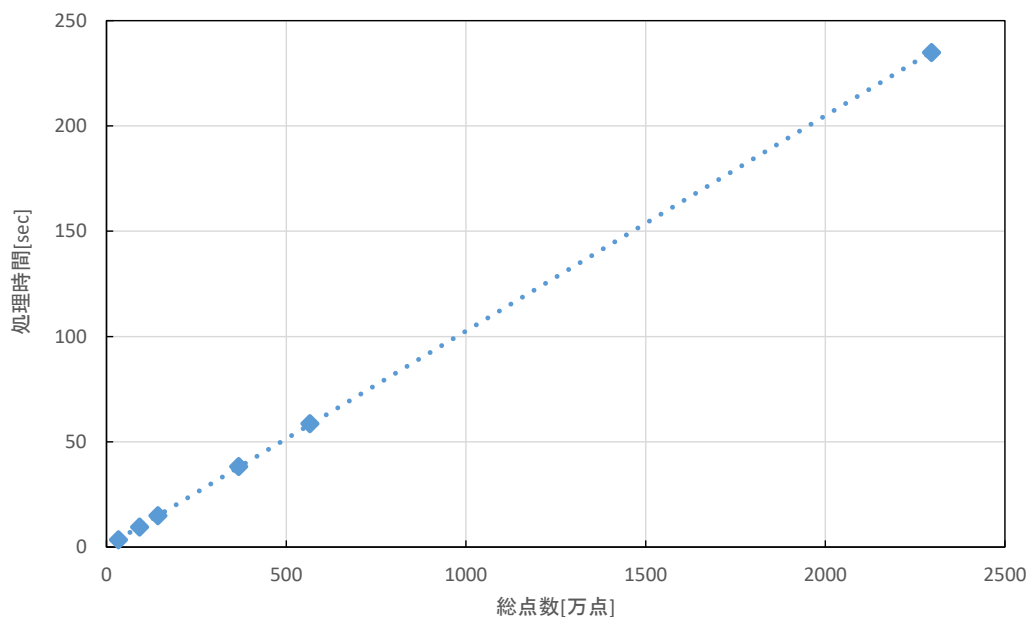


図2.37 点数と処理時間の関係

2.9.3.5 擬似計測点群の誤差の標準偏差変化の違いの効果

擬似計測点群生成ソフトウェアを用いて、誤差の偶然誤差の標準偏差を変化させ、提案精密レジストレーションおよび円筒モデリング手法のロバスト性の検証を行った。

用いた円筒本数は前目同様 10 本、半径方向の誤差評価式を用いた。図 2.38 に示すように、各計測点における擬似計測点群の誤差の標準偏差を 1.5 倍にし、1.0 倍の場合との円筒間の軸間距離誤差、軸間角度誤差、半径値誤差を比較した。精度検証結果を図 2.39、図 2.40 および図 2.41 に示す。

結果より、すべての円筒において、許容要求精度を満足した。円筒 ID1 の軸間距離誤差のみ精度低下が見られた。これは、径が異なる同軸の円筒配管の存在が要因だと考えられる。

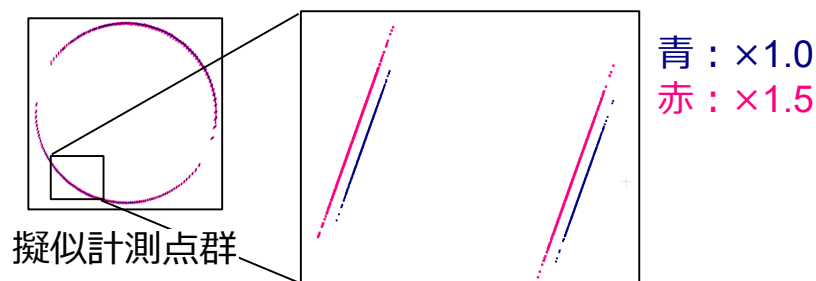


図2.38 誤差の標準偏差が異なる擬似計測点群

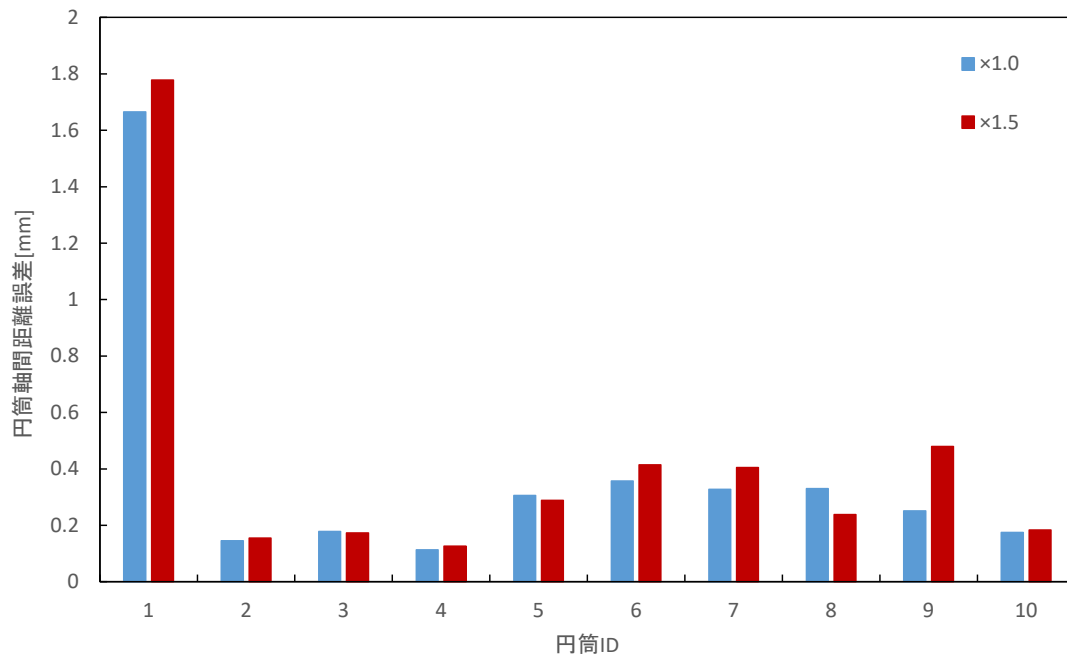


図2.39 異なる誤差標準偏差を用いた場合の円筒軸間距離誤差[mm]

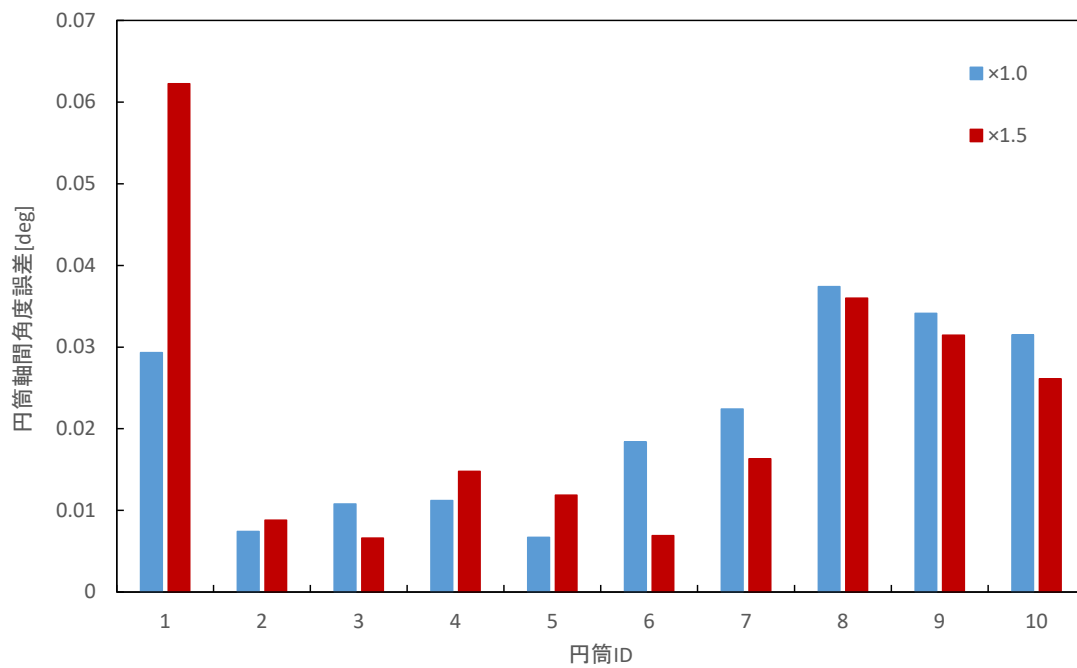


図2.40 異なる誤差標準偏差を用いた場合の円筒軸間角度誤差[deg]

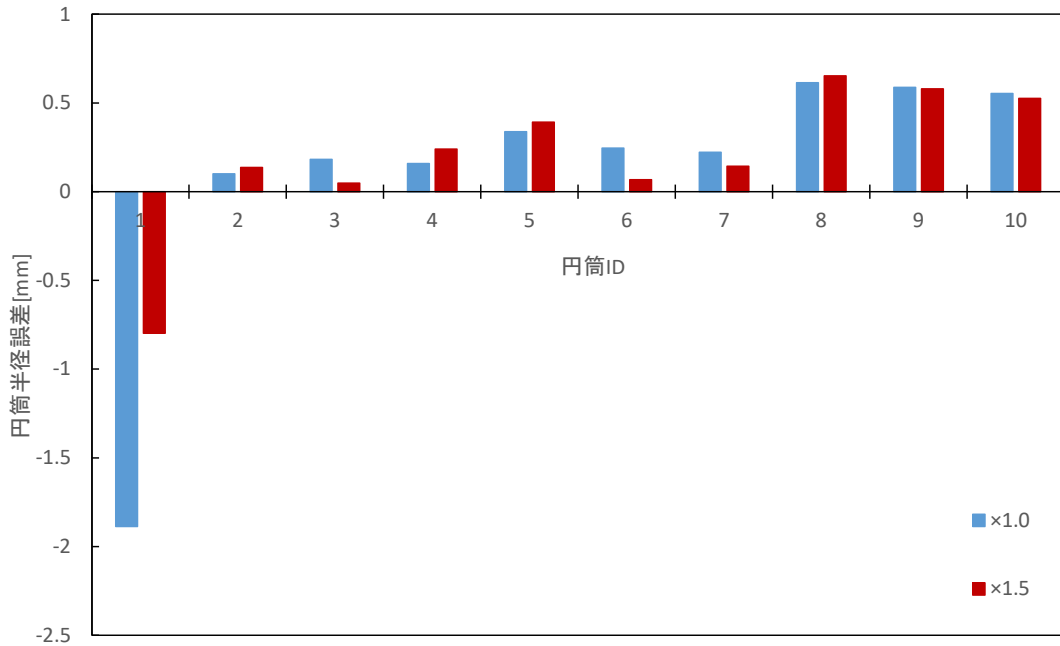


図2.41 異なる誤差標準偏差を用いた場合の円筒半径値の誤差[mm]

2.9.3.6 繰り返し重み付き最小二乗法における重み関数の変数の違いの効果

2.7.2 項で述べた重み関数の変数に関して、式(2.20)で表現される Fair 型重み関数を用いて、計測点 i の距離 $d_i(e_i = d_i)$ 、レーザ入射角 $\alpha_i(e_i = \alpha_i)$ 、フィッティング円筒面からの誤差 $D_{jk}(i)(e_i = D_{jk}(i))$ を評価した IRLSM による精密レジストレーションおよび円筒モデリングの精度検証を行った。調整パラメータは、 $e_i = d_i$ の場合は $c = 16[\text{m}]$ 、 $e_i = \alpha_i$ の場合は $c = 60[\text{deg}]$ 、 $e_i = D_{jk}(i)$ の場合は $c = 1[\text{mm}]$ とした。

2.9.3.1 目で述べた円筒ラフ抽出結果およびラフレジストレーション結果から、図 2.32 に示す円筒 10 本を用いて、半径方向の誤差評価式を使用し、各重み関数の変数を変化させ、精密レジストレーションおよび円筒モデリングを行った。また、参考値として、重みなし最小二乗法との精度比較も同時に行った。

円筒間の軸間距離誤差、軸間角度誤差、半径値誤差を比較した精度検証結果を図 2.42、図 2.43 および図 2.44 に、各誤差の平均値と最大値を表 2.6 に示す。これらの結果より、フィッティング円筒面からの誤差 $e_i = D_{jk}(i)$ を評価した重み関数を用いた場合が、最も高精度に円筒パラメータを算出できることを確認した。一方で、距離や入射角に応じた重みを導入しても精度向上が見られなかった。これは、主に理想円筒面上にない外れ値をもつ計測点が、精度低下を引き起こしているためだと考えられる。

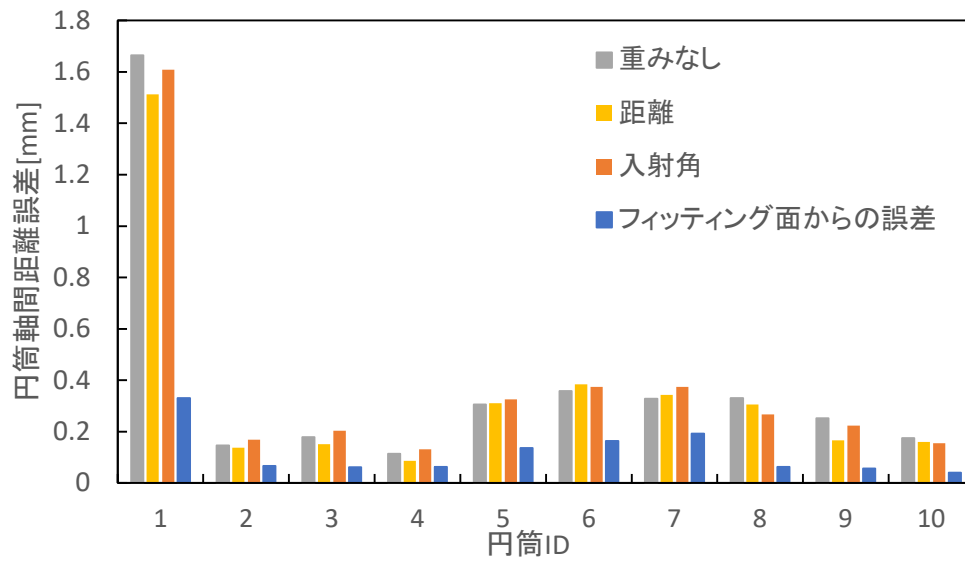


図2.42 異なる重み関数の変数を用いた場合の円筒軸間距離誤差[mm]

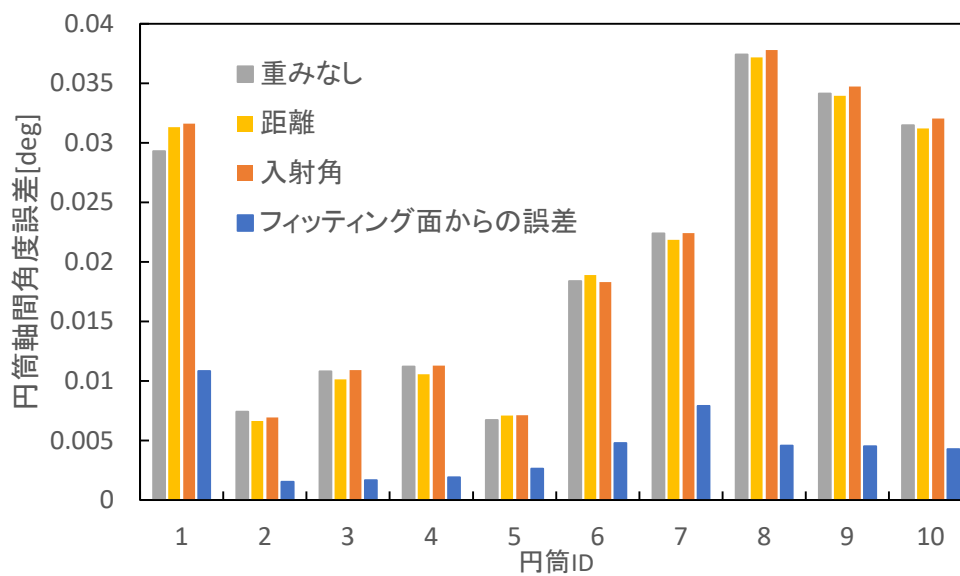


図2.43 異なる重み関数の変数を用いた場合の円筒軸間角度誤差[deg]

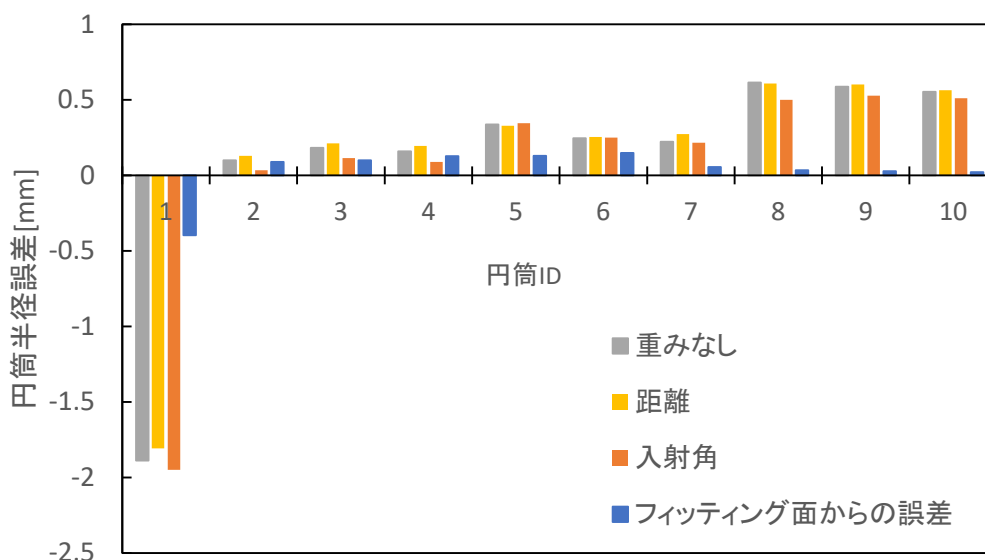


図2.44 異なる重み関数の変数を用いた場合の円筒半径値の誤差[mm]

表2.6 異なる重み関数の変数を用いた場合の円筒モデリング誤差の平均値と最大値

	距離誤差 [mm]		角度誤差 [deg]		半径値誤差の 絶対値[mm]	
	平均値	最大値	平均値	最大値	平均値	最大値
重みなし	0.38	1.67	0.021	0.037	0.49	1.89
Fair 型 距離	0.36	1.51	0.021	0.037	0.50	1.81
Fair 型 入射角	0.38	1.61	0.021	0.038	0.45	1.95
Fair 型 Fit 面残差	0.12	0.33	0.004	0.011	0.11	0.40

2.9.3.7 繰り返し重み付き最小二乗法における重み関数の違いの効果

次に、2.8.2 項で述べた式(2.20)～式(2.23)で表現される異なる重み関数を用いて精密レジストレーションおよび円筒モデリングの精度検証を行った。調整パラメータは、式(2.20)の Fair 型および式(2.21)の Cauchy 型重み関数を用いた場合は、 $c = 1[\text{mm}]$ 、式(2.22)の Huber 型および式(2.23)の Tukey 型を用いた場合は、式(2.26)で表現される $c = \alpha \text{MADN}$ を用いて $\alpha = 1, 3, 6$ と変化させた。

前目同様、2.9.3.1 目で述べた円筒ラフ抽出結果およびラフレジストレーション結果から、図 2.32 に示す円筒 10 本を選択し、半径方向の誤差評価式を用いた IRLSM による精密レジストレーションおよび円筒モデリングを行った。また、参考値として、重みなし最小二乗法との比較も同時に行った。

円筒間の軸間距離誤差、軸間角度誤差、半径値誤差を比較した精度検証結果を図 2.45、

図 2.46 およびに図 2.47, 各誤差の平均値と最大値を表 2.7 に示す. これらの結果より, 調整パラメータを $c = 6 \times \text{MADN}$ と設定した Tukey 型重み関数を用いた場合の誤差は LSM の誤差の1/10程度となり, 最良な精度を得ることを確認した.

一方, Huber 型では, 調整パラメータが大きい場合に, 外れ値の重みを下げることが出来ずに, 精度が悪化することを確認した. また, Tukey 型重み関数で, $c = 1 \times \text{MADN}$ ならびに $c = 3 \times \text{MADN}$ を用いた場合は, 品質の良い点群に対しても重みの差をつけてしまうため, $c = 6 \times \text{MADN}$ と比べ, 若干の精度低下を招いた. 処理時間は LSM で約 54 sec, Tukey 型で約 142 sec であった.

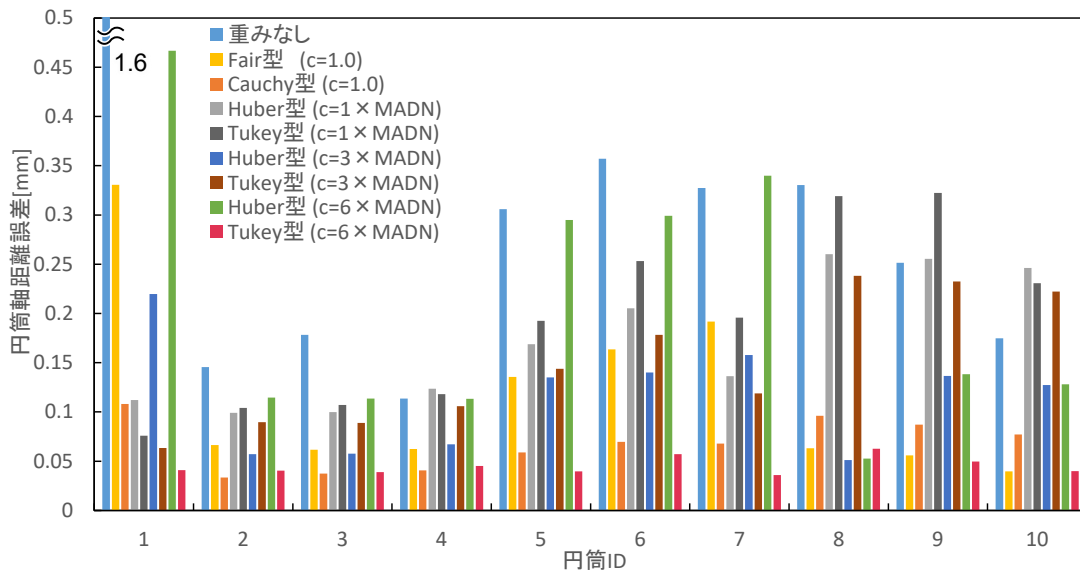


図2.45 異なる重み関数を用いた場合の円筒軸間距離誤差[mm]

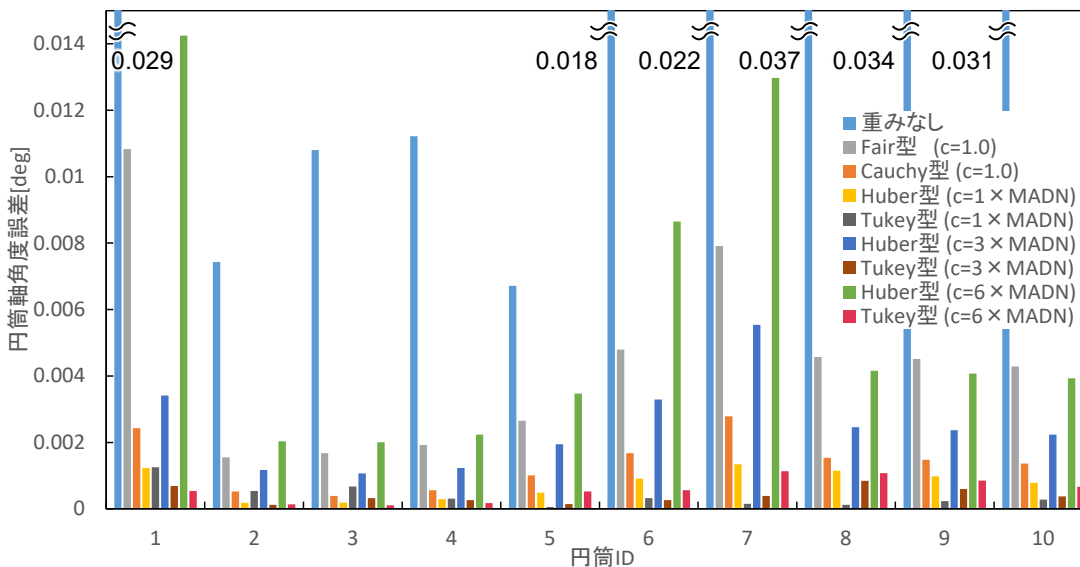


図2.46 異なる重み関数を用いた場合の円筒軸間角度誤差[deg]

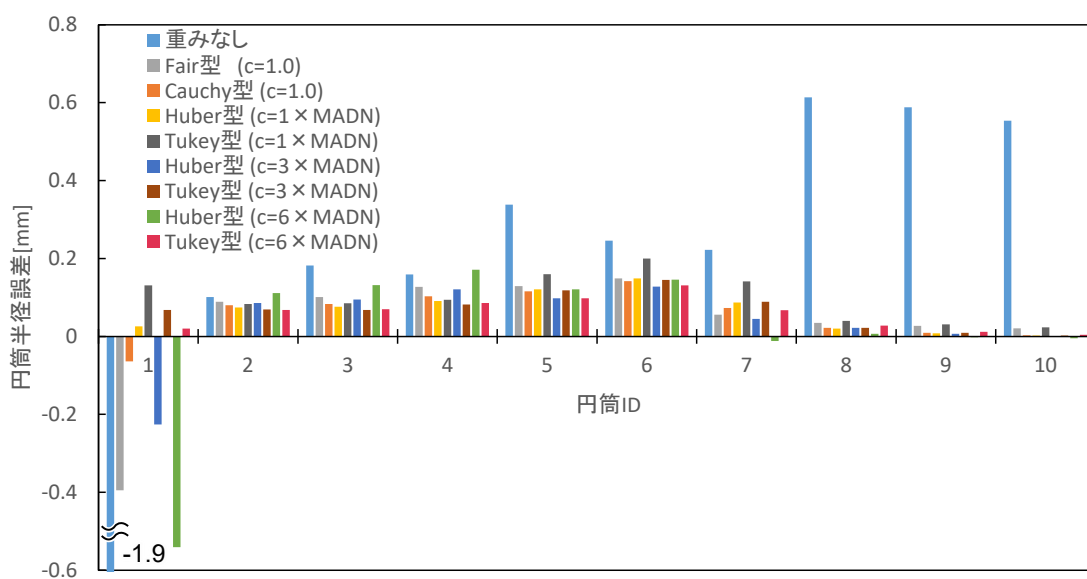


図2.47 異なる重み関数を用いた場合の円筒半径値の誤差[mm]

表2.7 異なる重み関数を用いた場合の円筒モデリング誤差の平均値と最大値

	距離誤差 [mm]		角度誤差 [deg]		半径値誤差の 絶対値[mm]	
	平均値	最大値	平均値	最大値	平均値	最大値
重みなし	0.38	1.67	0.021	0.037	0.49	1.89
Fair 型 $c = 1$	0.12	0.33	0.004	0.011	0.11	0.40
Cauchy 型 $c = 1$	0.07	0.11	0.001	0.003	0.07	0.14
Huber 型 $c = 1\text{MADN}$	0.17	0.26	0.000	0.001	0.07	0.15
Tukey 型 $c = 1\text{MADN}$	0.19	0.32	0.000	0.001	0.10	0.20
Huber 型 $c = 3\text{MADN}$	0.11	0.22	0.002	0.006	0.08	0.22
Tukey 型 $c = 3\text{MADN}$	0.15	0.24	0.000	0.001	0.07	0.15
Huber 型 $c = 6\text{MADN}$	0.21	0.47	0.006	0.014	0.12	0.54
Tukey 型 $c = 6\text{MADN}$	0.04	0.06	0.001	0.001	0.06	0.13

2.9.3.8 従来の as-is モデリング手法との精度比較

従来の as-is モデリング手法と提案レジストレーションおよび円筒モデリング手法との精度比較を行った。前目同様、10 本の円筒を選択し、レジストレーションおよび円筒モデリングを行った。

従来 as-is モデリング手法では、点群処理フリーソフトウェア[23]と点群処理商用ソフトウェア[32]を用いて、ICP ベースの点群のレジストレーションを行い、位置合わせされた点群に対して、Levenberg-Marquardt 法[11]を用いた精密円筒フィッティングを行い、円筒パラメータを算出した。この算出したパラメータと、Tukey 型重み関数、調整パラメータが $c = 6MADN$ を用いた IRLSM の提案手法で求めた円筒パラメータとを比較した。

円筒間の軸間距離誤差、軸間角度誤差、半径値誤差を比較した精度検証結果を図 2.48、図 2.49 および図 2.50、各誤差の平均値と最大値を表 2.8 に示す。

結果より、従来の as-is モデリング手法と比較し、大幅な精度向上を確認した。

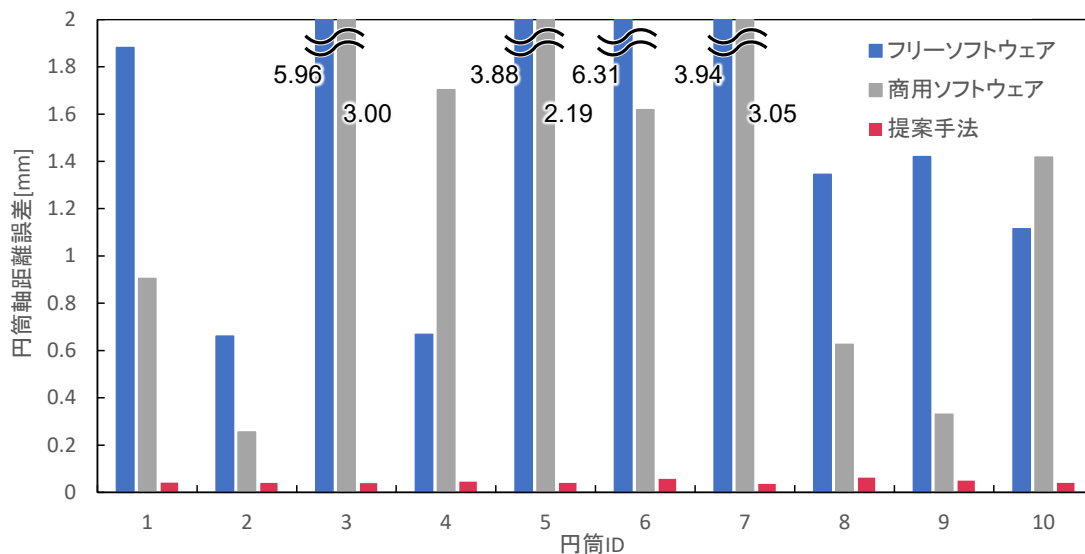


図2.48 従来手法との比較における円筒軸間距離誤差[mm]

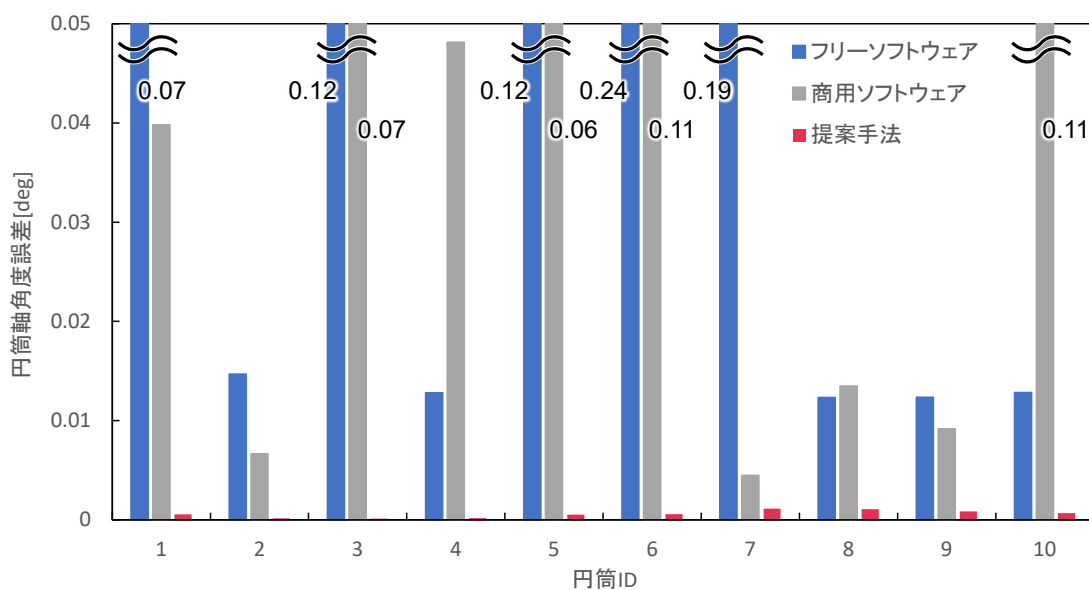


図2.49 従来手法との比較における円筒軸間角度誤差[deg]

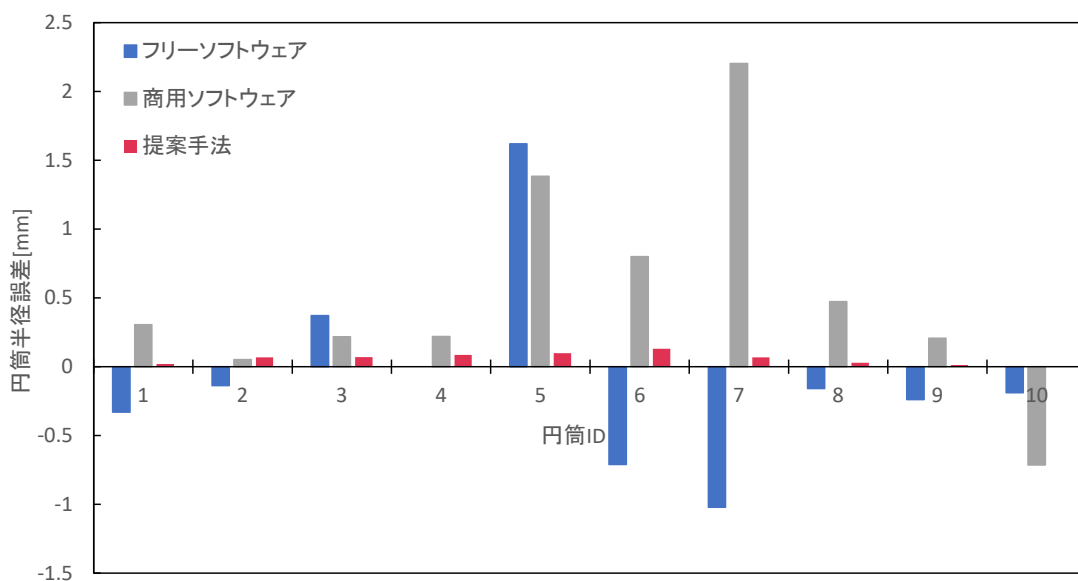


図2.50 従来手法との比較における円筒半径値の誤差[mm]

表2.8 従来手法との比較における円筒モデリング誤差の平均値と最大値

	距離誤差 [mm]		角度誤差 [deg]		半径値誤差の 絶対値[mm]	
	平均値	最大値	平均値	最大値	平均値	最大値
フリーソフト[23]	2.72	6.31	0.081	0.239	0.48	1.62
商用ソフト[32]	1.51	3.05	0.047	0.110	0.66	2.20
Tukey 型 $c = 6\text{MADN}$	0.04	0.06	0.001	0.001	0.06	0.13

2.9.4 中規模プラントの擬似計測点群を用いたレジストレーションおよびモデリング結果

より複雑な化学プラント配管システムに対して、提案レジストレーションおよび円筒モデリング手法の精度検証を行った。また、入射角フィルタリングの有用性についても検証を行った。図 2.51 に示すような、実際の化学プラントの配管 CAD モデル ($19m \times 9m \times 12m$) から、4 スキャン分の擬似計測点群を生成した。図 2.52 に示す擬似計測点群の総点数は 848 万点で、約 50 本ほどの直進パイプを含む。用いた誤差評価式は、半径方向の誤差評価式で、重みなしの最小二乗法を用いた。

精密レジストレーション結果を図 2.53 に示す。また、円筒間の軸間距離誤差、軸間角度誤差、半径値誤差の平均と標準偏差を比較した精度検証結果を図 2.54、図 2.55 および図 2.56 に、各誤差の平均値を表 2.9 に示す。

実化学プラント配管の規模においても、提案手法の有用性を確認した。また、提案手法の平均誤差は、モデリングの要求精度を満足することを確認した。一方で、入射角フィルタリングによる効果は、前項ほど顕著に表れなかった。

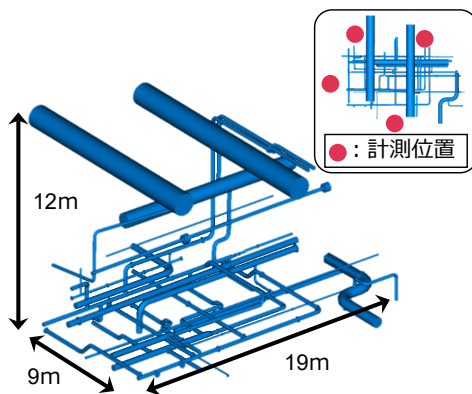


図2.51 円筒配管 CAD モデル

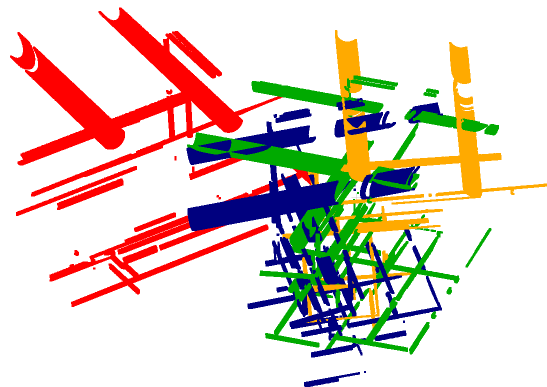


図2.52 生成した擬似計測点群 (4 スキャン)

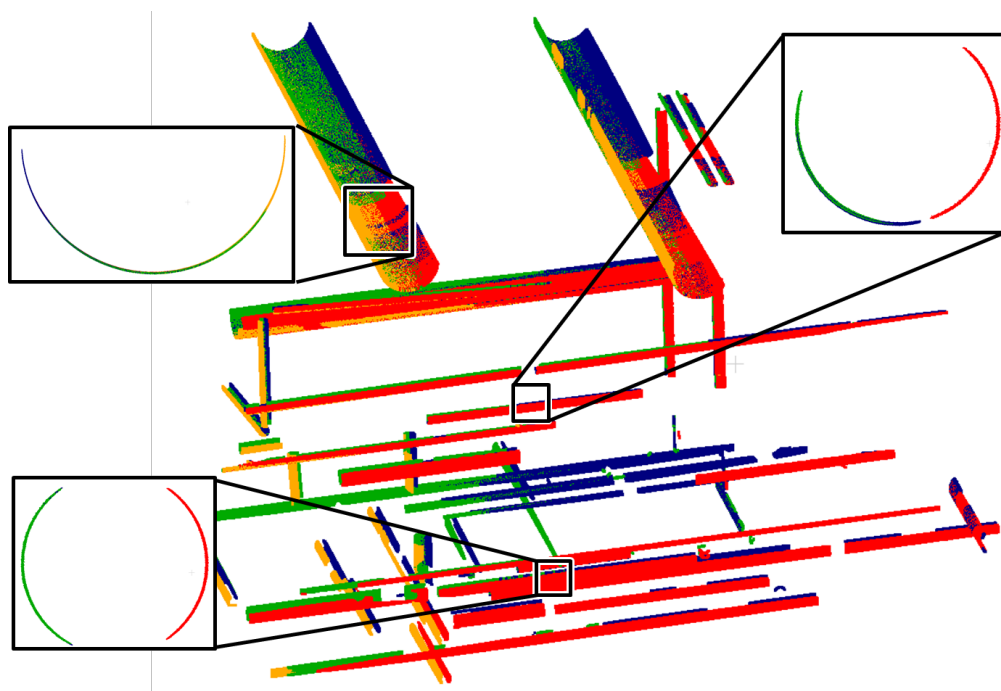


図2.53 提案手法による精密レジストレーション結果

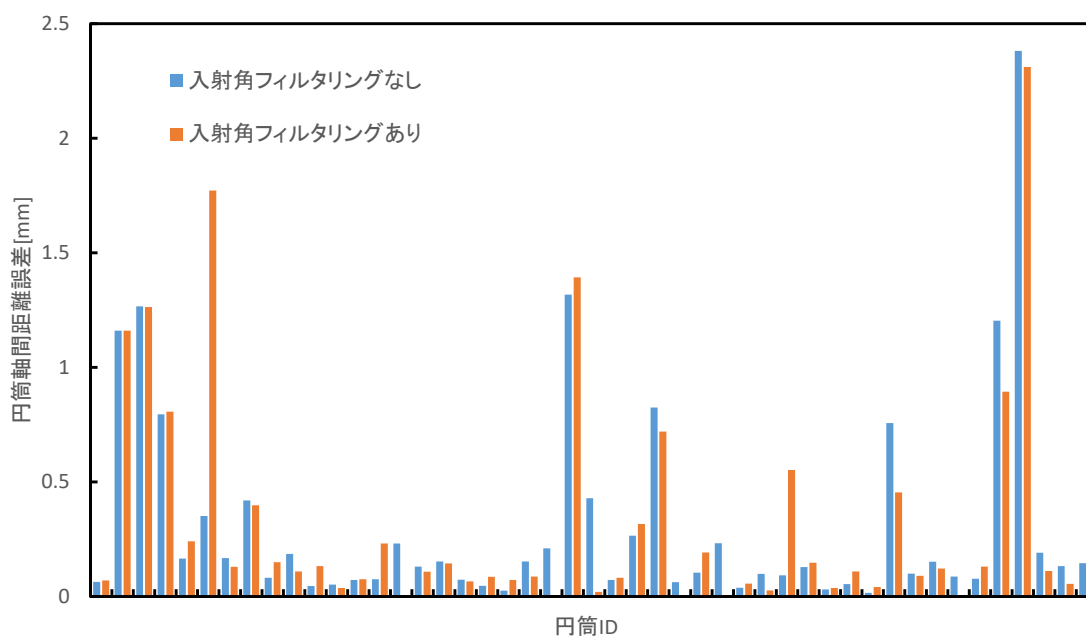


図2.54 中規模プラントCAD モデルを用いた場合の円筒軸間距離誤差[mm]

