



Title	プラント改修向けas-builtモデル構築のための地上型レーザスキャナの最適配置計画
Author(s)	脇坂, 英佑
Citation	北海道大学. 博士(情報科学) 甲第13302号
Issue Date	2018-09-25
DOI	10.14943/doctoral.k13302
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/71905
Type	theses (doctoral)
File Information	Eisuke_Wakisaka.pdf



[Instructions for use](#)

博士論文

プラント改修向け as-built モデル構築のための
地上型レーザスキャナの最適配置計画

脇坂 英佑

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

2018 年 8 月

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

脇坂 英佑

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

プラント改修向け as-built モデル構築のための 地上型レーザスキャナの最適配置計画*

脇坂 英佑

概要

温室効果ガス削減の流れを受け、空調設備業界では、近年、省エネルギーを目的とする既存設備の改修の需要が高まっている。改修工事では、既存の熱源プラントや配管系統などの現況をまず計測し、その一部を新規設備と交換する作業が必要となる。近年、その計測の高精度化・効率化を図るため、3次元地上型レーザスキャナ (TLS) が導入され始めている。TLS により計測された既存設備の3次元計測点群から、設備の現況形状と配置を反映した3次元 as-built モデルを構築することで、改修に必要な調査期間の短縮と綿密な計画立案が可能となっている。本来、改修工事に求められる精度品質の3次元 as-built モデルを構築するためには、設備各部に要求される計測条件の制約を満たすよう、設備内に地上型レーザスキャナ (TLS) を適切に設置し、効率的に設備を計測することが望ましい。しかし現状は、熟練オペレータの判断のみでこのスキャナの配置が決定されているため、その配置において計測条件の制約が満たされ、求められる精度品質の3次元 as-built モデルが生成できるという保証が必ずしも無いのが実情である。本研究はこの問題を解決するため、事前調査時に既存設備をカメラで撮影した多数の写真から Structure-from-Motion (SfM) を用い計測対象設備のラフな3次元モデル (SfM モデル) を生成し、この SfM モデルを活用し、TLS 計測時のレーザの入射角や計測距離、レジストレーションのための点群間重複の制約を満たし、計測必要箇所の計測率を最大化する最適スキャナ配置を、整数計画問題等の最適化手法を用いて計算機により合理的に導出する手法を新たに提案した。また、実設備を対象に、提案手法で得られたスキャナ配置と熟練者が決定したスキャナ配置について、スキャン回数、計測の網羅性、as-built モデル化の精度、処理時間の観点から比較を行い、提案手法の優位性を示した。さらに、実務への展開時に求められる最適配置に対する要求条件の様々な拡張に対しても、提案手法の目的関数や制約条件を一部変更するだけで対応可能であることを、計算機シミュレーションにより確認した。

キーワード：地上型レーザスキャナ, スキャナ配置計画, Structure-from-Motion, Next-Best-View 問題, 整数計画問題, As-built モデル化, プラント

*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-DT79155209,
2018年8月10日

Optimal Placement of a Terrestrial Laser Scanner for As-built Modelling for Plant Renovation[†]

Eisuke Wakisaka

Abstract

In response to the trend of reducing greenhouse gas emissions, demand for renovation of existing facilities for energy conservation is increasing in recent years in the heating, ventilating, and air-conditioning (HVAC) industry. In renovation work, it is necessary to check the current status of existing heat source plants and piping systems, and to exchange some of them with new ones. In recent years, a three-dimensional (3D) terrestrial laser scanner (TLS) have begun to be introduced in order to improve measurement accuracy and efficiency. It is possible to shorten the investigation process and make in-depth planning necessary for renovation work by constructing a 3D as-built model that reflects the current shape and arrangement of facilities from the 3D laser-scanned point cloud of existing facilities by using TLS. Ordinarily, in order to build a high quality 3D as-built model required for renovation work, it is desirable to properly install a TLS in the facility so as to efficiently scan the facility satisfying constraints of scan qualities required for each part of the facility. However, since the placement of the TLS has been decided only by an experienced operator, there is no guarantee that its placement satisfies the constraints of the scan qualities and that a 3D as-built model of the required quality can be generated.

To solve the issues, in this research, a coarse 3D model (SfM model) of the object to be scanned is constructed from multiple photos taken of the existing equipment with a camera by using Structure-from-Motion (SfM). Then, by utilizing this SfM model, we have developed a new method that an optimal scanner placement maximize the scan coverage while satisfying constraints on laser beam incident angle, scan range, and scan overlap by using a numerical optimization approach. In the actual site, we compare the scanner placement obtained by the proposed method and the scanner placement decided by experienced operator in terms of the

number of scans, scan coverage, as-built modeling accuracy, and processing time, and demonstrated the superiority of the proposed method. In addition, we confirmed by computer simulation that we can deal with various extensions of requirement for optimal placement required at the time of applyment to practical work by changing part of objective function and constraint condition of proposed method.

Key words : Terrestrial laser scanner, Scanner placement planning, Structure-from-Motion, Next-Best-View problem, Integer programming, As-built modeling, Plant

目次

第 1 章 緒論

1.1 本研究の背景	1
1.2 関連研究	5
1.3 本研究の目的および特徴	12
1.4 論文の構成	14

第 2 章 ボクセル表現と貪欲法を用いた準最適スキャナ配置計画アルゴリズムの開発

2.1 提案手法の概要	16
2.2 Structure-from-Motion (SfM) による 3D モデルの構築	17
2.2.1 SfM による 3D モデルの自動構築	17
2.2.2 計測重要度の分類	20
2.2.3 SfM モデル欠損部の補完	21
2.2.3.1 デプスマップの生成	22
2.2.3.2 SfM モデルの欠損部の補完	23
2.3 スキャナ配置候補の推定	26
2.3.1 ボクセルの生成	27
2.3.2 ボクセルへの計測重要度の付与	27
2.3.3 ボクセルを用いた空間占有状態の分類	28
2.3.4 ボクセルの支配的法線の算出	31
2.3.5 床面上の点群の抽出	31
2.3.6 スキャナ設置候補点の推定	34
2.4 準最適スキャナ位置の導出	34
2.4.1 計測対象となるボクセルの選定	34
2.4.2 スキャナ配置問題の定式化	37
2.4.3 制約条件	38

2.4.4	貪欲法による準最適スキャナ配置の導出	39
2.5	小規模で簡易な計測環境におけるスキャナ配置の導出結果	41
2.5.1	計測対象	41
2.5.2	計測重要度の設定	43
2.5.3	各種パラメータの設定	44
2.5.3.1	スキャナパラメータの設定	44
2.5.3.2	制約条件の設定	45
2.5.4	準最適スキャナ配置の導出結果	46
2.5.5	計測重要度による制約条件の効果	50
2.5.6	オペレータによる配置結果との比較	53
2.5.6.1	実験条件	53
2.5.6.2	オペレータによるスキャナ配置との比較評価	54
2.6	中規模で複雑な計測環境におけるスキャナ配置の導出結果	55
2.6.1	計測対象	56
2.6.2	計測重要度の設定	57
2.6.3	各種パラメータの設定	57
2.6.4	準最適スキャナ配置の導出結果	57
2.6.5	計測重要度の制約による効果	61
2.6.6	オペレータによる配置結果との比較	63
2.6.6.1	実験条件	63
2.6.6.2	オペレータによるスキャナ配置との比較評価	64
2.6.7	As-built モデル化精度の定量評価	65
2.6.6.1	実験条件	65
2.6.6.2	モデル化手順	67
2.6.6.3	モデル化精度の評価結果	67
2.7	まとめ	69