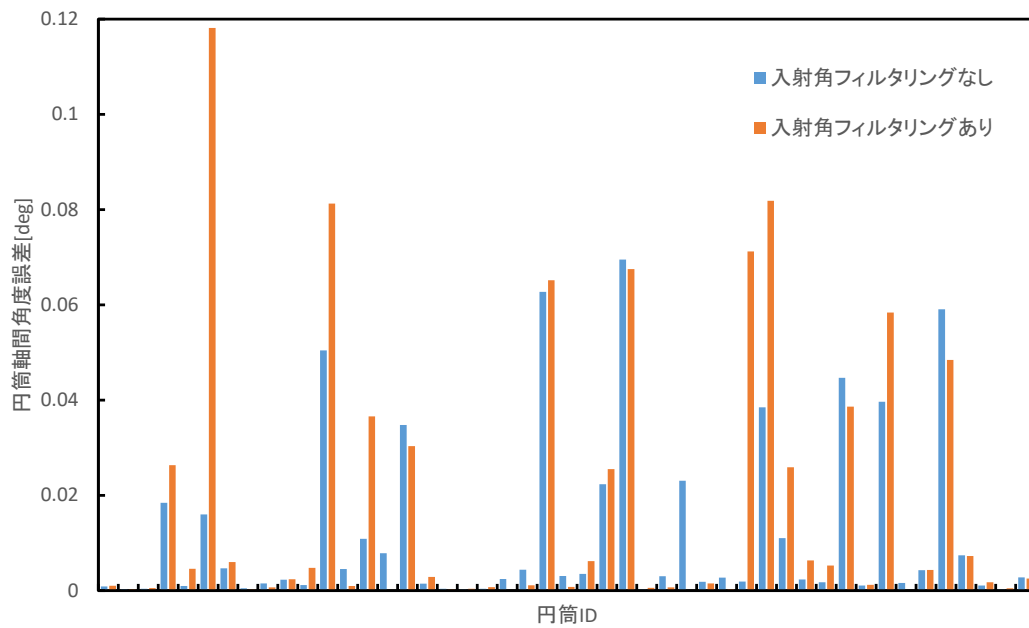


図2.55 中規模プラントCAD モデルを用いた場合の円筒軸間角度誤差[deg]

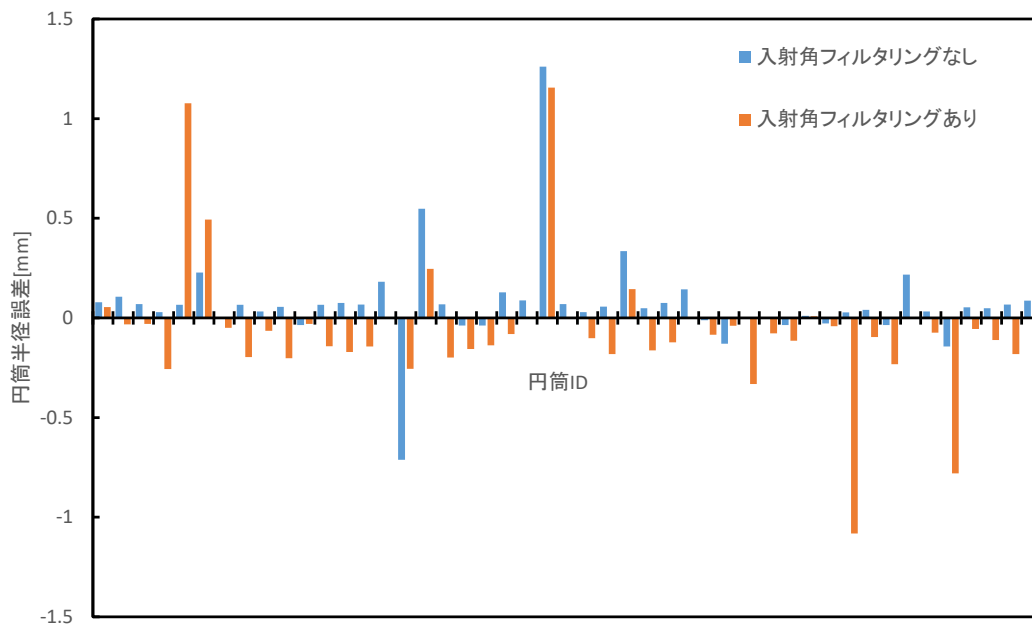


図2.56 中規模プラントCAD モデルを用いた場合の円筒半径値の誤差[mm]

表2.9 中規模プラントCAD モデルを用いた場合の円筒モデリング精度検証結果

平均値	軸間距離誤差 [mm]	軸間角度誤差 [deg]	半径値誤差 [mm]
提案手法：入射角 フィルタリングなし	0.32	0.0122	0.12
提案手法：入射角 フィルタリングあり	0.35	0.0196	0.22

2.9.5 重複のない擬似計測点群を用いたレジストレーションおよびモデリング結果

提案レジストレーションおよび円筒モデリング手法の優位性検証のために、擬似計測点群ソフトウェアで、恣意的に点群間の重複がない擬似計測点群を生成し、従来 as-is モデリング手法との比較を行った。

図 2.57 の円筒配管 CAD モデル(16m × 4m × 8m)から、図 2.58 に示すように、点群間の重複がない点群を生成する。本実験では、図 2.58 の手動ラフレジストレーション後の点群を入力とし、従来の as-is モデリング手法（フリーソフトおよび商用ソフトウェア）と提案手法との円筒モデリング精度比較を行った。また、入射角フィルタリングを行った場合における提案手法の有用性を検証するために、手動による入射角フィルタリングも行った。円筒 8 本を使用し、半径方向の誤差評価式を用いて、重みなし最小二乗法を用いた。

各手法による精密レジストレーション結果を図 2.59 に示す。また、提案手法における円筒モデリング精度検証結果を表 2.10 に示す。結果より、従来 as-is モデリング手法では、レジストレーションが行えない一方で、提案手法では、入射角フィルタリング後のような、さらに点群間の重複が全くない場合でも高精度にレジストレーションおよび円筒モデリングが行えることを確認した。

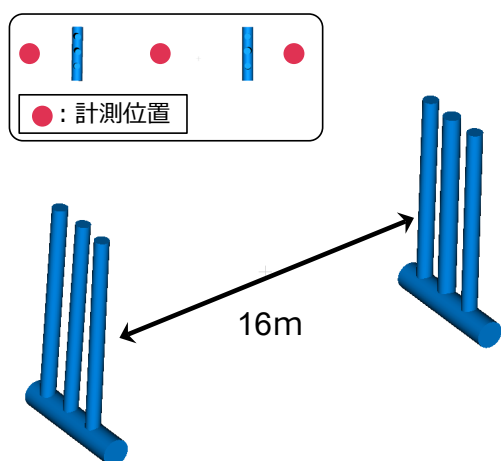


図2.57 円筒配管 CAD モデル

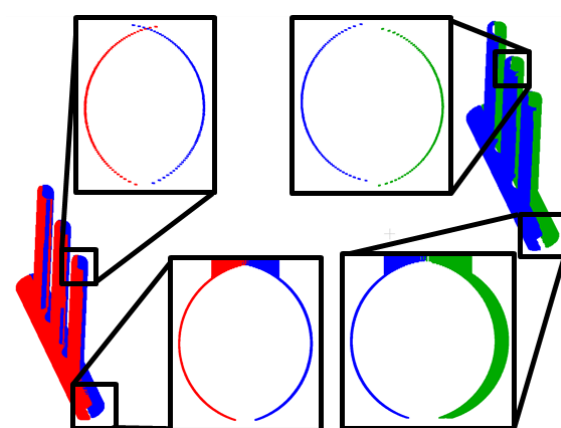
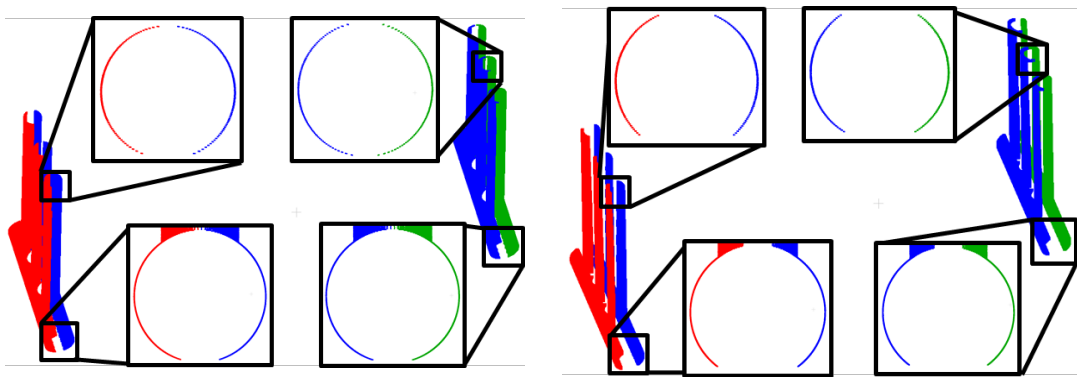
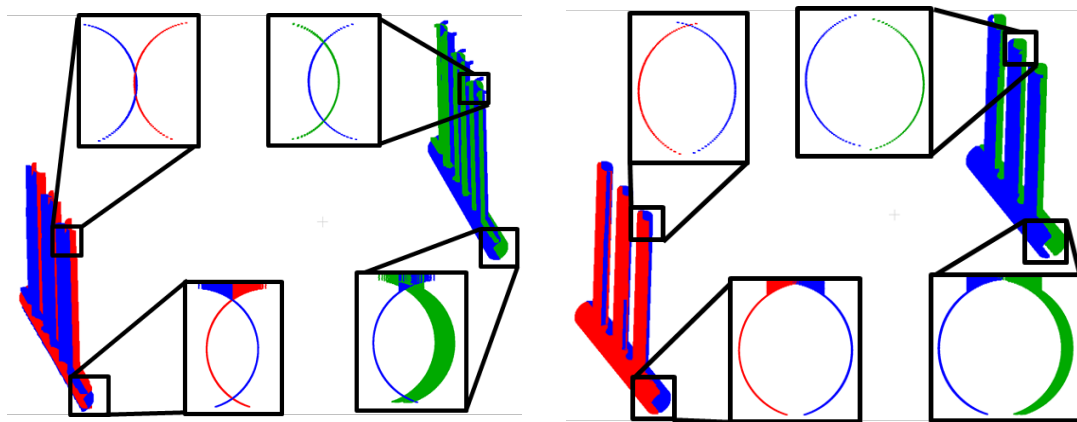


図2.58 手動ラフレジストレーション後の擬似計測点群



(a) 提案手法：入射角フィルタリングなし (b) 提案手法：入射角フィルタリングあり



(c) 点群処理フリーソフトウェア

(d) 点群処理商用ソフトウェア

図2.59 各手法による精密レジストレーション結果

表2.10 重複のない点群を用いた場合の円筒モデリング精度検証結果

平均値	軸間距離誤差 [mm]	軸間角度誤差 [deg]	半径値誤差 [mm]
提案手法：入射角 フィルタリングなし	0.007	0.003	0.14
提案手法：入射角 フィルタリングあり	0.010	0.004	0.22

2.9.6 考察

本節では、擬似計測点群を用いて、提案レジストレーションおよび円筒モデリング手法の有用性検証およびロバスト性検証について述べた。提案手法は、円筒モデリングの要求精度である $\pm 5\text{mm}$ 以内を充足することを確認した。また、レーザ照射方向の誤差評価式に比べ、半径方向の誤差評価式を用いた場合の方がより安定して最適解を求めることが出来ることを確認した。この要因は、変数の数が大きく関係していると

考えられる．これは半径値を定数化することで，算出されるパラメータの精度が大きく改善された点からも推察される．

また，提案手法は，点群の密度が小さい場合や誤差の標準偏差が大きくなった場合でも，高精度にモデリングを行うことが可能である．さらに，点群間の重複の有無に関わらず，従来手法と比較して，高精度な位置合わせならびにモデリングが可能であるため，提案手法は，高い精度とロバスト性を持った手法と言える．円筒配管が複雑に交差するプラント設備においては，狭隘部が多く存在し，点群間に重複があるように計測できない場合や，重複させるためにスキャン回数が増える場合がある．このような問題に対しても，本手法は優位に実行可能であると考えられる．

入射角フィルタリングの効果について，中規模プラント CAD モデルを用いた場合では顕著な優位性は見られなかった．しかしながら，実計測点群データは，系統誤差だけではなく，レーザのスポット割れや外れ値を多く含むため，有効に働くと推察される．また，フィッティング面からの誤差を評価し，外れ値を完全に排除できる Tukey 型重み関数の IRLSM を用いることで，計測誤差に対してロバストなモデリングが可能であることを確認した．さらに，本手法における調整パラメータの適切な設定手法についても提案し，その有用性を確認した．

2.10 実計測点群データを用いたレジストレーションおよびモデリング結果とその評価

2.10.1 概要

実環境における有用性を検証するために，冷暖房空調設備を計測した点群データならびに，水処理プラントを計測した点群データに対して，提案手法を適用した．各検証における，実験条件を表 2.11 に示す．

表2.11 2.10 節における実験対象環境と条件

実験対象環境	レーザ スキャナ	誤差 評価式	円筒 本数	円筒 分割	入射角 フィルタ リングの 有無	スキャン 数	総点数 [万点]	重みの 変数	重み関数 ならびに 調整 パラメータ c
冷暖房 空調設備 (2.10.2 項)	Leica HDS 7000	$D_{jk}^o(i)$	32	×	有	6	6,357	Fitting 誤差	Tukey 型 6MADN
水処理 プラント (2.10.3 項)	FARO Focus 3D		306	○	無	12	51,531		

2.10.2 冷暖房空調設備プラントを対象としたレジストレーションおよびモデリング結果

実環境における有用性を検証するために、冷暖房空調設備を計測した点群データに対して、提案手法を適用した。

図 2.60 に示すように、寸法 $29m \times 27m \times 10m$ の冷暖房空調設備を計測した総点数 6357 万点の 6 スキャン分の実計測点群データを用いた。用いたスキャナは、Leica HDS7000 である。計測した点群データの初期姿勢を図 2.60 に、計測環境内の点群データ例を図 2.61 に示す。

これらの点群に対して、円筒ラフ抽出を行い、ラフレジストレーションした結果を図 2.62 に示す。このデータに対して、半径方向の誤差評価式、Tukey 型重み関数ならびに調整パラメータ $c = 6MADN$ を用いて、精密レジストレーションおよび円筒モデリングを行った。結果を図 2.63 および図 2.64 に示す。また、求めたスキャナパラメータを用いて、計測生データを精密位置合わせした結果を図 2.65 に示す。処理時間は、円筒ラフ抽出に、1 スキャン当たり平均 30 sec、ラフレジストレーションに 2.8 sec、精密レジストレーションと円筒モデリングに 23 sec だった。

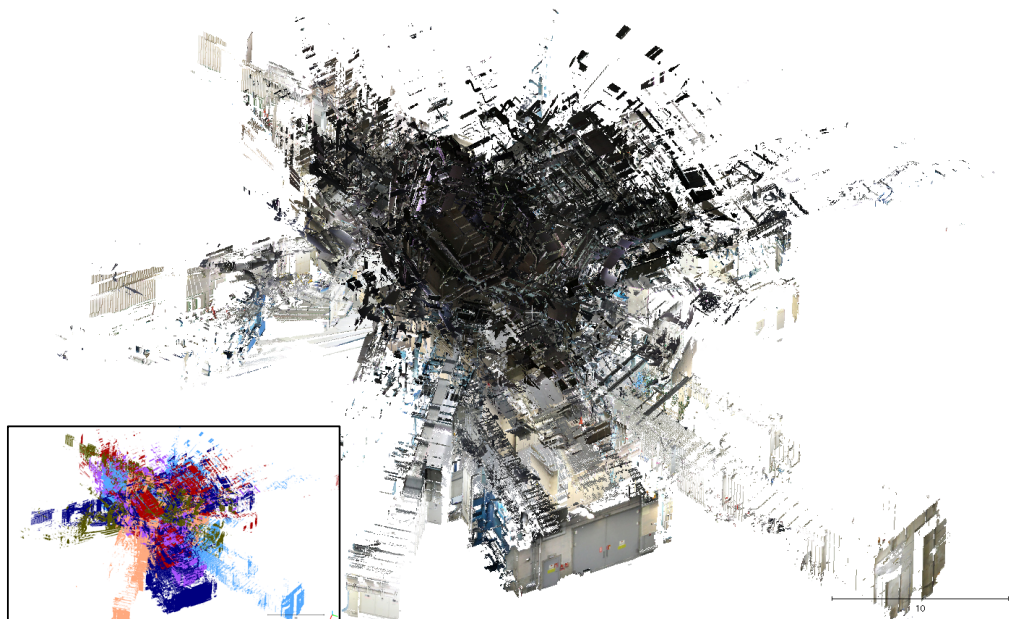


図2.60 冷暖房空調設備計測点群データ初期姿勢 (6 スキャン分)



図2.61 冷暖房空調設備計測点群データ例

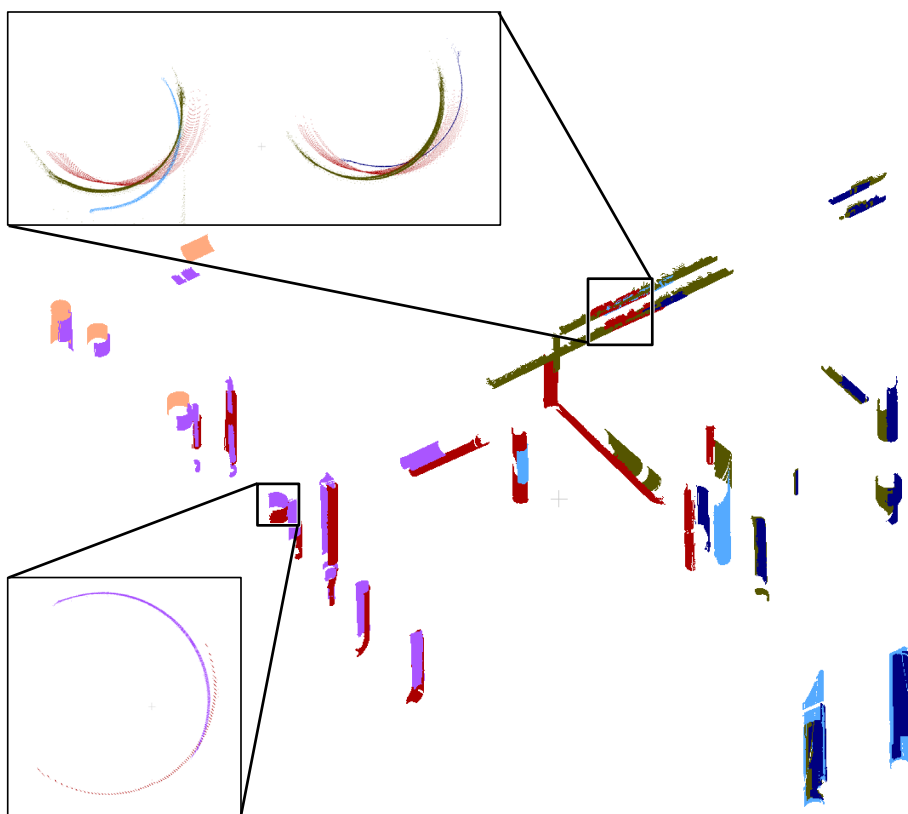


図2.62 冷暖房空調設備計測点群のラフレジストレーション結果

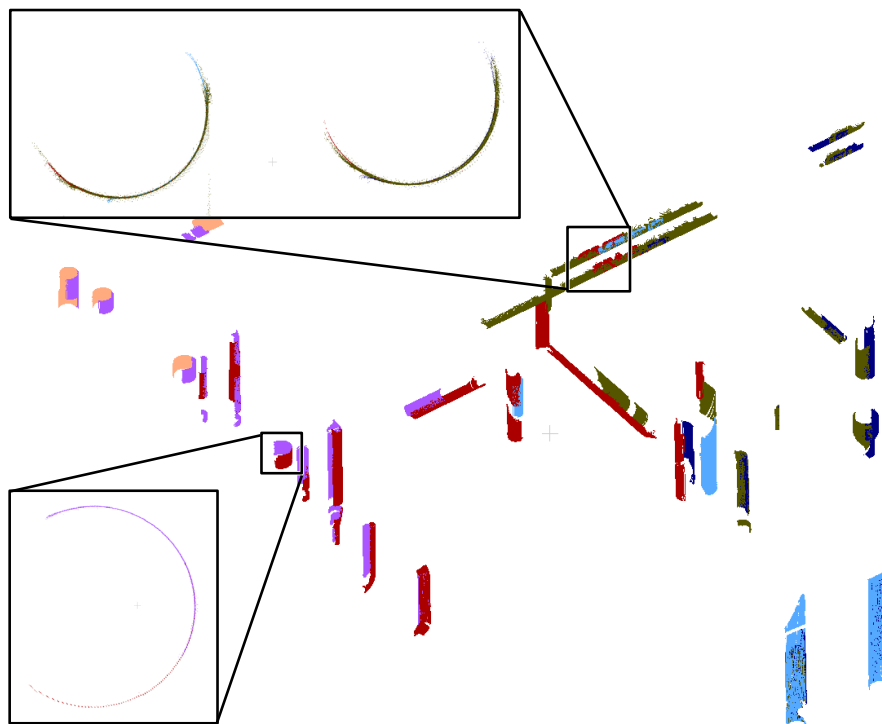


図2.63 冷暖房空調設備計測点群の精密レジストレーション結果

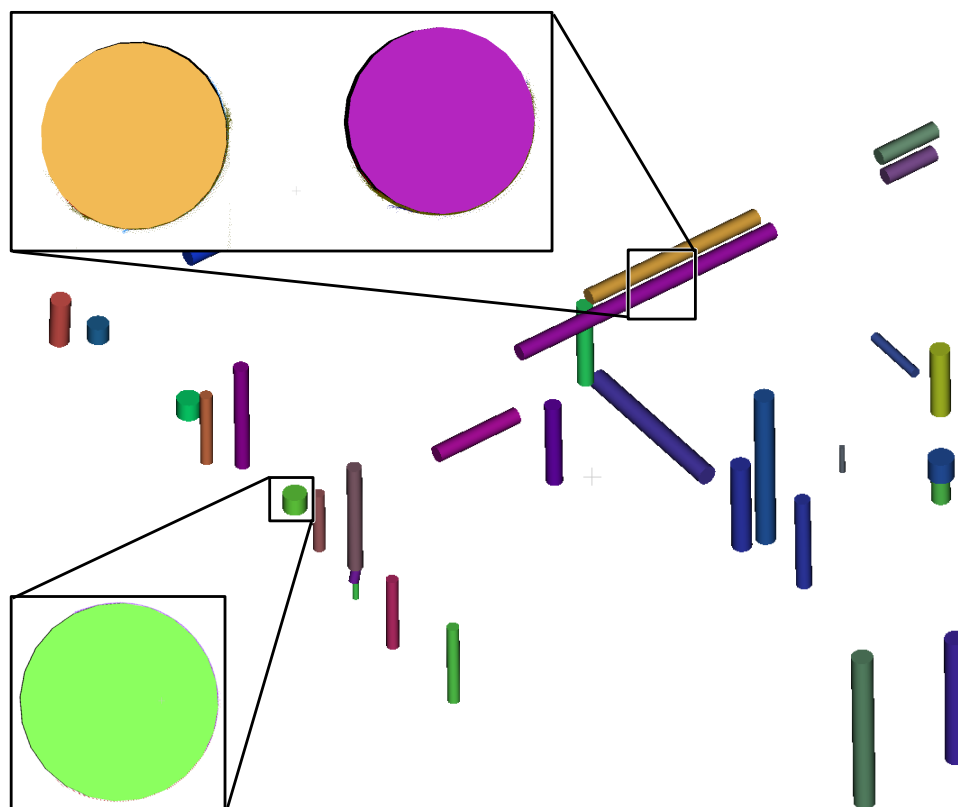


図2.64 冷暖房空調設備計測点群の円筒モデリング結果

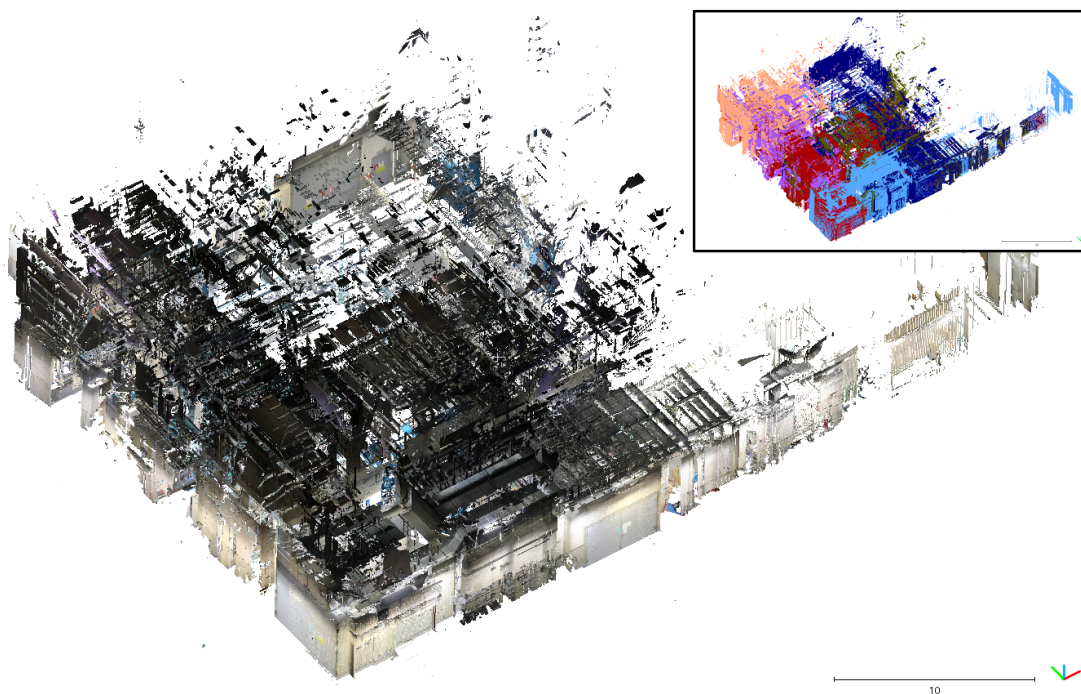


図2.65 冷暖房空調設備計測生データの精密レジストレーション結果

精度検証として、任意の点群対を選択し、比較的良好に計測が行えている平面上計測点群を抽出する．一方の平面点群に最小二乗フィッティングを行い、もう一方の平面点群から平面までの距離の平均を誤差として算出した．結果を表 2.12 に示す．円筒部を用いた精密レジストレーションを行った結果、平面間距離レジストレーション誤差が最大 2.3mm で、本手法は高精度に位置合わせが行えることを確認した．

表2.12 冷暖房空調設備における精密レジストレーション精度評価結果

平均値	平面ペア A	平面ペア B
点群対 I	1.1 mm	2.3 mm
点群対 II	0.7 mm	1.5 mm

2.10.3 水処理プラントを対象としたレジストレーションおよびモデリング結果

実環境における有用性を検証するために、水処理プラントを計測した点群データに対して、提案手法を適用した．図 2.66 に示すように、寸法 $21m \times 10m \times 5m$ の水処理プラントを計測した 12 スキャン分の総点数 5 億 1531 万点の実計測点群データを用いた．用いたスキャナは Faro Focus3D である．計測した点群データの初期姿勢を図 2.66 に、計測環境内の点群データ例を図 2.67 に示す．

これらの点群に対して、円筒ラフ抽出を行い、ラフレジストレーションを行った結果を図 2.68 に示す．このデータに対して、Tukey 型重み関数，調整パラメータ $c = 6MADN$ を用いて、円筒分割ならびに入射角フィルタリングを行った精密レジストレー

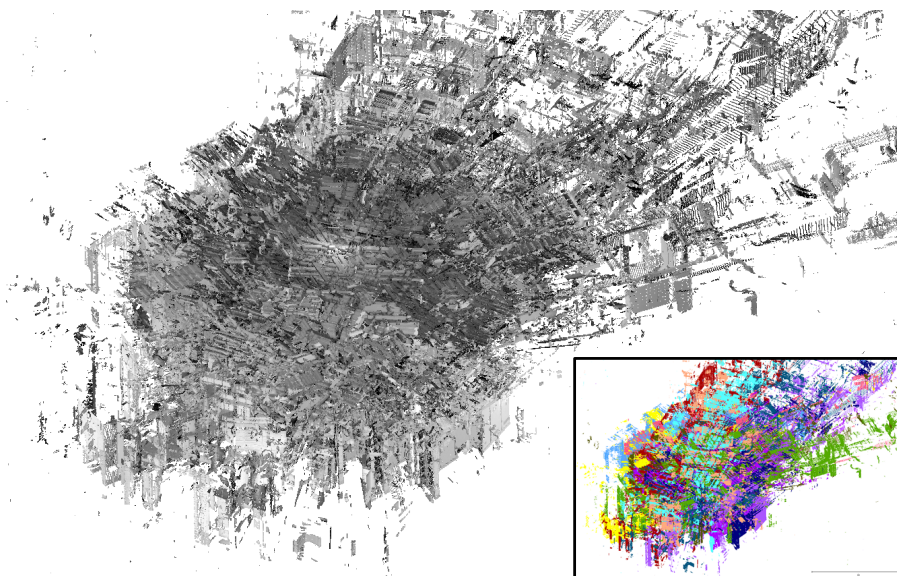


図2.66 水処理プラント計測点群データ初期姿勢 (12 スキャン分)

ションおよび円筒モデリングした結果を図 2.69 および図 2.70 に示す。また、求めたスキャナパラメータを用いて、計測データを精密位置合わせした結果を図 2.71 に示す。処理時間は、円筒ラフ抽出に、1 スキャン当たり平均 2.6 min、ラフレジストレーションに 31.9 min、精密レジストレーションと円筒モデリングに 9.9 min だった。

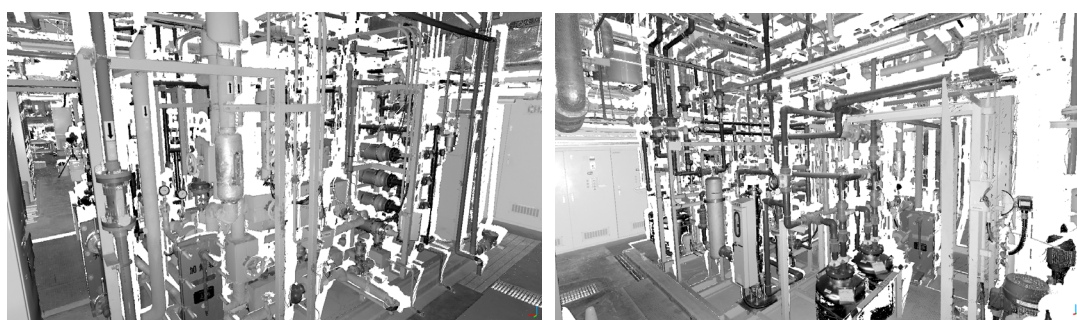


図2.67 水処理プラント計測点群データ例

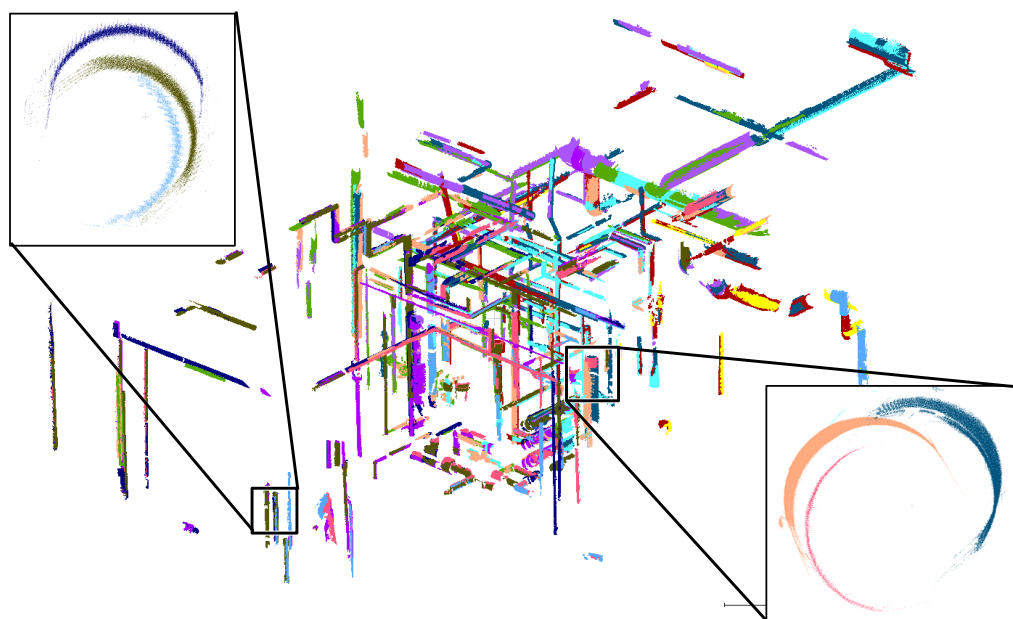


図2.68 水処理プラント計測点群のラフレジストレーション結果

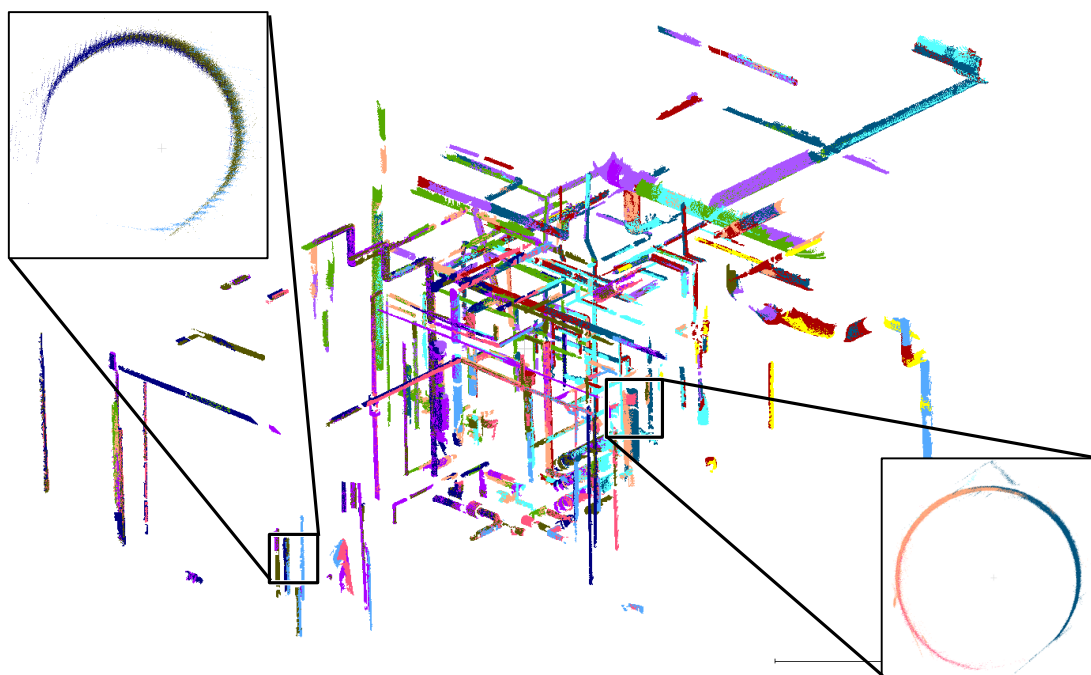


図2.69 水処理プラント計測点群の精密レジストレーション結果

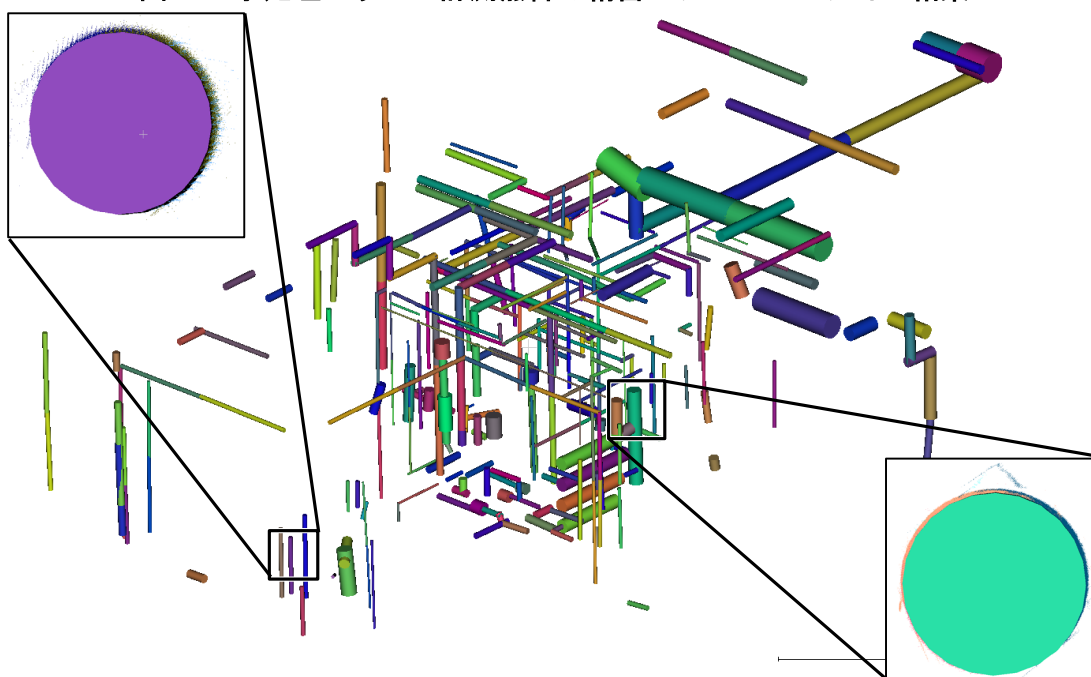


図2.70 水処理プラント計測点群の円筒モデリング結果

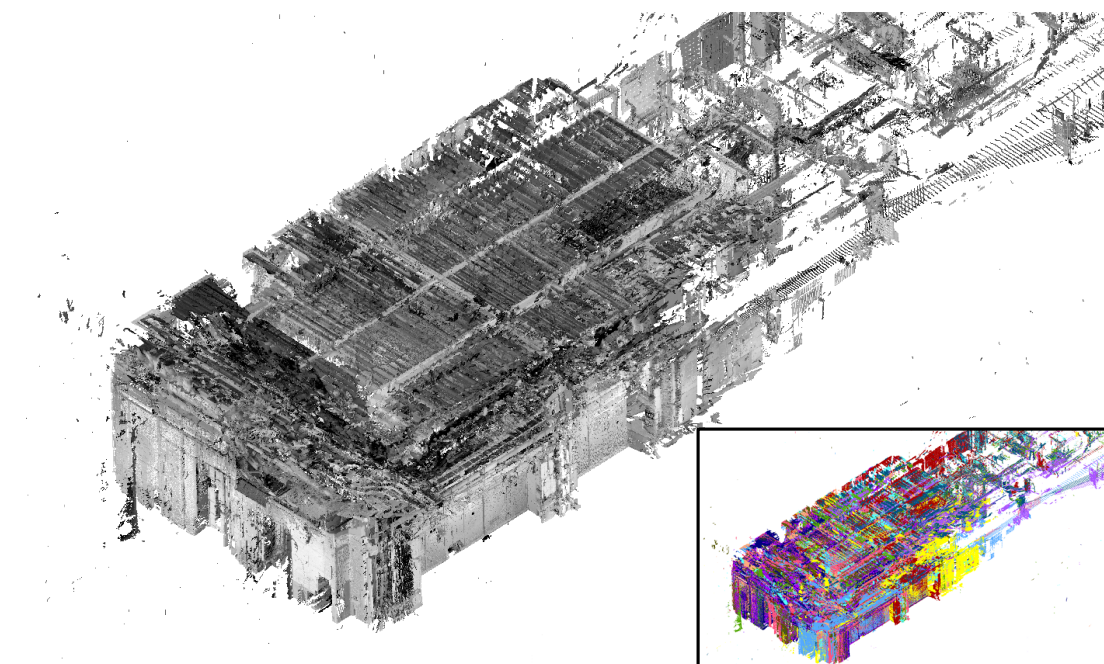


図2.71 水処理プラント計測生データの精密レジストレーション結果

精度検証として、任意の点群対を選択し、比較的良好に計測が行えている平面上計測点群を抽出する。一方の平面点群に最小二乗フィッティングを行い、もう一方の平面点群から平面までの距離の平均を誤差として算出した。結果を表 2.13 に示す。円筒部を用いた精密レジストレーションを行った結果、平面間距離レジストレーション誤差が最大 3.0mm で、本手法は高精度に位置合わせが行えることを確認した。

また、円筒モデリング結果の精度検証として、単一スキャン内で、任意の円筒を 2 本選択する。各円筒上の点群から 1 点を平行に結ぶように選択し、距離を計測し、真値とする。次に、提案手法で算出した円筒パラメータから、同様の円筒 2 本を選択し、外周間距離を算出し、真値と比較し誤差を算出した。選択した円筒対は 8 本で、比較結果を表 2.14 に示す。結果より、実環境下において、改修目的の円筒モデリング要求精度±5mm 以内を充足することを確認した。

表2.13 精密レジストレーション精度評価結果

平均値	平面ペア A	平面ペア B	平面ペア C
点群対 I	0.9 mm	1.1 mm	0.9 mm
点群対 II	0.7 mm	3.0 mm	0.9 mm
点群対 III	0.6 mm	0.9 mm	0.5 mm

表2.14 水処理プラント計測点群データにおける円筒モデリング精度の検証結果

	2 点間距離	提案手法により算出した 円筒外周間距離	誤差
円筒対 I	5.1217 m	5.1199 m	-1.9 mm
円筒対 II	3.8791 m	3.8769 m	-2.1 mm
円筒対 III	3.8113 m	3.8111 m	-0.2 mm
円筒対 IV	4.0616 m	4.0596 m	-2.0 mm
円筒対 V	2.6548 m	2.6544 m	-0.4 mm
円筒対 VI	4.1837 m	4.1797 m	-4.0 mm
円筒対 VII	6.1512 m	6.1492 m	-2.0 mm
円筒対 VIII	3.8041 m	3.8047 m	0.5 mm

2.10.4 考察

本節では、冷暖房空調設備ならびに水処理プラントを計測した実計測点群データに対して、提案レジストレーションおよび円筒モデリング手法を適用し、その有用性検証結果について述べた。本手法は円筒部を用いたレジストレーション手法であるのに対し、異なるスキャン間の平面上計測点群対の誤差が最大 3.0mm と、高精度なレジストレーションが可能であることを確認した。さらに、計測された点群データを指標とした円筒モデリング精度検証においても、モデル化許容誤差の±5mm を充足することを確認した。

しかしながら、図 2.72 に示すような円筒モデル化が正常に行えていない円筒も存在する問題が確認された。これは円筒配管の片側にしか点群が計測しておらず、レジストレーション後も計測点群が円筒の片側に偏っているため、円筒が誤フィッティングされていることや、円筒ラフ抽出した際の円筒パラメータの精度が悪く、これを初期値として最適化したため、局所解に陥ったことが要因として推察される。今後このモデリング誤差が、算出される他のパラメータに与える影響を考察し、手法の改良を行う必要がある。

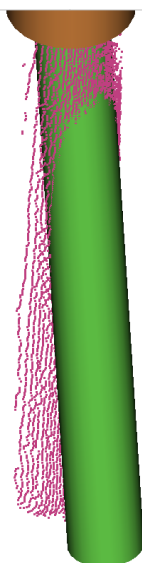


図2.72 確認された問題点

2.11 まとめ

本手法では、円筒オブジェクト一致制約に基づく、プラント配管系統レーザ計測点群データの精密レジストレーションとモデリングの同時処理のために、以下の 3 つの手法を開発した。

- 1) 計測点群データ内から Efficient RANSAC を用いて、レジストレーションに活用する円筒のみを選択的に自動抽出する手法を開発し、モデリングを行う円筒の大まかな円筒パラメータを実計測点群から短時間で抽出した。
- 2) 抽出した円筒と 3 次元ハッシュ表を用いた効率的な自動ラフレジストレーション手法を開発し、レジストレーションとモデリングの同時処理に必要なスキャナの外部パラメータをおおよその値を推定した。
- 3) 円筒配管を用いた精密レジストレーションおよび円筒モデリングの同時処理手法を開発し、本手法に適切な重み関数およびその調整パラメータの設定方法も示した。また、本手法は、従来手法と比較して、十数メートル規模の環境でサブミリオーダーの大幅な精度向上とロバスト性を持ち、実計測点群に対しても、プラント改修工事に必要となる配管端部誤差 $\pm 5\text{mm}$ 以内のレジストレーションとモデリングが可能であることを実証した。

今後の課題として、以下の3つの課題が存在する。

1) 円筒分割パラメータの決定手法の開発

本手法では、円筒分割を行う円筒の選択方法を、円筒長さという一つの指標で行っている。さらに、円筒分割数に関しても、任意の固定値でしか分割できない。そのため、抽出された円筒集合の中から、たわんでいる円筒のみを自動で選択し、各円筒に対して、適切な円筒数をそれぞれ自動で決定する手法の開発が必要となる。

2) 円筒上点群のサンプリング手法の開発

本手法では、抽出された円筒上の点群を用いて、最小二乗法によって、精密レジストレーションおよび円筒モデリングの同時処理を行っている。しかしながら、円筒上の計測点数は、円筒ごとで大きく異なるため、最小二乗法を用いた場合では、円筒上の計測点数が多い円筒に、算出される最適解が依存すると考えられる。そのため、全ての円筒ごとに、モデリングする円筒上の点数が一樣となるように、サンプリングする手法を開発する必要がある。

3) 保温材を巻いた円筒のモデリング

本手法は、保温材が巻かれていない直進円筒を対象としている。しかしながら、実際の環境において、保温材が巻かれている配管が存在する場合もあり、その表面の材質上、系統誤差を多く含む点群が得られる。そのため、保温材を考慮した、よりロバストな円筒モデリング手法の開発が必要となる。

第3章 SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画支援 手法の開発

3.1 研究背景

近年, 高度経済成長期に建設された橋梁や大規模建造物の老朽化が進んでいる. 2029 年には国内に存在する全国約 72 万橋のうち, 52%が建設年数 50 年を超える. さらに, このほかにも建設年数が不明な橋梁も約 23 万橋存在する[4]. これらのインフラ建造物の安全の担保および維持管理のためには, 現況と過去の点検履歴の把握が重要である. しかし, 従来のインフラ建造物の維持管理の点検成果は, 図面上に記録されているため, 点検作業現場において, 点検・変状個所の把握を行いつらく, 作業効率を下げる一因となっている. また図 3.1(a)に示すように, 都道府県および政令都市の管轄下の橋梁と比較して, 市区町村管轄下の橋梁の維持点検は, 技術・人手・コストの面から困難を極め, 通行規制などといったインフラ機能自体の停止が近年大幅に増加している[33]. さらに, 図 3.1(b)に示すように, 市区町村のうち町の約 3 割, 村の約 6 割で橋梁保全業務に携わっている土木技術者が存在しておらず, その維持管理業務自体が正しく行う必要性も求められている.

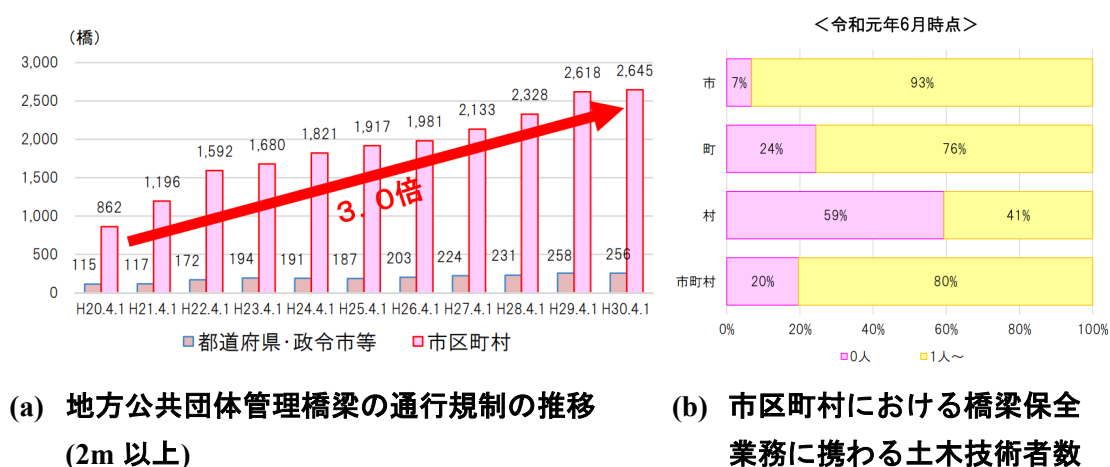


図3.1 地方公共団体管理下の橋梁における現状[33]

そこで国土交通省では、この問題解決のために、インフラ建造物の維持管理作業の効率化を目的に、3 次元 as-is モデルを点検成果の一形態として利活用し始めた[34]。3 次元 as-is モデルを活用することによって、維持管理における点検・変状個所を 3 次元 as-is モデル上に記録することが可能で、実際に維持管理現場に行かなくても、PC 上でそれらの相対的な位置関係などを空間的に把握しやすくなり、より効率的で簡易な点検業務が期待される。

これに伴い、橋梁やダムなどのコンクリート建造物の 3 次元 as-is モデル化を行うために、カメラのみを用いてテクスチャリッチな 3 次元モデルを生成可能な Structure from Motion[35], [36], [37]と Multi-View Stereo [38], [39] (SfM-MVS)技術の活用が広がっている。SfM-MVS はカメラ 1 台のみで撮影した多数の画像から 3 次元モデルを生成でき、その生成可能なソフトウェアもフリーなものから安価な商用のソフトウェアまで存在するため、導入障壁が低いという利点がある。そのため、レーザスキャナのような高価な機器の導入が難しい地方公共団体でも、利活用の期待が見込める。さらに、形状表面上のひびや欠損の写真を保存できるだけでなく、それらのテクスチャを 3 次元モデルに鮮明に反映可能な特徴を持つため、変状個所の把握がより簡易になる。

3.2 SfM-MVS による 3 次元モデル生成プロセスにおける関連研究とその問題点

3.2.1 SfM-MVS 手法による 3 次元モデル生成プロセスとその問題点

まず SfM-MVS による 3 次元 as-is モデル生成プロセスについて簡単に述べる。図 3.2 に示すように、SfM-MVS 処理による 3 次元モデル生成のために、まず画像間で重複を持つ多数の画像集合を入力として、撮影した画像のカメラポーズ(位置・姿勢)と、カメラポーズを推定する際に生成される、画像間の自然特徴点の 3 次元空間における対応点であるタイポイントを生成する SfM [35], [36], [37]という処理と、SfM で求めたカメラポーズから複数のステレオマッチングを行い、密な点群もしくは密なメッシュモデルを生成する MVS [38], [39]という二つの処理に分かれる。

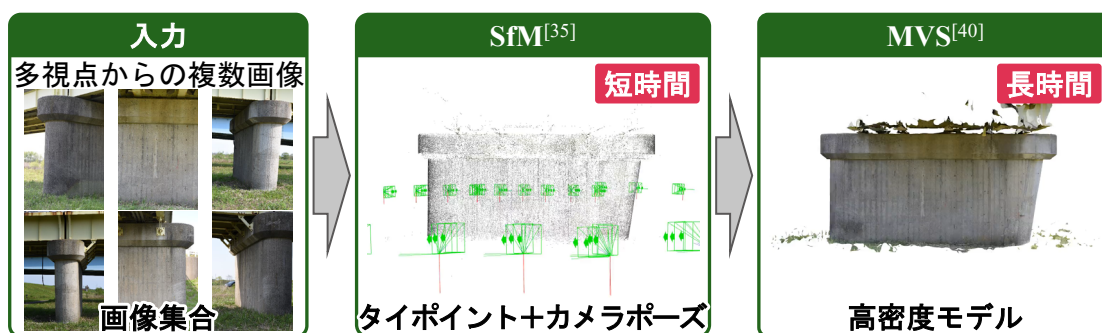


図3.2 SfM-MVS による 3 次元モデル生成の流れ

SfM は、撮影したカメラポーズを推定する手法であり、一般的な処理過程は下記のようなになる。

(1) 2 次元画像上での自然特徴量抽出とマッチング

まず、単一画像上から自然特徴量の抽出を行う。SIFT[40]や SURF[41]などに代表されるような、画像の回転や拡大・縮小のスケール変化に頑健な自然特徴量を画像内から抽出・記述していく。次に、単一画像上で抽出した特徴量を、複数画像間で RANSAC などを用いて、誤対応の影響を除きながらマッチングを行い、画像上の対応点を求めていく。

(2) 非線形最適化によるカメラポーズの推定および 3 次元タイポイントの算出

次に、撮影した画像のカメラポーズと対応点の 3 次元空間位置を算出する。(1)で求めた画像間の対応点のマッチング結果を用いて、一つのカメラ座標系を基準として、もう一方のカメラ位置・姿勢パラメータの 6 つと、対応点の 3 次元空間中の座標値 3 つの合計 9 つの変数を算出する。ただし、対応点だけでは、スケールを求めることができないため、変数は 8 つとなる。これらの変数のうち、まず 8 点アルゴリズムや 5 点アルゴリズムを用いてカメラポーズを求め、次に三角測量の原理から、対応点の 3 次元空間上の座標値を求める。この処理を(1)で求めた全対応点に対して行う。最後に、これまで用いた 3 次元対応点群(タイポイント)とカメラポーズの変数を非線形最適化によって、誤差が最小となるカメラポーズおよび 3 次元対応点であるタイポイントを算出する。これらの最適化処理はバンドル調整 (Bundle Adjustment)[42]と呼ばれる。

以上で述べたように、SfM で復元されるタイポイントは、画像上の自然特徴点に対応した点群であるため、疎な点群になってしまう。そのため、MVS を行い密な点群を生成する必要がある。SfM で算出したカメラポーズを用いて、密な点群の生成を行う。下記の手順で構成される[43]。

- (1) マッチングコスト(類似度)の計算
- (2) 近接ピクセル領域におけるコストの集約によるデプスマップ生成
- (3) デプスマップからの視差の計算による密な点群の生成
- (4) 密な点群に対するフィルタリング

上記で述べたように、SfM-MVS は画像間にオーバーラップを持つ画像集合から、物体表面上の欠損などをとらえたテクスチャ付きの高密度なメッシュモデルを生成可能である。しかしながら、下記に述べる問題点が存在する。

- (1) どのカメラポーズで画像を何枚撮影すれば、高精度なモデルが生成可能かを事前に推定することが困難であるため、既撮影カメラポーズの位置や枚数によっては、カメラポーズの正しい推定が行えない場合や、生成されたモデル上に穴や大きな形状誤差などの品質低下領域が含まれる問題がある。
- (2) (1)を避けるために、過剰な撮影が行われた場合や冗長な画像が増加した場合、多視点ステレオ計測を行う MVS 処理に膨大な処理時間が要する問題がある。
- (3) 画像を撮影した段階では、画像集合から生成される最終的な 3 次元モデルの形状や品質は確認できず、モデル形状を確認するために、長時間の MVS 処理が必要となる問題がある。

3.2.2 最適撮影計画手法 (View Planning) の既存研究とその問題点

3.2.1 項で述べた SfM-MVS による 3 次元モデル生成について、少ない撮影回数でも対象物の高密度モデルを品質よく生成できるカメラポーズを推定することを目的に、最適な撮影カメラポーズを推定する手法が提案されている。

はじめに、計算機支援による SfM-MVS 向け撮影計画の既存研究における大まかな

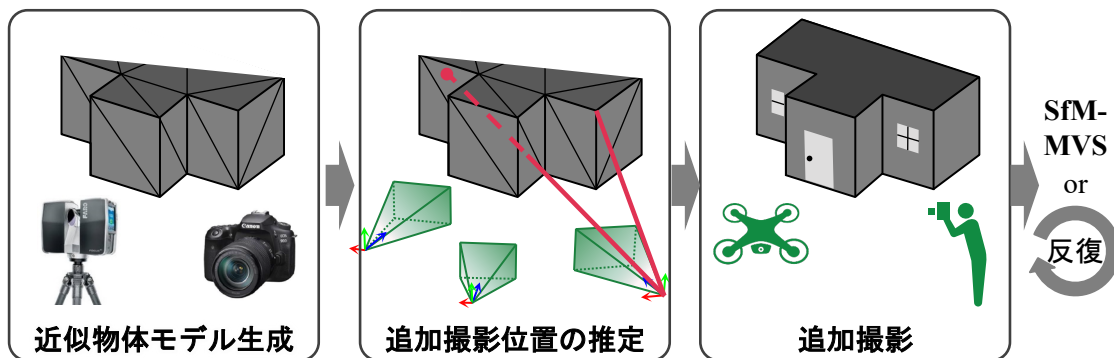


図3.3 既存研究における写真計測向け撮影計画の処理手順

処理手順を説明する．まず，図 3.3 に示すように，事前に計測したレーザ計測点群データに対してメッシュを張り近似モデルを生成する場合や，規則的な疎な撮影を行，一度 SfM-MVS により高密度モデルを生成し，それらを事前知識として入力する．その後，近似モデル上で，既撮影位置からの視線交差判定や，近似モデル上でタイポイントや疎なスパース点群から品質予測や追加撮影カメラポーズの推定を行っていく．その後，推定されたカメラポーズを参照し，追加撮影を行う．最後に，SfM-MVS を行い，高密度モデルを生成するか，もしくは，これらの処理を反復し再構成精度を高めた後に再度 SfM-MVS で最終的な高密度モデルを生成する．

近年では，UAV (Unmanned Aerial Vehicle)の発達により，自由度の高い画像撮影が可能になっているため，UAV を活用した最適撮影計画手法が提案されている[44], [45], [46]. 近年の UAV を使う最適撮影計画手法では，図 3.4 に示すような *explore-then-exploit* 手法がとられる．この手法は，まずモデル化対象の頭上を規則的に飛び，撮影した画像を入力として MVS を行い，最適な撮影カメラポーズを推定するための事前知識 (簡易的な 3 次元モデル)を生成する．その後，その 3 次元モデルを基準に，高精度な 3 次元モデルを生成するための撮影カメラポーズと，UAV の航空路を求めていく．しかしながら，カメラポーズを推定するために用いられる簡易的な 3 次元モデルは，上空からの規則的なグリッドなどで撮影した画像から生成されているため，地表付近の 3 次元形状を正確に反映していない可能性がある．また，事前知識を生成するために処理時間のかかる MVS を行わなければならない，効率の低下につながる．

Peng *et al.* [47]も同様に，*explore-then-exploit* 手法を用いて，最適撮影計画の推定を行っている．この手法は初期にジグザグに飛行後，疎な点群から，事前知識となる粗い 3 次元メッシュを生成することで，最適撮影カメラポーズと UAV の経路を算出する．上記の手法とは異なる点は，事前知識を作成し，最適撮影を行った後に生成する 3 次元モデルを，再度事前知識として使用し，最適撮影を数回反復することで，事前知識の形状反映性を高めている点にある．

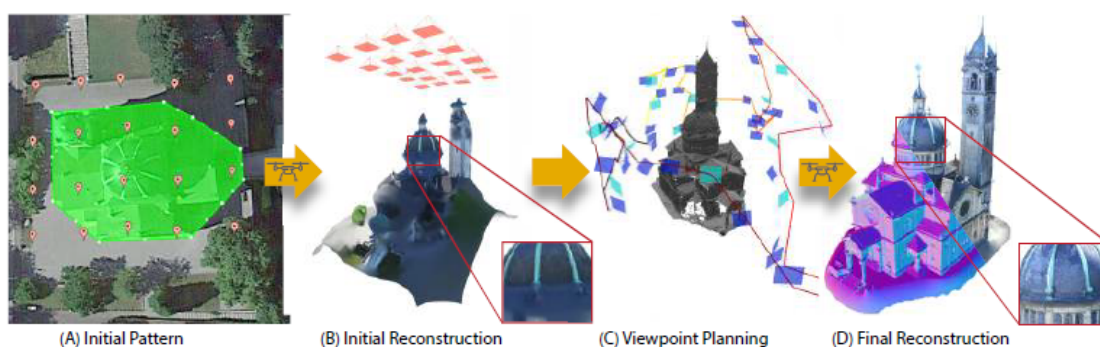


図3.4 *explore-then-exploit* による最適撮影計画[44]

Martin *et al.* [48]は、事前のミッションで獲得した 3 次元データや、公衆的に使用できる点群データから UAV 向けの撮影カメラポーズや効率的なパス経路を計算する。また、Jing *et al.* [49]は、図 3.5 に示すように、一般的に使用できる 2 次元マップから生成した近似モデルを事前知識として UAV の撮影カメラポーズを推定する。これらの手法は、事前知識の形状や状況が最適撮影計画推定時と変化する場合があります、不適切なカメラポーズを推定する可能性が高いと考えられる。

Alsadik *et al.* [50]は、図 3.6 に示すように、動画から SfM によって生成したタイポイントから生成した三角形メッシュを事前知識とし、事前知識に対して放射上やグリッド上に設置したカメラポーズ候補から最適な撮影カメラポーズを選択していく。この手法は、追加カメラポーズが事前に設置したカメラポーズ候補に限定されてしまい、効果的な品質向上を行えない可能性がある。

Mostegel *et al.* [51]は、onlineSfM[52]で逐次的にカメラポーズを推定し、機械学習で生成した **confidence predictor** から、低品質領域をカバーするようなカメラポーズを予測していくが、事前に訓練データの生成や学習データ生成が必須である。

以上の UAV を用いた最適撮影計画手法は、操作技術の習得や、飛行時間が短く画像の撮影枚数に限りがあるだけではなく、効率的な航空路を推定する必要が求められ、技術導入の障壁がやや高い問題がある。一方で、手動撮影を想定した、写真測量向けの最適撮影計画は手軽に導入でき、多くの研究が提案されている。

図 3.7 に示すように、Hoppe *et al.* [52]は、一般的な SfM 処理と同等の精度で online の SfM が行える手法を提案した。Online SfM は画像が追加されるごとに SfM 処理が行われ、タイポイントを基に生成した表面メッシュの形状も更新していく。その後、GSD (Ground Sampling Distance)や各メッシュで可視なカメラ数を評価したすることによって、品質を予測し、表面メッシュに付加させることで、品質を可視化している。

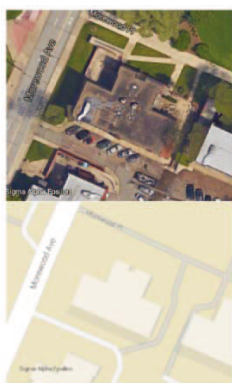


図3.5 2次元マップからの事前知識を用いた最適撮影計画[49]

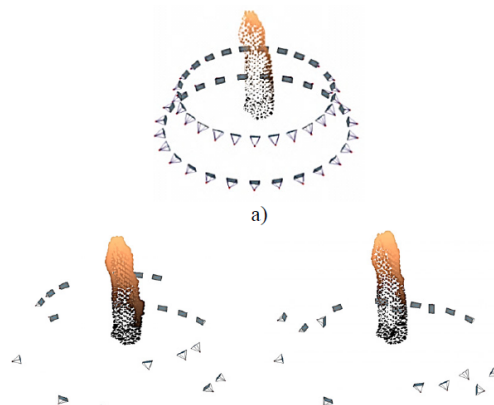


図3.6 カメラネットワークを用いた最適撮影計画[50]

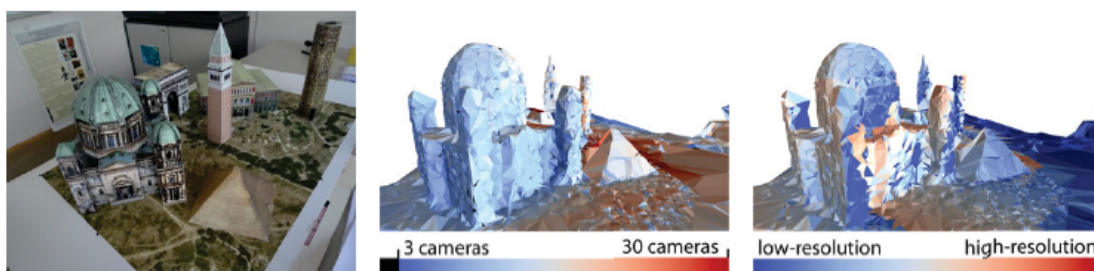


図3.7 Online SfMによる品質予測 (左から、入力の画像例、表面メッシュ上の可視なカメラ数評価結果、表面メッシュ上の GSD 評価結果)[52]

しかしながら、品質の可視化のみであり、どこから撮影するかはユーザに委ねられる問題がある。

Mendez *et al.* [53]は、対象をカバーする被覆率と精度に関する指標から、効率的な追加カメラポーズの推定を行っており、閾値の設定次第で、探索的にカメラポーズを推定するか、精度向上のためのカメラポーズ推定するかを決定できる。Dunn *et al.* [54]は部分的な3次元モデルを入力とし、レイキャスティングなどを用いて、次の撮影用カメラポーズを求めていく。Ahmadabadian *et al.* [55]は、Kinectで取得した点群やSfMの出力結果であるタイポイントを入力として、対象を中心とした楕円形をなすカメラポーズ候補を設置し、その候補から最小数の最適なステレオカメラを選択する。Huang *et al.* [56]は、従来の処理時間が膨大になるピクセルごとのMVSではなく、superpixelに分割した画像に対して、各superpixelごとにpiece-wiseのMVSを行うfast MVSを提案し活用している。Fast MVSで生成した簡易な3次元モデルを事前知識とし、対象の被覆率を増加させるような画像を順次、加えながら品質を向上させていく手法である。しかしながら、これらの手法はモデル化対象となる物体が小さく、インフラ建造物のような大規模な対象への適用性が不明である。

Mauro *et al.* [57]はSfMで出力したタイポイントとカメラポーズから品質を予測し、品質予測結果をタイポイント上に付加し、その後グリッド上に分割したカメラ位置候補の中から、低品質領域を補完できるカメラポーズを推定している。しかしながら、この手法は疎な点群のみを活用したもので、正しい可視性判定を行っておらず、正確な品質予想が難しく、不適切なカメラポーズを推定する可能性がある。

3.2.3 最適画像選択手法 (Image Selection) の既存研究とその問題点

3.2.1 項で述べた問題解決のために、最適な撮影カメラポーズを推定するアプローチではなく、対象に対して、過剰な画像撮影や動画撮影を行った後、高精度なモデル生成に最適なカメラポーズを選択する最適画像選択 (Image Selection) 手法が提案されている。

SfM で行われた画像マッチング結果から、よりロバストかつ高精度に深さ推定を行うためや、高負荷な MVS を効率的に行うために、ステレオマッチングに有効な画像のみを選択し、それらの画像集合を提案する MVS に活用している[58], [59], [60], [61]. これらの最適画像選択手法は、膨大な入力画像集合から適切な画像のみを選択するために用いられており、たとえば、Furukawa *et al.* [62]は、インターネット上の画像から、大規模な 3 次元モデルを生成するための最適画像選択手法を行っており、画像間角度や可視性を評価することで、フィルタリングを行っている。Tingdahl *et al.* [63]は、図 3.8 に示すように、効率的な MVS を行うために、冗長な画像をフィルタリングし、有効な画像のみでメッシュモデル生成を行っている。

Hornung *et al.* [64]は、MVS で大量に画像を使用された場合に、より効率的かつ高精度なモデル再構成が行えるように、画像集合から MVS に有効な画像のみを選択することで冗長な画像を除去している。Mostegel *et al.* [65]は、SfM で出力したカメラポーズやステレオマッチング結果を学習した Confidence predictor を用いて、有効なカメラポーズに順位付けを行うことで、ユーザが求める品質ごとの 3 次元モデルを生成できる手法を提案した。Yang *et al.* [66]は、画像間角度や再投影誤差などの指標を用いて、3 次

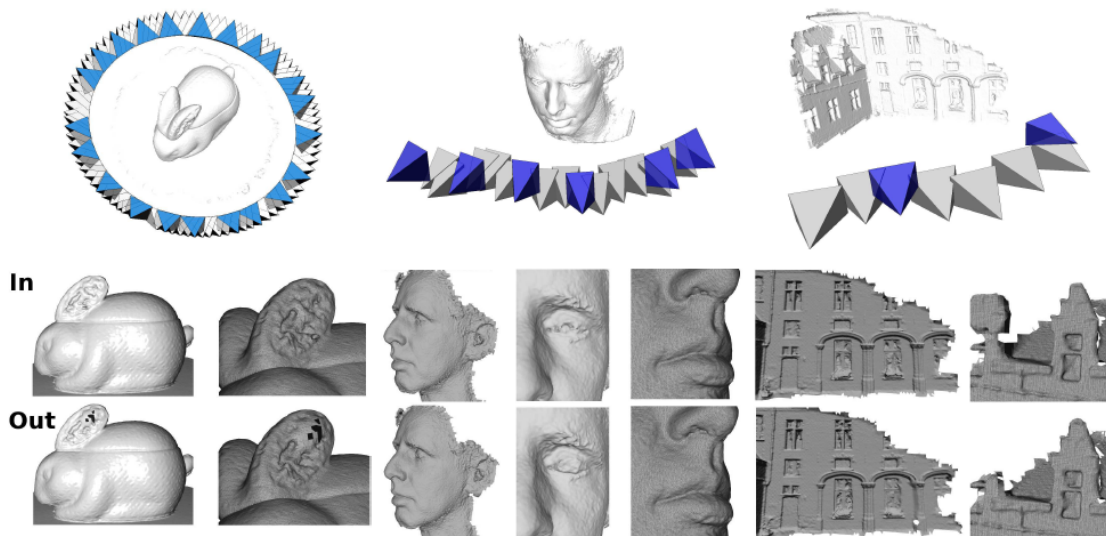


図3.8 効率的なメッシュ生成のための画像選択手法[63]

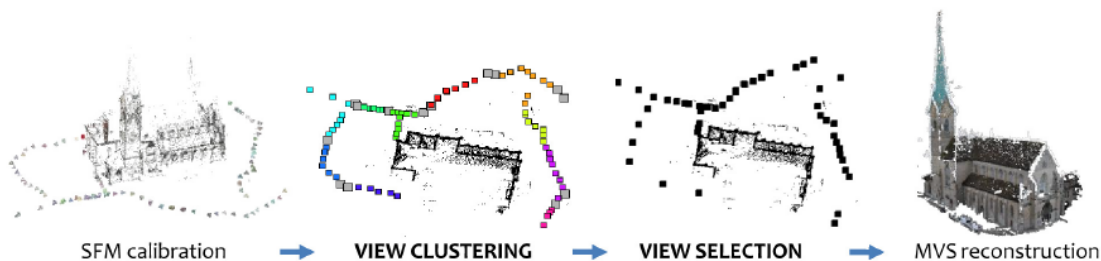


図3.9 ビュークラスタリングに基づく画像選択手法[67]

元モデルへの貢献度を各画像で算出し、有効な画像のみを選択する手法を提案した。Mauro *et al.*[67]は、図 3.9 に示すように、密なカメラポーズから、既撮影の画像撮影位置についてクラスタリングを行い、対象の被覆率とクラスタ間の接続を担保した最小の画像数を選択する手法を提案した。

しかしながら、これらの最適画像選択手法では、高精度な 3 次元モデルを保証できない可能性がある。たとえ、撮影者が充足のない画像を撮影したとしても、抜けがある可能性があり、それらを埋めるような再撮影は再び対象の現場に赴くか、再撮影自体行えない場合がある。また、インターネットなどで収集した画像は、同じカメラポジションが多く、さらに撮影するカメラにもばらつきがあるため、高精度なモデルを生成することができない問題がある。

以上、既存手法における問題点を下記にまとめる。

- あらかじめ疎な撮影やレーザ計測を行い、3 次元モデルといった事前知識の生成が必要であり、撮影計画の効率低下につながる点。
- 事前知識として生成した 3 次元近似モデルに対して、可視性判定を行っていない場合、品質改善に寄与しない、誤った追加撮影位置の推定や品質予測を行ってしまう可能性がある点。
- MVS で得られる高密度モデルの精度と、品質予測指標との相関性が未検証であるために、品質予測指標が MVS で得られるであろう高密度モデルの品質を正確に反映していない可能性がある点。
- 推定した追加撮影位置が、実環境でどのカメラポーズで撮影すれば良いかどうかを指示する方法が提案されていない点。

3.3 本手法の目的と特徴

上記の問題点から、本手法では、SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画を導出可能なアルゴリズムの開発を目的とする。本手法は、処理時間のかかる MVS を行わず、比較的短時間で計算可能な SfM から出力されたタイポイントおよびカメラポーズのみを用いて、MVS で最終的に得られるであろう高密度メッシュモデルの品質を予測し、その低品質領域形状を改善できるような最適な追加撮影カメラポーズを推定するものである。

具体的には、下記 4 点についての開発を目指す。

- (1) SfM で出力されるタイポイントとカメラポーズのみから、MVS で得られるであ

ろう高密度モデルの形状を近似した 3 次元メッシュモデルを高速に生成する手法の開発.

- (2) SfM で出力されるタイポイントとカメラポーズのみから, MVS を行わずに, MVS で得られるであろう高密度モデルの品質が予測可能な指標の開発.
- (3) 品質予測指標の算出後, 次に追加撮影すべき低品質領域を数理計画法により自動選択する手法の開発.
- (4) 選択した低品質領域に基づいて, 次の撮影カメラポーズを自動推定する手法の開発.

本手法の特徴として以下の 4 点があげられる.

- (1) MVS 処理を行わずに, 短時間で処理可能な SfM 結果のみから, 最終的な得られるであろう高密度メッシュモデルを近似した 3 次元モデルと, その品質が予測可能な点.
- (2) 高密度メッシュモデルとレーザ計測点群との誤差を比較し, 高密度メッシュモデルの品質と相関関係のある品質予測指標を活用している点.
- (3) 数理計画法により, 最も改善効果のある低品質領域を自動選択し, 低品質領域を集中的かつ効率的に改善可能なカメラポーズの推定を行っている点.
- (4) 一般的な SfM 処理で得られるタイポイントとカメラポーズのみから, 品質予測およびカメラポーズが推定可能なため, 他の SfM-MVS 処理系との親和性が高い点.
- (5) 追加撮影推定の定量的な終了条件について, 実験的に考察し, 提案している点.

3.4 提案する最適撮影計画プロセスの全体概要

本手法は手持ちカメラによる撮影を想定し, 対象物は平面を多く含む建造物とする. 処理時間のかかる MVS からではなく, 比較的短時間で処理可能な SfM で出力された 3 次元タイポイントおよびカメラポーズのみを用いて, MVS で最終的に得られるであろう高密度メッシュモデルの品質を予測し, その低品質領域形状を改善できるような最適な追加撮影カメラポーズの推定を行う.

図 3.10 に本手法の概要を示す。まず、初期画像集合から SfM (A1)を行い、タイポイント集合と既撮影画像のカメラポーズから、既撮影カメラ位置からのタイポイントの可視性判定と品質予測指標値の記録のために、近似物体表面モデルの生成を行う (A3)。次に、タイポイントとカメラポーズを活用した品質予測指標から、最終的に得られるであろう高密度モデルの品質を予測し、近似物体表面モデル上のタイポイントに記録していく (A4)。近似物体表面モデル上のタイポイントに付加された品質予測指標値から、最も改善効果が高いであろう低品質領域を数理計画法によって、複数個所選択していく (A5)。次に、選択した低品質領域に基づいて、低品質領域を改善できるような追加撮影用カメラポーズを推定する (A6)。推定したカメラポーズに基づいて、追加画像を撮影する (A7)。撮影した画像を初期画像集合に追加し、再度 SfM と本手法を繰り返していく。なお、一回の反復ごとに低品質領域などの改善度を観察し、終了条件を満たすかどうか判定する (A8)。条件を満たしたら、反復を終了し、最後に一度のみ

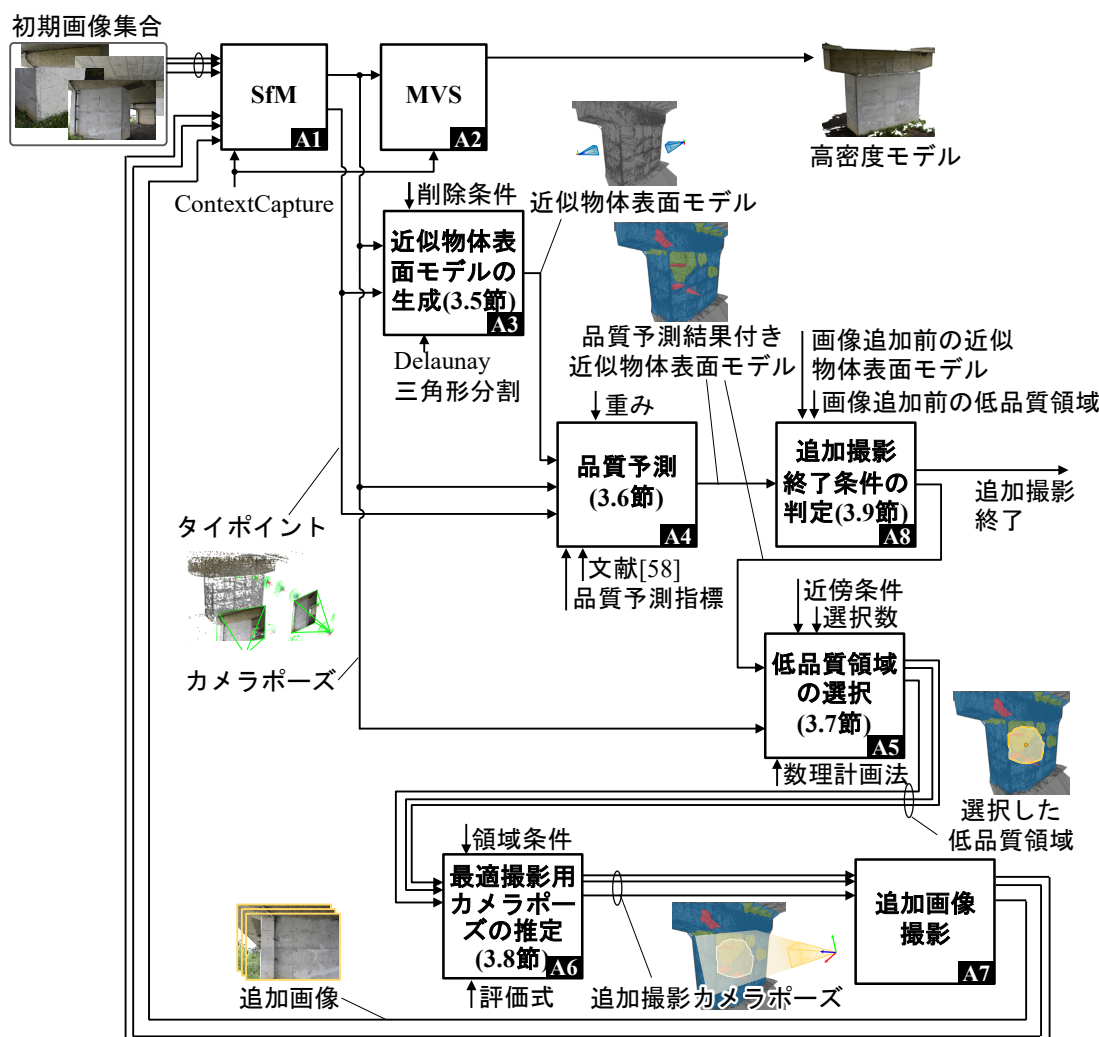


図3.10 提案する最適撮影計画プロセスの概要

MVS を行い、高密度な 3 次元モデルの生成を行う (A2). 次節から各処理について詳細に述べる.

3.5 近似物体表面モデルの生成

3.5.1 概要

まず、既撮影カメラ位置からのタイポイントの可視性判定と品質予測指標値の記録のために、近似物体表面モデルを生成する. 本手法は Labatut らの手法[68]を簡略化し、短時間で終了する SfM で出力される 3 次元タイポイント集合 P とカメラポーズ $e = \langle c, \theta \rangle$ ($c \in R^3$: カメラの投影中心, $\theta \in R^3$: カメラの光軸方向を表すオイラー角)から、MVS で得られる高密度モデルの近似物体表面モデルを生成する. 以下に手順を述べ、次項より各処理について詳細に述べる.

- (1) Delaunay 四面体分割を行い、凸包四面体集合を生成する[69].
- (2) カメラ位置と可視なタイポイント間の視線ベクトルと、四面体集合の視線交差判定を行い、交差した四面体を削除する.
- (3) 視線交差判定のみでは削除しきれなかった三角形メッシュを、いくつかの経験則的な削除条件に基づいて削除し、近似物体表面モデルを生成する.

3.5.2 Delaunay 四面体分割とレイトレーシング

図 3.11 に示すように、SfM により推定されたタイポイント集合 P の点群に対し、Delaunay 四面体分割[69]を行い、四面体集合 H を生成する. その後、位置ベクトル p_i をもつタイポイント $i(\in P)$ と、 i を可視なカメラ位置集合 C の投影中心 $c_j(\in C)$ との視線ベクトル($v_j^i = p_i - c_j$)集合 $V_i = \{v_j^i\}$ を算出する. H とすべての $v_j^i(\in V_i)$ との視線交差判定を行い、交差した四面体を削除した四面体集合を近似物体表面モデル H' として生成する.