第3章 メッシュモデル表現と整数計画法を用いた最適スキャナ配置計画アルゴリズム

ムの開発

3.1	前章における提案手法の課題と解決策	71
3.2	提案手法の概要	72
3.3	Structure-from-Motion (SfM) による 3D モデル構築	74
3.3.1	面分への計測重要度の付与	74
3.4	最適スキャナ位置の導出	75
3.4.1	スキャナ配置問題の定式化	76
3.4.2	整数計画問題の採用理由	76
3.4.3	定式化	78
3.4.4	計測対象となる面分の選定	80
3.4.4.1	各面分への ID 付与	81
3.4.4.2	カメラ撮影位置からの画像の生成	81
3.4.4.3	画像走査による可視性の判定	81
3.4.5	可観測行列の生成	83
3.4.5.1	スキャナ視点からのパノラマ展開画像の生成	83
3.4.5.2	画像走査による可視性と計測品質条件の判定	84
3.4.6	整数計画法による最適スキャナ配置の導出	85
3.5	最適スキャナ配置の導出結果	86
3.5.1	計測対象および計測重要度の設定	86
3.5.2	スキャナパラメータおよび制約条件閾値の設定	87
3.5.3	最適スキャナ配置結果	88
3.5.4	前章の結果との比較	90
3.7	As-built モデル化精度の定量評価	92
3.7.1	実験条件およびモデル化手順	92
3.7.2	前章の結果との比較	92
3.8	処理時間の比較	94
3.8.1	GPU による可視性判定の効果	94

3.8.1.1	全探索の交差判定による可視性判定手法	94
3.8.1.2	全探索の交差判定による可視性判定との比較	95
3.8.2	全体の処理時間の比較	96
3.9	まとめ	97

第4章 実務への展開を考慮した最適スキャナ配置アルゴリズムへの拡張

4.1	実務で適用する際の課題と解決策	98
4.2	未計測領域を防止する追加スキャナ計測位置推定アルゴリズム	100
4.2.1	提案手法の概要	100
4.2.2	定式化	101
4.2.3	追加スキャナ計測位置候補の推定	102
4.2.4	可視性判定と可観測行列の生成	103
4.2.5	追加スキャナ計測位置の導出	104
4.2.6	追加スキャナ計測配置の導出結果	104
4.2.6.1	計測対象および未計測面分	104
4.2.6.2	スキャナパラメータおよび制約条件閾値の設定	105
4.2.6.3	追加スキャナ計測配置結果	105
4.3	最短計測順序および移動経路導出アルゴリズム	109
4.3.1	提案手法の概要	109
4.3.2	定式化	110
4.3.3	移動可能領域グラフの構築	111
4.3.4	経路候補グラフの算出	113
4.3.5	最短移動経路の導出	113
4.3.6	計測順序および最短移動経路の導出結果	114
4.3.6.1	導出対象および設定パラメータ	114
4.3.6.2	計測順序および最短移動経路結果	115
4.3.6.3	最短計測順序の効果検証	115
4.4	レジストレーションのためのオーバーラップを考慮したスキャナ配置計画アルゴ	

リズム	117
4.4.1 提案手法の概要	117
4.4.2 平面領域の選択	119
4.4.3 最適スキャナ配置の導出	119
4.4.3.1 レジストレーションが可能な条件	119
4.4.3.2 定式化	120
4.4.3.3 可視性判定と可観測行列の生成	121
4.4.3.4 レジストレーションスコアの算出	121
4.4.3.3 オーバーラップを考慮した最適スキャナ配置の導出	123
4.4.4 オーバーラップを考慮した最適スキャナ配置の導出結果	123
4.4.4.1 計測対象および平面ターゲット	123
4.4.4.2 スキャナパラメータおよび制約条件閾値の設定	123
4.4.4.3 オーバーラップを考慮した最適スキャナ配置結果	124
4.5 まとめ	127
第5章 結論と今後の課題	
5.1 結論	129
5.2 今後の課題	131
参考文献	132
謝辞	135
研究業績目録	136

図目次

図 1.1	国内の建設投資における維持修繕工事の推移[2].....	1
図 1.2	手作業と TLS による調査から施工までの流れの違い	2
図 1.3	地上型レーザスキャナ	3
図 1.4	空調設備の 3D レーザスキャナ計測と as-built 3 次元モデル化.....	3
図 1.5	入射角および計測距離による計測精度の変化	4
図 1.6	スキャナ計測によるオクルージョン領域の変化	4
図 1.7	レジストレーションのための点群間重複	4
図 1.8	3D レーザスキャナにおける入射角および計測距離による計測精度の変化.....	6
図 1.9	リバースエンジニアリング分野での NBV に関する研究例	6
図 1.10	高速なボクセルベースの NBV 手法を用いた Svensson ら[15]の手法による処理例.....	7
図 1.11	配管のモデル化をするための NBV 手法を用いた Kawashima ら[13]の手法による処理例.....	8
図 1.12	計測精度を考慮したスキャナ配置を導出する Soudarissanane ら[14]の手法による処理例.....	8
図 1.13	対話的な位置の微調整による可視性確認が可能な Ahn ら[16]の手法による処理例.....	9
図 1.14	初期の配置計画における未計測領域を計測するスキャナ設置位置を導出する Blaer ら[18]の手法による処理例.....	10
図 1.15	分割統治法を用いてスキャナ設置位置を導出する Zhang ら[19]の手法による処理例.....	10
図 1.16	2つの整数計画問題を用いた北田ら[20]の手法による処理例	11
図 1.17	1.3 節の各問題点に対する解決策	13
図 1.18	本研究の処理手順の概要	14
図 2.1	準最適スキャナ配置計画手法の概要	17
図 2.2	SfM による 3D モデル構築の処理手順	18

図 2.3	異なる視点の写真からの 3 次元形状の復元のイメージ[24].....	18
図 2.4	MVS による密な 3 次元点群の復元[24].....	19
図 2.5	SfM ソフトウェアから構築された空調設備の SfM モデル.....	19
図 2.6	計測重要度の定義.....	20
図 2.7	SfM モデルに対する計測重要度の分類.....	20
図 2.8	SfM モデルにおける欠損領域.....	21
図 2.9	欠損部を含む SfM モデルに対する物体の有無の誤分類.....	22
図 2.10	デプスマップの生成.....	23
図 2.11	デプスマップによる欠損部の補完手法の概要.....	24
図 2.12	RGB 類似性に基づいたデプスの補完手法の適用.....	25
図 2.13	補完手法の方向依存性と平均化処理.....	25
図 2.14	スキャナ配置候補の推定の処理手順.....	26
図 2.15	ボクセルの生成.....	27
図 2.16	ボクセルへの計測重要度の付与.....	27
図 2.17	光線による空間占有状態の判別.....	28
図 2.18	ボクセルを用いた空間占有状態の分類手順.....	29
図 2.19	デプスマップの補完画素を光線が通過する際の処理.....	30
図 2.20	ボクセルの支配的法線.....	31
図 2.21	床面ボクセルの抽出.....	32
図 2.22	三脚を含む TLS の包絡形状を近似した円柱.....	33
図 2.23	スキャナが設置可能な床面領域の推定.....	33
図 2.24	準最適スキャナ位置の導出の処理手順.....	35
図 2.25	計測対象となるボクセルの選定.....	35
図 2.26	可視性の算出.....	36
図 2.27	各種制約条件.....	38
図 2.28	計測対象となるボイラ室の図面（上面図）.....	42
図 2.29	計測対象の SfM モデル（ボイラ室）.....	42

図 2.30	SfM により推定された カメラの位置姿勢 (ボイラ室)	42
図 2.31	ボイラ室の SfM モデルへの計測重要度の付与	43
図 2.32	本研究で使用した地上型レーザスキャナ (TLS)	43
図 2.33	スキャナパラメータの定義	44
図 2.34	スキャナ設置候補点の推定までの処理結果 (ボイラ室)	48
図 2.35	準最適スキャナ配置結果 (ボイラ室)	49
図 2.36	『未計測』となったボクセルの分布 (ボイラ室)	49
図 2.37	計測重要度を考慮しない場合のスキャナ配置結果 (ボイラ室)	51
図 2.38	計測品質を満たさないボクセルの分布 (ボイラ室)	52
図 2.39	計測品質を満たす『重要度：高』のボクセルに対する計測率の推移 (ボイラ室)	52
図 2.40	スキャナ設置位置の計測方法	53
図 2.41	熟練オペレータによるスキャナ配置結果 (ボイラ室)	54
図 2.42	各ケースにおける計測率の推移 (熱源機械室)	55
図 2.43	計測品質の充足条件を緩和した場合の計測率の変化 (熱源機械室)	55
図 2.44	計測対象となる熱源機械室の図面 (上面図)	56
図 2.45	計測対象の SfM モデル (熱源機械室)	57
図 2.46	SfM により推定されたカメラの位置姿勢 (熱源機械室)	57
図 2.47	熱源機械室の SfM モデルへの計測重要度の付与	57
図 2.48	熱源機械室におけるスキャナ設置候補点の推定までの処理結果	59
図 2.49	準最適スキャナ配置結果布 (熱源機械室)	60
図 2.50	『未計測』となったボクセルの分布 (熱源機械室)	60
図 2.51	計測重要度を考慮しない場合のスキャナ配置結果 (熱源機械室)	62
図 2.52	計測品質を満たさないボクセルの分布 (熱源機械室)	63
図 2.53	計測品質を満たす『重要度：高』のボクセルに対する計測率の推移 (熱源機械室)	63
図 2.54	熟練オペレータによるスキャナ配置結果 (熱源機械室)	64

図 2.55	各ケースにおける計測率の推移（熱源機械室）	65
図 2.56	計測品質の充足条件を緩和した場合の計測率の変化（熱源機械室）	65
図 2.57	白黒ターゲット	66
図 2.58	導出したスキャナ設置位置の指示方法	66
図 2.59	評価対象となるフランジの パラメータ	66
図 2.60	トータルステーションによるフランジ計測	66
図 2.61	点群データからのフランジパラメータの取得	67
図 2.62	各ケースのスキャナ設置位置分布と評価対象となるフランジ	68
図 2.63	フランジ直径のモデリング誤差	69
図 2.64	フランジ端面の中心位置のモデリング誤差	69
図 3.1	可視性の誤分類により未計測となるボクセル	72
図 3.2	最適スキャナ配置計画手法の概要	73
図 3.3	SfM による 3D モデル構築手法の概要	74
図 3.4	面分への計測重要度の付与	75
図 3.5	最適スキャナ位置の導出手法の概要	76
図 3.6	SfM モデルを構成する各面分への固有 RGB 値の付与（ボイラ室）	81
図 3.7	画像走査による『可視』となる面分の抽出	82
図 3.8	入射角の検査	82
図 3.9	スキャナ視点からのパノラマ展開画像の生成	84
図 3.10	計測品質条件の検査	85
図 3.11	計測対象となる SfM モデルの計測重要度の分類	86
図 3.12	解像度以下の面分のレンダリング結果	87
図 3.13	ボイラ室における最適スキャナ配置結果	89
図 3.14	熱源機械室における最適スキャナ配置結果	89
図 3.15	『観測不可』となった面分の分布（a:ボイラ室, b:熱源機械室）	89
図 3.16	各ケースのスキャナ配置の比較（ボイラ室）	90
図 3.17	各ケースのスキャナ配置の比較（熱源機械室）	90

図 3.18	フランジ直径のモデリング誤差	93
図 3.19	フランジ端面の中心位置のモデリング誤差	93
図 3.20	全探索の交差判定による可視性判定	94
図 3.21	面分数に対する可視性判定の計算時間の推移（実測値）	95
図 3.22	最適スキャナ位置の導出（A3）における計算時間	95
図 4.1	未計測領域のための追加スキャナ計測位置推定手法の概要	100
図 4.2	追加スキャナ計測候補の推定	102
図 4.3	未計測面分の計測品質条件の検査	103
図 4.4	『重要度:高』の未計測面分の分布（ボイラ室）	105
図 4.5	『重要度:高』の未計測面分の分布（熱源機械室）	105
図 4.6	ボイラ室における追加スキャナ計測配置結果	106
図 4.7	熱源機械室における追加スキャナ計測配置結果	106
図 4.8	小型 3D レーザスキャナおよび高所用の三脚	107
図 4.9	最短計測順序および移動経路の導出手法の概要	109
図 4.10	移動可能領域の推定	112
図 4.11	移動可能領域グラフの構築	113
図 4.12	経路グラフの構築	113
図 4.13	熱源機械室における最短移動経路の導出結果（上面図）	114
図 4.14	スキャナ設置位置と導出した最短計測順序（上面図）	115
図 4.15	オーバーラップを考慮した最適スキャナ配置計画手法の概要	118
図 4.16	レジストレーションが可能な条件	119
図 4.17	ターゲットを構成する面分の計測品質条件の検査	122
図 4.18	レジストレーション行列の生成	123
図 4.19	SfM モデル内の選択した平面領域（熱源機械室）	124
図 4.20	オーバーラップを考慮の有無によるスキャナ配置の違い	125
図 4.21	レジストレーションが可能となるスキャナ設置位置ペア	125

表目次

表 2.1	光線の通過確率 pvr	36
表 2.2	最適スキャナ配置の導出アルゴリズム	41
表 2.3	SfM に使用したカメラの仕様	43
表 2.4	本研究で使用した TLS の仕様	43
表 2.5	スキャナパラメータの設定値	45
表 2.6	制約条件の設定値	45
表 2.7	計測対象ボクセル数とスキャナ設置候補点数 (ボイラ室)	46
表 2.8	準最適スキャナ配置の計測率 (ボイラ室)	46
表 2.9	準最適スキャナ配置の計算時間 (ボイラ室)	50
表 2.10	計測重要度を考慮しないスキャナ配置の制約条件の設定値 (ボイラ室) ...	50
表 2.11	計測重要度を考慮しないスキャナ配置の計測率 (ボイラ室)	51
表 2.12	計測品質を満たさないボクセルの割合 (ボイラ室)	52
表 2.13	熟練オペレータによるスキャナ配置の計測率 (ボイラ室)	54
表 2.14	熱源機械室における計測対象ボクセル数とスキャナ設置候補点数	58
表 2.15	準最適スキャナ配置の計測率 (熱源機械室)	60
表 2.16	準最適スキャナ配置の計算時間 (熱源機械室)	61
表 2.17	計測重要度を考慮しないスキャナ配置の計測率 (熱源機械室)	61
表 2.18	計測品質を満たさないボクセルの割合 (熱源機械室)	62
表 2.19	熟練オペレータによるスキャナ配置の計測率 (熱源機械室)	64
表 3.1	計測対象となる SfM モデルの詳細	85
表 3.2	スキャナパラメータの設定値	87
表 3.3	制約条件の設定値	88
表 3.4	計測対象面分数とスキャナ設置候補点数	88
表 3.5	最適スキャナ配置の計測率	88