3.5.3 四面体削除による高精度化

次に、 H' 内に Delaunay 四面体分割時に生成され、前項までの視線交差判定のみでは削除しきれない、下記に示す(1)–(3)三角形メッシュが存在する。これらの三角形を含む四面体が原因で、 H' 上における、画像を追加すべき低品質領域の品質予測値が不適切に推定される場合がある。その解決のために、図 3.12 に示すように、下記の(1)–(3)に該当する三角形を、順に削除するメッシュフィルタリングを行い、品質予測に適切なメッシュのみを残す処理を行う。

(1) 局所的に突出した歪んだ三角形

各四面体 $h(\in H')$ において、隣接する四面体数をカウントし、隣接四面体数が1以下で、かつ式(3.1)で定義される h のストレッチ $Stretch(h)$ が0.1以下となる形状が歪んだ四面体を削除し、 H'_1 を生成する。ストレッチとは、1で正四面体、0に近づくにつれ体積が0になる四面体要素の形状品質指標である。

$$Stretch(h) = 6\sqrt{6}W(h) / \left(S(h) \max_{e \in h} (l_e) \right) \quad (3.1)$$

ただし、 W と S はそれぞれ h の体積と表面積で、 l_e はエッジ e の長さである。

(2) 広い境界を張る三角形

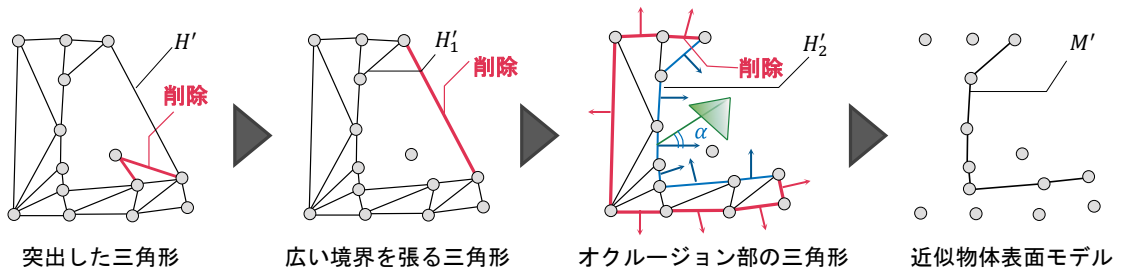


図3.12 メッシュフィルタリング

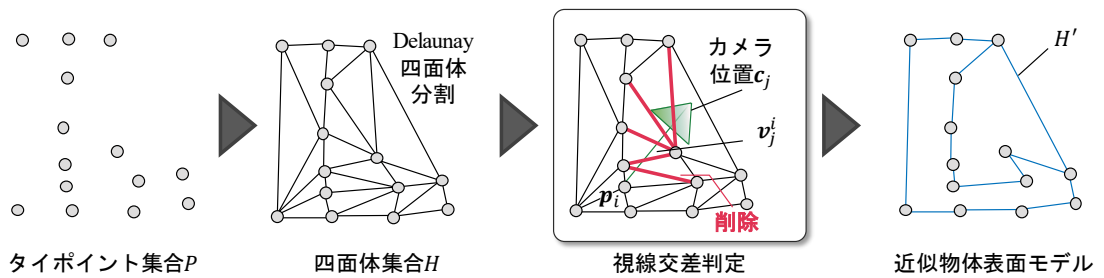


図3.11 近似物体表面モデルの生成手法

H'_1 上の広い境界を張る三角形は、1 画像の画角内に三角形全体が収まらず、低品質領域として誤って推定される場合がある。そこで図 3.13 に示すように、 H'_1 上の各三角形頂点を構成するタイポイントに対し、可視なカメラ集合の重複数を評価し、広い境界を張る三角形と判断されたものを削除した。以下にそのアルゴリズムを述べる。

(a) 可視なカメラの再割り当て

タイポイント $i(\in P)$ は、画像上の自然特徴点の類似性から生成されたものであり、式 (3.2)に示す i と i を可視なカメラ j の関係を表した集合 R として、SfM の出力結果に記録されている。

$$R = \{(i, j) | i \in P, j \in C, K(i, j) = \text{true}\} \quad (3.2)$$

ここで、 $K(i, j) \in \{\text{true}, \text{false}\}$ は、SfM において i が j のポーズ推定に使われた否かを表す論理式である。しかし、 j の画角内に存在する全て可視なタイポイント i のすべてが、 R 内に記録されている訳ではない。そのため、 j における i の可視性をより正確に評価するため、全タイポイント i を j 上に再投影し、画角内に存在した i を可視タイポイントとした式(3.3)の可視タイポイント集合 Q を生成する。

$$Q = \{(i, j) | i \in P, j \in C, L(i, j) = \text{true}\} \quad (3.3)$$

ここで、 $L(i, j) \in \{\text{true}, \text{false}\}$ は、 i を j に再投影したときに j の画角内に存在するか否かを表す論理式である。

(b) 可視なカメラ集合の抽出

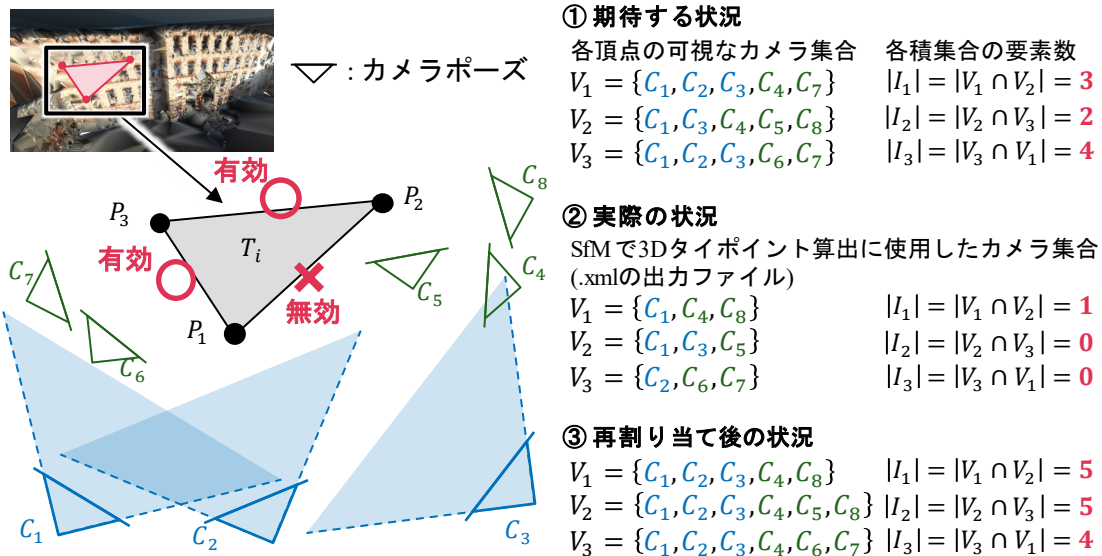


図3.13 広い境界を張る三角形のフィルタリング

H'_1 にある三角形 T_i の頂点であるタイポイント集合 $P(T_i) = \{j, k, l\}$ に対する可視なカメラ集合 $V_{P(T_i)}$ を Q から抽出する。

(c) 有効エッジの判定

T_i の各エッジ $(j_1, j_2)(j_1 \in P(T_i), j_2 \in P(T_i), j_1 \neq j_2)$ において、可視なカメラ集合 V_{j_1} と V_{j_2} の積集合 $I(j_1, j_2)$ をとり、その要素数 $|I(j_1, j_2)|$ が3以上であれば有効エッジ、それ以外は無効エッジの属性を各エッジにつける。

(d) フィルタリング

T_i に無効エッジが一つでも含まれれば、 T_i を表面に持つ四面体を H'_1 から除去する。

以上のフィルタリング処理を H'_1 境界上の全三角形に対して行い、新たに四面体集合 H'_2 を生成する。

(3) オクルージョン部に存在する三角形

次に、既撮影画像からのオクルージョン部に存在する三角形を含む四面体の除去アルゴリズムを下記に示す。

- (a) H'_2 の各三角形において、隣接する四面体数が2の場合は、内部三角形、1の場合は表面三角形として抽出する。
- (b) 表面三角形の外側法線を抽出し、カメラ位置から表面三角形の重心へのベクトルと、表面三角形の法線との入射角度 α を算出する。 α が閾値 $\tau_\alpha[\text{deg}]$ 以上の表面三角形を除去する。

以上の(1)–(3)の三角形フィルタリング処理を H' 境界上の全三角形に対して行い、残された表面三角形を近似物体表面モデル M' として生成する。

最後に、図 3.14、図 3.15 と図 3.16 に大学構内建物を対象とした 105 枚の画像セット、橋脚を対象とした 110 枚の画像セット、ならびに、大学構内建物を対象とした 42 枚の画像セットを用いた、タイポイントとカメラポーズ、メッシュフィルタあり・なしの近似物体表面モデルならびに高密度メッシュモデルの生成例を示す。フィルタリングにより、MVS で得られる高密度メッシュモデルと表面形状が類似した近似物体表面モデルが得られた。

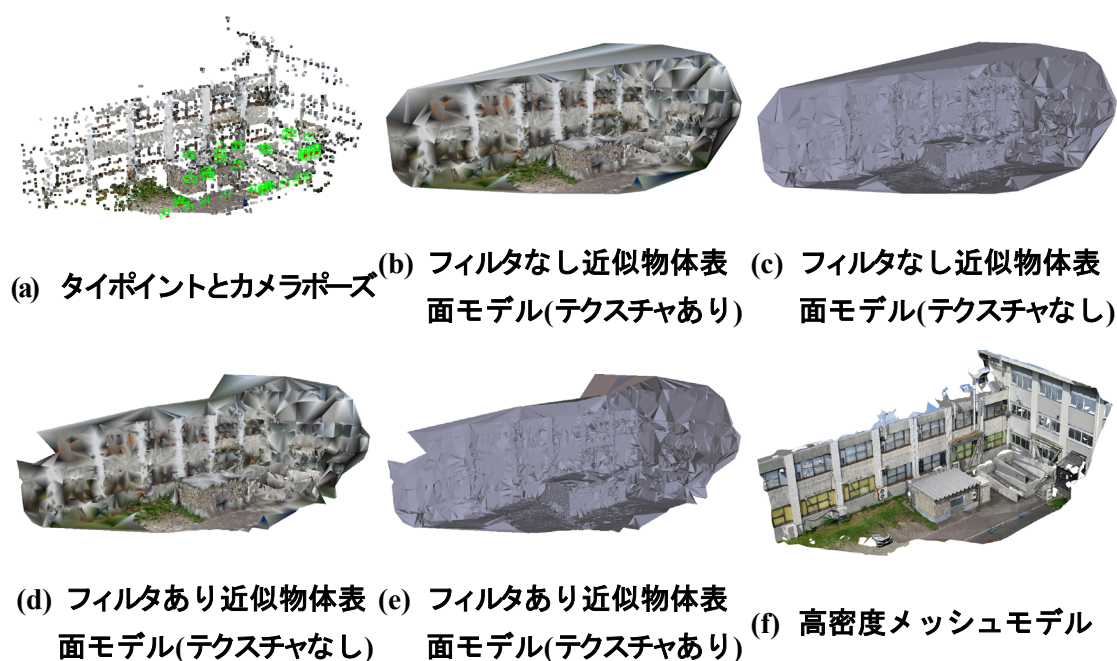


図3.14 建物を対象とした近似物体表面モデルの生成例

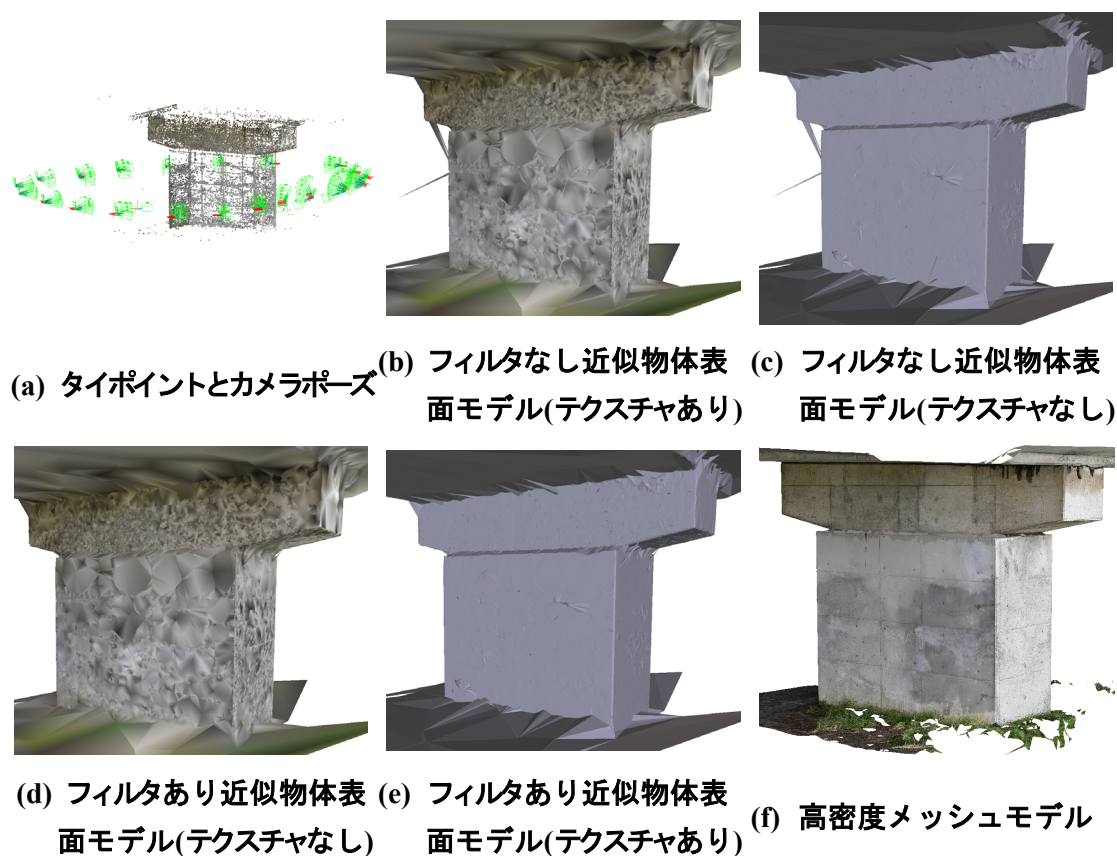


図3.15 橋脚を対象とした近似物体表面モデルの生成例

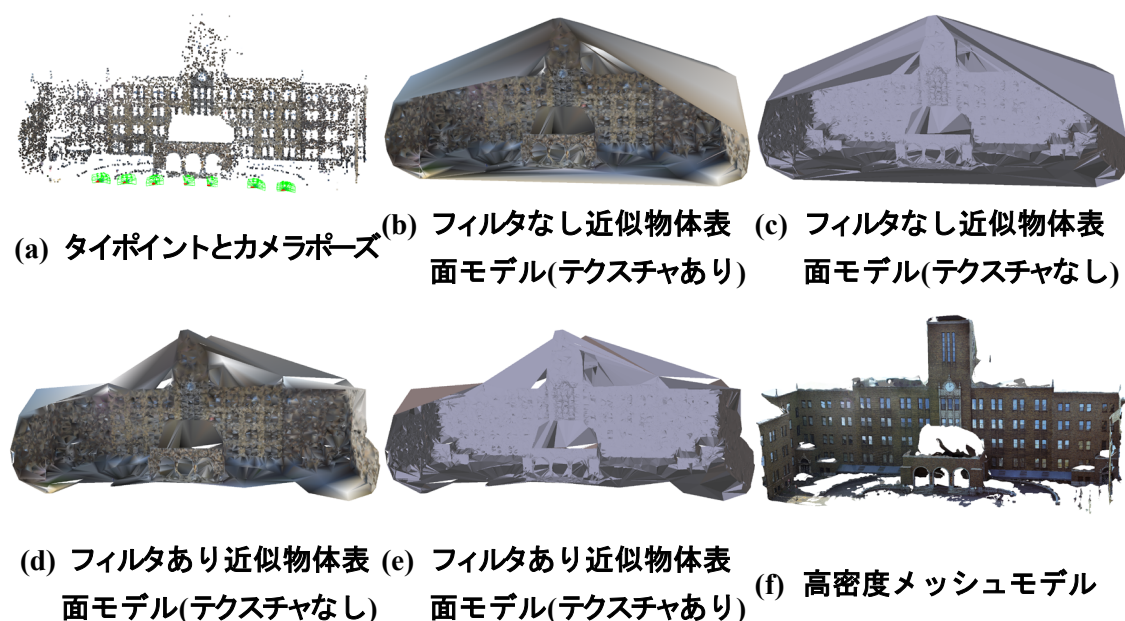


図3.16 大学構内建物を対象とした近似物体表面モデルの生成例

3.6 品質予測手法

3.6.1 概要

MVS で生成される高密度モデルの品質を予測するため、Mauro らの手法[57]を拡張し、前節で生成した近似物体表面モデル上に、SfM で出力したタイポイントとカメラポーズから、品質予測指標で推定していく。

まず、品質予測指標算出前に、タイポイント集合 P 内の任意のタイポイント $i(\in P)$ と、 i を中心として、半径 r の球内に含まれる近傍タイポイントとの平均距離 $\bar{R}$ が1となるように、モデルスケールを正規化する。

3.6.2 品質予測指標

次に、図 3.17 に示すように、Mauro ら[57]が提案した 4 つの指標(a)–(d)に加え、本手法で独自に提案する指標(e)–(l)を加えた合計 12 個の指標をタイポイント i の品質予測指標としてそれぞれ評価する。なお、下記の指標は、前節までで求められたタイポイント、カメラポーズ、近似物体表面モデルのメッシュ、画像を利用して評価できることが条件である。

(a) Density

図 3.17(a)に示すように、タイポイント点群 P 内においてタイポイントの局所密度が低い部分では高密度メッシュモデルの品質が低下する可能性が高い。そのため、あるタイポイント i 周りの他のタイポイントの局所密度を Density $F_D(i)$ として式(3.4)で評価する。

$$F_D(i) = |B_i|, \quad (3.4)$$

$$B_i = \{j | d(i, j) \leq r_1, j \in P, i \neq j\}$$

ただし、 r_1 はタイポイント密度評価の近傍半径であり、 $d(i, j)$ はタイポイント i, j 間の距離である。

(b) Uncertainty

図 3.17(b)に示すように、タイポイント i を可視な2つのカメラ j, k から i に向かう視線ベクトル $v_j^i, v_k^i (\in V_i)$ 間の角度が小さい場合は、MVSで推定される深さ方向の精度が低下する。したがって、 i に対する最大視線方向角を Uncertainty $F_U(i)$ として式(3.5)で評価する。

$$F_U(i) = \max_{v_j^i, v_k^i \in V_i} \angle(v_j^i, v_k^i) \quad (3.5)$$

(c) 2D-Saliency

図 3.17(c)に示すように、タイポイント i を画像上に投影した点の近傍画素 j のテクスチャが乏しい場合は、MVSのステレオマッチングの品質が低下しやすくなる。そのため、この投影点周りのテクスチャ強度を、平均輝度勾配 2DSaliency $F_{2D}(i)$ として式(3.6)で評価する。

$$F_{2D}(i) = \frac{1}{|N_{S_i}|} \frac{1}{|S_i^j|} \sum_{j \in N_{S_i}} \sum_{k \in S_i^j} \|\nabla(k)\| \quad (3.6)$$

ただし、 S_i は i の画像投影点を中心とする正方形領域の画像集合、 N_{S_i} は i を可視な画像枚数、 $\nabla(k)$ は画素 k 周りの画像の輝度勾配である。

(d) 3D-Saliency

図 3.17(d)に示すように、異なる半径 r に対するタイポイント i の法線ベクトル $\mathbf{n}_r(i)$ 間の差分が大きい場合、対象物表面も複雑な凹凸をもつ可能性が高く、より多くの画像撮影が必要となる。これを反映した形状顕著性 $F_{3D}(i)$ を式(3.7)で評価する。

$$F_{3D}(i) = \|\mathbf{n}_{r_1}(i) - \mathbf{n}_{r_2}(i)\| \quad (3.7)$$

ただし、タイポイント*i*における法線ベクトル $\mathbf{n}_r(i)$ は、*i*を中心とした半径*r*の球近傍に含まれるタイポイントに対し、主成分分析を行うことで算出する。

(e) Frontality

図 3.17(e)に示すように、カメラ*j*からタイポイント*i*に入射する視線方向ベクトル $\mathbf{v}_j^i$ の、近似物体表面モデル*M*上における法線ベクトル $\mathbf{n}_r(i)$ に対する入射角が大きい場合、形状再現性が低下すると推察される。したがってその平均入射角を Frontality $F_f(i)$ として式(3.8)で評価する。

$$F_f(i) = \frac{1}{|V_i|} \sum_{\mathbf{v}_j^i \in V_i} \angle(\mathbf{v}_j^i, \mathbf{n}_r(i)) \quad (3.8)$$

(f) Reliability

図 3.17(f)に示すように、タイポイント*i*を可視な画像数 $|V_i|$ が少ない場合、形状推定の信頼性は低下する。そこでこれを判定する Reliability $F_R(i)$ を式(3.9)より評価する。

$$F_R(i) = |V_i| \quad (3.9)$$

(g) Area

図 3.17(g)に示すように、近似物体表面モデル上の三角形メッシュの面積値が大きい場合、画像上の特徴点が密に抽出できなかったため、最終的に得られるであろう高密度メッシュモデルの品質も低下すると考えられる。そこで、近似物体表面上のタイポイント*i*に接続する三角形メッシュ t_j^i の平均面積値を $F_a(i)$ として、式(3.10)で評価する。

$$F_a(i) = \frac{1}{|T^i|} \sum_{t_j^i \in T^i} \text{area}(t_j^i) \quad (3.10)$$

ここで、 T^i はタイポイント*i*に接続する三角形メッシュの集合である。

(h) Edge

図 3.17(h)に示すように、近似物体表面モデル上のエッジ長が長い場合、SfM で得られるタイポイントが疎になるため、低テクスチャが含まれることが多いと考えられる。そこで、近似物体表面モデル上において、タイポイント*i*に接続するエッジの平均長を $F_e(i)$ として、式(3.11)で評価する。

$$F_e(i) = \frac{1}{|D^i|} \sum_{j \in D^i} \text{length}(e_j^i) \quad (3.11)$$

ただし、 D^i は近似物体表面モデル上のタイポイント i の次数である。

(i) Baseline

図 3.17(i)に示すように、タイポイント i から可視な 2 つのカメラ j, k の投影中心 $\mathbf{c}_j, \mathbf{c}_k$ 間の距離(基線長; Baseline)が短い場合、深さ方向の推定が正確に行えない。そこで、全カメラ対の平均値を $F_b(i)$ として、式(3.12)で評価する。

$$F_b(i) = \frac{1}{N_{c_i} C_2} \sum_{j=1}^{N_{c_i}} \sum_{k=j+1}^{N_{c_i}} (\|\mathbf{c}_j - \mathbf{c}_k\|) \quad (3.12)$$

(j) Height

図 3.17(j)に示すように、タイポイント i から可視な 2 つのカメラ j, k の基線を 2 等分した点 $\mathbf{c}'_{jk}$ からタイポイント $\mathbf{p}_i$ までの距離(被写体距離; Height)が長い場合、画像上の解像度が低下し、正しい深さ推定が行えない。そこで、全カメラ対の平均値を $F_h(i)$ として、式(3.13)で評価する。

$$F_h(i) = \frac{1}{N_{c_i} C_2} \sum_{j=1}^{N_{c_i}} \sum_{k=j+1}^{N_{c_i}} (\|\mathbf{p}_i - \mathbf{c}'_{jk}\|) \quad (3.13)$$

(k) Baseline and Height ratio

図 3.17(k)に示すように、タイポイント i の平均基線長と平均被写体距離の比が、 $1/2$ から $1/20$ の範囲にある場合、深さ推定が妥当な精度で推定でき、この範囲を外れると深さ方向の精度が低下する可能性がある[70]。そこで、基線長と被写体距離の比を $F_{bh}(i)$ として、式(3.14)で評価する。

$$F_{bh}(i) = \frac{F_b(i)}{F_h(i)} \quad (3.14)$$

(l) Difference between view distances

図 3.17(l)に示すように、タイポイント i から可視な 2 つのカメラ j, k の視線ベクトル $\mathbf{v}_j^i, \mathbf{v}_k^i$ の距離 $\|\mathbf{v}_j^i\|$ と $\|\mathbf{v}_k^i\|$ との差分が大きく異なるとき、画像間の解像度が異なり、生成されるモデルの精度が低下する場合がある。そこで、その平均値を $F_{diff}(i)$ として、式(3.15)で評価する。

$$F_{diff}(i) = \frac{1}{N_{ci} C_2} \sum_{j=1}^{N_{ci}} \sum_{k=j+1}^{N_{ci}} \|\mathbf{v}_j^i\| - \|\mathbf{v}_k^i\| \quad (3.15)$$

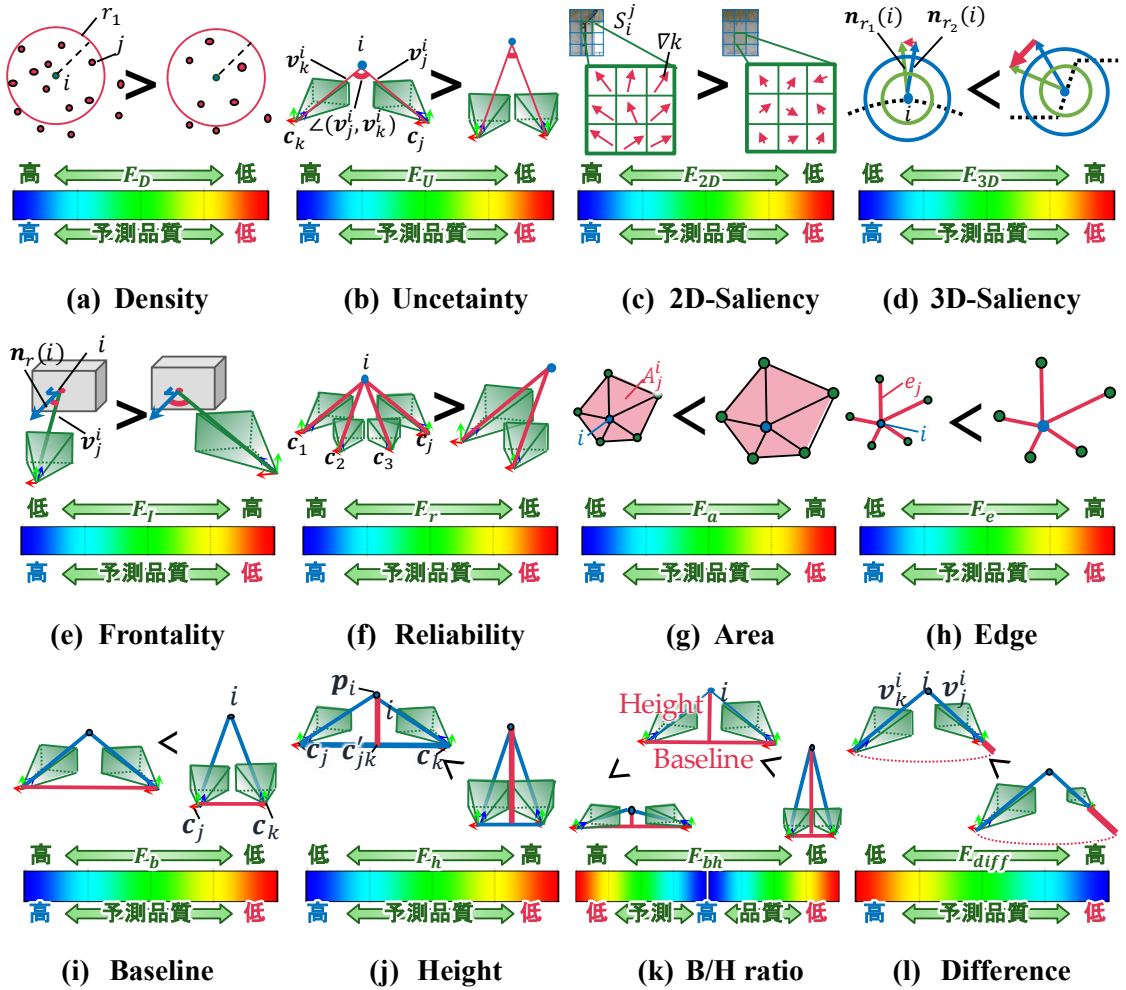


図3.17 品質予測指標の概要図

3.6.3 品質予測指標と高密度モデルとの定量的評価実験

3.6.3.1 概要

ここでは、TLS (地上型レーザスキャナ)で対象物を計測した点群を真値と仮定し、3.6.2 項で示した品質予測指標と、最終的に MVS 処理から得られた 3 次元メッシュモデルとレーザ計測点群間の誤差との相関を検証した。実験概要を図 3.18 に示す。

まず画像集合を入力とし、SfM-MVS 処理で生成した高密度メッシュモデルと、TLS で計測した点群との位置合わせを行い (A3)、メッシュモデル頂点から TLS 点群までの距離をモデル誤差とし、誤差値を対応する TLS 計測点に付加する (A4)。その後、3.5 節で述べた、タイポイントを頂点とする三角形メッシュで表された近似物体表面モデルの各頂点に予測指標値 F_X を付加する (A5)。その頂点に最も近い誤差付き TLS 計測点を見つけ、最後に、予測指標値 F_X を与えるモデル誤差の平均値と標準偏差を算出した (A6)。SfM-MVS 処理には ContextCapture[71]を用いた。

実験には、表 3.1 に示すコンクリート製橋脚と、大学構内の建物を対象として行った。カメラポーズやカメラの性能を変化させても、同様の傾向が推定されるか調査するために、大学構内建物に対しては、2 種類のカメラを用いて計測を行った。

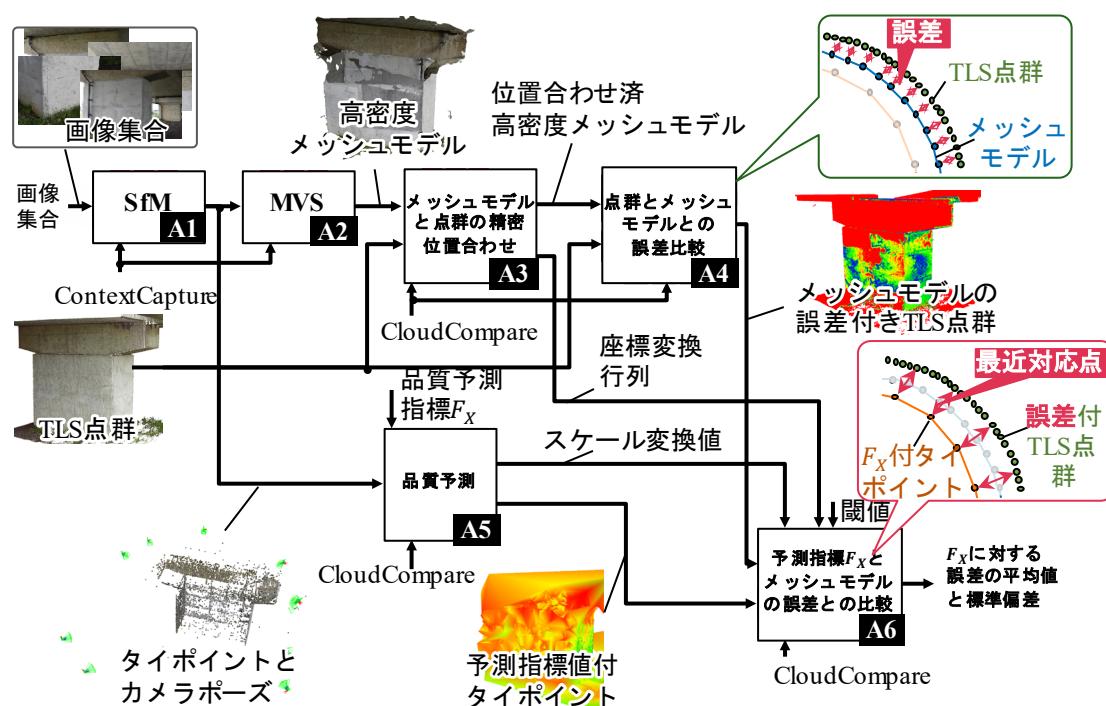
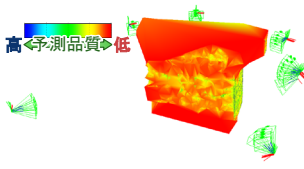
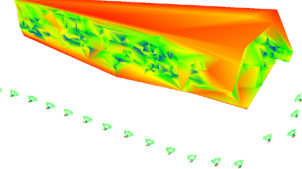
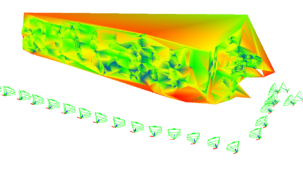
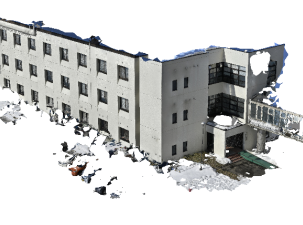


図3.18 品質予測指標の定量的評価実験の概要

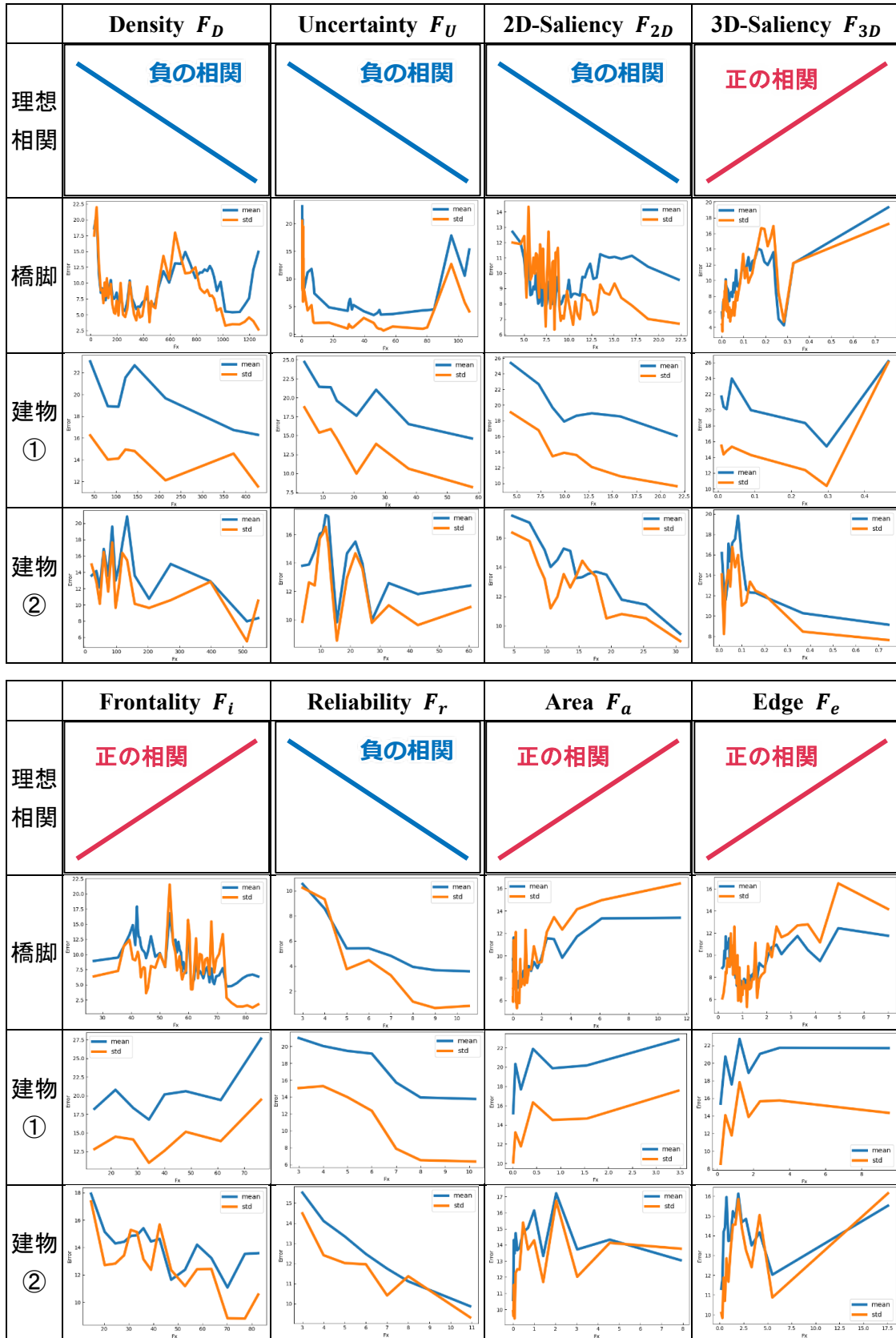
表3.1 実験に用いたカメラと対象

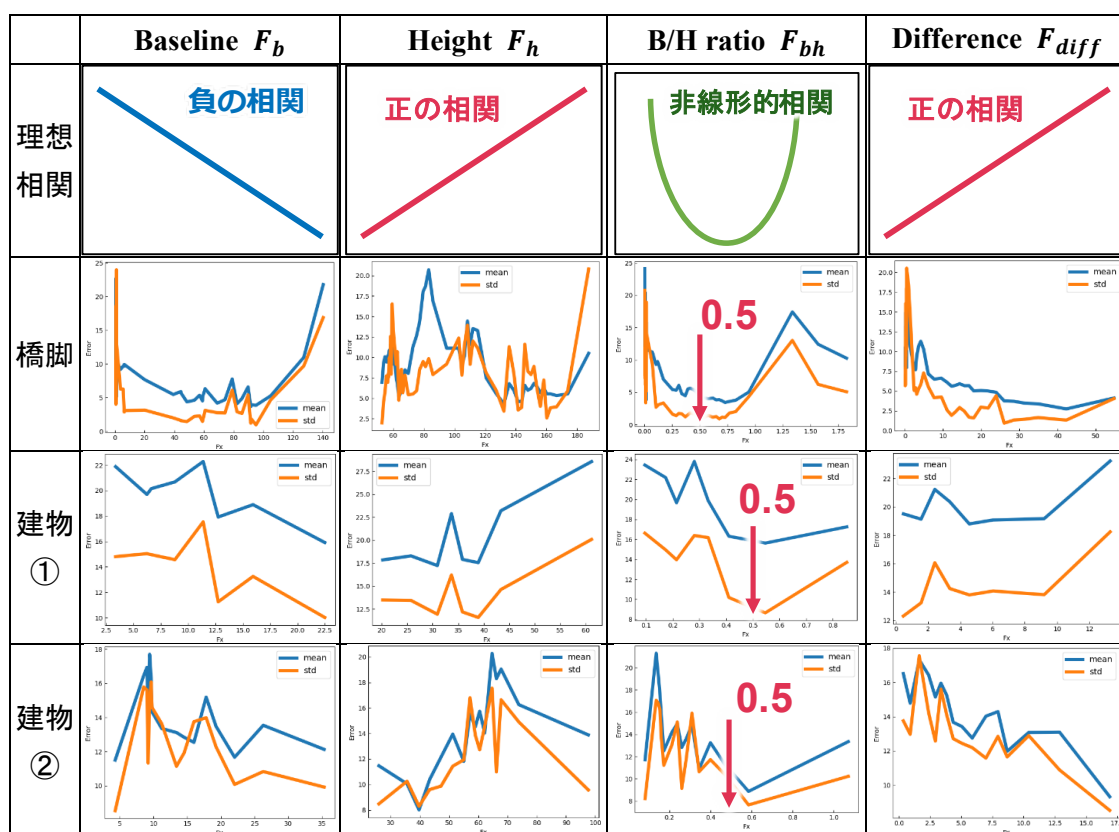
	雁来大橋橋脚	大学構内建物①	大学構内建物②
画像枚数	33 枚	39 枚	46 枚
使用カメラ	Nikon D750	Canon EOS M3	Nikon D750
品質予測結果			
高密度メッシュモデル			

3.6.3.2 評価結果

実験結果を表 3.2 に示す．各グラフの横軸が品質予測指標値，縦軸が最終的な高密度メッシュモデルの誤差，青線が誤差平均，橙線が誤差の標準偏差となる．各品質予測指標の，1 行目には理想とする相関関係を表したグラフ，2 行目は橋脚の結果，3・4 行目が大学構内建物を対象とした実験結果である．

表3.2 定量評価結果





3.6.3.3 考察

表 3.2 に示すように、品質予測指標と F_r は、最終的な誤差平均および標準偏差とで負の相関を持つことがわかる。これはタイポイント 1 点をサポートする、カメラポーズが複数あることで、より信頼性の高い 3 次元上の点が推定されているため、高精度になると考えられる。

また、 F_{bh} は、最終的な誤差平均と標準偏差に対して 2 次関数の相関を持つ。 F_{bh} は 0.5 付近で誤差が最小となり、画像間角度の経験的推奨値として知られている 20–30 度 ($F_{bh} = 0.53$) を反映した結果[70]であり、妥当だと考えられる。

次に、 F_{2D} は画素の輝度勾配を評価したものであり、テクスチャが豊富なコンクリートを多く含む橋脚にはあまり効果がないことがわかるが、低テクスチャ領域を多く含む、大学構内建物に対しては負の相関を持つことがわかる。

また、 F_a および F_e は値が大きい時にやや正の相関があることがある。つまり、疎なタイポイントを形成しているし、近似物体表面モデル上に大きな面を張る領域がやや精度が低下する傾向にある。

一方で、いずれの撮影においても変動が著しく明確な相関が認められない指標、対象や明確な相関が認められない指標、ならびに、期待される相関と逆の傾向を持つ指

標などは使えないと判断し、以上の結果から、 F_{bh}, F_r, F_a, F_e を品質予測指標として、採用する。

3.6.4 品質予測指標の正規化

次に、3.6.2 項の式(3.4)–(3.7), (3.9)–(3.11), (3.14)で導出した各品質予測指 $F_X(i)(X \in D, U, 2D, 3D, r, a, e, bh)$ を、式(3.16)により正規化エネルギー E_X へ変換する。

$$E_X(i) = \begin{cases} L(F_X - \mu_X, \sigma_X), & X \in \{3D, a, e\}; \\ 1 - L(F_X - \mu_X, \sigma_X), & X \in \{D, U, 2D, r\}; \\ 1 - K(F_X, \sigma_X), & X \in \{bh\} \end{cases} \quad (3.16)$$

ただし、 μ_X は F_X の平均値、 σ_X は F_X の標準偏差であり、 $L(F_X - \mu_X, \sigma_X) = 1/(1 + \exp(-2(x - \mu)/\sigma))$ はロジスティック関数、 $K(F_X, \sigma_X) = 1/(1 + (x - 0.5/\sigma)^2)$ は2次関数である。

その後、変換した各 E_X を集計し、形状劣化値 (geometry degradation indicator) E_{gdi} として式(3.17)と(3.18)で評価する。式(3.17)はMauro[57]で提案されたものであり、3.10節で述べる比較実験に用いるため、記載する。 E_{gdi} の値が大きい個所では、MVSで生成したモデル形状の品質低下が予測され、その領域を補完撮影する追加画像が必要となると考えられる。

$$E_{gdi}(i) = (2E_D(i) + 2E_U(i) + E_{2D}(i) + E_{3D}(i))/6 \quad (3.17)$$

$$E_{gdi}(i) = w_r E_r(i) + w_a E_a(i) + w_e E_e(i) + w_{bh} E_{bh}(i) \quad (3.18)$$

ただし、 w_r, w_a, w_e, w_{bh} は撮影フェーズ変更用の重みであり、本手法では、対象となるモデルの被覆率やタイポイントが十分ではない初期撮影時には、 $w_r = w_{bh} = 1/6$ と $w_a = w_e = 1/3$ として、対象のモデルの全域をカバーするカメラポーズを優先的に推定していく。その他の場合は、 $w_r = w_{bh} = w_a = w_e = 1/4$ とする。

3.7 低品質領域の選択手法

3.7.1 概要

次に追加撮影すべき低品質領域の選択を行う。図3.19に示すように、追加撮影によりメッシュモデル上の低品質領域をできるだけ効率的に改善するには、追加撮影画像

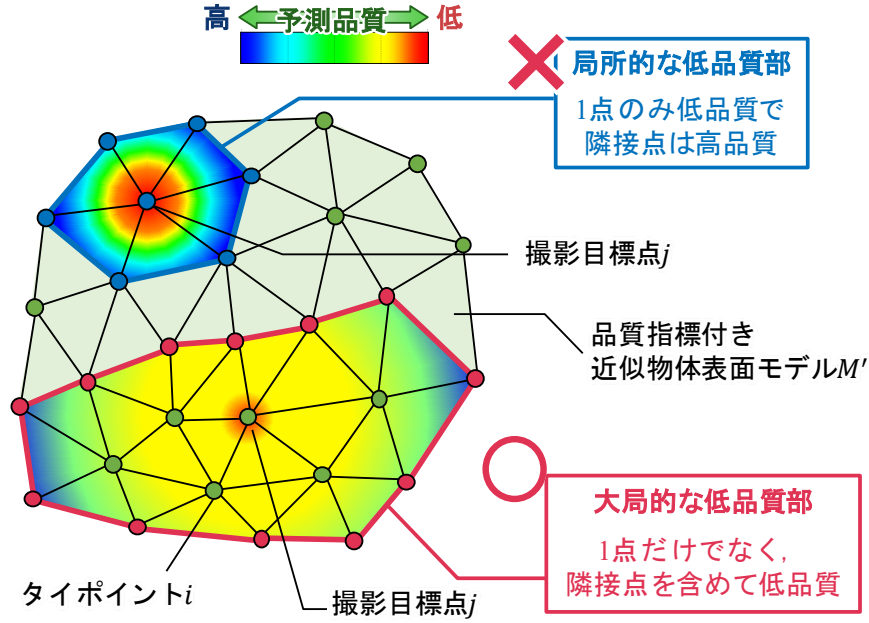


図3.19 低品質領域の選択の概要

内に低品質領域ができるだけ多く含まれるような撮影目標点の発見が好ましい．そのため，局所的な低品質領域ではなく，隣接領域も含め大域的な低品質領域となる部分の選択を行う．本手法では，推定された品質予測指標をもとに，追加撮影時のこの撮影目標点の選択を，数理計画法を用いて定式化した．

3.7.2 数理計画法を用いた定式化

まず，近似物体表面モデル M' 上の各タイポイント $i(\in P)$ に対して，算出された形状劣化度 $E_{gdi}(i)$ を属性値 w_i として付加する．そして，撮影目標点 $j(\in P)$ と， M' 上の j の近傍領域内に含まれる他のタイポイント i のもつ形状劣化度から i の周辺領域における品質低下の程度を予測し，品質低下が大きい領域を撮影目標点として，優先的に s 枚追加撮影する．本手法では，この追加撮影の際の s 個の撮影目標点を，以下の式(3.19)–(3.22)の最適化問題の解として，タイポイント集合 P の中から選択する．

$$\underset{\{x_j\}, \{z_i\}}{\text{maximize}} \quad \sum_{j \in P} \left(\frac{(\sum_{i \in P} w_i z_i) + w_j x_j}{(\sum_{i \in P} z_i) + x_j} \right) \quad (3.19)$$

$$\text{subject to} \quad z_i \leq \sum_{j \in P} a_{ij} x_j \quad (3.20)$$

$$\sum_{i \in P} z_i \geq 2 \quad (3.21)$$

$$\sum_{j \in P} x_j = s \quad (3.22)$$

$$x_j \in \{0,1\} (\forall j \in P)$$

$$z_i \in \{0,1\} (\forall i \in P)$$

ここで、決定変数 x_j, z_i は式(3.23)および(3.24)の意味を持つ.