表 3.6	各ケースのスカナ設置箇所数	91
表 3.7	各ケースの計測品質を満たす計測率	91
表 3.8	最適スカナ配置の計算時間（ボイラ室および熱源機械室）	96
表 4.1	未計測面分数と追加スカナ計測候補点数	106
表 4.2	追加スカナ計測箇所数	106
表 4.3	高さの最小化を考慮したことによるスカナ配置位置の違い（ボイラ室および熱源機械室）	107
表 4.4	追加スカナ計測位置の計算時間（ボイラ室および熱源機械室）	108
表 4.5	グラフ構築のパラメータの設定値	114
表 4.6	最短移動経路の計算時間（熱源機械室）	115
表 4.7	提案手法および作業者による計測順序および移動距離、移動時間の違い...	116
表 4.8	平面ターゲットの計測品質条件および計測率の設定値	124
表 4.9	各スカナ位置から可観測となる平面	126

第1章 緒論

本章では、研究の背景、関連研究、研究目的、研究手法とその特徴、および本論文の構成について述べる。

1.1 本研究の背景

近年、国内における建設投資は、アベノミクスによる公共投資増加や東京オリンピック特需に伴い、減少傾向から増加に転じているが、建設投資ピーク時の1992年度と比較すると約42%減少している[1]。一方で、戦後の積極的な社会資本整備や民間建設投資により、建設ストックが積み上がってきている。このため、図1.1に示すように、維持修繕の建設工事額は、年々増加しており、建設投資に対する割合も増加している[2]。これに伴い、空調設備業界においても、改修工事の割合が増加している。また、部材・設備の竣工時または設置時から更新または交換までの年数である供用年数は、建築躯体の部材が約60年に対して、空調設備である空調機や熱源機器は15~20年、配管部材が約30年となっており、改修サイクルが短い[3]。さらに、近年の省エネに対する強い要求に伴い、改修工事が頻繁となっている。しかし竣工から何十年も経過し

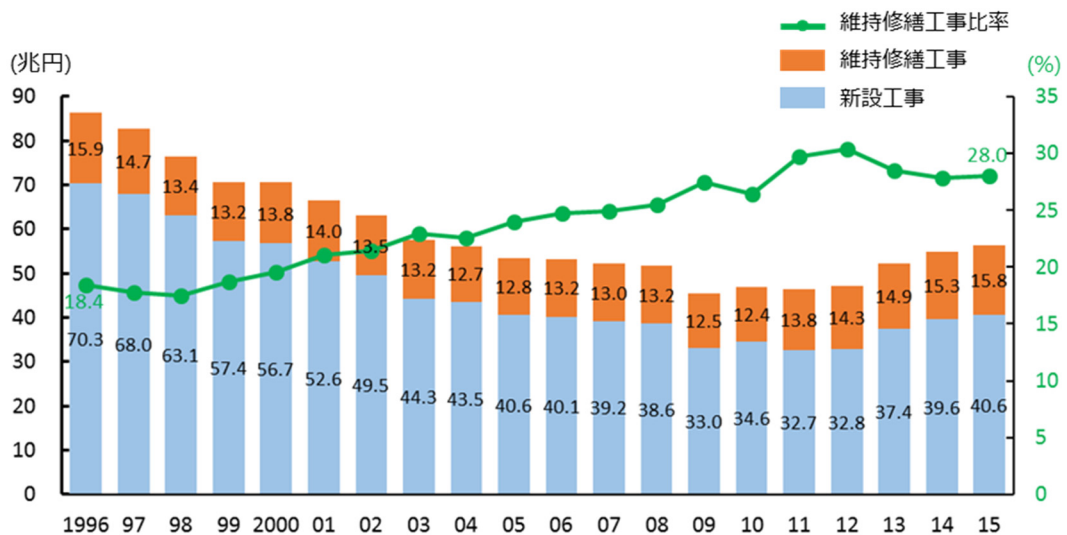


図 1.1 国内の建設投資における維持修繕工事の推移[2]

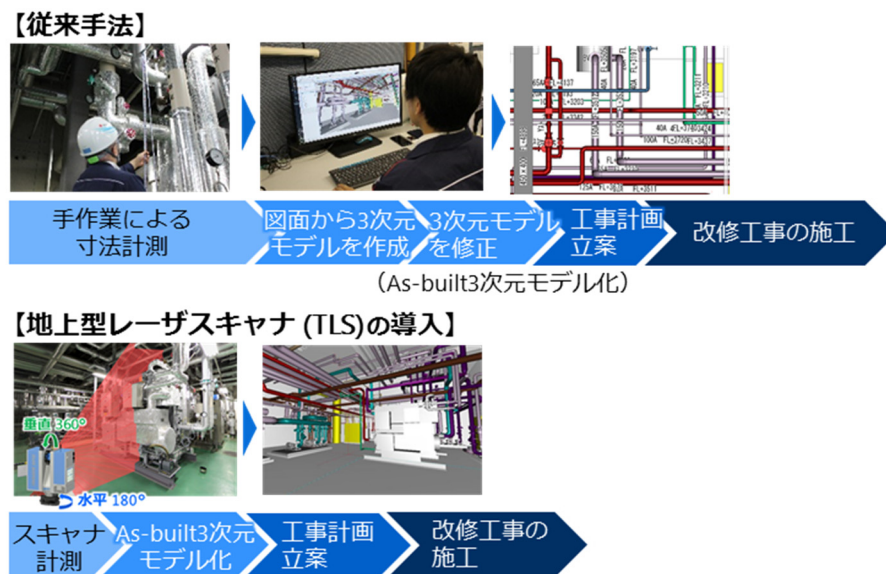


図 1.2 手作業と TLS による調査から施工までの流れの違い

た建物の改修工事を請負う際、客先に設備の詳細な寸法を記載した施工図面があることは極めて稀であり、完成時の設備システムの内容を記載した紙ベースの竣工図面しか残っていない場合が多い。また、施工図面が残っている場合でも、過去の改修履歴や設備の変更点が全て反映されていることは極めて稀であり、竣工図面、施工図面ともに設備の現況と異なっている場合が多い。これは、竣工した建物や j の維持管理は、新築工事をした会社とは別の会社が請負うことが多く、繰り返し行われる小規模な維持修繕は、図面に反映せず工事をするが多かったためである。

そのため改修前の現場調査において、図 1.2 に示すように、長時間かけてスケールにより手作業で寸法を計測する。その後、竣工図面から 3 次元モデルを作成し、計測した寸法をもとに 3 次元モデルを修正し、設備の現況を反映した as-built 3 次元モデルを作成しているのが現状である。さらに工事に必要な箇所を計測し忘れることにより、工事の際に既存設備と新設設備の干渉による手戻りが発生し、現場での追加工事による工期の遅れや追加費用の発生が生じる問題も抱えている。

一方、大規模環境内の物体表面上の 3 次元データを非接触で取得する方法として、図 1.3 に示すような、計測可能距離が異なる様々な 3D レーザスキャナが建築土木等の分野で近年導入されている。3D レーザスキャナは、機器本体が水平方向に 180°、レーザ照射部が垂直方向に 360° 回転しながら全方位に照射し、周囲に存在する物体表面で反射したレーザパルスがスキャナに戻ってくるまでの往復時間とレーザの照射方向を計測することで、物体表面の形状を 3 次元の点の集合として取得することができ

中距離タイプ		長距離タイプ	
			
FARO Focus^{3D}	Z+F Imager5010	TOPCON GLS-2000	RIEGL VZ-2000
計測距離			
～130m	～187m	～500m	～約2000m