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{タイポイント}j\text{を撮影目標点として採用する} \\ 0, & \text{採用しない} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{他のタイポイント}i\text{が撮影目標点}j\text{の近傍点} \\ & \text{としてカバーされる} \\ 0, & \text{採用しない} \end{cases} \quad (3.24)$$

ここで、式(3.20)のパラメータ a_{ij} は、撮影目標点の選択時に、タイポイント i を撮影目標点 j の周辺近傍点として評価すべきか否かを規定した 0-1 変数であり、式(3.25)で定義される.

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & i,j\text{が 3.7.3 項の条件 1 かつ 2 を満たす} \\ 0, & \text{満たさない} \end{cases} \quad (3.25)$$

式(3.19)の目的関数は、追加画像の撮影目標点およびその周辺近傍点として選択された全てのタイポイントの形状劣化度の平均値を表している. また式(3.20)は、タイポイント i が、撮影目標点 j の近傍点としてカバーされるには、 i をカバー可能な撮影目標点 j が最低 1 点は存在しなければならない制約条件である. 式(3.21)は、撮影目標点 j がカバーする近傍点 i は、少なくとも 2 点は必要である制約条件である. さらに式(3.22)は、追加撮影で画像を一度に s 枚追加する条件を意味する.

なお本手法では、式(3.19)–(3.22)の最適化問題の近似解を貪欲法により算出し、追加撮影画像の目標点を決定している.

3.7.3 近傍点の選択条件

前項で示した、最適化式の条件式 1, 2 を下記に述べる.

条件 1 : エッジ長さ $|e_{ij}|$ が τ_d 以下

図 3.20(a)に示すように、タイポイント $i, j (\in P)$ 間が M' 上で隣接し、かつそのエッジ

長 $|e_{ij}|$ が長さ閾値 τ_d 以下である場合、真となる。この条件は、隣接しているが、エッジ距離が極端に長い隣接点の形状劣化度は評価対象から外すための条件である。なお τ_d は、 M' の全エッジ長さの平均 μ と標準偏差 σ から $\tau_d = \mu + 3\sigma$ により算出した。

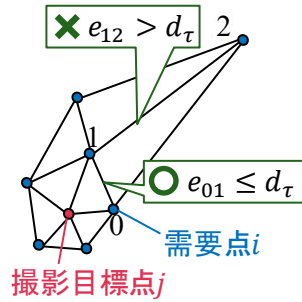
一方、条件2については、近似物体表面モデルのメッシュの位相を考慮した条件2a、もしくは既存画像の撮影範囲との類似性を考慮した条件2bのいずれかを用いる。

条件2a：撮影目標点から k-ring 以内

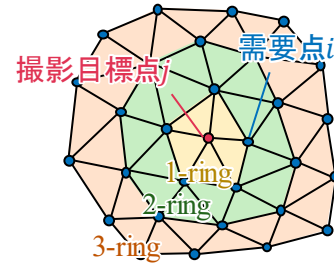
図3.20(b)に示すように、近似物体表面モデル M において、撮影目標点 j から M 上の k-ring 以内にタイポイント i が存在するとき真となる。

条件2b：撮影目標点から平均 FOV 高さ h_{FOV} の1/2以内

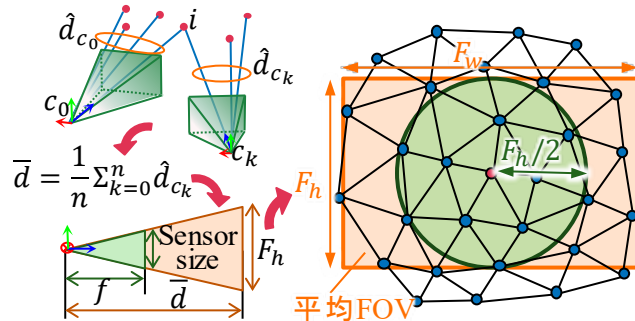
図3.20(c)に示すように、各カメラ c_k に対して、可視なタイポイントまでの平均距離 $\hat{d}_{c_k}$ を算出する。その後、 $\hat{d}_{c_k}$ の全カメラに対する平均距離 $\bar{d}$ を算出し、焦点距離 f およびセンササイズから平均 Field of View (FOV)の高さである h_{FOV} を算出する。撮影目標点 j を中心とした半径 $h_{FOV}/2$ 以内の円領域内で、かつタイポイント j に i が連結している場合、真となる。



(a) エッジ距離条件



(b) k-ring 条件



(c) 平均 FOV 高さによる選択条件

図3.20 近傍点の選択条件

3.8 追加撮影カメラポーズの推定手法

3.8.1 概要

前節で選択した低品質領域を基に、次に撮影すべき領域をカバーする追加撮影用カメラポーズの推定を行う。本手法は生成した撮影位置候補領域内で評価関数に基づいて自動決定する。ただし、手持ちカメラ撮影を前提とし、既撮影位置の水平面からの高さ・物体までの距離とほぼ同等な値をもつ追加撮影位置を決定するものと仮定した。以下に手順を述べ、次項より各処理について詳細に述べる。

- (1) カメラ位置候補の生成
- (2) 最適カメラ位置の選択
- (3) 最適カメラ姿勢の推定

3.8.2 撮影位置候補の生成

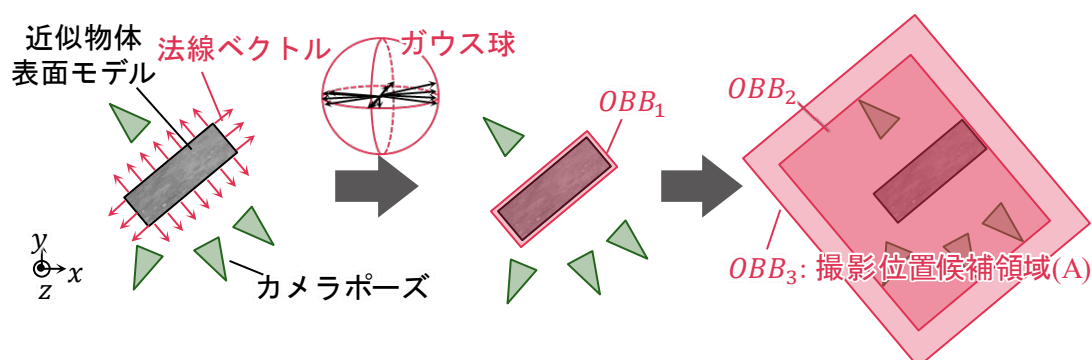
下記の手順で撮影位置候補の生成を行う。

(A) OBB による撮影位置候補領域の算出

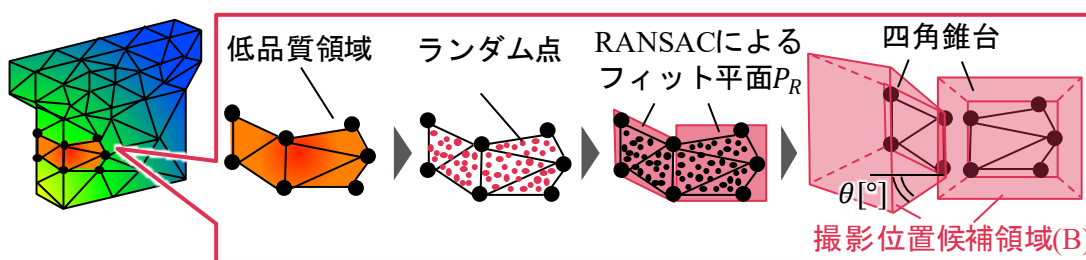
まず追加撮影のためのカメラ位置の候補領域となる OBB (Oriented Bounding Box) を、近似物体表面モデルから推定する。SfM で出力されるモデル座標系には任意性があるため、水平面を手動指定し、その法線ベクトルを z 軸とする。次に図 3.21(a) に示すように、近似物体表面モデル M' 上の各三角形の法線ベクトルを推定し、 z 軸以外の方向の法線ベクトルをガウス球に投影する。さらに、ガウス球上で Mean shift 法[72]から OBB の主軸となる x 軸と y 軸を決定し、 M' を内包する OBB_1 を生成する。次に OBB_1 と主軸が同一で、既撮影カメラ位置を内包する最小体積の OBB_2 を生成する。最後に、追加撮影用カメラ位置の設置自由度を拡げるため、 OBB_1 の x, y 軸方向に幅を α_{xy} 倍(本手法では $\alpha_{xy} = 1.2$)し、また手持ちカメラ撮影の制約を考慮し、 z 軸方向に α_z 倍(本手法では $\alpha_z = 0.8$)した OBB_3 を生成し、撮影位置候補領域(A)とする。

(B) 低品質領域に基づいた撮影位置候補領域の算出

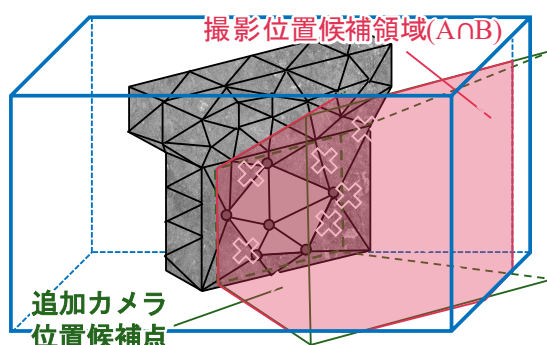
次に、前節で選択された低品質領域に基づき、追加撮影のカメラ位置候補領域を RANSAC[24]に基づいて推定した平面を用いて生成する。低品質領域を構成するメッシュ頂点のタイポイントのみに対して、RANSAC による平面フィットを行っても、点数が少なく適切な平面を推定できない。そのため、まず図 3.21(b)のように、メッシュ



(a) OBB による撮影位置候補領域の算出



(b) 低品質領域に基づいた撮影位置候補領域の算出



(c) 撮影位置候補の算出

図3.21 撮影位置候補の生成方法

面分内にランダムな点を多数生成し、これらの点群と頂点に対して、平面 RANSAC を繰り返すことによって、低品質領域にフィットする複数平面を抽出する。これにより、複数形状を持つ低品質領域を複数に分割した各領域で追加撮影カメラポーズを求めることが可能となる。その後、各複数平面の領域の主軸に平行で、領域に外接する長方形領域 P_R を生成する。次に、 P_R の 4 境界線を通り P_R に垂直な平面から外側に角度 $\theta[^\circ]$ だけ傾いた 4 境界面と P_R から四角錐台を定義し、この錐台内の領域を、低品質領域を改善する追加撮影位置候補領域(B)とする。

(C) 撮影位置候補の生成

最後に, 図 3.21(c)に示すように, これらの領域(A)と(B)の積領域($A \cap B$)内において, ランダムな位置をとる点を, 指定数だけ生成し, その点集合をカメラ位置候補集合 $\mathcal{C} = \{c_i\}$ とする.

3.8.3 最適撮影カメラポーズの推定

$\mathcal{C}$ 内の各カメラ位置 c_i に対し, 式(3.26), (3.28)で定義される2種類の追加撮影位置の最適評価指標を計算し, 式(3.29)の目的関数を最小化する位置を最適追加撮影位置 c_{NBV} として選択する.

(A) 正対撮影の評価指標

対象物上で他画像と共有可能性の高い自然特徴量を抽出するには, 正対撮影が適している. そこで, 図 3.22(a)に示すように, 追加撮影位置 c_i が低品質領域に正対する位置にどの程度近いかを評価するため, 平面 P_R の法線 $\mathbf{n}$ と低品質領域の重心点 $\mathbf{p}$ から, 式(3.26)で定義される指標 $NBV_{frontality}^i$ を計算する. この指標値が低いほど, 低品質領域を正対撮影するカメラ位置となる.

$$NBV_{frontality}^i = 1 - \left(\mathbf{n} \cdot \frac{\mathbf{c}_i - \mathbf{p}}{\|\mathbf{c}_i - \mathbf{p}\|} \right) \quad (3.26)$$

(B) 基線比の評価指標

図 3.22(b)に示すように, 追加した画像が既撮影カメラとのネットワークを確保し, SfMによりそれらの位置・姿勢が安定に推定できるようにするため, 既撮影カメラの中で低品質領域を最もカバーしているカメラ位置 c_r と, 追加撮影位置 c_i , 領域重心点 $\mathbf{p}$

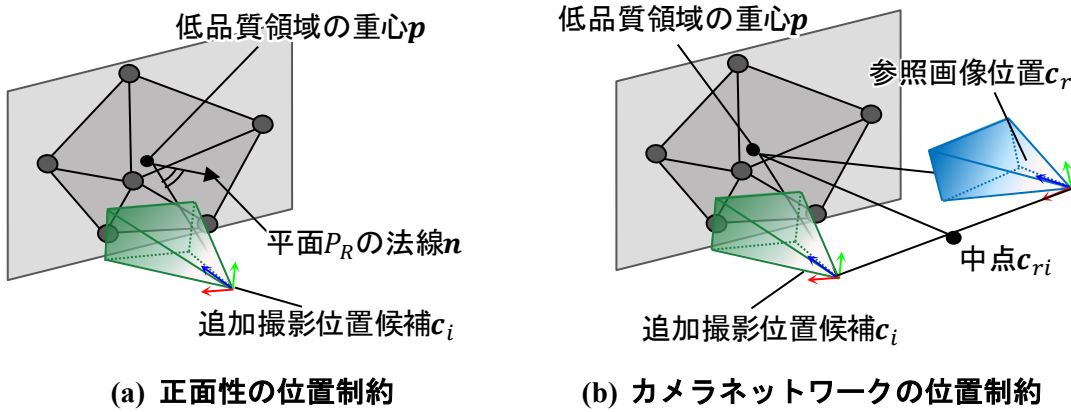


図3.22 最適撮影位置評価指標

の位置関係が、MVS において適当な位置関係かを評価した基線比を式(3.27)で求める。基線比は、2 画像間の距離と、画像から対象までの距離との比であり、SfM-MVS の経験則である画像間角度 20-30deg 程度するとき、MVS 再構成が最良となることが知られている。この経験則を反映した基線比の評価指標 NBV_{BH}^i を式(3.28)で評価する。

$$BH^i = \left| \frac{\|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_r\|}{\|\mathbf{c}_{ri} - \mathbf{p}\|} - 0.536 \right| \quad (3.27)$$

$$NBV_{BH}^i = \frac{BH^i - BH_{max}}{BH_{min} - BH_{max}} \quad (3.28)$$

式(3.26)および(3.28)の評価指標の重み付き和を目的関数(3.29)とし、これが最小となる位置 $\mathbf{c}_i$ を、最適追加撮影位置 $\mathbf{c}_{NBV}$ として導出する。

$$\mathbf{c}_{NBV} = \arg \min_{\mathbf{c}_i \in C} (w_f NBV_{frontality}^i + w_{BH} NBV_{BH}^i) \quad (3.29)$$

ただし、 w_f , w_{BH} は重みであり、本報では $w_f = w_{BH} = 1/2$ とした。

最後に、式(3.29)で選択された $\mathbf{c}_{NBV}$ から、低品質領域重心点 $\mathbf{p}$ へのベクトルを、追加撮影の最適カメラ姿勢として決定する。

3.8.4 複数カメラポーズの推定

前項では、式(3.27)の $\mathbf{c}_r$ を、選択した低品質領域内で最多のタイポイント撮影点数をもつ既撮影画像位置として $\mathbf{c}_{NBV}$ を推定していた。しかし、式(3.29)で $\mathbf{c}_{NBV}$ が $\mathbf{c}_r$ のみに依存し、さらに追加される画像が 1 カ所の低品質領域に対し一枚のみとなるため、低品質領域 1 カ所に対する大幅な改善ができない場合があった。

そこで、参照画像への依存性を解消するために、単一の低品質領域に対し、反復的に複数の追加撮影位置を導出する。式(3.27)の参照画像位置 $\mathbf{c}_r$ に $\mathbf{c}_{NBV}$ を代入し、式(3.29)より再度、最適追加撮影位置 $\mathbf{c}'_{NBV}$ を求める。これを反復し、分割された低品質領域 1 カ所に対しても、必要に応じて、既存カメラネットワークとの接続を確保できる可能性が高い複数視点の追加撮影カメラポーズを求めることが可能となる。

3.9 画像追加終了条件

追加撮影時の画像追加終了条件を決定するために、実際に最終的な高密度モデルの

品質と終了条件の値の変動を調査し、妥当な条件の選択を行った。

3.9.1 カメラ位置集合間のレジストレーション

一般に, SfM で得られるタイポイントとカメラポーズの座標系は処理毎に一定せず, 画像追加ごとにその座標系が異なってしまう, 画像追加前後の品質予測指標の変位などを正確に比較することが難しい. そこで, この座標系を一致させるため, 初期 (0 回目) 撮影画像集合に対して SfM が算出したカメラ位置集合 C_0 を基準として, n 回目の撮影画像集合のカメラ位置集合 C_n との間で, 同一カメラ位置が一致するようスケール可変型レジストレーションを行った.

なお, SfM によって誤ったカメラポーズが推定されてしまった場合, それらの影響を受け, 誤った位置合わせが行われてしまう場合がある. そこで, RANSAC を用いた頑健なレジストレーションを行う. 下記に手順を述べる.

- (1) 各カメラ位置集合 C_0 と C_n の中から, 同一画像名を持つカメラ位置ペア (c_i^0, c_j^n) を生成する. ただし, $c_i^0 \in C_0, c_j^n \in C_n$ である.
- (2) (c_i^0, c_j^n) の中から 3 ペア選択し, Horn *et al.*の手法[73]を用いてスケール可変型レジストレーションを行い, 算出した座標変換行列 T を C_n に適用する.
- (3) c_i^0 と座標変換された c_j^n 間 to
- (4) の距離 d_{ij} を計算し, その中央値を合致度 $d_{consensus}$ として, 算出する.
- (5) (1)–(3)の処理を反復し, 合致度が最小となる座標変換行列 T_{min} を算出し, C_n に適用することで, C_0 と C_n の位置合わせを行う.

3.9.2 画像追加の終了条件候補

画像追加の終了条件候補として, 次に示す候補(A)–(C)を調査した.

(A) 近似物体表面モデル間の変位

n 回目の画像追加直後に生成した近似物体表面モデルの三角形メッシュ M'_n と, $n+1$ 回目の画像追加時の近似物体表面モデルのメッシュ M'_{n+1} 間の距離平均値と標準偏差を評価する.

(B) 品質予測指標平均値間の差分

画像追加 n 回目の近似物体表面モデル上に記録した品質予測指標値 $F_X^n (X \in R, a, e, bh)$ の平均値 $\hat{F}_X^n$ と, 画像追加 $n+1$ 回目の品質予測指標値 F_X^{n+1} の平均値 $\hat{F}_X^{n+1}$ との差分 $|\hat{F}_X^{n+1} - \hat{F}_X^n|$ を評価する.

(C) 低品質領域における品質予測指標値の改善度

まず画像追加 n 回目の近似物体表面モデル上で選択した低品質領域の品質予測指標値 $LF_X^n (X \in R, a, e, bh)$ の平均値 $\widehat{LF}_X^n$ を求める。次に、低品質領域に含まれるタイポイント P_{LQ}^n に対する最近傍点 1 点を、画像追加 $n+1$ 回目の近似物体表面モデル上のタイポイント P^{n+1} の中から選択し、選択した最近傍点の品質予測指標値 LF_X^{n+1} の平均値 $\widehat{LF}_X^{n+1}$ を求め、それら間の差 $|\widehat{LF}_X^{n+1} - \widehat{LF}_X^n|$ を低品質領域の改善度として評価する。

以上の評価値の変動パターンを、画像追加の各回で観察し、追加撮影を終了する条件の検討を行った。

3.9.3 終了条件の検討実験と考察

図 3.23 に示す雁来大橋橋脚を対象とした画像集合に対し、前節までで述べた最適画像計画手法を適用し、画像追加を 7 回反復した結果に対して、前節の終了条件(A)–(C)の変動パターンを観察した。結果を図 3.24–図 3.26 に示す。

結果より、条件(A)–(C)のいずれも画像追加に従って、値が徐々に減少していることが確認できる。しかし図 3.24 に示すように、条件(A)は近似物体表面モデルの変位の平均値や標準偏差が減少するものの、画像追加前後で同一低品質領域が変化しなかった場合、変位が小さくなり、低品質領域の改善前に誤って画像追加の終了判定をしてしまい、再構成モデルが低品質のまま残される可能性がある。また、図 3.25 に示す品質予測指標平均値間の差分(B)は、追加回数に応じ徐々に変化しているが、変化量が小さく終了条件の見極めが困難である。一方、図 3.26 に示す条件(C)は、低品質領域の品質予測指標値の改善度の変動であるため、選択した低品質領域の品質向上を直接的に意味しており、それらの偏差が小さいことは、画像追加がモデル精度の向上にあまり寄与しなくなった状態を示すものと解釈できる。

以上の結果から、本報では条件(C)の中でも、画像追加に従って減少傾向をもつ F_a, F_e に対する改善度を観察し、改善度が最大値の $1/3$ を下回った時に画像追加を終了する

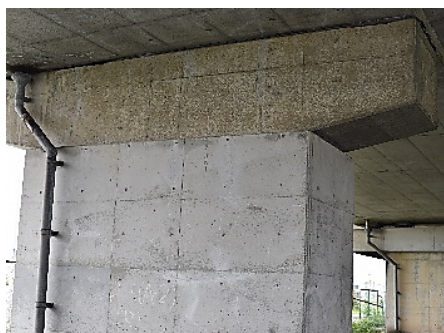


図3.23 実験対象

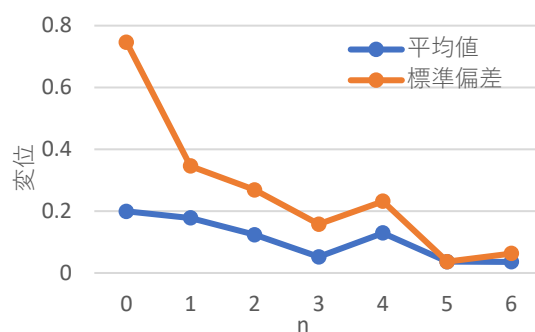


図3.24 近似物体表面モデルの変位 (条件 a)

条件に設定した。

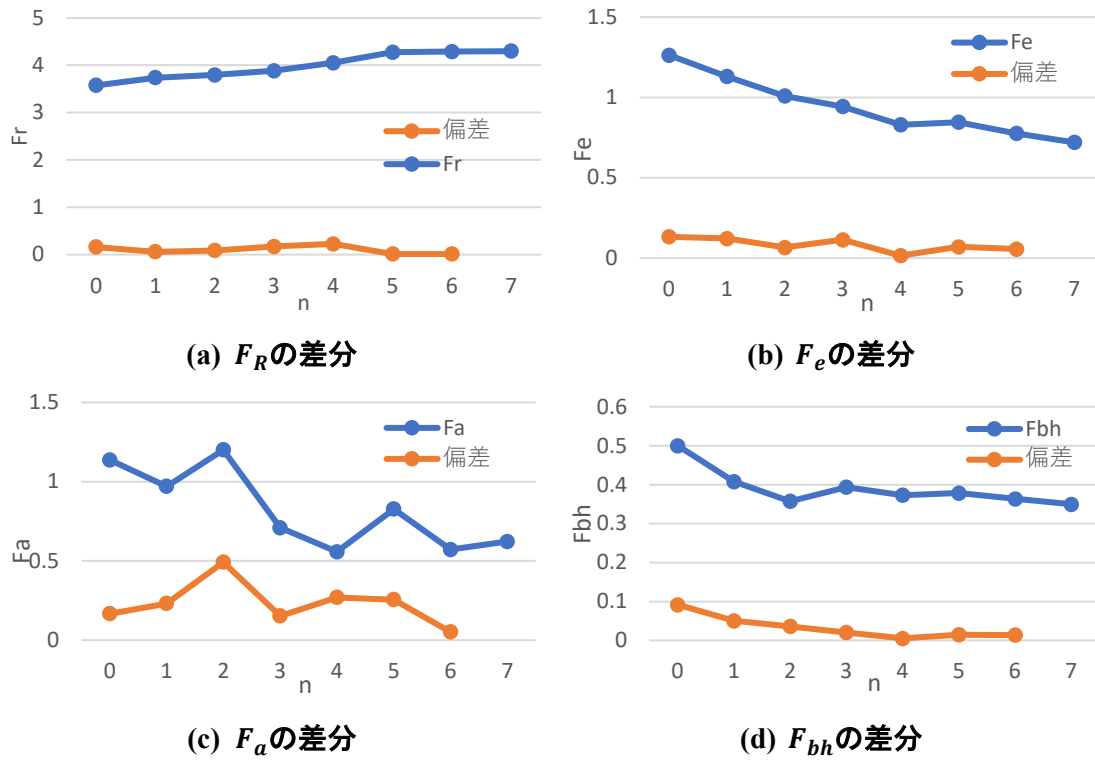


図3.25 品質予測指標平均値間の差分 (条件 b)

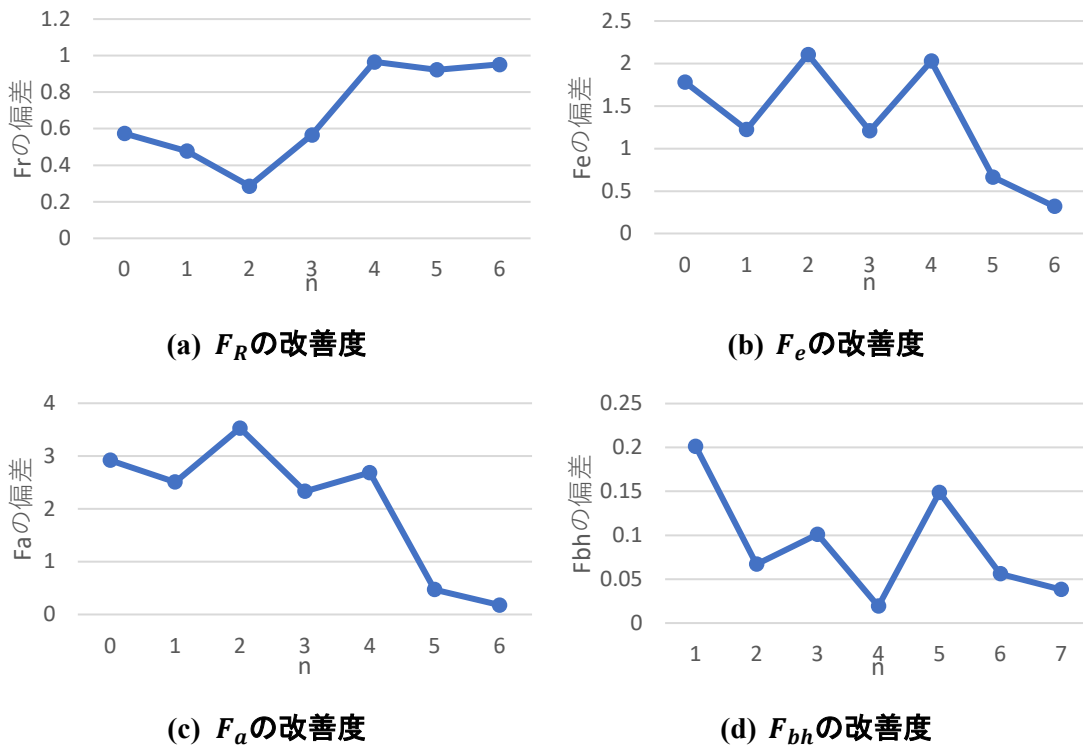


図3.26 低品質領域における品質予測指標値の改善度 (条件 c)

3.10 最適撮影カメラポーズ推定結果とその評価

3.10.1 概要

本節では、任意の環境で事前に撮影した画像集合に対して、提案する最適撮影計画手法を適用し、その有用性検証を行った。用いた計算機の仕様ならびに開発に使用したライブラリを表 3.3 に示す。なお、開発環境は Visual Studio 2017 Professional[74]、開発言語は Microsoft Visual C++を用いた。

表3.3 計算機仕様ならびに用いたライブラリ

SfM-MVS 用の計算機仕様

OS	:	Windows 10 Education
CPU	:	Intel® Xeon® E5-2360 v3 @ 2.40GHz
RAM	:	128.0 GB

追加撮影用の計算機の仕様

OS	:	Windows 10 Education
CPU	:	Intel® Core™ i9-9900K @ 3.60GHz
RAM	:	64.0 GB

ライブラリ

CloudCompare [23]	:	ver. 2.9.1
Qt [75]	:	ver. 5.14.2
OpenCV [76]	:	ver. 3.4.1
PCL [30]	:	ver. 1.8.1
Tetgen [69]	:	Ver. 1.5

検証実験では、モデル化対象をその周辺から密に撮影した元画像集合を U 、ランダムに選択した数十枚を初期画像集合 I_0 とし、提案手法により最適な追加撮影カメラ位置を導出した。次に、算出された最適カメラ位置・姿勢に最も近いカメラポーズをもつ追加画像数枚を画像群 $U - I_0$ 画像内から選択し、 I_0 に追加し撮影済み画像集合 I_1 を生成する。以上の画像追加を数回反復していくことで、モデル品質を逐次的に改善していく。本実験では、図 3.27 に示すように、橋脚および大学構内の建物を撮影した我々が作成したデータセット、および、家屋を撮影した既存の公開データセット[77]を用いた。

3.10.2 橋脚を対象とした最適撮影カメラポーズ推定結果

3.10.2.1 概要

本項では、図 3.27(a)に示す雁来大橋道路橋のコンクリート橋脚を対象とし、画像追加による効果、低品質領域の選択結果の評価、追加カメラポーズの推定結果、TLS 点群との定量評価結果、初期画像に対する依存性の評価結果を述べる。対象の概略寸法は約 $1.8 \times 7.0 \times 4.9m$ である。

3.10.2.2 画像追加による効果

まず、図 3.28 に示すような、事前に密に撮影した全 110 枚の画像集合から、橋脚側部の画像を恣意的に削除した 86 枚の初期画像集合を対象とし、画像追加によるモデル精度向上の効果を定性的に評価した。画像追加前の SfM 結果と高密度メッシュモデルを図 3.29(a)に、各品質予測指標を近似物体表面モデル上にレンダリングした結果を図 3.30 に示す。橋脚側部のタイポイントが生成されておらず、再構成されたモデル平面も穴が開き、かつ、断面形状の平面度も劣化していることがわかる。さらに、図 3.30 に示すように、再構成されていない領域は E_{gdi} より品質が低下していることが確認でき、特に F_e, F_a が顕著に反応していることがわかる。

次に、品質低下領域を改善できるような、橋脚側部を撮影した画像カメラポーズを追加した。追加した画像は図 3.28 に示すカメラポーズの計 6 枚で、初期画像に追加画像を加えて生成したタイポイントと高密度メッシュモデルを図 3.29(b)に、各品質予測指標を近似物体表面モデル上にレンダリングした結果を図 3.31 に示す。画像追加により、穴が消え、断面形状の平面度も著しく向上しており、さらに、タイポイントも十分に生成されていることが確認できる。また、図 3.31 に示す品質予測結果についても、画像前よりも予測品質結果が向上していることが確認できる。

以上の結果から、タイポイントおよび MVS による最終的な高密度メッシュモデルの再構成領域を増加させる画像追加は、品質向上に効果的で、モデル化対象をタイポ



(a) 橋脚



(b) 大学構内建物



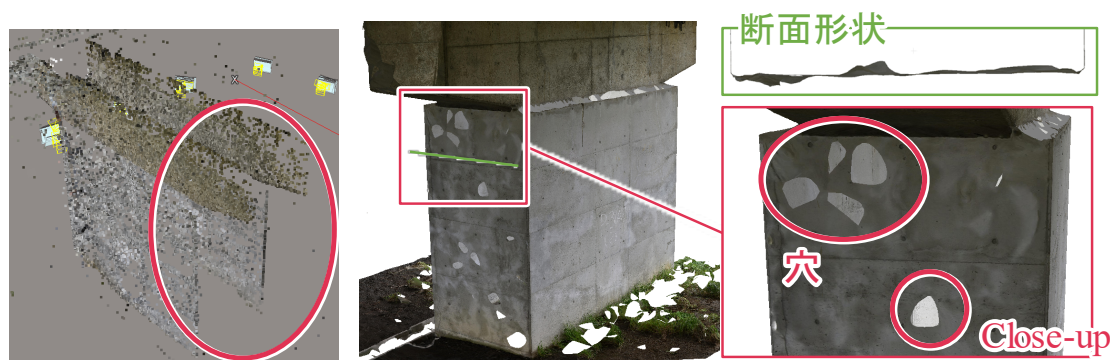
(c) 家屋

図3.27 モデル化対象

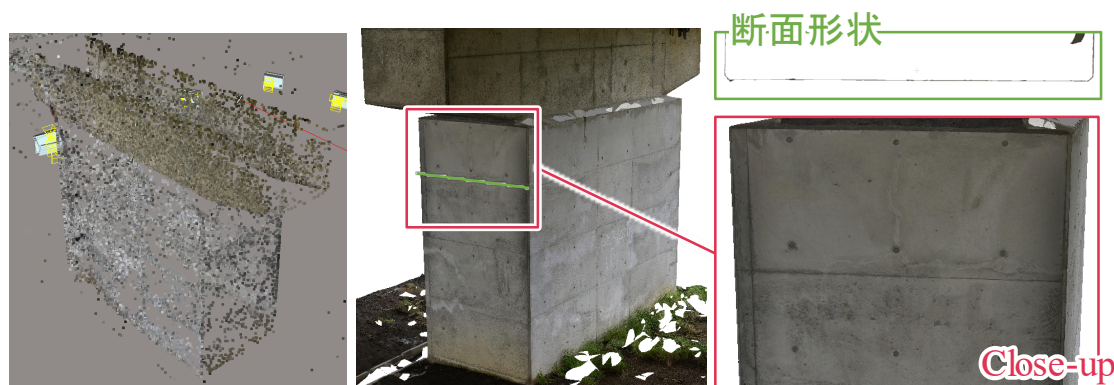
イントで十分覆うような撮影位置を推定することが必要条件であると考えられる。また、画像追加前で計測ができておらず再構成されていない領域は、 E_{gdi} の値が高い、つまり、品質が低いという結果が得られており、さらに画像追加後の品質予測の結果は改善していることが確認できる。この結果から、品質予測指標が MVS を行わずに最終的な高密度モデルの品質を予測するのに十分妥当な結果であることを示した。



図3.28 タイポイントとカメラポーズ



(a) 画像追加前のタイポイントと高密度メッシュモデル



(b) 画像追加後のタイポイントと高密度メッシュモデル

図3.29 画像追加による品質向上効果

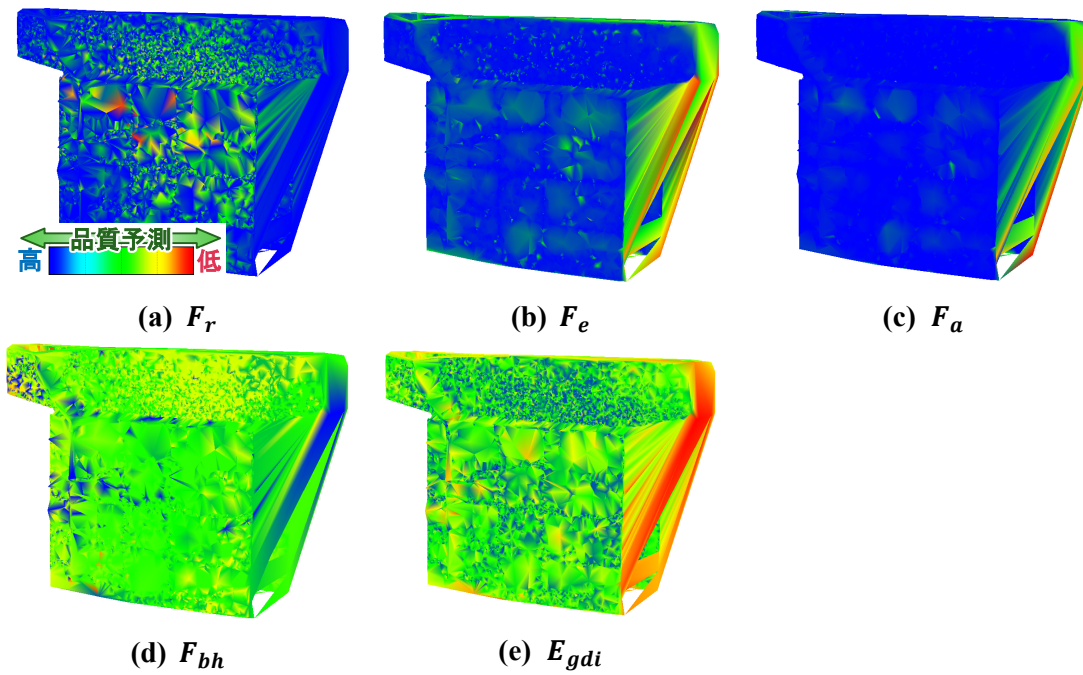


図3.30 画像追加前の品質予測結果

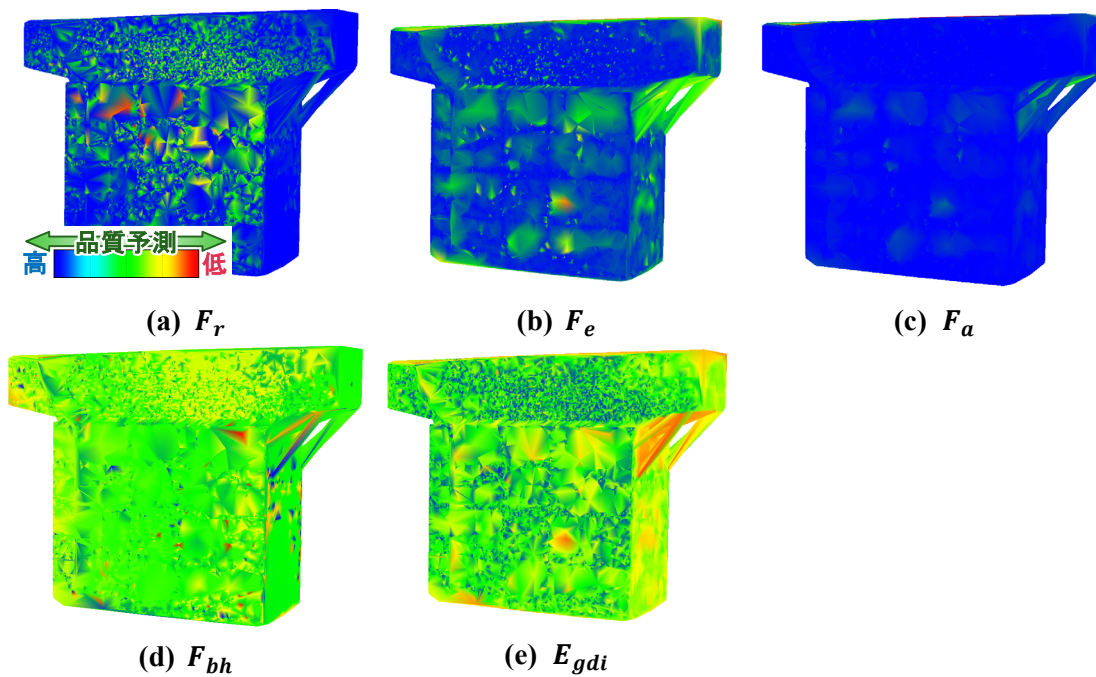


図3.31 画像追加後の品質予測結果

3.10.2.3 低品質領域の選択結果

次に、コンクリート製の橋脚を対象に、低品質領域の選択結果を定量的評価と、3.7.3項で述べた近傍点の選択条件を比較した。密に撮影した画像集合から33枚の初期画像

集合を選択した．このときのタイポイントとカメラポーズを図 3.32 に，予測品質を図 3.33 に示す．結果から，橋脚右上部の予測品質が低く(赤く)なっていることが確認できる．次に，撮影目標点 $s = 3$ ，撮影目標点から 1-ring, 2-ring, 3-ring (条件 2a)を用いた低品質領域の選択結果を図 3.34 に，平均 FOV 高さをを用いた低品質領域選択結果を図 3.35 に示す．両手法とも選択した領域の品質が，他の領域と比べて低いことが確認できる．

次に，両手法で選択された右上部を撮影した追加画像を 1 枚のみ選択し，画像追加を行った．画像追加後のタイポイントとカメラポーズを図 3.36 に，画像追加前後の高密度メッシュモデルを図 3.37 に示す．この結果より選択した低品質領域に従って，追加撮影することによって，高密度メッシュモデルの形状品質の向上に有効であることが示された．なお，低品質領域の選択時に 3-ring の選択条件を用いた場合の処理時間は 0.7 sec，平均 FOV 高さをを用いた場合は 2.4 min，初期画像集合 33 枚に対する SfM の処理時間は 71 sec，MVS に 22 min だった．これらの結果より，以降の実験では，処理速度を考慮し低品質領域の選択条件は k-ring を用いる．

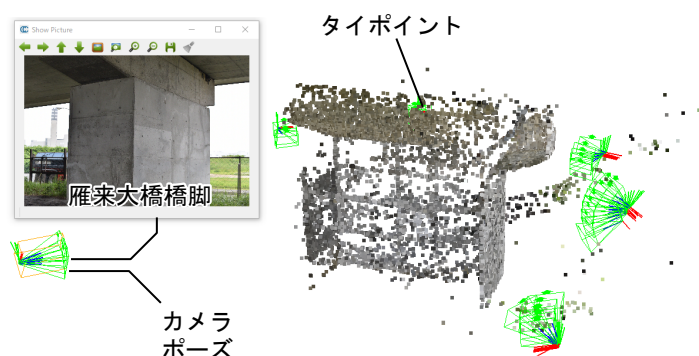


図3.32 画像追加前のタイポイントとカメラポーズ

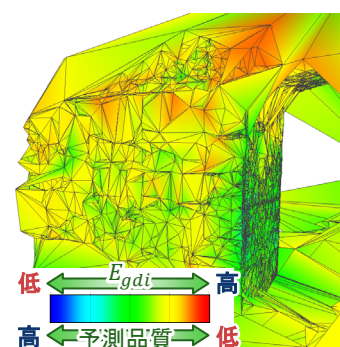
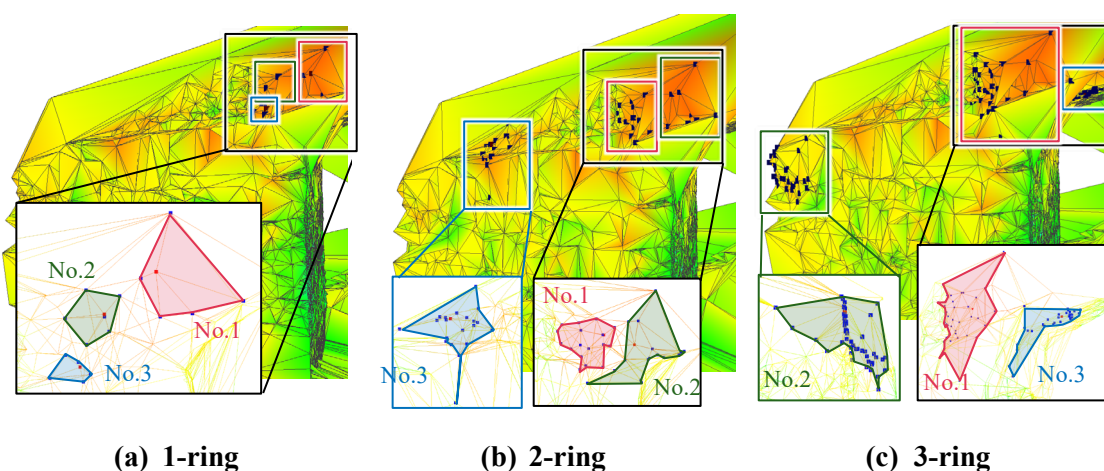