図 1.3 地上型レーザスキャナ

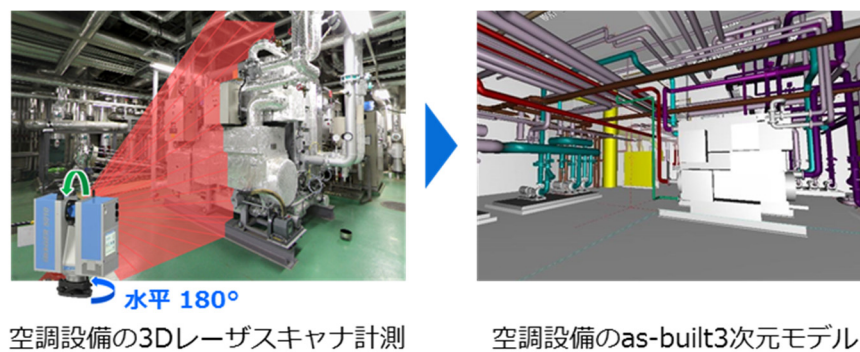
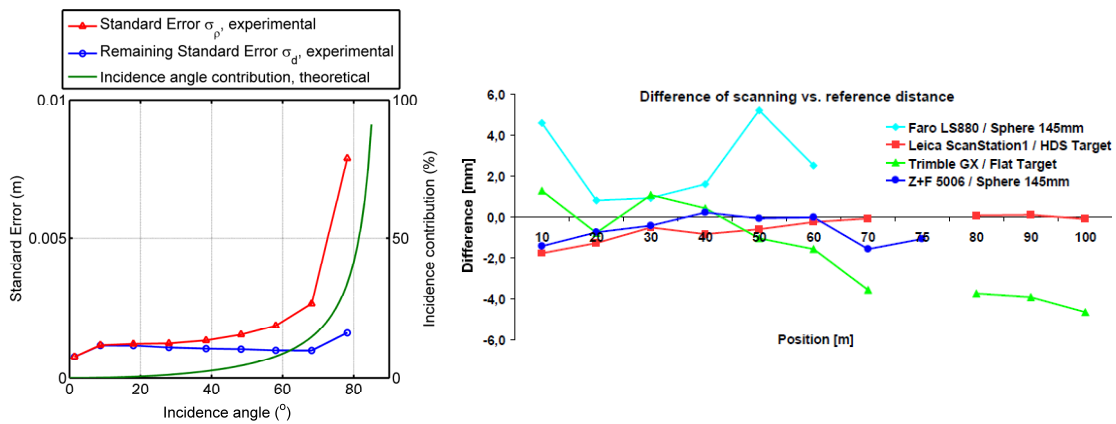


図 1.4 空調設備の 3D レーザスキャナ計測と as-built 3 次元モデル化

る機器であり，周囲の環境内にある物体の配置や形状のデータを高速，かつ容易に取得することができ，中でも，図 1.3 のような地面に設置して計測する地上型レーザスキャナ (TLS) は，プラント，建設分野で活用され始めている．空調設備の改修工事においても，図 1.4 に示すように，レーザ計測点群から既存設備の as-built 3 次元モデルを構築し，調査期間の短縮と改修工事前の綿密な計画立案に活用する試みが始まっている[4]．これにより，計画段階で上記の問題を発見・回避し，工期の短縮とコストの削減を図ることが期待されている．しかしながら，TLS を用いて計測から改修工事に求められる精度品質の as-built 3 次元モデルを構築するためには，TLS 計測時に，以下に示すレーザの入射角や計測距離などの様々な条件を考慮しながら，設備内の適切な箇所に TLS を配置し計測することが本来必要である．

まず，図 1.5 に示すように，TLS の計測誤差は，計測対象表面へのレーザ光入射角と計測距離に大きく依存する特性を持っている[5][6]．一方，設備各部に要求される計測誤差の上限は，計測対象となる設備の種類により異なる．例えば，熱源機器の更新工事において，工場であらかじめ加工した新設配管と既設配管を現場加工せずに接続するプレファブ工事の場合，フランジやバルブの接続部では，配管を交換するため計



(a) 入射角の計測精度への影響を実験的に評価した Soudarissanane らの研究

(b) 計測距離の計測精度への影響を実験的に評価した Kersten らの研究

[5]

[6]

図 1.5 入射角および計測距離による計測精度の変化

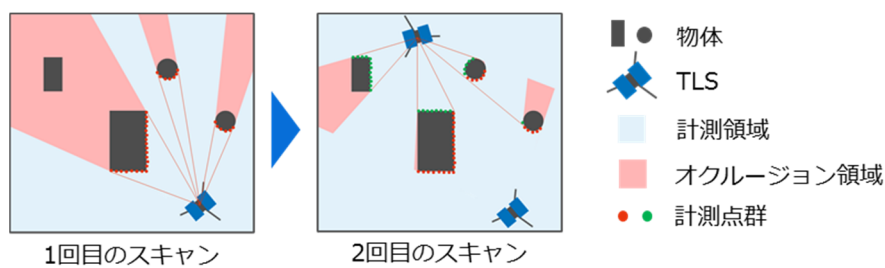


図 1.6 スキャナ計測によるオクルージョン領域の変化

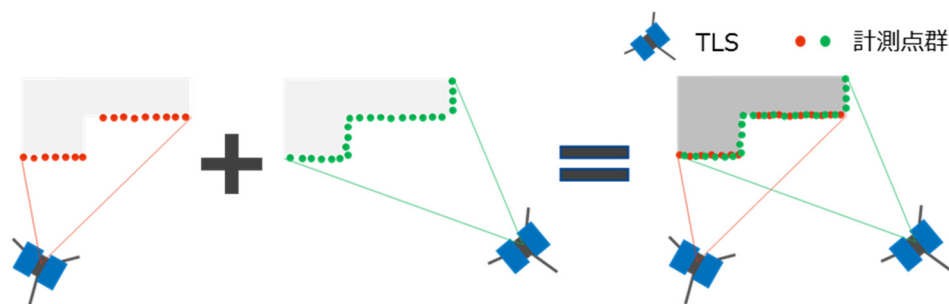


図 1.7 レジストレーションのための点群間重複

測誤差は 5mm 以下である必要がある。反対に、熱源機器周辺では、新設機器との干渉の有無のみが分かればよいため、計測誤差は 20mm 程度でもよい。したがって、このように計測対象ごとに異なる計測誤差の上限に適合するような計測点を生成できるような、入射角と計測距離をもつスキャナ配置が求められる。

次に、図 1.6 に示すように、レーザ計測の性質上、スキャナと物体の間に他の物体が

存在する場合、手前の物体によりレーザが遮断される箇所は、点群が取得できないオクルージョン領域となる。空調設備は、配管・ダクト・機器が狭い空間に密集しており、レーザ計測を行う際にオクルージョン領域が大量に発生し、その領域内に存在する物体は、そのスキャナ位置からでは計測できない。このオクルージョン領域を解消するためには、この領域が可視となる別位置にスキャナを設置して計測し、取得した点群同士を位置合わせするレジストレーション処理を行う必要がある。このレジストレーションが可能なるよう、図 1.7 に示すように、点群間の重複が得られるスキャナ配置も必要となる。さらに、TLS による計測作業を効率化するためには、計測必要箇所の可視性をできるだけ確保しつつもスキャン回数は可能な限り少なくすること、もしくは一定のスキャン回数で計測できる設備表面の範囲が最大となるような TLS の配置も望まれる。

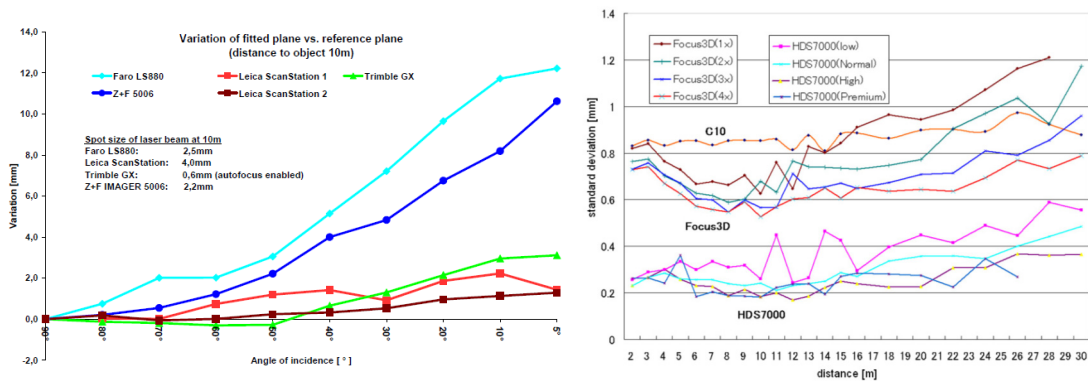
このように、空調設備改修向け as-built モデル構築のための TLS 計測では、様々な計測条件を満たし、かつ計測作業が効率化できる最適なスキャナ配置が本来求められる。しかし現状は、事前調査に基づき、熟練したオペレータの判断のみでスキャナの設置位置が決定されているため、例えばスキャン回数が過少となり、またその配置が上述の計測条件を必ずしも満たす保証が無いなどの問題を抱えている。

この問題解決のためには、TLS 計測時の入射角や計測距離、レジストレーションのための点群間重複の制約を満たし、かつ計測必要箇所が実際に計測される割合を最大化できるような最適スキャナ配置を、計算機支援により自動推定する手法が必要となる。

1.2 関連研究

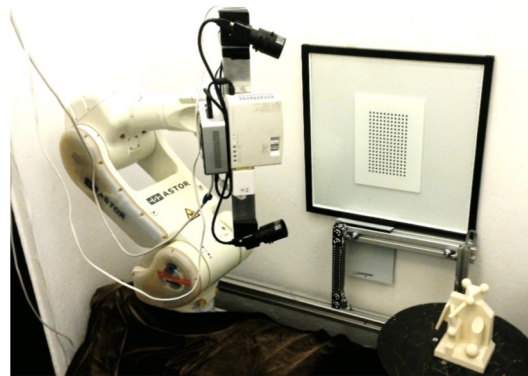
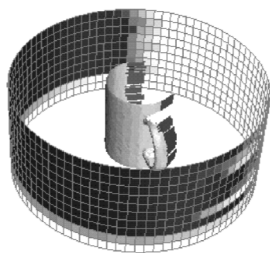
レーザスキャナによる計測に基づいた点群から as-built 3 次元モデル化を行う際、レーザ計測点群の計測誤差はモデル化精度に影響を与える最も重要な要素となっている。レーザ計測点群の誤差は、機器のキャリブレーション、計測空間周辺の大気状態、計測対象の材質や形状から影響を受ける[5]。なかでも、計測対象面の形状は、物体表面とスキャナ位置の向きにより相対的に決定する入射角および計測距離に作用し、計測点群の誤差に大きく影響を与える。また、様々な TLS を用いて計測精度の要因を実験的に評価した研究[5]-[8]があり、図 1.8 に示すように、入射角と計測距離の増加は、計測誤差の増大につながると報告されている[5]-[8]。

一方、本研究と類似した目的を持つ、計測対象に対する計測器の最適配置と計測順序を自動的に決定する問題は、Next-Best-View (NBV) 問題として知られており、移動



- (a) 機種ごとの計測精度を実験的に評価した Kersten らの研究[6]
 (b) 機種ごとの平面の計測精度を評価した榎本らの研究[8]

図 1.8 3D レーザスキャナにおける入射角および計測距離による計測精度の変化



- (a) 計測対象物体の外周から計測可能な位置を推定する Pito らの研究[10]
 (b) 複数のスキャナとマニピュレータによる NNB アルゴリズムを評価した Karaszewski らの研究[11]

図 1.9 リバースエンジニアリング分野での NNB に関する研究例

ロボットによる環境マップ生成[9]やリバースエンジニアリング[10]-[12], プラントエンジニアリング[13], 建築や建設分野[14]-[20]において多くの研究例がある. また, Scott ら[12]や Wujanz ら[21]は, この NNB に関する広範囲の調査研究を行っている. 以下にこれら NNB の既存研究の概要, ならびに空調設備の改修工事の際の TLS 最適配置計画にそれらを適用しようとした場合の問題点をまとめる.

リバースエンジニアリング分野の NNB に関する研究[10][11]は, 図 1.9 に示すように, 計測対象はコップや彫刻などの比較的単純な形状が多く, スキャナの計測範囲より小さいため, 計測対象周囲の開けた空間に配置して計測している. それに対して,

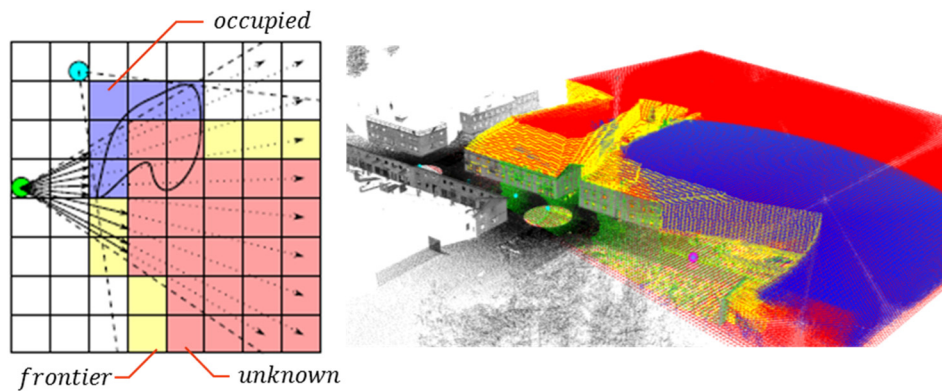


図 1.10 高速なボクセルベースの NBV 手法を用いた Svensson ら[15]の手法による処理例

空調設備におけるレーザ計測は，計測対象がとても複雑で密集しており，1 回のスキャンで取得できる空間よりもかなり大きい．そして，レーザスキャナは，計測対象空間の内側に設置されており，撮影位置はロボットアームで自由に動かせるため制約がない．したがって，空調設備のレーザ計測において，スキャナ設置位置を物理的な制約に基づいて決定する必要があるため，最適スキャナ配置を推定するために従来の NBV 手法を用いることは適切ではない．本研究で取り扱う TLS の最適配置問題も NBV 問題の一種であるが，その研究例は少ない．また，NBV 問題は，事前知識を用いない方法と計測対象の 2 次元図面や 3D モデルなどを事前知識として用いる方法に区別され，後者の方が，より良い計測器の配置を得られることが知られている[22]．

Svensson ら[15]や Kawashima ら[13]は，volumetric な手法を用いて未計測部分を最小化する手法を提案している．これらの手法は，ボクセルを用いて計測空間を表現し，各ボクセルを未計測である *unknown*，計測済みで点群が存在しない *free*，計測済みで点群が存在する *occupied* のいずれかに分類する．その後，*unknown* セルを最小化もしくは可視となるボクセル数の期待値が最大となる位置を，次のスキャナ設置位置として推定する．

Svensson ら[15]は，図 1.10 に示すように，屋外環境や建物屋内の TLS 計測を対象としており，八分木を用いて大規模環境レーザ計測のための NBV 問題を高速に導出する手法の研究を行っている．TLS を設置可能であることを条件に，未計測空間を最小化することを目的として最適スキャナ配置を推定する．八分木や *unknown* セルに隣接した *free* セルである *frontier* セルを用いることで高速な光線追跡法を実現している．