図3.33 予測した品質



(a) 1-ring

(b) 2-ring

(c) 3-ring

図3.34 k-ring を用いた低品質領域選択結果

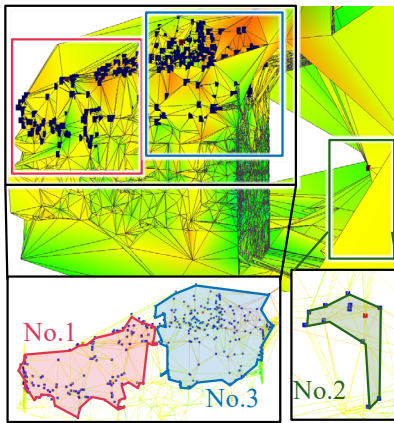


図3.35 平均 FOV 高さを用いた低品質領域選択結果

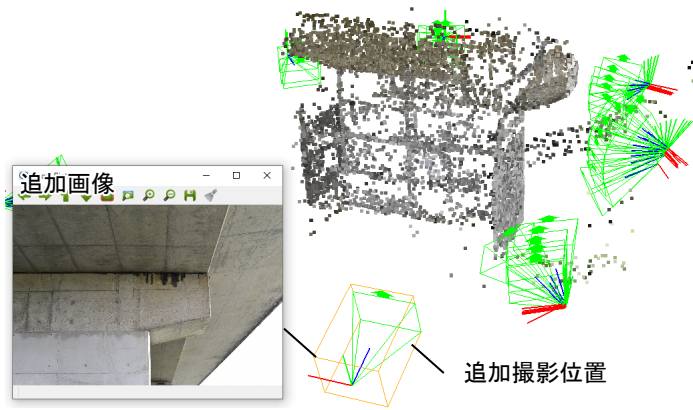


図3.36 画像追加後のタイポイントとカメラポーズ



(a) 画像追加前

(b) 画像追加後

図3.37 画像追加前後の高密度メッシュモデル

3.10.2.4 追加カメラポーズの推定結果

雁来大橋橋脚外周を密に撮影した 171 枚の元画像集合 U から、ランダムに選択した 30 枚を初期画像集合 I_0 とし、提案手法により最適な追加撮影カメラ位置を導出した。 I_0 から生成した近似物体表面モデル、品質予測結果、低品質領域一カ所あたり、一つの追加撮影用カメラポーズ推定結果および、低品質領域一カ所あたり複数の追加撮影用カメラポーズを推定した結果を図 3.38 に示す。

次に、算出された最適カメラポーズに最も近い撮影画像を画像群 $U - I_0$ 内から選択し、 I_0 に追加し撮影済み画像集合 I_1 を生成する。 I_0 、品質領域一カ所あたり、一つの画像追加を 7 回反復し、最終的に 72 枚の画像から各々生成した高密度メッシュモデル、ならびに、品質領域一カ所あたり 2 枚の画像追加を 5 回反復し、最終的に 92 枚の画像

群 I_5 から生成した高密度メッシュモデルを図 3.39 に示す。両画像追加手法とも初期画像集合と比較して、再構成領域が増加したことが確認でき、推定したカメラポーズが正しい推定だったと考えられる。

低品質領域一カ所あたり単一画像追加と複数枚画像追加の比較のために、一回目の画像追加後の高密度メッシュモデルを図 3.40 に、画像追加ごとに生成した高密度メッシュモデルと TLS 点群との平均誤差の推移を図 3.41 に示す。単一の画像追加に比べ、複数の画像追加では総画像枚数が増加したが、1 回あたりの画像追加枚数は増加したため、1 回目の画像追加で再構成モデルの誤差が大幅に減少したことがわかる。このことから、複数枚画像追加は、初期の画像追加段階で効果があることがわかった。

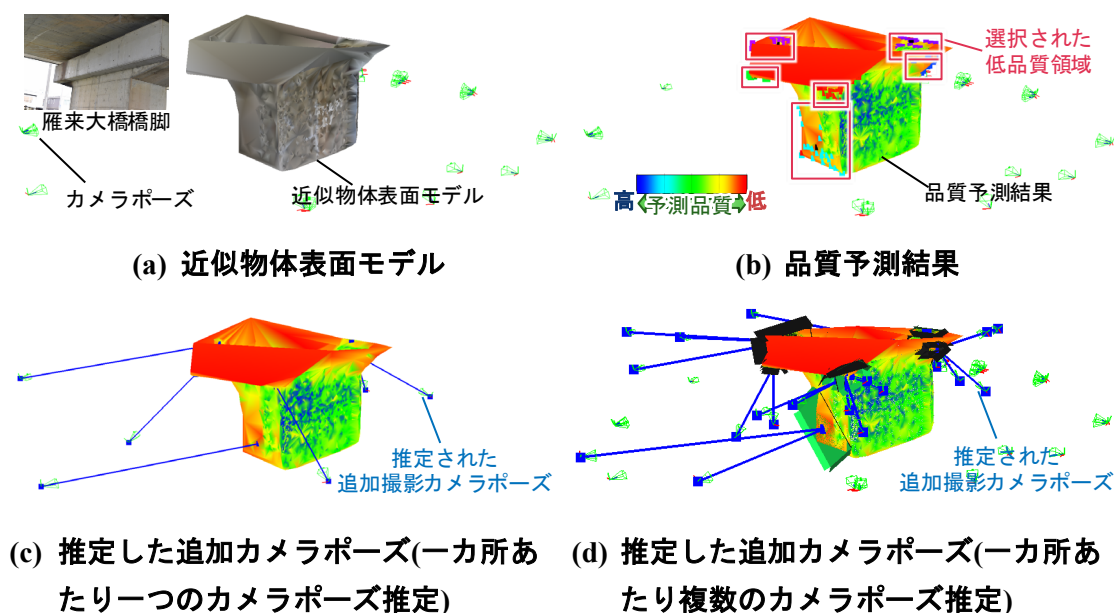


図3.38 品質予測および追加カメラポーズ推定結果



図3.39 最終的な高密度メッシュモデル

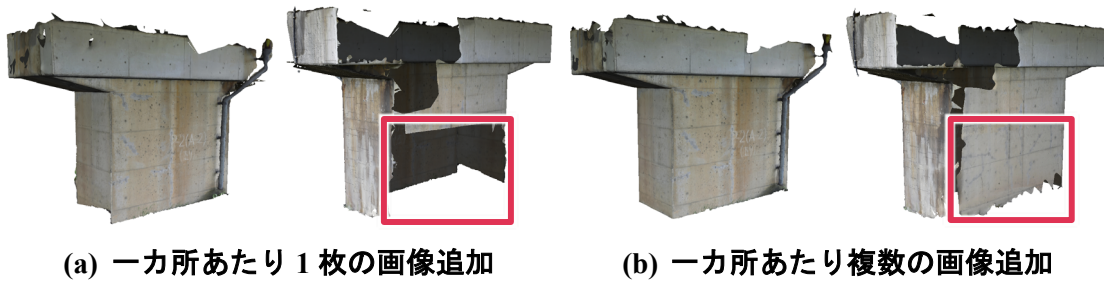


図3.40 一回目画像追加後の高密度メッシュモデル

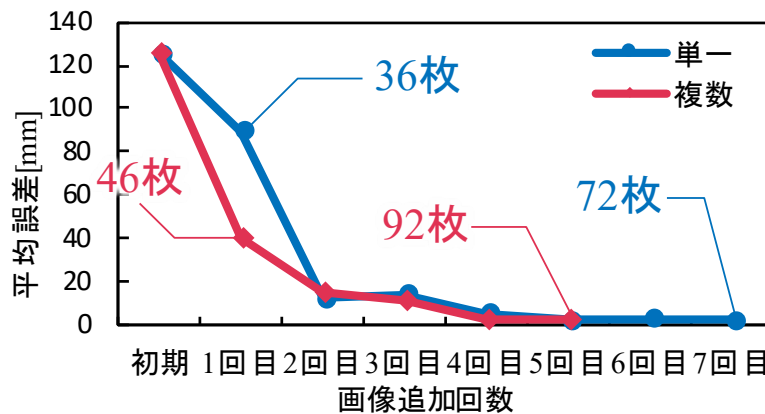


図3.41 高密度メッシュモデルの平均誤差の推移

3.10.2.5 TLS 点群との精度比較結果

次に、TLS によって取得したレーザ計測点群と、最終的な高密度メッシュモデルとの精度比較を行った。密に撮影した 110 枚のオリジナル画像集合 I_0 から、手動で 21 枚の初期画像集合 I_1 を選択する。提案手法によって、一度に 6 カ所の低品質領域を選択し、それぞれ 1 カ所の画像、計 6 枚の画像を一度に追加する。画像追加プロセスを 7 度行い、最終的に、63 枚の画像を I_0 から選択した。また、提案手法の優位性比較のために、 I_0 からランダムに 63 枚の画像を選択し、同様に SfM-MVS より高密度モデルを生成した。

オリジナル画像集合 I_0 、初期画像集合 I_1 、ランダムに選択した画像集合、および、提案手法によって選択した画像集合で推定した、カメラポーズと最終的な高密度メッシュモデルを図 3.42 に示す。図 3.42(b) に示すように、初期画像集合のみでは、対象のモデルが不十分に生成できていないことが確認できる。また、図 3.42(c) に示す、ランダムに選択した画像集合では、赤丸で示す領域が再構成できていないことが確認できる。一方で、図 3.42(d) に示す、提案手法で選択した画像集合では、対象モデル全体をカバ

一した高密度メッシュモデル生成できていることがわかる。

次に、生成した高密度メッシュモデルと、TLS で計測した点群との誤差比較結果を図 3.43 に示す。提案手法により選択した合計 63 枚の画像集合を利用すると、110 枚すべて使用し生成した高密度メッシュモデルと同様の結果が得られたことが目視で確認できる。また、ランダムに選択した画像集合では、非再構成領域ができていることが確認できる。ランダムに選択した画像集合と、提案手法で選択した画像集合で、生成した高密度メッシュモデルの誤差平均はそれぞれ 7.99mm と 3.30mm で、標準偏差は 0.82mm と 0.07mm であった。この結果から、少ない画像集合から始め、提案手法で選択した画像集合は、再構成領域の増加と精度向上に有効であることが示された。

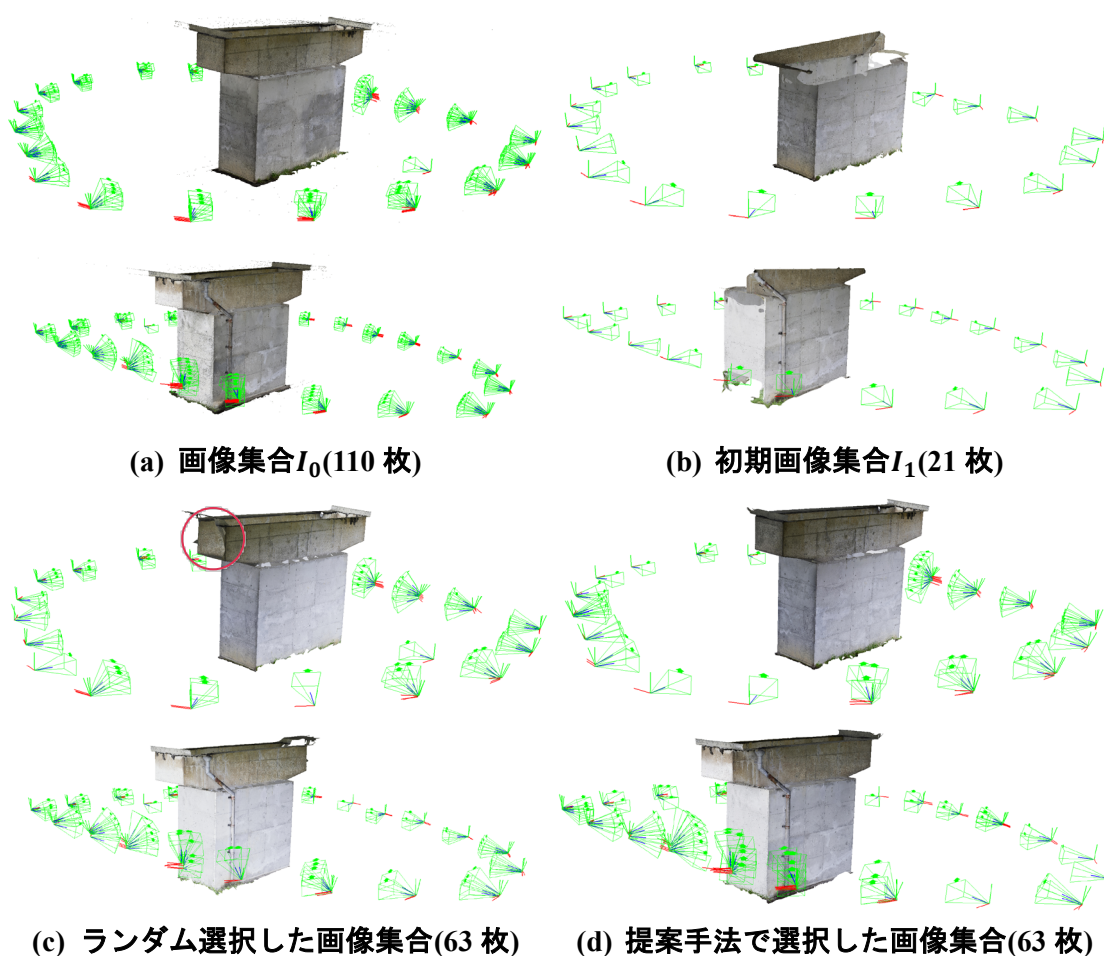


図3.42 カメラポーズと高密度メッシュモデル

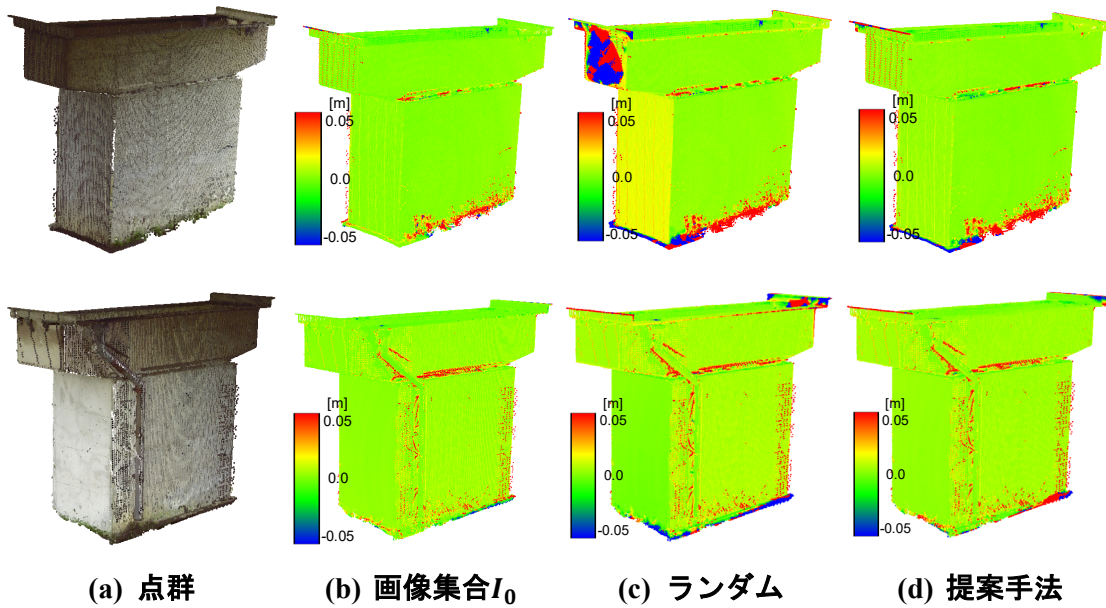


図3.43 高密度メッシュモデルと点群との誤差比較結果

3.10.2.6 初期画像集合に対する依存性

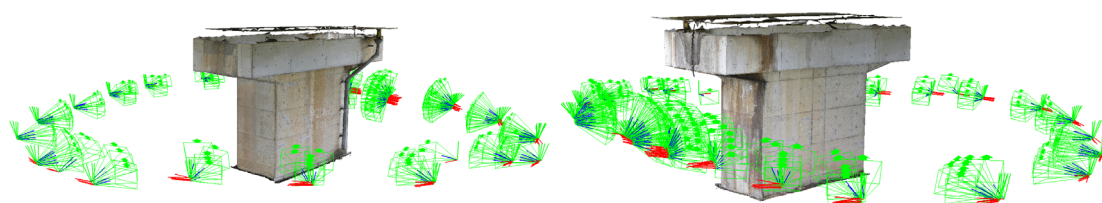
次に、提案手法に対する初期画像枚数と位置の依存性を検証した。密に撮影した 171 枚のオリジナル画像集合から、20 枚、25 枚、30 枚をランダムに選択した初期画像集合に対して、提案手法によって画像追加を行い、最後に高密度メッシュモデルを生成し、その誤差を TLS 点群と比較した。

171 枚のオリジナル画像集合と各初期画像集合で、生成されたタイポイントと高密度メッシュモデルを図 3.44 に示す。初期画像集合枚数が少ないほど、高密度モデルを再構成できていないことが確認できる。また、20 枚、25 枚の初期画像集合では、カメラポーズの推定に失敗していることがわかる。

これらに対して、提案手法を適用し、画像追加後のタイポイントと高密度メッシュモデルを図 3.45 に示す。20 枚の初期画像では最終的な画像枚数は 90 枚、25 枚の初期画像では 90 枚、30 枚の初期画像では 83 枚であった。結果より、初期画像集合枚数が何枚でも対象となる橋脚をすべてカバーした高密度メッシュモデルが生成できていることが確認できる。

最後に、TLS で取得したレーザ計測点群と、各初期画像集合から提案手法によって画像追加後に生成した高密度メッシュモデルとの誤差を比較した。誤差比較結果を図 3.46 に示す。各初期画像集合に適用した提案手法は、171 枚のオリジナル画像集合で生成した高密度メッシュモデルと精度が変わらず、また、初期画像集合の枚数や位置が異なっても、高精度な 3 次元モデル生成が可能である。このことからある程度大ま

かな初期画像集合でカメラポーズの推定に数枚失敗している場合でも，提案手法は推定が成功している領域を基に，次の追加撮影位置を求めていき，再構成領域の増加に有効であることを確認した．なお，20 枚，25 枚，30 枚の初期画像集合から提案手法を適用し生成した高密度メッシュモデルの誤差平均は 1.71mm, 1.72mm, 2.02mm であり，標準偏差はそれぞれ 0.009mm, 0.008mm, 0.011mm であった．提案手法は，初期画像集合の枚数・位置への依存性は少なく，画像追加を行っていくことで，最終的な高密度モデルの精度向上に有効であることを確認した．



(a) 171 枚のオリジナル画像集合



(b) 20 枚の初期画像集合



(c) 25 枚の初期画像集合



(d) 30 枚の初期画像集合

図3.44 各初期画像集合におけるタイポイントと高密度メッシュモデル

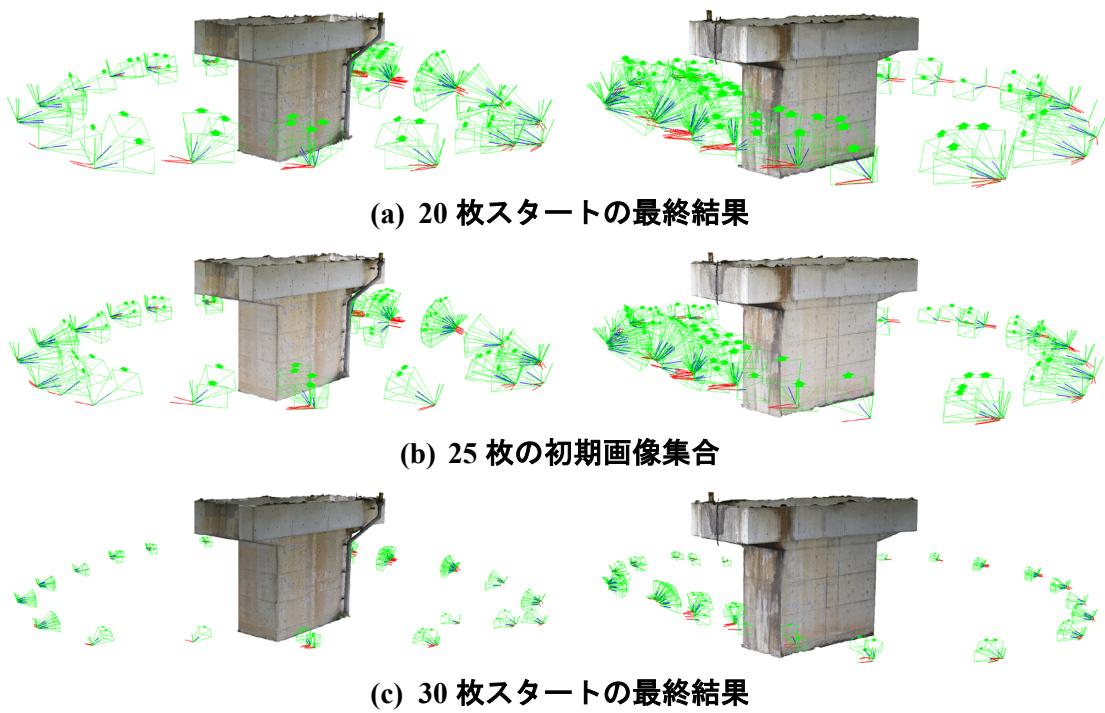


図3.45 画像追加後カメラポーズと高密度メッシュモデル

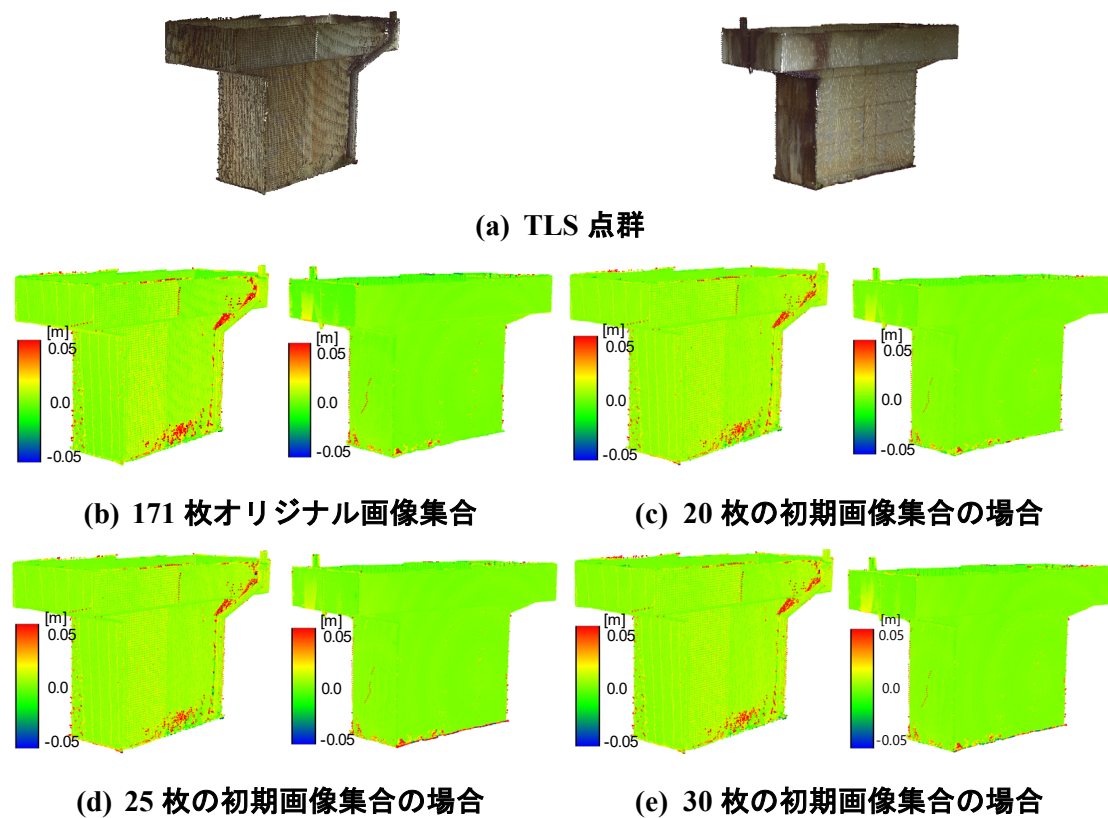
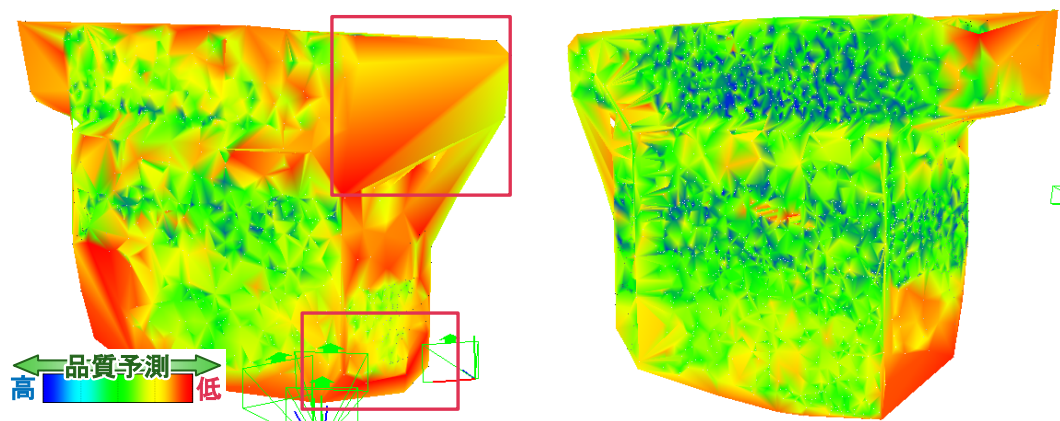


図3.46 TLS 点群との誤差比較結果

3.10.2.7 終了条件の検証実験①

110 枚のオリジナル画像集合 U に対して、提案手法を適用した。まず、オリジナル画像内からランダムで選択した 30 枚を初期画像集合 I_0 とし、 I_0 を用いた品質予測結果と、 I_0 から MVS で再構成した高密度メッシュモデルを図 3.47 に示す。この結果から、図中の赤枠で示す部分が再構成されていないことが確認できる。

次に、低品質領域を一度に 6 カ所選択し、その領域から推定された追加カメラポーズに最も近接したカメラポーズを持つ追加画像(最大距離 3.3 m 以内で低品質領域に対する撮影入射角が最小な画像)を、 $U - I_0$ 内から複数枚選択し、 I_0 に追加した撮影済み画像集合 I_1 を生成する。以上の画像追加を、図 3.48 に示すように、3.9 節で示した改善度の終了条件を満たすまで繰り返した。最終的な反復追加回数は合計 6 回、追加後の



(a) 品質予測結果



(b) 高密度モデル

図3.47 初期画像集合 I_0 に対する品質予測結果と高密度モデル(画像枚数 30 枚)

総画像枚数は 61 枚となった。追加終了後の画像を用いた品質予測結果と高密度メッシュモデルを図 3.49 に示す。初期画像集合のみで生成した高密度メッシュモデルと比較し、モデルの全域にわたり高品質で再構成が行われ、正気画像集合で見られた穴等の欠損部等が改善されたことを確認した。

終了条件の妥当性を検証するために、画像集合 I_5 に対する高密度メッシュモデルの生成結果を図 3.50 に示す。モデル上部の橙枠内に再構成されていないわずかな欠損部がみられることが確認できる。この結果から、終了条件に従って、画像追加を行うことが有効であることが示された。

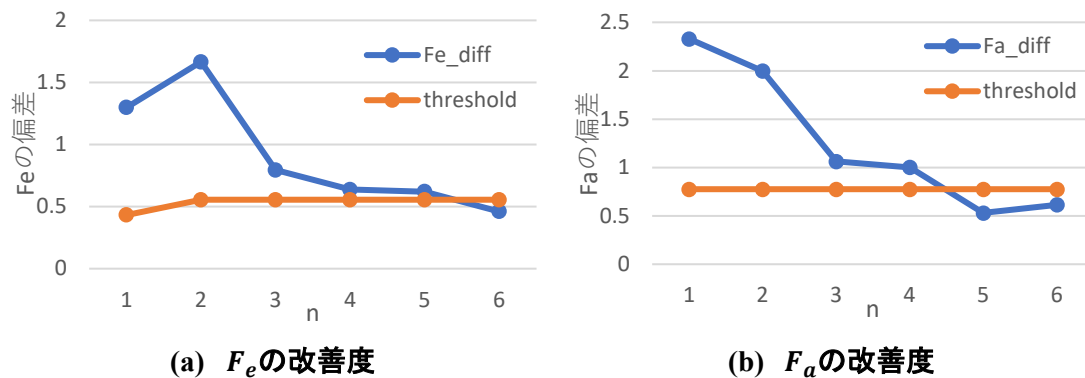
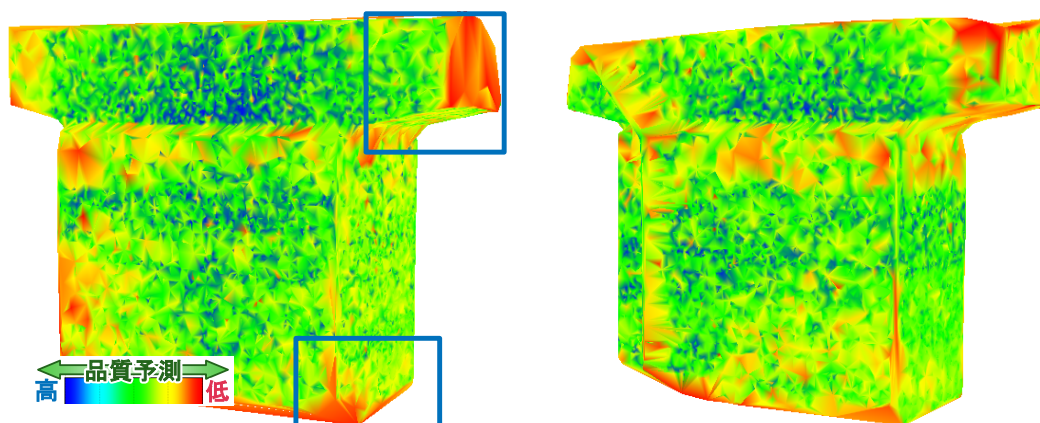


図3.48 低品質領域における指標の改善度



(a) 品質予測結果



(b) 高密度モデル

図3.49 画像集合 I_6 に対する品質予測結果と高密度モデル(画像枚数 61 枚)



図3.50 画像集合 I_5 に対する品質予測結果と高密度モデル(画像枚数 57 枚)

3.10.3 建物を対象とした最適撮影カメラポーズ推定結果

3.10.3.1 概要

本項では、図 3.27(b)に示す大学構内の建物を対象とし、従来手法との精度比較結果を述べる。

3.10.3.2 従来手法との比較結果

次に、大学構内建物を対象に 23 枚の画像を初期入力として、Mauro *et al.*に従来手法[57]と提案手法との品質予測結果を定性的に評価した。本実験では、追加撮影位置推定は行わず、推定した品質結果より、手動で撮影位置を決定した。

まず、23 枚の画像を用いて最終的に生成した高密度メッシュモデルを図 3.51 に示す。高密度メッシュモデルを観察すると、スロープ部分や中央の小屋上部、車の影が再構成されていないことが確認できる。これらの非再構成領域は、撮影した画像がないことによって発生した低品質領域である。次に、式(3.17)で評価した従来手法の品質予測指標[57]と、式(3.18)で述べた提案手法の品質予測指標を用いて、予測した品質をそれぞれ図 3.52 および図 3.53 に示す。従来手法に比べ、提案手法は高密度メッシュモデルの非再構成領域に顕著に反応していることが確認でき、従来手法では形状の凹部になどに顕著に反応していることがわかる。

次に、スロープ部を対象に画像 27 枚を追加し、生成した高密度メッシュモデルを図 3.54 に示す。画像追加により、再構成領域が増加したことが確認でき、また、画像追加前の品質予測結果と比べ、予測される品質が向上したことが確認できる。

なお、品質予測の処理時間は従来手法では約 10 sec、提案手法は約 3 sec で、より高速に品質予測が可能となる。初期画像集合 23 枚に対する SfM に約 1 min、MVS に 10 min だった。



図3.51 画像追加前的高密度メッシュモデル

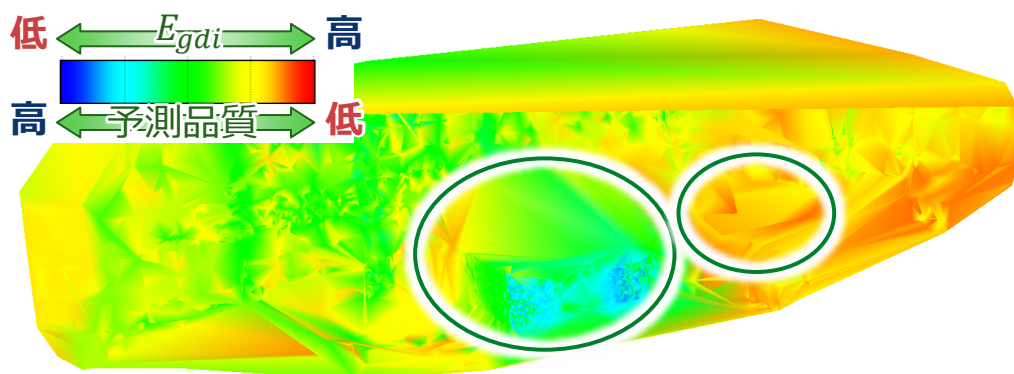


図3.52 従来手法による品質予測結果

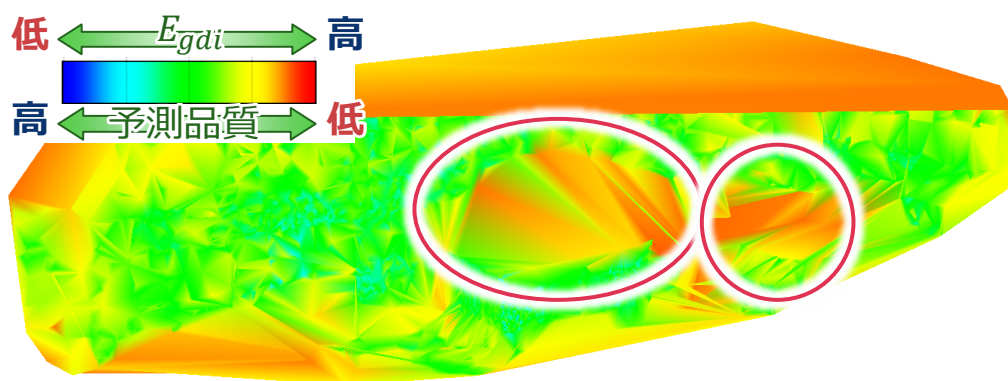


図3.53 提案手法による品質予測結果

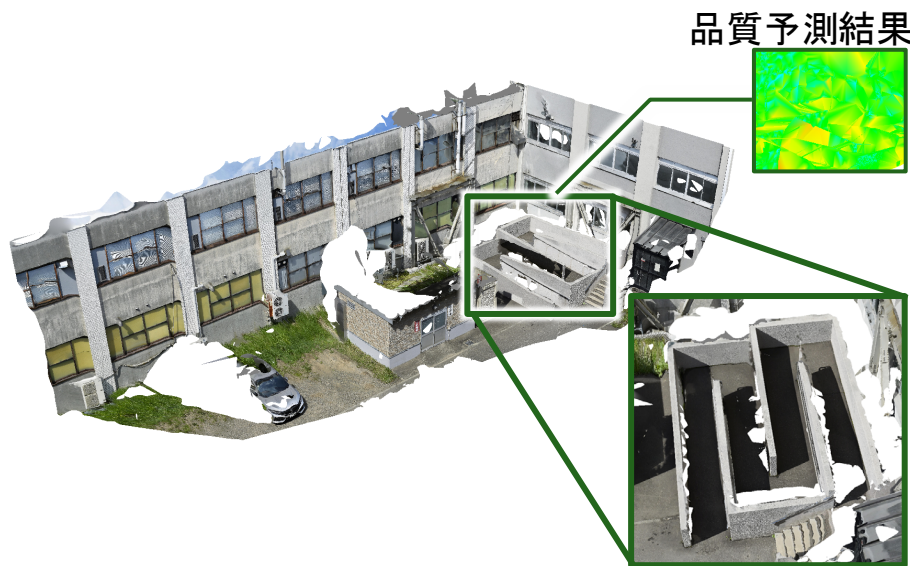


図3.54 画像追加後の高密度メッシュモデル

3.10.4 家屋を対象とした最適撮影カメラポーズ推定結果

3.10.4.1 概要

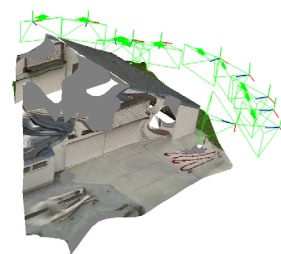
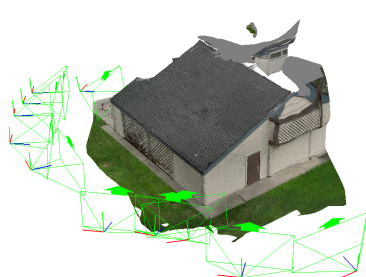
本項では，図 3.27(c)に示す家屋を対象とし，従来手法との精度比較結果を述べる．

3.10.4.2 従来手法との比較結果

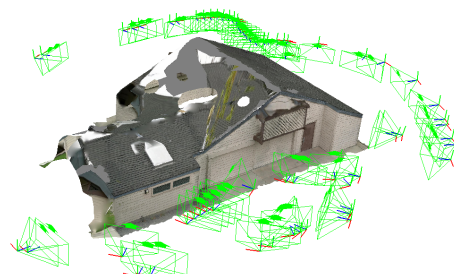
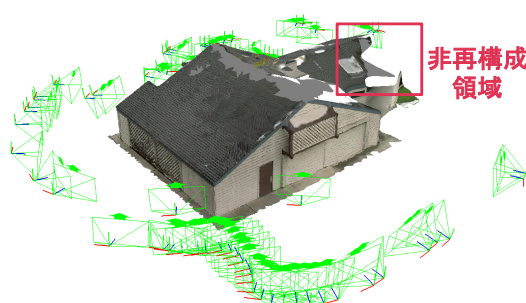
次に，Mauro *et al.*が提案した品質予測指標[57]と提案手法を用いて画像追加を複数回を行い，生成した高密度メッシュモデルの精度比較を行った．比較のために，合計 410 枚の画像で構成される家屋を対象としたオリジナル画像集合[77]を用いた．まず，SfM でカメラポーズが推定できるように 11 枚の初期画像を 410 枚の画像集合から任意に選択した．次に，各品質予測指標を用いて，品質を予測し，提案する低品質領域の選択を行い，追加カメラポーズを推定した．推定したカメラポーズから一番近接したカメラポーズをオリジナル画像集合から選択し画像追加を行い，両手法とも最終的に 65 枚の画像を選択した．そのときのカメラポーズと最終的な高密度メッシュモデルを図 3.55 に示す．提案手法は対象の全体をカバーできていることが確認できる一方で，従来手法では，やや欠けている領域があることが確認できる．

次に，高密度メッシュモデルと TLS 点群との誤差比較結果を図 3.56 に示す．提案手法と従来手法の平均誤差はそれぞれ 39.3mm と 259.2mm，標準偏差は 11.0mm と

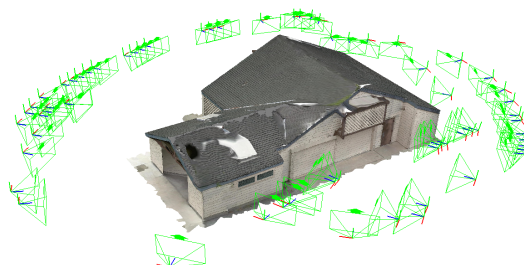
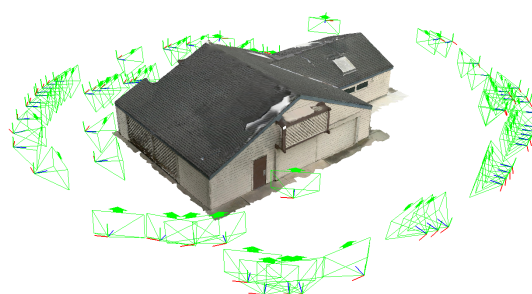
349.8mmであった。結果より、同じ画像枚数でも提案手法の方が高精度なモデル生成が可能なのことがわかる。つまり、より効果的な撮影用カメラポーズを推定できていることが確認できた。提案手法によって選択した画像集合65枚に対するSfMの処理時間は2min、MVSに6.5minだった。



(c) 初期画像集合

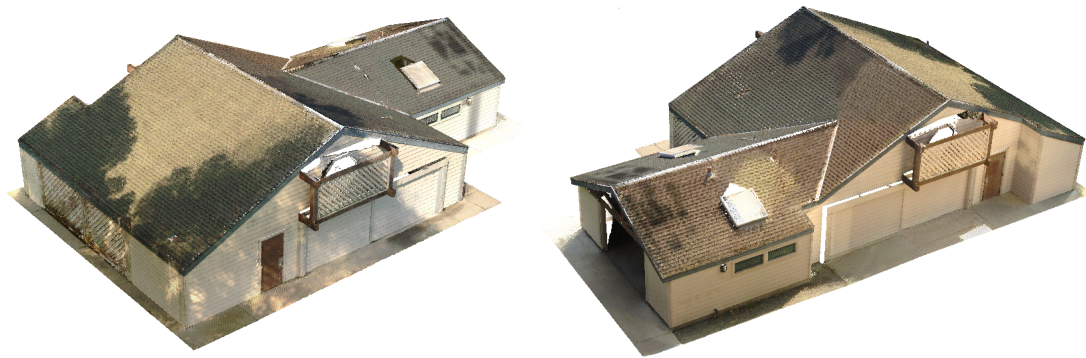


(d) 従来手法[57]

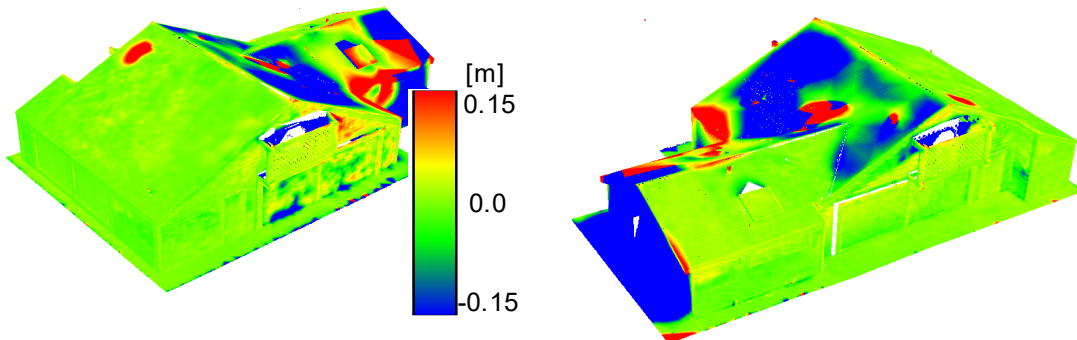


(e) 提案手法

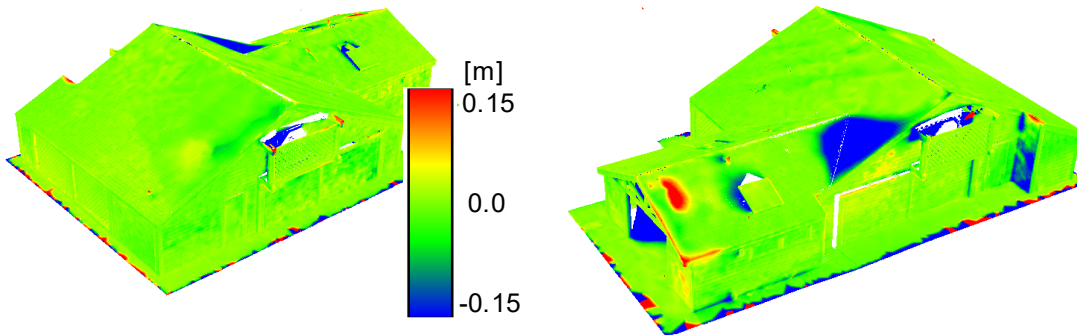
図3.55 タイポイントとカメラポーズおよび高密度モデル



(a) TLS 点群



(b) 従来手法[57]



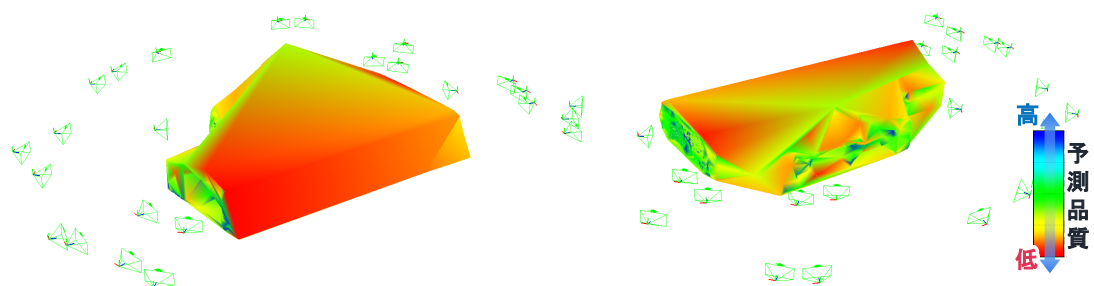
(c) 提案手法

図3.56 高密度メッシュモデルの TLS 点群との誤差比較結果

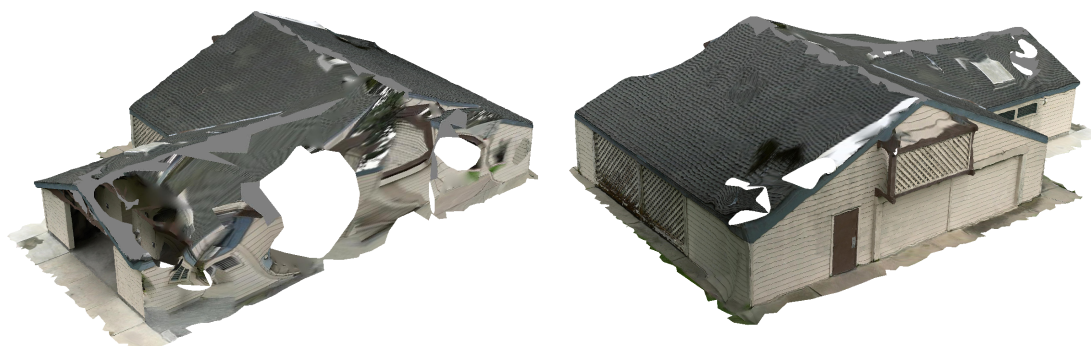
3.10.4.3 終了条件の検証実験②

家屋を撮影した 410 枚のオリジナル画像集合 U に対して、提案手法を適用した。まず、オリジナル画像内からランダムで選択した 30 枚を初期画像集合 I_0 とし、 I_0 を用いた品質予測結果と、 I_0 から MVS で再構成した高密度メッシュモデルを図 3.57 に示す。次に、低品質領域を一度に 6 カ所選択し、その領域から推定された追加カメラポーズに最も近接したカメラポーズを持つ追加画像(最大距離 5.5m 以内)を、 $U - I_0$ 内から複

数枚選択し、 I_0 に追加した撮影済み画像集合 I_1 を生成する．以上の画像追加を、3.9節で示した改善度の終了条件を満たすまで繰り返した．反復追加回数は合計7回、追加後の総画像枚数は77枚となった．追加終了後の画像を用いた品質予測結果と高密度メッシュモデルを図3.58に示す．初期画像集合のみで生成した高密度メッシュモデルと比較し、ごく一部の領域を除き、モデルの全域にわたり高品質で再構成が行われ、図3.57に見られた穴等の欠損部等が著しく少ないことが確認できた．

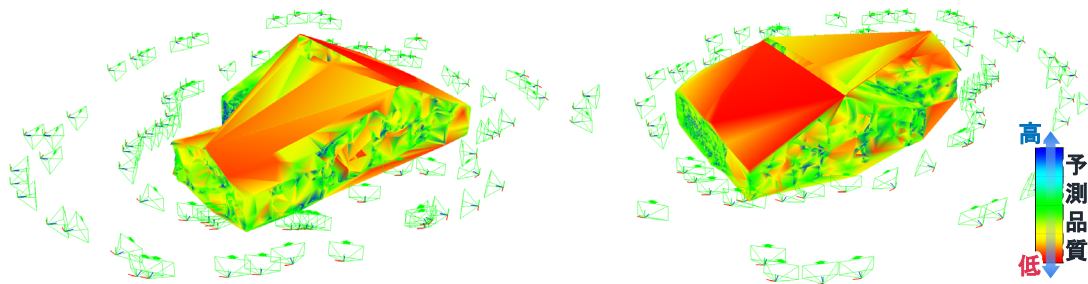


(a) 品質予測結果



(b) MVSで生成した高密度メッシュモデル

図3.57 初期画像集合を用いた結果 (画像枚数 30 枚)



(a) 品質予測結果



(b) MVS で生成した高密度メッシュモデル

図3.58 画像追加 7 回後の画像集合を用いた結果 (画像枚数 77 枚)

3.10.5 考察

本節では、橋脚、大学構内建物、家屋を対象に撮影した画像集合に対して、提案する最適撮影計画手法を適用し、その有用性を検証した。まず、SfM-MVSにより生成した高密度メッシュモデルの低品質領域に対して、画像追加を行うことによって、形状精度が改善できることを示した。また、本手法によって選択された低品質領域や、推定されたカメラポーズに従って、画像追加を行うことによって、生成されるモデル精度が向上することを確認した。さらに、高精度な計測が可能な TLS 点群と比較し、本手法によって選択された画像集合で生成した 3 次元モデルは、誤差平均が 3.3mm と高精度にモデリングできることを確認した。初期画像集合枚数や撮影位置が変化しても、画像追加を反復的に行うことによって、高精度なモデル生成が可能であることを示した。また、Mauro ら[57]の手法を用いて提案手法と同じ枚数の追加撮影を行い生成した高密度メッシュモデルや、提案手法と同じ枚数ランダムに画像を選択し生成した高密度メッシュモデルと比較し、提案手法はより高品質に再構成が可能であることを示した。

さらに、従来手法で提案された品質予測指標と比較し、本手法は MVS で得られるであろう高密度モデルの品質とより相関のある指標であり、特に非再構成領域との相関があることを確認した。また、両手法を用いて画像追加しても、本手法がより適切な

適切な追加画像を選択でき、モデルの全体形状を再構成できることを確認した。

3.11 まとめ

本手法では、SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画の導出のために、以下の4つの手法を開発した。

- (1) 短時間で処理可能な SfM で出力したタイポイントとカメラポーズのみから、最終的に得られるであろう高密度モデルを近似した、3次元メッシュモデルを MVS と比べて高速に生成する手法を開発した。短時間で近似形状の確認に有効であることを示した。
- (2) SfM の出力結果であるタイポイントとカメラポーズのみから、MVS を行わずに、最終的に得られるであろう高密度モデルの品質を予測可能な品質予測指標を開発した。提案手法で用いられる品質予測指標は、高密度モデルとの相関性実験から得られた、より相関の高いとされる指標であり、従来手法と比べ、高密度モデルの品質をより正確に反映しており、より少ない枚数で高品質なモデル生成可能であることを示した。
- (3) 予測した品質に基づいて、次に追加撮影すべき低品質領域を数理計画法により自動で選択する手法を開発した。選択された低品質領域を補完する画像を追加することによって、高密度モデルの品質向上に有効であることを示した。
- (4) 選択した低品質領域をカバーする、次の追加撮影カメラポーズを自動推定する手法を開発した。少数の初期画像集合から出発し、推定したカメラポーズに従って、反復的に追加撮影行うことによって、最終的に生成される高密度モデルの再構成領域の増加と品質向上に有効であることを確認した。

今後の課題として、以下の2つの課題が存在する。

(1) 画像追加カメラポーズの指示手法

本手法では、SfM で出力されたスケール情報を元に、次の追加撮影カメラポーズ推定を行っている。そのため、実環境と仮想環境のスケールを合わせる必要がある。さらに、仮想環境内で推定されたカメラポーズが実環境内のどこになるのかを正確に算出し、指示する必要がある。

(2) フェーズごとの重みの決定

本手法では、式(3.18)で示すように、各品質予測指標の重みは一定である。しかしながら、少数の画像から始める場合に、再構成領域を増加させる(初期)段階と、再構成し

た領域の品質を向上させる(最終)段階の二つのフェーズが存在すると考えられる．そのため，初期段階では，再構成領域を増加させるのに有効な指標 F_e, F_a に重みを大きくし，最終段階では再構成領域の精度向上に有効とされる指標 F_r, F_{bh} の重みを大きくする必要があると考えられる．

(3) ドローン計測システムのへの統合

本手法は，手持ちカメラによる撮影を前提としている．一方で近年ではドローンによる画像撮影が容易となっているため，自動航行を想定とした追加撮影用カメラポーズの推定や効率的な航行経路の推定などが必要となる．

第4章 スマートフォンとクラウドシステムを 活用した最適撮影計画支援システムの 実作業 as-is モデル記録への応用

4.1 研究背景

1.1 節で述べたように、近年のインフラ老朽化問題が顕在化しており、効率的な維持管理の重要性が問われている。それに加え、地方公共団体や地方中小企業では、技術者が十分にいない問題もある。図 4.1 に示すように、地方公共団体が実施する橋梁点検において、直営点検では 54%、委託点検においても 42%が研修未受講かつ民間資格未保有である[33]。つまり、委託・直営点検共に、維持管理点検の知識・技術が不十分で、効率的で正確な維持管理作業が行えていない可能性がある。これに対処するには、点検作業の十分な習熟が必要であるが、大量の時間が必要となると考えられる。

この解決のために、近年、国土交通省では i-Construction を推進している[78]。i-Construction とは、建設現場における、労働力不足の解決や生産性の向上を目指した取り組みのことである。その一つに、図 4.2 に示すような、調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までのあらゆる建設生産プロセスにおいて、3 次元データ等を導入し、ICT (Information and Communication Technology) 建機などの新技術も活用すること

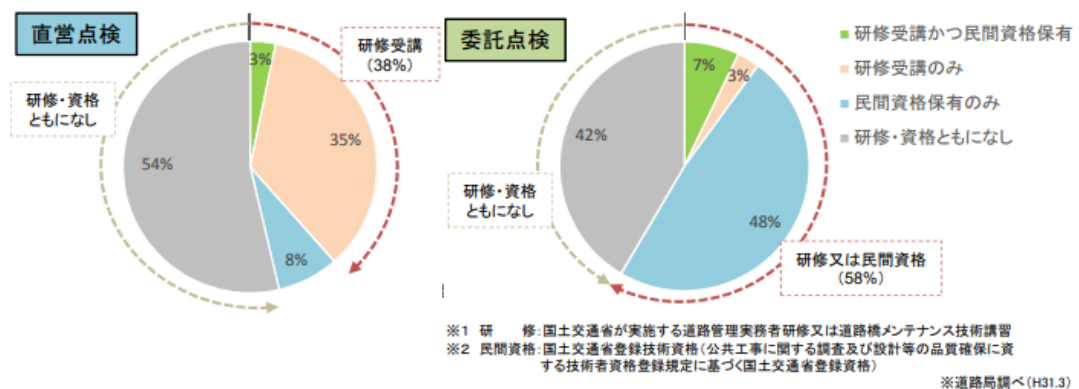


図4.1 点検実施者の保有資格や研修受講歴

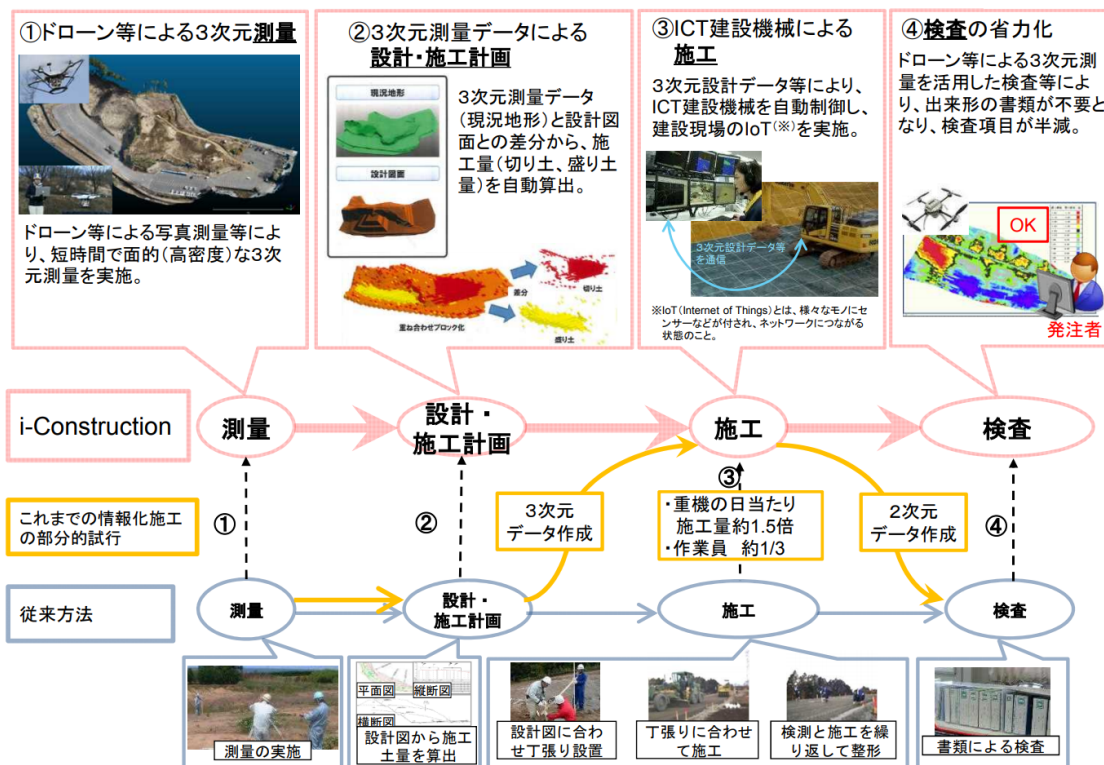


図4.2 ICTの全面的な活用（ICT土工）の概要[78]

で、従来方法に比べ、効率的かつ省力化を目指している。

しかしながら、i-Construction を地方公共団体や中小企業が即時に適用することは難しいと考えられる。例えば、TLS やドローンによる 3 次元測量は高精度な計測や効率的な測量が行える一方で、それらの機器は高額で購入が難しく、レンタルでも高額で、頻繁に使用することが難しいため、3 次元測量データを用いた維持管理作業を頻繁に行うことができないと考えられる。

そのため、地方公共団体や中小企業にとって、安価な手持ちカメラと SfM-MVS による 3 次元測量が i-Construction を導入する際に最適な方法の一つであると考えられる。しかしながら、まだ導入障壁が以下の点から依然として高いままである。

4.2 SfM-MVS による 3 次元 as-is モデルの実現場応用における

問題点

4.2.1 最適撮影計画支援手法の実現場応用の問題点

これらの解決のために、第 3 章では、SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画を提案したが、本手法を実現場に応用するにはまだ問題が存在している。

まず、本手法で推定したカメラポーズは、SfM で出力された任意のスケール内で次の追加撮影用カメラポーズを推定している。そのため、実環境と仮想環境のスケールを合わせる必要がある。さらに、推定されたカメラポーズが、実環境内でどこから撮影するかを正確に指示する必要がある。また、推定した追加撮影カメラポーズを実環境内のどこであるかということを示すことができない。例えば、人が侵入できない足場であった場合、正確な撮影ができない問題がある。

4.2.2 施工現場における 3 次元計測プロセスの現状とその問題点

次に、施工現場における 3 次元計測プロセスの現状を図 4.3 に示す。現在の 3 次元計測プロセスでは施工現場に赴き、SfM-MVS によるモデル生成を想定し、高精度なモデル化が可能となる高解像度の画像を取得できる一眼レフを用いて、画像撮影を行う。次に、ソフトウェアが動作可能な現場事務所などに戻り、SD カードなどを經由し、画像データを移動させ、SfM-MVS ソフトウェアを使用し、長時間かけて高密度な 3 次元モデルを生成する。その後、生成した 3 次元モデルを作業者が、その品質を評価し、施工・維持管理作業へ活用する。仮に、3 次元モデルに欠損や撮り忘れなどに起因しモデルの品質が低い場合に、再度、施工現場に赴き、追加撮影位置を行い、モデル生成プロセスを経なければならない。

しかしながら、現状のプロセスでは、図 4.3、ならびに、下記に示すボトルネックが存在する。

- (1) 高精度な 3 次元モデルを得るためには、高解像度でセンササイズの大きい一眼レフカメラを使うことが重要となる。しかし、一眼レフカメラは大きく、かつ、重たく、さらに、施工現場などでは足場が不安定なことが多いため、一眼レフカメラを持ちつつ、撮影を行うことは危険を伴う。

- (2) 一眼レフカメラでは、ネットワークを通じて、画像を PC へ転送する作業が複雑である。そのため、SD カードに保存した画像を、後々現場事務所などで PC へ転送しなければならない非効率である。近年では、Wi-Fi を通じて、スマートフォンに転送できる機能などが存在するが、スマートフォンに転送した後、スマートフォンから PC へと通信するという作業を撮影しながら行うことは、非効率な作業で危険を伴う。
- (3) SfM-MVS による高密度 3 次元モデルの生成には、画像枚数に依存するが、一般的に膨大な時間を要する。そのため、モデルの品質を確かめるためには、画像撮影後、長時間処理を行って初めて確認できるため、作業工程が一時停止となる可能性がある。仮に、モデル品質が満足しないものであれば、現場に行き再撮影が必要となり、労力を要する。
- (4) SfM-MVS で高密度 3 次元モデルを作るために、撮影作業者は、画像間の重複に注意を払いつつ、適切な撮影計画を練ることが大切になるが、どのカメラポーズから合計何枚の画像を撮影すれば、高精度なモデルを生成できるか、事前に撮影することは難しく、結果として、低品質なモデルが生成される場合がある。一方、これを避けるために、大量の画像を撮影すると、モデル処理に膨大な時間がかかるため、生成する 3 次元モデルの品質を現場で確認できない。

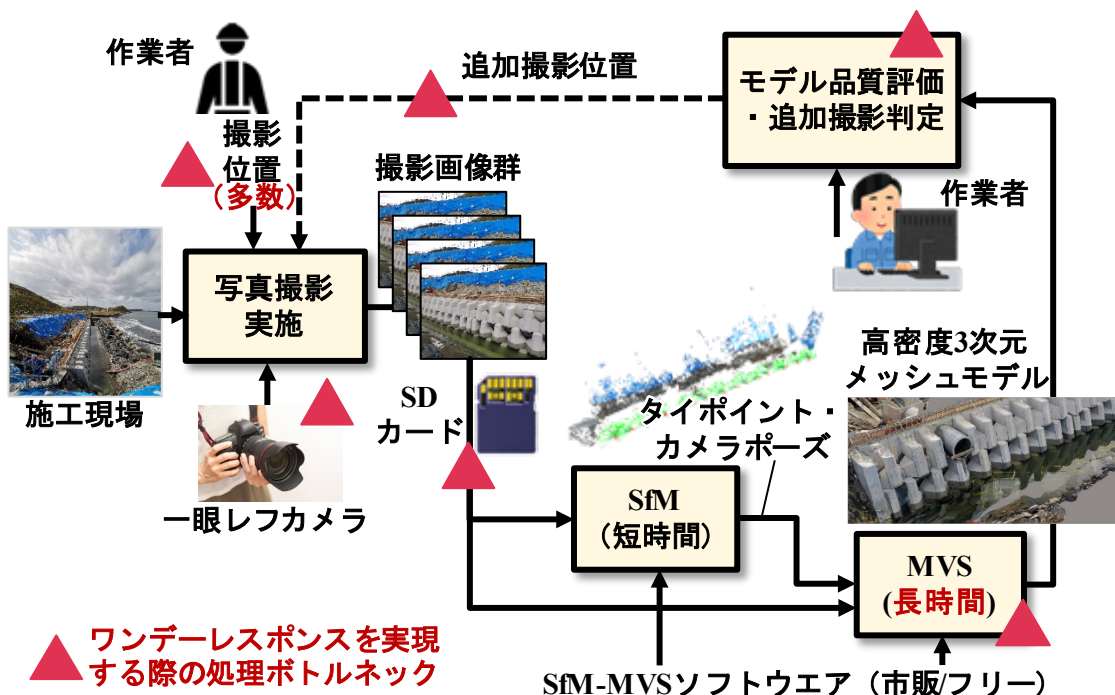


図4.3 施工現場における SfM-MVS による 3 次元計測プロセスの現状

4.3 本手法の目的と特徴

以上の問題解決のために、第 3 章で提案した最適撮影計画手法を用いて、高精度な 3 次元モデルを効率的に作成可能な写真計測システムを開発し、工事現場の写真撮影から 3 次元モデル生成までをその日のうちに完了するワンデーレスポンスの実現を目指す。

本手法の特徴を下記に示す。

- (1) スマートフォンとクラウドシステム (e.g. Google フォト[79], Google ドライブ[80])による画像撮影と画像転送の簡素化を行い、作業現場で撮影労力を軽減する。スマートフォンは軽量なため、足場が不安定な現場でも、一眼レフカメラに比べ、軽快な撮影が可能となる。さらに、クラウドシステムを活用することにより、撮影中に自動で、クラウドにアップロード可能になるため、現場事務所への画像転送が簡易になる。
- (2) (1)のシステムを用いることで、アップロードされた画像を逐次的に、SfM 処理にかけていくことが可能となる。さらに第 3 章の手法により、次に追加すべき低品質の領域と、追加カメラポーズを数分で推定することが可能となる。
- (3) 第 3 章の手法で選択された、次に追加撮影すべき低品質領域の箇所を示した追加撮影目標点の指示画像を生成する。生成した指示画像をメッセージアプリ (e.g. Google ハングアウト[81])を通じて、即座に現場撮影者に送信して、現場の画像撮影者はその指示画像を参考に、追加撮影画像を撮影し、再度、クラウドへアップロードを行う。
- (4) (2)と(3)の処理を繰り返すことで、MVS 処理を行わずに、低品質な領域を含まない 3 次元モデルを、最小枚数の画像集合で生成することが可能となる。
- (5) 次に追加撮影すべき低品質領域の撮影目標点を既存撮影画像上にレンダリングした画像のみを現場作業員へ送り、追加撮影カメラポーズを指定しないことによって、追加撮影位置は現場作業員が足場などを考慮して撮影可能な位置から画像を取得できる可能性を高めている。
- (6) 本システムは、スマートフォンと、フリーで使えるクラウドサービスを用いるため、導入コストが低い。また、第 3 章の最適撮影計画手法を用いることにより、たとえ、写真測量による 3 次元モデルを生成した経験がなくても、高精度な 3 次元モデルが生成することが可能となり、技術導入の障壁も低くなる。

4.4 提案する最適撮影計画支援システムの全体概要

本手法の概要を図 4.4 に示す。まず、施工現場で、作業者はスマートフォンを用いて、3次元モデルの対象の少数初期画像集合を撮影する。このとき、撮影しつつ、スマートフォンのアプリを用いて、クラウドへと自動でアップロードしていく。次に現場事務者などにいる PC のオペレーターは、アップロードされた画像を用いて、SfM 処理および、最適追加撮影処理を行い、次に追加撮影すべき目標点の指示画像を生成し、メッセージアプリを通じて、現場作業員へと指示を出す。つまり、現場作業員は追加画像撮影および画像アップロード、PC オペレーターは SfM、最適撮影計画処理および追加指示を反復していくことによって、高精度なモデル生成を行っていく。最後に、一度 MVS 処理を行い、高密度な 3 次元モデルを生成する。

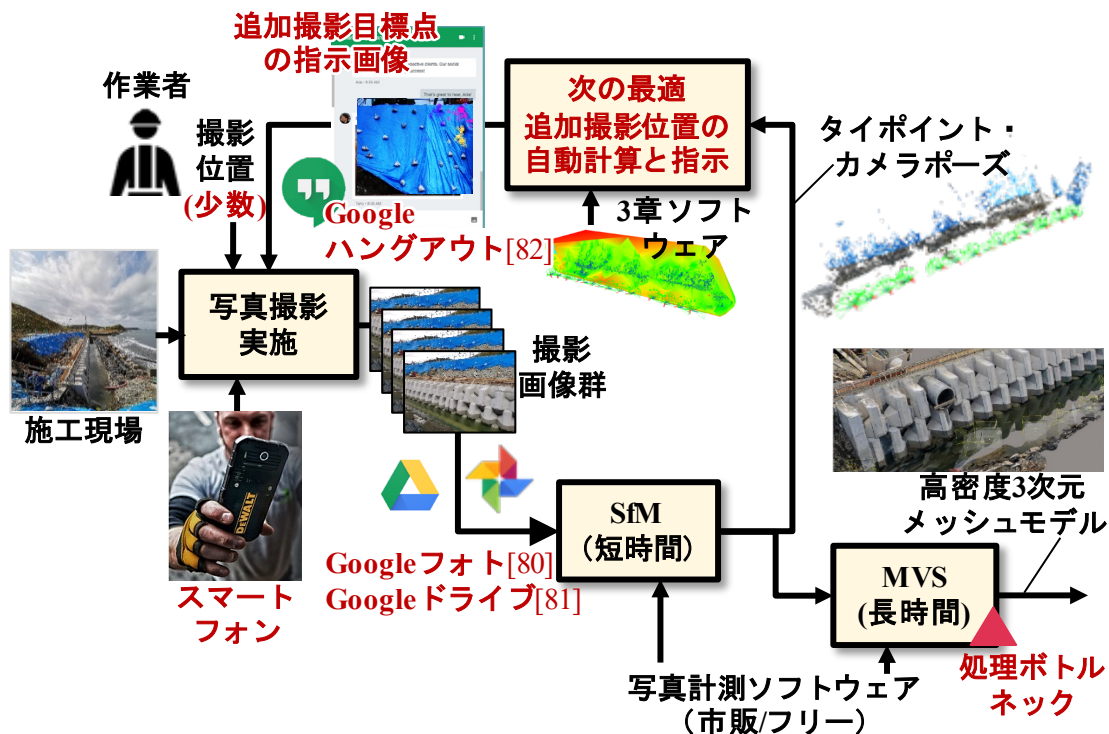


図4.4 計算機支援による最適撮影位置指示技術を用いたワンデーレスポンス対応の写真計測プロセス

4.5 As-is モデル生成結果とその評価

4.5.1 概要

本節では、トンネル覆道を対象として、第 3 章で提案した最適撮影計画を実現場へ適用し検証した後、消波ブロックを対象として、スマートフォンとクラウドを活用した提案システムを適用し、品質改善効果を検証した。用いた計算機・アプリケーションの仕様を表 4.1 に示す。

自動撮影指示の処理プロセスを図 4.5 に示す。まず、施工現場において初期画像を撮影し、Google フォトなどを通じて、現場事務所へと画像をアップロードする。その後、SfM を行いタイポイントとカメラポーズを用いて、品質予測および追加撮影領域の推定を行う。この結果から、追加指示画像を生成し、Google ハングアウトを通じて、施工現場の撮影者へと転送する。その後、撮影者は追加撮影指示画像を参考にして、追加画像を撮影する。再度、事務所へ画像を転送・SfM・品質予測・施工現場へのフィードバックを数回繰り返していく。

表4.1 用いた計算機とアプリケーション

使用機器		
OS	:	Windows 10 Education
CPU	:	Intel® Xeon CPU E5-2630 v3 @2.4GHz
RAM	:	128.0 GB
GPU	:	NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti
カメラ	:	SONY α 7R-III
スマートフォン	:	HUAWEI Mate20-Pro
SfM-MVS ソフトウェア	:	ContextCapture [71]

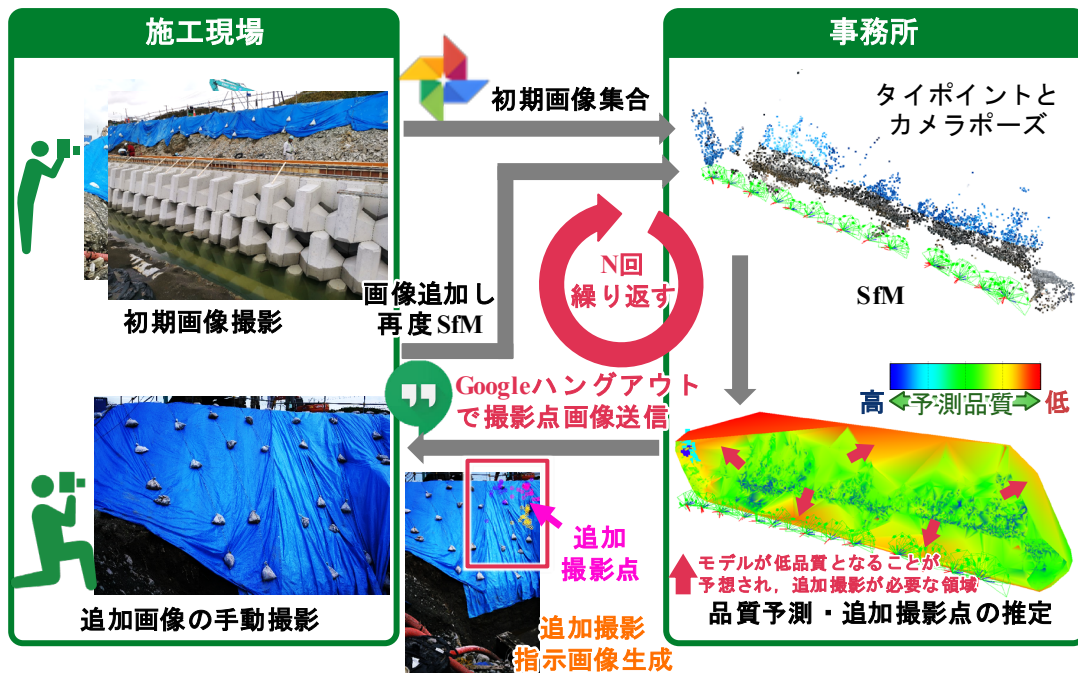


図4.5 自動指示の処理概要

4.5.2 トンネル覆道に対する適用結果

追加撮影による品質改善効果検証のために、図 4.6 に示すように、国道 231 号増毛町大別苅トンネル覆道中の 40m において、提案手法を適用した。用いたカメラは SONY α 7R-III を用いて 174 万画素の画像を撮影した後、スマートフォン ASUS X01 を経由し、現場事務所への画像転送を行った。初期画像枚数は 54 枚で一部例を図 4.7 に示す。

これらの初期画像集合、および、反復的に画像追加した画像集合に対して、MVS で生成した高密度モデル、生成した追加指示画像、それらに基づいて追加した画像を図 4.8、図 4.9 に示す。現場での実験時間の制限上、画像追加回数は 3 回であった。



図4.6 大別苅トンネル覆道



図4.7 初期画像例

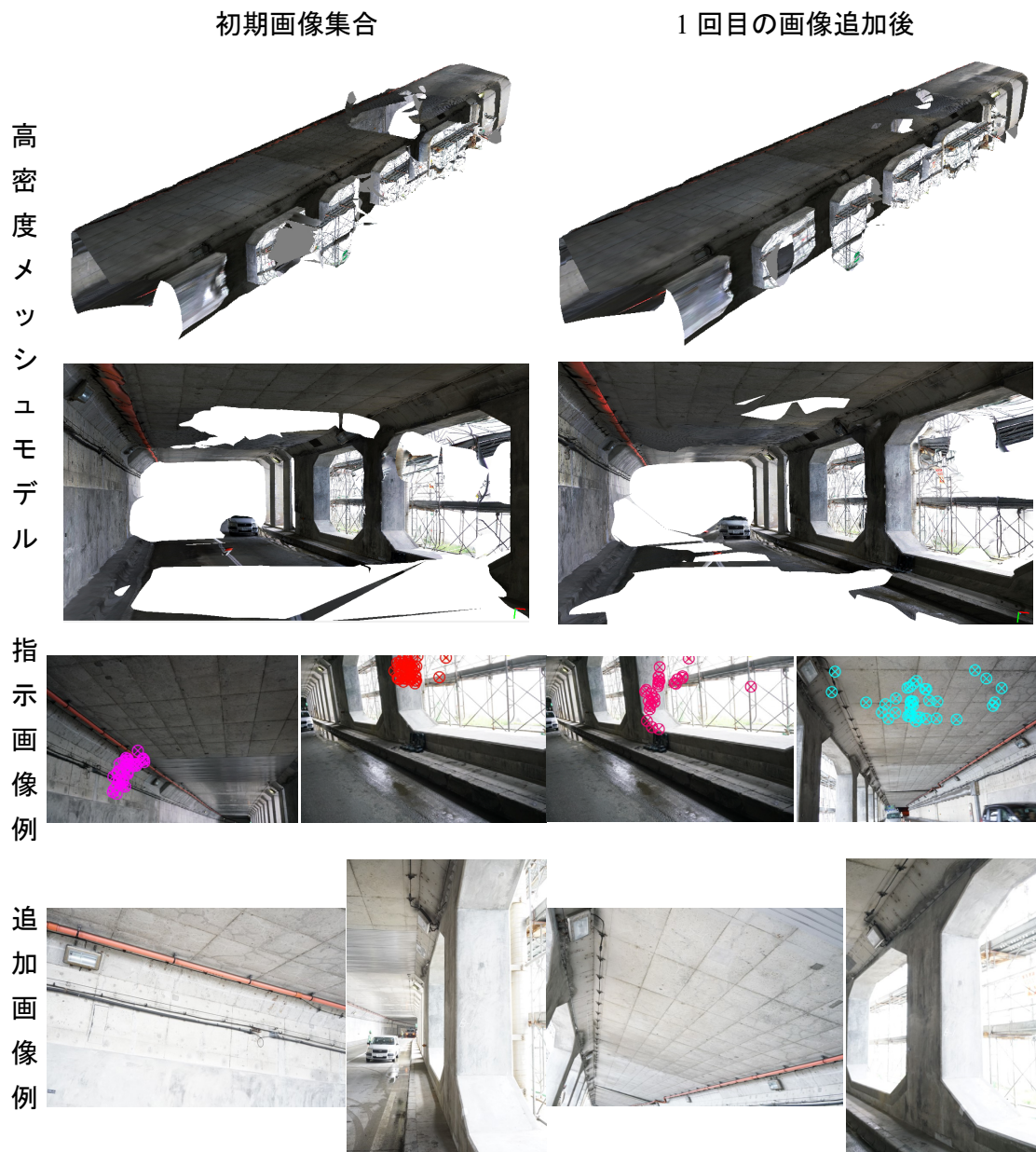


図4.8 覆道に対する最適撮影計画結果 (初期・1回目)

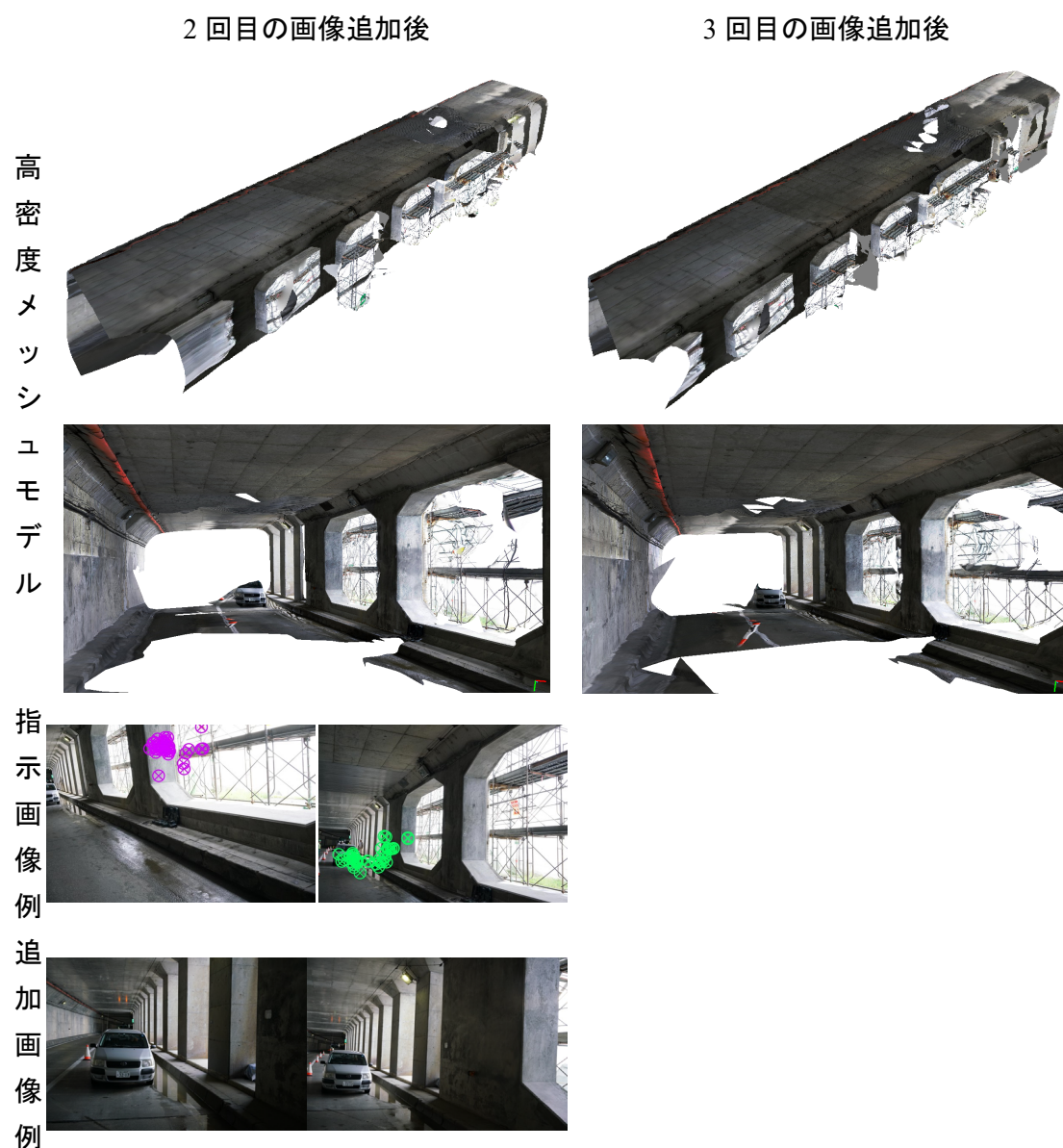


図4.9 覆道に対する最適撮影計画結果 (2 回目・3 回目)

図 4.8, 図 4.9 に示すように, 画像追加によって, 再構成された領域が増加していることが確認できる. 特に, 追加指示画像に基づいて画像を追加された, 柱部分や天井部で, 再構成の増加が確認できた. また, そのときの各プロセスでの画像枚数と処理時間を表 4.2 に示す. MVS 処理によって高密度モデルを生成した場合, 数分の処理時間を要するが, 本手法を用いると, 数秒で品質を予測できることが分かった.