また，Kawashima ら[13]は，図 1.11 に示すように，プラント系統の TLS 計測を対象

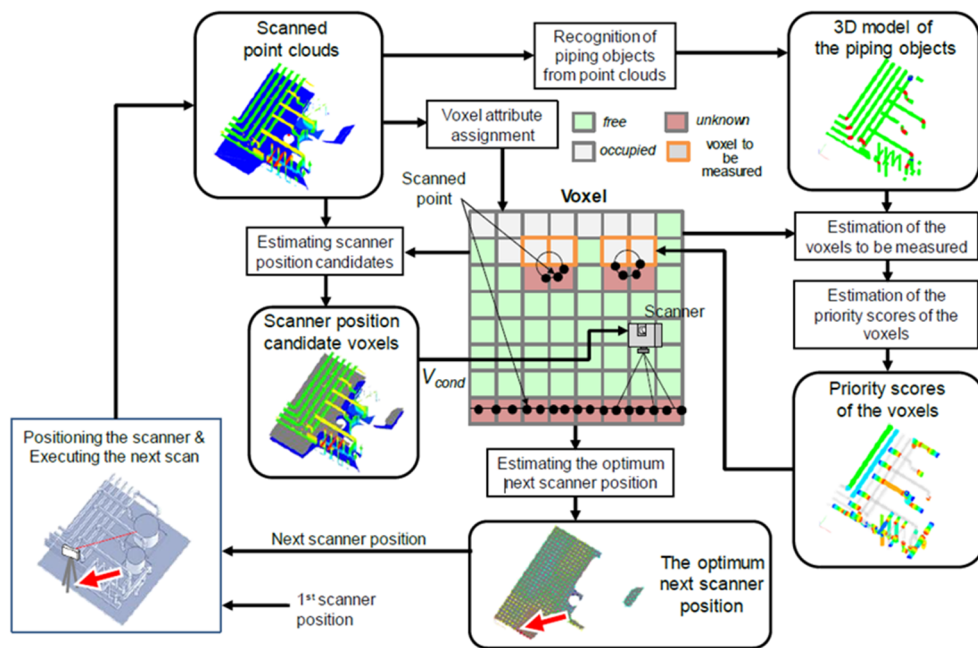


図 1.11 配管のモデル化をするための NBV 手法を用いた Kawashima ら[13]の手法による処理例

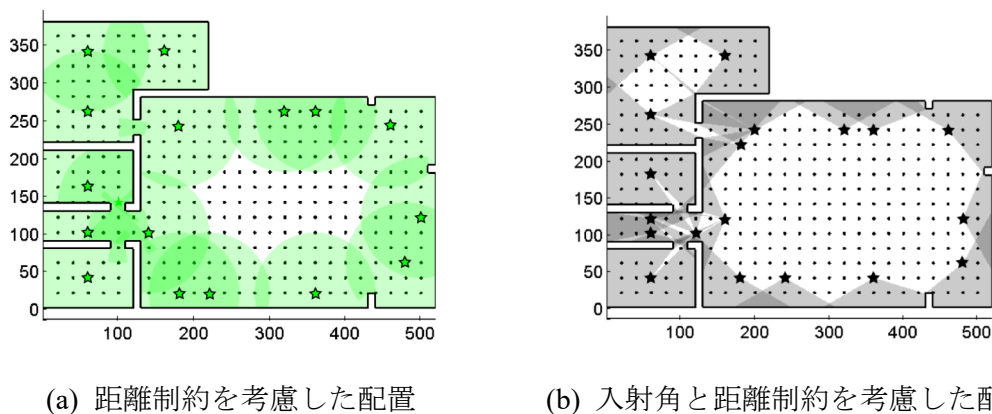
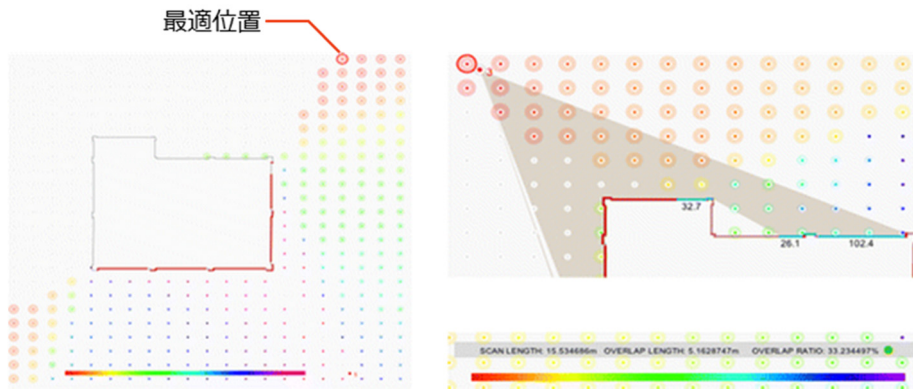


図 1.12 計測精度を考慮したスキャナ配置を導出する Soudarissanane ら[14]の手法による処理例

としており、配管システムの計測時に発生するオクルージョン領域に含まれる配管システムの未計測を最小化するため、スキャンごとに得られる計測点群から認識した配管システムのモデルをもとに可視となるボクセル数の期待値が最大となるスキャナ位置を自動推定する手法の研究を行っている。しかし、いずれも計測対象の事前知識を利用していないため、入射角や計測距離の制約や、計測必要箇所の見視性を正確に反映した TLS の最適配置を推定することは原理的に困難である。



(a) 推定された最適位置 (b) 対話操作により決定した最適位置からの可視性

図 1.13 対話的な位置の微調整による可視性確認が可能な Ahn ら[16]の手法による処理例

一方, Soudarissanane ら[14]は, 図 1.12 に示すように, 建物屋内の TLS 計測を対象としており, 計測対象の 2 次元図面をポリライン化した 2D マップを事前知識として利用している. まず, 2D マップ上にグリッド格子点を発生させ, 設置候補点として設定する. その後, 入射角および計測距離の制約を満たし, 可視となる線分の長さが最大となる位置を貪欲法により推定する. この処理を繰り返し, 全壁面が少なくとも 1 回は計測されるという条件を満たし, スキャナ設置回数が最小となる TLS の最適配置を推定する.

また, Ahn ら[16]は, 図 1.13 に示すように, 伝統建築物外壁形状の TLS 計測を対象としており, 建物の 2 次元図面を事前知識として利用している. まず, 2 次元図面から建物の外壁の 2D ポリラインモデルを作成し, モデル上にグリッド格子点を発生させ, 設置候補点として設定する. その後, 入射角・計測距離・点群間重複の制約を満たし, 可視となる線分の長さが最大となる位置を貪欲法により推定する. その後, 推定された最適位置を目印とし, ユーザが対話的に設置位置を移動させながら, その位置からの可視性を確認し, 最終的なスキャナ設置位置として決定する. この処理を, 全壁面が全て計測されるまで繰り返すことにより, TLS の最適配置を決定する. しかし, Soudarissanane ら[14]や Ahn ら[16]の手法はいずれも, 計測対象の形状を線分として簡素化し, 最適配置を単純な 2 次元問題として定式化している. そのため, 3 次元的に複雑に配置された空調設備の配管系統や機器の TLS 計測に適用した場合, オクルージョンが起きず, 計測必要箇所の可視性も担保されたスキャナ配置が導出される保証がない. また, 事前知識に設計図面を用いるため, 図面が現況を反映していない場合, 無効なスキャナ配置が得られる可能性がある.