表4.2 画像追加枚数と処理時間 (本手法で必要な処理時間を太字で表記)

	総画像枚数 (追加画像枚数)	SfM 処理時間	提案手法 処理時間	MVS 処理時間
初期	54	1 min 53 sec	3.72 sec	4min 30 sec
追加①	59 (5)	1 min 43 sec	4.14 sec	6 min
追加②	63 (4)	1 min 57 sec	5.32 sec	6 min
追加③	67 (4)	2 min 3 sec	5.67 sec	6 min

4.5.3 護岸工事現場に対する適用結果

次に，スマートフォンとクラウドシステムによる効率化検証のために，豊浦工区護岸ブロック工事現場において，提案手法を適用した．用いたスマートフォンは，HUAWEI 製 Mate20-Pro で，広角レンズを用いて 970 万画素の画像を撮影し，撮影現場から現場事務所への画像転送には Google フォト[79]を，現場作業者への指示には Google ハングアウト[81]を用いた．対象となる工事現場の初期画像の一例を図 4.10 に示す．

これらの初期画像集合，および，反復的に画像追加した画像集合に対して，MVS で生成した高密度モデル，生成した追加指示画像，それらに基づいて追加した画像を図 4.11，図 4.12 に示す．現場での実験時間の制限上，画像追加回数は 3 回であった．



図4.10 豊浦工区護岸ブロック工事現場の初期画像例

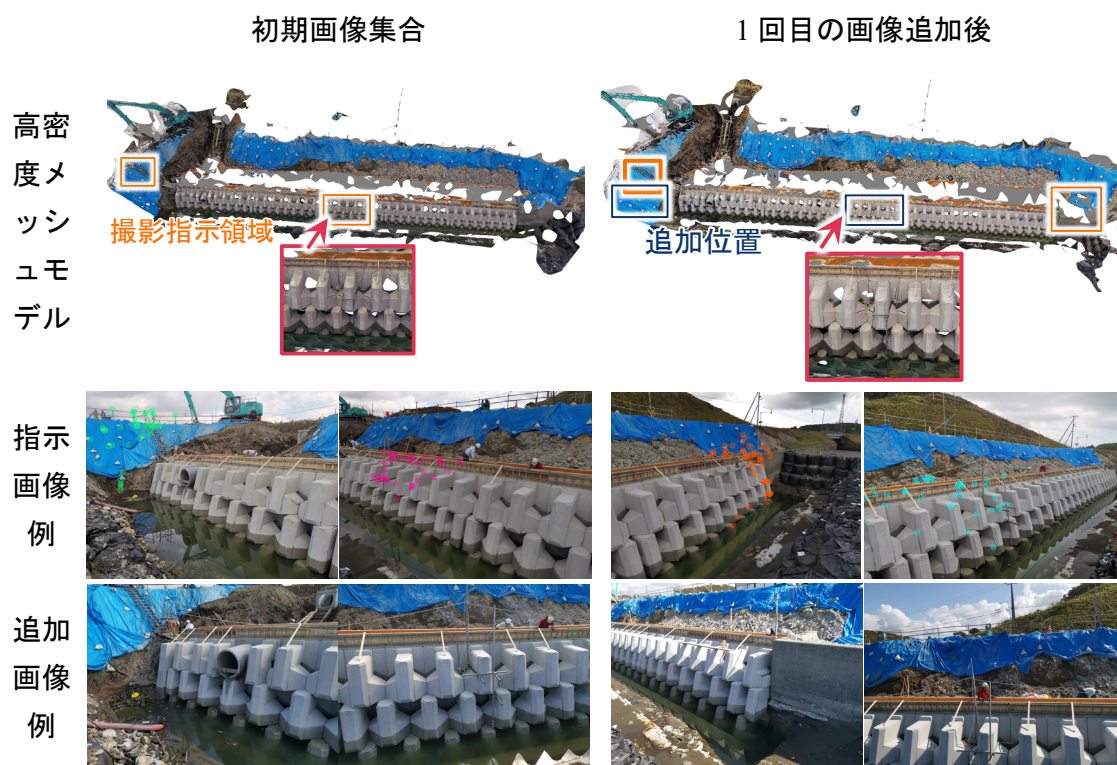


図4.11 護岸工事現場に対する最適撮影計画結果 (初期・追加①)

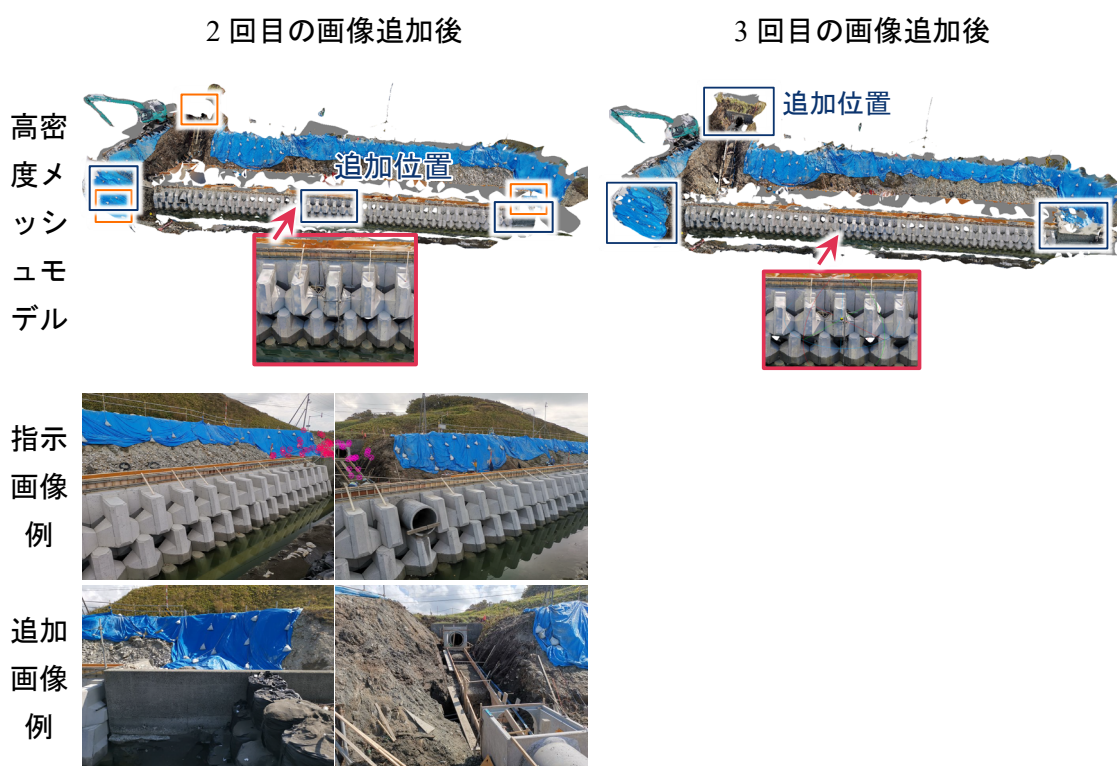


図4.12 護岸工事現場に対する最適撮影計画結果 (追加②・追加③)

表4.3 画像追加枚数と処理時間 (本手法で必要な処理時間を太字で表記)

	総画像枚数 (追加画像枚数)	SfM 処理時間	提案手法 処理時間	MVS 処理時間
初期	44	1 min 30 sec	3.96 sec	15 min
追加①	49 (5) ※1 枚失敗	1 min 20 sec	4.17 sec	-
追加②	58 (9) ※2 枚失敗	1 min 20 sec	5.08 sec	-
追加③	68 (10) ※2 枚失敗	1 min 40 sec	-	20 min

図 4.11, 図 4.12 に示すように, 画像追加によって, 一つ前の未撮影で再構成されていない領域が, 指示画像を基に画像追加することによって, 再構成領域が増加していることが確認できる. また, 初期画像集合では消波ブロック部などに穴が存在していたが, 追加した画像により埋まっていることがわかる. また, そのときの各プロセスでの画像枚数と処理時間を表 4.3 に示す. 本実験でも, 提案手法は高速に品質を予測可能であることが分かった.

4.5.4 考察

本項では, 実際の作業から各作業に関わる時間を仮定し, 写真測量による画像撮影から 3 次元モデル生成までのプロセスの処理時間効率化の効果検証を行う. 仮定として, 画像撮影に 1 枚当たり 15 sec, SfM に 1 枚当たり 0.03 min, MVS に 1 枚当たり 0.3 min, 撮影位置推定を 6 sec で固定し, 画像アップロード時間は撮影時間に含まれるとして, 従来の作業プロセスと本手法の処理時間を算出した. 従来の作業プロセスは二つの状況を考慮する. 下記に従来手法と本手法の仮定した作業プロセスを述べる. 追加画像枚数については, 4.5.3 項を参考にした.

- (1) 対象に対して, 抜けがないように 400 枚の画像を過剰に撮影し, SfM-MVS による高密度モデルを生成する.
- (2) 対象に対して 44 枚の画像を撮影した後, SfM-MVS により高密度モデルを生成する. その後, 高密度モデルの低品質領域を補完する 24 枚の追加画像を撮影し, 合計 68 枚の画像に対して, 再度 SfM-MVS によりモデル生成を行う.
- (3) 提案手法では, 44 枚の初期画像から始め, SfM 処理後, 追加撮影位置推定, 画像撮影を 3 回繰り返していく. 画像追加枚数は, 1 回目は 5 枚, 2 回目は 9 枚, 3 回目は 10 枚とした. 3 回の画像追加後, 合計 68 枚の画像群に対して, SfM-MVS によって高密度メッシュモデルを生成する.

仮定した各作業プロセスの処理時間を図 4.13 に示す. 結果より, (1)の従来手法では,

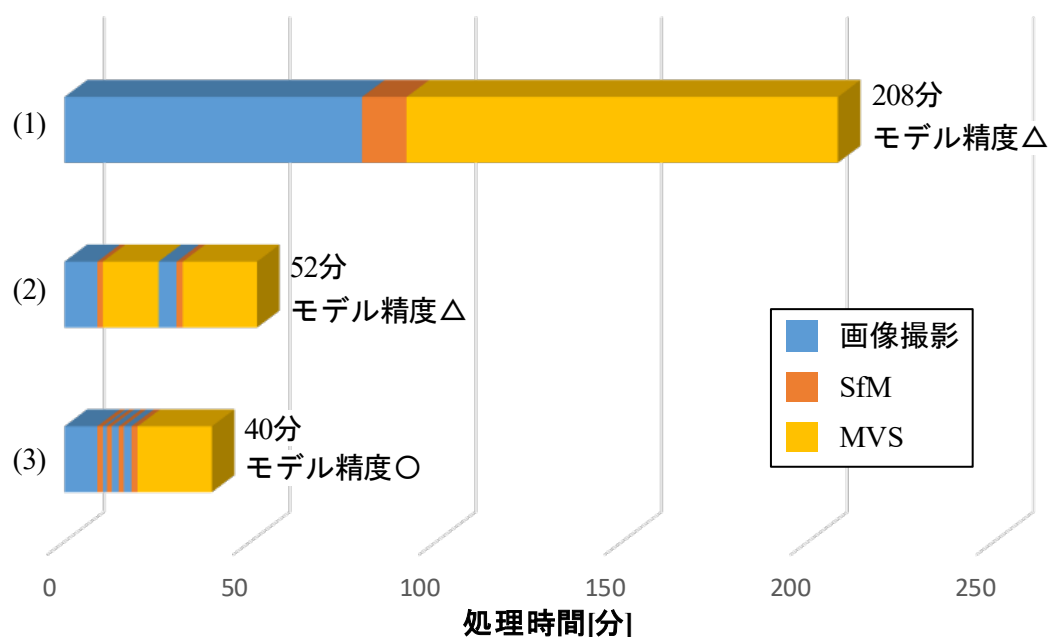


図4.13 処理時間の比較結果

モデルを再構成するために約 3.5 時間、(2)の場合は、モデル生成までに約 52 min 必要であり、(3)の提案手法は約 40 min で、従来手法に比べ短時間でモデル生成が可能であるがわかる。特に(1)と比較すると約1/5に減少したことが確認できる。また、従来手法の(1)と(2)では、撮影するカメラポーズは撮影者に委ねられたままであり、生成されるモデル精度向上に寄与するかどうか不明であり、高精度なモデル生成が保証されない。一方、提案手法では、最適な画像撮影が計算機によって算出され、効率的に品質改善が何度も行われ、高精度なモデルを生成できる可能性が高いと考えられる。

4.6 まとめ

本手法では、工事現場の写真撮影から 3 次元モデル生成までをその日のうちに完了するワンデーレスポンスの実現のために、第 3 章で提案した最適撮影計画手法、ならびに、スマートフォンとクラウドシステムを用いて、高精度な 3 次元モデルを効率的に作成可能な写真計測システムを開発した。これにより、写真測量による 3 次元モデル生成作業の経験がなくても、高精度な 3 次元モデルを安価で生成可能となり、地方公共団体や中小企業でも i-Construction を始めとする IT 施工の導入が簡易になることを示唆した。具体的に以下の 3 つに関して開発を行った。

- (1) 計算機による 3 次元モデル品質推定技術と、品質向上のための追加撮影位置の

自動指示手法を開発し、SfM-MVSによるモデル生成のための画像撮影プロセスの熟練度に依存せずに、高精度な3次元 as-is モデル生成が可能となった。

- (2) スマートフォンとクラウドを連携し、従来の画像撮影プロセスにおける一眼レフカメラによる撮影と、撮影現場でのモデル品質が確認できないボトルネックを解消し、画像撮影をより簡易にした。
- (3) 二つの実際の工事現場において、提案した画像計測プロセスを適用し、追加撮影によりモデル品質を高めてゆく逐次改善型写真計測プロセスの有効性を確認した。また、処理時間の比較考察結果から、提案手法は、従来のモデル生成プロセスに比べて、約1/5程度モデル生成時間を縮減できる可能性があることを確認した。

今後の課題として、以下の課題が存在する。

- 現在、撮影指示の画像転送までは自動化されているが、品質予測や追加撮影位置推定は、マニュアル操作である。そのため、最適撮影計画手法をクラウドサーバ側で自動化し、ユーザは画像撮影のみで高精度なモデル生成が完了するようなシステムの構築を目指す。

第5章 結論と今後の課題

5.1 結論

本研究では、大規模構造物に対する 3 次元現況反映型モデル生成のための高精度モデリング手法と最適撮影計画手法の開発を目的とした。具体的には、プラント設備を対象とし、円筒オブジェクト一致制約を用いた精密レジストレーションと円筒モデリングの同時処理手法を提案し、シミュレーション環境および実環境内でその有効性を検証した。また、写真測量における SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画手法、ならびに、提案した最適撮影計画手法、スマートフォンとクラウドシステムを活用した最適撮影計画支援システムの実作業 as-is モデル記録への応用手法を提案し、建物を撮影した画像や工事現場における提案手法への有用性を検証した。

本論文の第 2 章から第 4 章の各章で得られた結論をそれぞれ下記にまとめる。

- (1) プラント設備における維持改修の効率化のために、円筒オブジェクト一致制約に基づく、プラント配管系統レーザ計測点群データの精密レジストレーションと円筒モデリングの同時処理手法を提案した。本手法はプラント設備に多く存在する円筒配管を用いた、レジストレーションと円筒モデリングの同時処理手法であり、従来手法では困難であった点群間に重複がない点群に対しても、レジストレーションおよび円筒モデリングが可能であることを、擬似計測点群を用いて示した。また、レジストレーションと円筒モデリングのプロセスを一つの最適化問題に集約させることで、誤差の重畳が防止され、ミリオーダーの高精度なレジストレーションと円筒モデリングが可能であることを、シミュレーション環境および実環境で検証した。また、最適化に用いる適切な重み関数と調整パラメータ設定方法も示した。さらに、TLS より計測された点群から、Efficient RANSAC および独自の円筒フィルタリングを行うことで、レジストレーションおよびモデリングに有効な円筒のみを選択する手法、円筒パラメータを用いた自動ラフレジストレーション手法も開発することで、計測データからモデリングまでの一連のプロセス全体を提案した。プラントを実際に計測した点群に提案手法を適用し、結果として、配管端部誤差 $\pm 5\text{ mm}$ 以内という、プラ

ント改修工事における配管系統 CAD モデル生成時の要求精度を満たすレジストレーションと円筒配管モデリングが可能であることを確認した。

- (2) インフラ構造物を対象にした、SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画を導出可能なアルゴリズムを開発した。本手法は、処理時間のかかる MVS を行わずに、比較的短時間で処理可能な SfM の出力結果から、最終的に得られるであろう高密度モデルの品質を予測し、低品質と予測される領域を自動選択および品質改善できるような最適な追加撮影カメラポーズ推定手法であり、実際に生成した高密度メッシュモデルの誤差と品質予測指標の相関関係を検証することで、より相関のある品質予測指標を採用した。実環境下で撮影した画像群に対して、提案手法で適用し選択した画像集合は、従来手法で選択された画像集合や、提案手法と同枚数ランダムに選択された画像集合に比べて、高密度モデルの誤差が約 $1/6$ から $1/2$ まで低減できることを実験的に示した。また、品質予測に必要な処理時間は数秒程度で可能であり、撮影現場で MVS を行わずに品質確認が可能であることを示した。
- (3) スマートフォンとクラウドシステムを活用した最適撮影計画支援システムの実作業 as-is モデル記録への応用手法を提案した。本手法は、提案した最適撮影計画手法、および、スマートフォンとクラウドシステムを活用して、工事現場での写真撮影から 3 次元モデル生成までをその日のうちに完了できるようなシステムであり、実際の工事現場に対して提案手法を適用し、画像を撮影しながら高精度な 3 次元モデルを生成可能であることを確認した。モデル生成にかかる処理時間が、従来の過剰撮影や途中で MVS を行いモデルの品質確認を行う方法と比較し、約 $1/5$ 程度の時間で同程度の品質を伴う高密度モデルが生成できる可能性が示された。

5.2 今後の課題

本論文で提案した研究の実用性を高めるために、今後の課題を下記に述べる。

- (1) レジストレーションと円筒モデリングの同時処理手法では、むき出しの直進円筒配管を対象としている。よりロバストで高精度なモデリングを行うためには、実環境下において、たわんでいる円筒に対して、適切な分割数を自動決定する手法が必要となる。また、実際のプラント設備では保温材が巻かれている円筒が存在しており、それらに適用可能なアルゴリズムの開発が必要となる。
- (2) SfM-MVS の最適撮影計画手法では、品質を予測する際の各指標値の重みは一定

にしている．しかし，撮影段階ごとに指標の重みを変化させることで，再構成領域の増加や品質向上により寄与した追加カメラポーズを推定することが可能となる．

- (3) アップロードされた画像から品質を予測および最適撮影推定を行うためには，サーバ側で手動操作が必要となる．そのため，最適撮影計画手法をクラウドで行い，システム全体の自動化が必要となる．

参考文献

- [1] 経済産業省,「高圧ガス保安分野 スマート保安アクションプラン (案)」, <https://www.meti.go.jp/press/2020/07/20200710009/20200710009-3.pdf> (最終閲覧日: 2020/11/05)
- [2] 消防庁,「令和元年中の石油コンビナート等特別防災区域の特定事業所における 事 故 概 要 」, https://www.fdma.go.jp/pressrelease/houdou/items/200529_tokusai_2.pdf (最終閲覧日: 2020/11/06)
- [3] 国土交通省,「社会資本の老朽化の現状と将来」, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html (最終閲覧日: 2020/11/11)
- [4] 国土交通省,「橋梁の現状」, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/research01_pdf01.pdf (最終閲覧日: 2020/11/11)
- [5] クモノスコーポレーション株式会社,「プラントの現状把握に 3D レーザースキャナを活用しませんか?」, <https://www.kankou.co.jp/2018/07/3d-example-plant/> (最終閲覧日: 2021/02/03)
- [6] 国土交通省,「2 「荒廃するアメリカ」とその後の取組み」, <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/hakusho/h26/html/n1132000.html> (最終閲覧日: 2020/11/10)
- [7] G. Klein and D. Murray, “Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces,” in *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 225–234, 2007, doi: 10.1109/ISMAR.2007.4538852.
- [8] J. Engel, T. Schöps, and D. Cremers, “LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM,” in *Computer Vision -- ECCV 2014*, pp. 834–849, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-10605-2_54.
- [9] 金井理, “大規模環境の 3 次元計測と認識・モデル化技術の現状,” *精密工学会誌*, vol. 79, no. 5, pp. 379–383, 2013.
- [10] P. J. Besl and N. D. McKay, “A method for registration of 3-D shapes,” *IEEE Trans.*

- Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 14, no. 2, pp. 239–256, 1992, doi: 10.1109/34.121791.
- ol. 14, no. 2, pp. 239–256, 1992, doi: 10.1109/34.121791.
- [11] C. M. Shakarji, “Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 103, no. 6, p. 633, 1998, doi: 10.6028/jres.103.043.
 - [12] FARO® Focus Laser Scanner スペックシート, <https://www.faro.com/ja-jp>
 - [13] D. Akca, “Full automatic registration of laser scanner point clouds,” ETH, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Zürich, 2003. doi: 10.3929/ethz-a-004656666.
 - [14] M. Zhang, “Accurate Sphere Marker-Based Registration System of 3D Point Cloud Data in Applications of Shipbuilding Blocks,” *J. Ind. Intell. Inf.*, vol. 3, no. 4, pp. 318–323, 2015, doi: 10.12720/jiii.3.4.318-323.
 - [15] J. Böhm and S. Becker, “Automatic marker-free registration of terrestrial laser scans using reflectance,” in *Proceedings of the 8th conference on optical 3D measurement techniques, Zurich, Switzerland*, pp. 9–12, 2007.
 - [16] I. Stamos and M. Leordeanu, “Automated feature-based range registration of urban scenes of large scale,” in *2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings.*, vol. 2, pp. II–II, 2003, doi: 10.1109/CVPR.2003.1211516.
 - [17] P. W. Theiler, K. Schindler, and others, “Automatic registration of terrestrial laser scanner point clouds using natural planar surfaces,” *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 3, pp. 173–178, 2012, doi: 10.5194/isprsannals-I-3-173-2012.
 - [18] B. Yang, Z. Dong, F. Liang, and Y. Liu, “Automatic registration of large-scale urban scene point clouds based on semantic feature points,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 113, pp. 43–58, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.12.005>.
 - [19] R. Schnabel, R. Wahl, and R. Klein, “Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection,” *Comput. Graph. Forum*, vol. 26, no. 2, pp. 214–226, 2007. <http://cg.cs.uni-bonn.de/en/publications/paper-details/schnabel-2007-efficient/>
 - [20] T. O. Chan, D. D. Lichti, and D. Belton, “A rigorous cylinder-based self-calibration approach for terrestrial laser scanners,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 99, pp. 84–99, 2015, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.11.003.
 - [21] R. Fletcher, “A Modified Marquardt Subroutine for Non-linear Least Squares”, *Theoretical Physics Division, Atomic Energy Research Establishment*, 1971.

- [22] 森谷亮太, “円筒オブジェクト認識に基づくプラントレーザスキャン点群データの高精度レジストレーション”, 平成27年度北海道大学工学部情報エレクトロニクスシステム情報コース卒業論文, 2015
- [23] CloudCompare, <http://www.danielgm.net/cc/>
- [24] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography,” *Commun. ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, 1981, doi: 10.1145/358669.358692.
- [25] JISC 日本工業標準調査会, <http://www.jisc.go.jp/index.html>
- [26] J. M. Coughlan and A. L. Yuille, “Manhattan World: compass direction from a single image by Bayesian inference,” in *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, vol. 2, pp. 941–947, 1999, doi: 10.1109/ICCV.1999.790349.
- [27] 増田宏, 榎本昌一, “レーザスキャナによる設備計測に適した曲面当てはめ手法,” 2012年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 289–290, 2012.
- [28] 中川徹, 小柳義夫, “最小二乗法による実験データ解析”, 東京大学出版会, 1982
- [29] R. A. Maronna and V. J. Yohai, “Introduction, in Robust Statistics: Theory and Methods”, *John Wiley & Sons, Ltd*, pp. 1-16, 2006.
- [30] PCL, <http://pointclouds.org/>
- [31] Eigen, http://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page
- [32] Geomagic, <https://www.3dsystems.com/>
- [33] 国土交通省, 「老朽化の現状・老朽化対策の課題」, <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf> (最終閲覧日: 2020/11/11)
- [34] 国土交通省, 「点検支援技術(画像計測技術)を用いた3次元成果品納品マニュアル【橋梁編】(案)」, <https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/content/001336376.pdf> (最終閲覧日: 2020/11/05)
- [35] J. L. Schonberger and J. Frahm, “Structure-from-Motion Revisited,” in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4104–4113, 2016, doi: 10.1109/CVPR.2016.445.
- [36] D. Crandall, A. Owens, N. Snavely, and D. Huttenlocher, “Discrete-continuous optimization for large-scale structure from motion,” in *CVPR 2011*, pp. 3001–3008, 2011, doi: 10.1109/CVPR.2011.5995626.

- [37] N. Snavely, S. M. Seitz, and R. Szeliski, “Photo tourism: Exploring photo collections in 3D,” in *SIGGRAPH Conference Proceedings*, pp. 835–846, 2006, doi: 10.1145/1141911.1141964.
- [38] M. Goesele, B. Curless, and S. M. Seitz, “Multi-View Stereo Revisited,” in *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’06)*, vol. 2, pp. 2402–2409, 2006, doi: 10.1109/CVPR.2006.199.
- [39] Y. Furukawa and J. Ponce, “Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 32, no. 8, pp. 1362–1376, 2010, doi: 10.1109/TPAMI.2009.161.
- [40] D. G. Lowe, “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 60, no. 2, pp. 91–110, 2004, doi: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
- [41] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, “SURF: Speeded Up Robust Features,” *Computer Vision – ECCV 2006*, pp. 404–417, 2006, doi: 10.1007/11744023_32.
- [42] B. Triggs, P. F. McLauchlan, R. I. Hartley, and A. W. Fitzgibbon, “Bundle Adjustment --- A Modern Synthesis,” in *Vision Algorithms: Theory and Practice*, pp. 298–372, 2000, doi: 10.1007/3-540-44480-7_21.
- [43] D. Scharstein and R. Szeliski, “A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 47, no. 1, pp. 7–42, 2002, doi: 10.1023/A:1014573219977.
- [44] B. Hepp, M. Nießner, and O. Hilliges, “Plan3D: Viewpoint and Trajectory Optimization for Aerial Multi-View Stereo Reconstruction,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 38, no. 1, 2018, doi: 10.1145/3233794.
- [45] M. Roberts, S. Shah, D. Dey, A. Truong, S. Sinha, A. Kapoor, P. Hanrahan, and N. Joshi, “Submodular Trajectory Optimization for Aerial 3D Scanning,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, vol. 2017-Octob, pp. 5334–5343, 2017, doi: 10.1109/ICCV.2017.569.
- [46] K. Schmid, H. Hirschmüller, A. Dömel, I. Grixia, M. Suppa, and G. Hirzinger, “View Planning for Multi-View Stereo 3D Reconstruction Using an Autonomous Multicopter,” *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 65, no. 1, pp. 309–323, 2012, doi: 10.1007/s10846-011-9576-2.
- [47] C. Peng and V. Isler, “Adaptive View Planning for Aerial 3D Reconstruction,” in *International Conference on Robotics and Automation, {ICRA} 2019, Montreal, QC, Canada, May 20-24, 2019*, pp. 2981–2987, 2019, doi: 10.1109/ICRA.2019.8793532.

- [48] A. R. Martin, I. Rojas, K. Franke, and D. J. Hedengren, "Evolutionary View Planning for Optimized UAV Terrain Modeling in a Simulated Environment," *Remote Sensing*, vol. 8, no. 1. 2016, doi: 10.3390/rs8010026.
- [49] W. Jing, J. Polden, P. Y. Tao, W. Lin, and K. Shimada, "View planning for 3D shape reconstruction of buildings with unmanned aerial vehicles," in *2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1109/ICARCV.2016.7838774.
- [50] B. S. Alsadik, M. Gerke, and G. Vosselman, "OPTIMAL CAMERA NETWORK DESIGN FOR 3D MODELING OF CULTURAL HERITAGE," *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. I-3, pp. 7–12, 2012, doi: 10.5194/isprsannals-I-3-7-2012.
- [51] C. Mostegel, M. Rumpler, F. Fraundorfer, and H. Bischof, "UAV-Based Autonomous Image Acquisition with Multi-view Stereo Quality Assurance by Confidence Prediction," in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1109/CVPRW.2016.8.
- [52] C. Hoppe *et al.*, "Online Feedback for Structure-from-Motion Image Acquisition," in *British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2012, doi: 10.5244/C.26.70.
- [53] O. Mendez, S. Hadfield, N. Pugeault, and R. Bowden, "Next-best stereo: Extending next-best view optimisation for collaborative sensors," in *British Machine Vision Conference 2016, BMVC 2016*, vol. 2016-Septe, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1103/PhysRevB.83.184119.
- [54] E. Dunn and J.-M. Frahm, "Next best view planning for active model improvement," *Proceedings of the British Machine Vision Conference 2009*. British Machine Vision Association, BMVA, pp. 53.1-53.11, 2009, doi: 10.5244/C.23.53.
- [55] A. H. Ahmadabadian, S. Robson, J. Boehm, and M. Shortis, "Stereo-imaging network design for precise and dense 3d reconstruction," *Photogramm. Rec.*, vol. 29, no. 147, pp. 317–336, 2014, doi: 10.1111/phor.12076.
- [56] R. Huang, D. Zou, R. Vaughan, and P. Tan, "Active Image-Based Modeling with a Toy Drone," *2018 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 6124–6131, 2018, doi: 10.1109/ICRA.2018.8460673.
- [57] M. Mauro, H. Riemenschneider, A. Signoroni, R. Leonardi, and L. J. Van Gool, "A unified framework for content-aware view selection and planning through view importance.," in *British Machine Vision Conference (BMVC)*, pp. 1–11, 2014, doi: 10.5244/C.28.69.

- [58] C. Bailer, M. Finckh, and H. P. A. Lensch, “Scale Robust Multi View Stereo,” in *Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision - Volume Part III*, pp. 398–411, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-33712-3_29.
- [59] M. Goesele, N. Snavely, B. Curless, H. Hoppe, and S. M. Seitz, “Multi-View Stereo for Community Photo Collections,” in *2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision*, pp. 1–8, 2007, doi: 10.1109/ICCV.2007.4408933.
- [60] P. Wu, Y. Liu, M. Ye, J. Li, and S. Du, “Fast and Adaptive 3D Reconstruction With Extensively High Completeness,” *IEEE Trans. Multimed.*, vol. 19, no. 2, pp. 266–278, 2017, doi: 10.1109/TMM.2016.2612761.
- [61] S. Shen, “Accurate Multiple View 3D Reconstruction Using Patch-Based Stereo for Large-Scale Scenes,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 22, no. 5, pp. 1901–1914, 2013, doi: 10.1109/TIP.2013.2237921.
- [62] Y. Furukawa, B. Curless, S. M. Seitz, and R. Szeliski, “Towards Internet-scale multi-view stereo,” in *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1434–1441, 2010, doi: 10.1109/CVPR.2010.5539802.
- [63] D. Tingdahl and L. Van Gool, “A Public System for Image Based 3D Model Generation,” in *Computer Vision/Computer Graphics Collaboration Techniques*, pp. 262–273, 2011, doi: 10.1007/978-3-642-24136-9_23.
- [64] A. Hornung, B. Zeng, and L. Kobbelt, “Image selection for improved Multi-View Stereo,” in *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1–8, 2008, doi: 10.1109/CVPR.2008.4587688.
- [65] C. Mostegel, F. Fraundorfer, and H. Bischof, “Prioritized multi-view stereo depth map generation using confidence prediction,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 143, pp. 167–180, 2018, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.03.022.
- [66] C. Yang, F. Zhou, and X. Bai, “3D Reconstruction through Measure Based Image Selection,” in *2013 Ninth International Conference on Computational Intelligence and Security*, pp. 377–381, 2013, doi: 10.1109/CIS.2013.86.
- [67] M. Mauro, H. Riemenschneider, A. Signoroni, R. Leonardi, and L. V Gool, “An Integer Linear Programming Model for View Selection on Overlapping Camera Clusters,” in *2014 2nd International Conference on 3D Vision*, vol. 1, pp. 464–471, 2014, doi: 10.1109/3DV.2014.25.
- [68] P. Labatut, J.-P. Pons, and R. Keriven, “Efficient Multi-View Reconstruction of Large-Scale Scenes using Interest Points, Delaunay Triangulation and Graph Cuts,” *2007 IEEE 11th Int. Conf. Comput. Vis.*, pp. 1–8, 2007, doi: 10.1109/ICCV.2007.4408892.

- [69] H. Si, “TetGen, a Delaunay-Based Quality Tetrahedral Mesh Generator,” *ACM Trans. Math. Softw.*, vol. 41, no. 2, 2015, doi: 10.1145/2629697.
- [70] 村木 広和, 田中 成典, 古田 均, 「デジカメ活用によるデジタル測量入門[POD版]」, 森北出版株式会社.
- [71] Bentley, ContextCapture, <https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture>
- [72] D. Comaniciu and P. Meer, “Mean shift: a robust approach toward feature space analysis,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 5, pp. 603–619, 2002, doi: 10.1109/34.1000236.
- [73] B. Horn, “Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Unit Quaternions,” *J. Opt. Soc. A*, vol. 4, pp. 629–642, 1987, doi: 10.1364/JOSAA.4.000629.
- [74] Visual Studio, <https://visualstudio.microsoft.com/ja/vs/older-downloads/>
- [75] Qt, <https://www.qt.io/jp>
- [76] OpenCV, <https://opencv.org/>
- [77] A. Knapitsch, J. Park, Q.-Y. Zhou, and V. Koltun, “Tanks and Temples: Benchmarking Large-Scale Scene Reconstruction,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 36, no. 4, 2017, doi: 10.1145/3072959.3073599.
- [78] 国土交通省, 「i-Construction 委員会 報告書 概要資料」, <https://www.mlit.go.jp/common/001137123.pdf> (最終閲覧日 : 2020/11/23)
- [79] Google, 「Google フォト」, <https://www.google.com/intl/ja/photos/about/> (最終閲覧日 : 2020/11/23)
- [80] Google, 「Google ドライブ」, https://www.google.com/intl/ja_jp/drive/ (最終閲覧日 : 2020/11/23)
- [81] Google, 「Google ハングアウト」, <https://hangouts.google.com/?hl=ja> (最終閲覧日 : 2020/11/23)

謝辞

本論文は、北海道大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻博士課程において行った研究をまとめたものである。論文執筆にあたり、大変多くの方々からご指導ならびにご協力を頂きました。この場を借りて改めて御礼申し上げます。

本専攻の金井 理教授におかれましては、学士課程4年次から6年間にわたりご指導を賜り、本研究の細部までご指導いただきました。また、国内外の学会発表や、企業との共同研究など大変貴重な機会をいただき、多くの経験を積むことができました。心より深謝申し上げます。

本専攻の伊達 宏昭准教授におかれましては、ミーティングや日常の議論を通じて、研究に関する多くの知識やご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

本専攻の小野里 雅彦教授、近野 敦教授におかれましては、副査として、本論文の指導や意見をいただき、心より感謝申し上げます。株式会社日立製作所 横浜研究所の渡辺 正浩氏を始めとする、中野 隆宏氏、山内 雄太氏におかれましては、学士課程4年次から修士課程までの3年間にわたり、定期的な打ち合わせや計測データ提供など、多くのご指導・ご支援をいただきました。また、冷暖房空調設備の計測データ提供や、現場視点からの意見等をいただきました新菱冷熱工業の脇坂 英佑氏には心から感謝申し上げます。

アジア航測株式会社の新名 恭仁氏、本間 亮平氏におかれましては、博士後期課程から3年間にわたり、ご指導を賜りました。また、株式会社環境風土テクノの須藤 清隆氏、株式会社堀口組の西山 充氏、本研究室の阿久津 啓君におかれましては、第4章の工事現場での計測環境のご提供と計測作業にご協力いただきました。心から感謝申し上げます。

本専攻のデジタル幾何処理工学研究室の研究補助員の高橋 緑様、宮尾 慶子様におかれましては、事務手続きに関して多くのサポートをしていただき、大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。また、本研究室の先輩、同輩ならびに後輩の方々には、実験に協力して頂いたり、研究活動のみに留まらず公私にわたり多くのサポートを頂きました。大変感謝いたします。

9年間という長い大学生活の間、生活面・精神面で支えていただき、大変な苦勞をかけしました両親には心から感謝いたします。

最後に，本研究は JSPS 科研費 JP20J10867 の助成を受けました．ここに感謝の意を表します．

発表実績

I. 査読付き学術雑誌

1. R. Moritani, S. Kanai, H. Date, M. Watanabe, T. Nakano and Y. Yamauchi, “Cylinder-based Efficient and Robust Registration and Model Fitting of Laser-scanned Point Clouds for As-built Modeling of Piping Systems,” *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 16, no. 3, pp. 396–412, 2019.
2. R. Moritani, S. Kanai, H. Date, M. Watanabe, T. Nakano and Y. Yamauchi, “Cylinder-based Simultaneous Registration and Model Fitting of Laser-scanned Point Clouds for Accurate As-built Modeling of Piping System,” *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 15, no. 5, pp. 720–733, 2018.

II. 査読付き国際会議プロシーディング

1. R. Moritani, S. Kanai, K. Akutsu, K. Suda, A. Elshafey, N. Urushidate, and M. Nishikawa, “Streamlining Photogrammetry-based 3D Modeling of Construction Sites using a Smartphone, Cloud Service and Best-view Guidance,” *Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, pp.1037–1044, 2020.
2. R. Moritani, S. Kanai, H. Date, Y. Niina and R. Honma, “Plausible Reconstruction of an Approximated Mesh Model for Next-Best View Planning of SfM-MVS,” *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2020*, pp.465–471, 2020.
3. R. Moritani, S. Kanai, H. Date, Y. Niina and R. Honma, “Quality Prediction of Dense Points Generated by Structure from Motion for High-Quality and Efficient as-is Model Reconstruction,” *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W13*, pp.95–101, 2019.
4. R. Moritani, S. Kanai, H. Date, M. Watanabe, T. Nakano and Y. Yamauchi, “Cylinder-based Efficient and Robust Registration and Model Fitting of Laser-scanned Point Clouds for As-built Modeling of Piping Systems,” *CAD’18 – the 15th annual International CAD Conference, Proceedings of CAD’18*, pp. 262–267, 2018.

5. R. Moritani, S. Kanai, H. Date, M. Watanabe, T. Nakano and Y. Yamauchi, “Cylinder-based Simultaneous Registration and Model Fitting of Laser-scanned Point Clouds for Accurate As-built Modeling of Piping System,” *CAD’17 – the 14th annual International CAD Conference, Proceedings of CAD’17*, pp. 389–394, 2017.

III. 学会発表

1. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 新名恭仁, 本間亮平, ” SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画支援システムの開発 (第 8 報) – 追加撮影終了条件の検討 –, 2021 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2021. (口頭発表予定)
2. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 新名恭仁, 本間亮平, ” SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画支援システムの開発 (第 7 報) – 単一低品質領域に対する複数追加撮影用カメラポーズの推定 –, 2020 年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp. 19-20, 2020. (オンライン開催)
3. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 新名恭仁, 本間亮平, ” SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画支援システムの開発 (第 6 報) – 低品質領域抽出結果に基づく追加撮影用カメラ位置の推定 –, 2020 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 43-44, 2020. (オンライン開催)
4. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 新名恭仁, 本間亮平, ” SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画支援システムの開発 (第 5 報) – 幾何学的特徴を用いた近似物体表面モデルの改良 –, 2020 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 226-227, 2020. (新型コロナウイルス感染症拡大防止に伴い大会中止)
5. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 新名恭仁, 本間亮平, ” SfM-MVS 向け最適撮影計画支援システムのための品質予測指標の改善および撮影不足箇所の推定”, 日本写真測量学会令和元年度秋季学術講演会発表論文集, pp. 201-204, 2019.
6. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 新名恭仁, 本間亮平, ” SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画支援システムの開発 (第 3 報) – モデル品質予測指標の改善 –, 2019 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 653-654, 2019.
7. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 新名恭仁, 本間亮平, ” SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画支援システムの開発 (第 4 報) – 近似物体表面モデルに対する画像被覆率評価による撮影不足箇

- 所推定－”, 2019 年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp. 13-14, 2019.
8. 阿久津啓, 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, ” マッチングコストに応じたコントラスト改善画像の選択による低テクスチャ物体の SfM-MVS 再構成モデル品質の向上”, 2019 年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp. 37-38, 2019.
 9. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 新名恭仁, 本間亮平, “SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画支援システムの開発”, 日本写真測量学会令和元年度年次学術講演会発表論文集, pp. 55-58, 2019.
 10. 阿久津啓, 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, ” 多重撮影とヒストグラム均一化による低テクスチャ物体の SfM-MVS 再構成処理の頑健性と精度向上”, 2019 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 89-90, 2019.
 11. 金井理, 阿久津啓, 森谷亮太, 伊達宏昭, ” 低テクスチャ物体に対する SfM-MVS 再構成改善のための一手法”, 日本写真測量学会北海道支部第 37 回学術講演会予稿集, pp. 33-38, 2019.
 12. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 新名恭仁, 本間亮平, ” SfM-MVS による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画 ー貪欲法による低品質領域の推定手法の開発ー”, 日本写真測量学会北海道支部第 37 回学術講演会予稿集, pp. 25-31, 2019
 13. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, ” Structure from Motion による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画 ーモデル品質低下要因の分析とその対処法の考察ー”, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 62-63, 2018. (北海道胆振東部地震のため口頭発表なし)
 14. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, ” Structure from Motion による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画 ー近似物体表面モデルの生成と品質予測指標の推定ー“, 2018 年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp. 41-42, 2018.
 15. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 渡辺正浩, 中野隆宏, 山内雄太, ” 円筒オブジェクト一致制約を利用したプラント配管系統レーザスキャン点群データの高精度レジストレーション (第 4 報) ー円筒ラフ抽出精度の改良およびラフレジストレーションの効率化ー”, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 573-574, 2018.
 16. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 渡辺正浩, 中野隆宏, 山内雄太, ” 円筒オブジェクト一致制約を利用したプラント配管系統レーザスキャン点群データの

- 高精度レジストレーション（第 3 報）－効率的な円筒抽出のための配管系統上点群の選択的抽出－”, 2017 年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp. 83-84, 2017.
17. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 渡辺正浩, 中野隆宏, 山内雄太, “円筒オブジェクト一致制約を利用したプラント配管系統レーザスキャン点群データの高精度レジストレーション（第 2 報）－重み付き最小二乗法導入によるレジストレーションの精度向上－”, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 509-510, 2017.
18. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 渡辺正浩, 中野隆宏, 山内雄太, “円筒オブジェクト一致制約を利用したプラント配管系統レーザスキャン点群データの高精度レジストレーション”, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 575-576, 2017.
19. 森谷亮太, 金井理, 伊達宏昭, 渡辺正浩, 中野隆宏, 山内雄太, “円筒オブジェクト一致制約を利用したプラント配管系統レーザスキャンデータの高精度レジストレーション”, 2016 年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp. 21-22, 2016.

IV. その他発表

1. 森谷亮太, “プラント配管系統レーザ計測点群データの精密レジストレーションと円筒モデリングの同時処理”, 大規模環境の 3 次元計測と認識・モデル化技術専門委員会 第 31 回定例研究会, 札幌, 8 月, 2018. (口頭, 査読なし)
2. 森谷亮太, “Structure from Motion による効率的で高精度な as-is モデル生成のための最適撮影計画 -モデル品質低下要因の分析とその対処法の考察-”, 大規模環境の 3 次元計測と認識・モデル化技術専門委員会 第 32 回定例研究会, 東京, 10 月, 2018. (ポスター, 査読なし)
3. 森谷亮太, 加藤雅志, “TLS キャリブレーションと点群からの特徴抽出”, 大規模環境の 3 次元計測と認識・モデル化技術専門委員会 第 28 回定例研究会, 札幌, 7 月, 2017. (口頭, 査読なし)