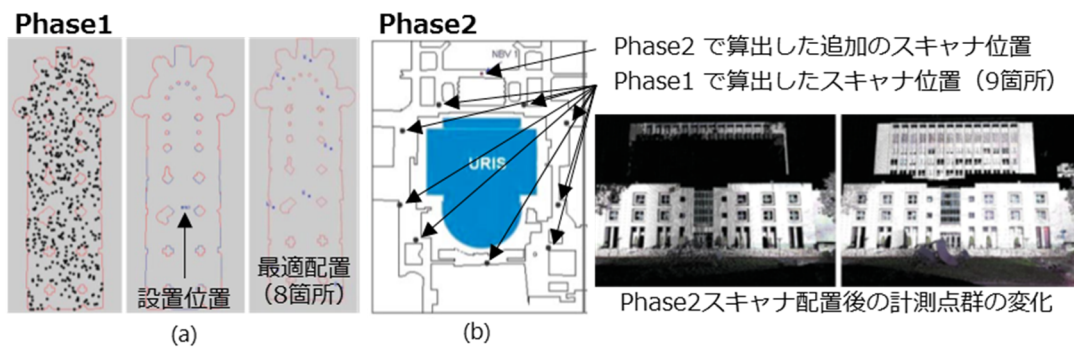


図 1.14 初期の配置計画における未計測領域を計測するスキャナ設置位置を導出する Blaer ら[18]の手法による処理例

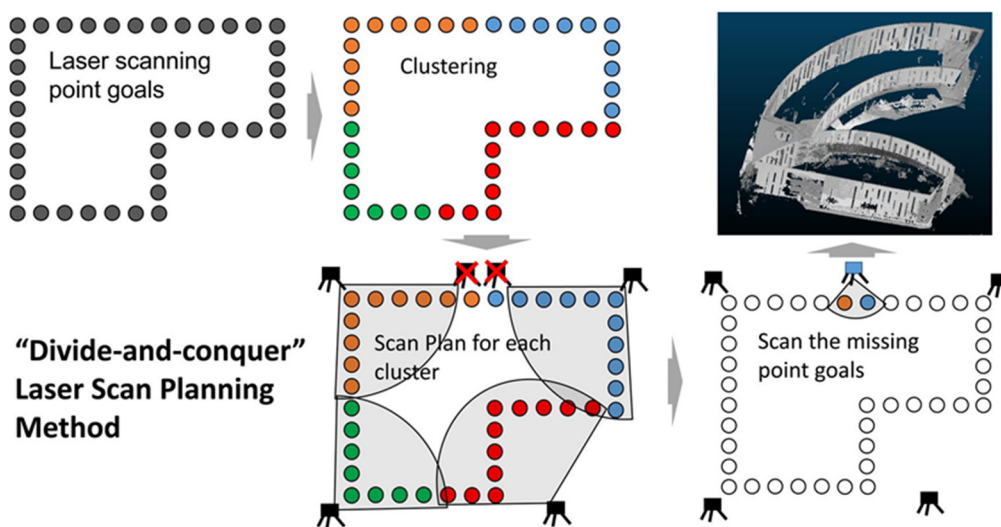


図 1.15 分割統治法を用いてスキャナ設置位置を導出する Zhang ら[19]の手法による処理例

さらに、Blaer ら[18]は、屋内外の建築物の TLS 計測を対象として、2D と 3D の事前知識を組み合わせた 2 段階の TLS の最適配置を決定している。はじめに、Phase1 として、図 1.14(a) に示すように、2 次元図面等から建物壁面の 2D ポリラインモデルを作成し、その内部もしくは外部にランダムに配置候補点を生成する。そして、各候補点においてポリラインの可視となる線分を計算し入射角、計測距離、スキャナ視野角の制約に基づいて線分を切断する。その後、貪欲法により、可視となる線分の長さの総和が最大となる候補点を決定する。この処理をカバー率が指定された閾値以下になるまで繰り返すことにより TLS の最適配置を推定する。次に、Phase2 として、図 1.14(b) に示すように、Phase1 で推定した位置から取得した点群をボクセル分割する。そして、各ボクセルを *seen_empty*, *seen_occupied*, *unseen* に分類し、*seen_empty* と隣接する

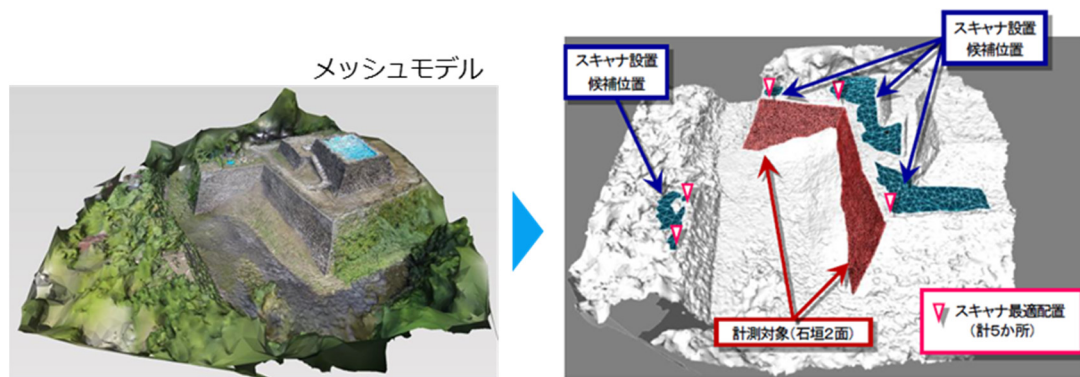


図 1.16 2つの整数計画問題を用いた北田ら[20]の手法による処理例

unseen を, *boundary_unseen* に分類する. 地面と交差するボクセル重心を設置候補点に設定し, 各候補点からの光線追跡法により, *boundary_unseen* と交差した光線数が最大となる位置を貪欲法により推定する.

また, Zhang ら[19]は, 図 1.15 に示すように, 建物の外壁形状の TLS 計測を対象としており, 図面等から粗くサンプリングした 3 次元特徴点と法線をサンプルしたものを事前知識として利用している. 各計測対象に要求される計測サンプリング点間隔仕様を付加し, 点間隔仕様が類似し, かつ隣接している対象点同士をグラフ彩色問題と貪欲法を用いてクラスタリングする. そして, 各クラスタ内において, 点間隔仕様を満たし, できるだけ多くの対象点を計測可能なスキャナ配置を決定する. さらに, この配置で取り漏らしたクラスタ境界の対象点を計測する追加のスキャナ配置を決定する. 同時に, 要求される点間隔仕様を満たすスキャン角度分解能も計算し出力する.

さらに, 北田ら[20]は, 図 1.16 に示すように, 建物屋外の TLS 計測を対象としており, 写真から Structure-from-Motion (SfM)を用いて, 計測対象の事前知識となる 3D メッシュモデルを利用している. メッシュモデル上で, 計測対象面, 周辺障害物, スキャナ設置候補点を手動で指定する. そして, 各設置候補点からのメッシュ上の各三角形の可視性リストを前処理で計算する. その後, 2つの最適化問題を計算する. 1つ目がスキャン回数最小化問題を解き, スキャナ設置回数を算出し, 2つ目が1つ目の最適化問題で推定されたスキャナ設置回数でスキャン計測点数が最大となる最適位置を 0-1 整数計画問題として導出する. これらは, 現況を反映した事前知識を活用し, スキャナ位置からの計測必要箇所可視性を 3 次元的に判断しているものの, TLS の入射角や計測距離の制約条件は最適化で考慮していないため, 要求精度品質を満たす空調設備の as-built モデル化が行える保証はない.

上述した TLS の最適配置問題に関する既存研究の問題点をまとめると以下のように

なる。

- ・ 事前知識を利用しない TLS の最適配置のための NBV 手法は、計測対象面の形状が分からないため、物体表面と TLS 設置位置の向きによって相対的に決定する入射角および計測距離の制約や、計測必要箇所の可視性を正確に反映した TLS の最適配置を推定することが原理的に困難である。
- ・ 2次元の事前知識を利用した TLS の最適配置のための NBV 手法は、計測対象の建物を2次元として扱っているため、3次元的に複雑に配置されたプラント設備の配管系統や機器の TLS 計測に適用した場合、オクルージョンが起きず、計測必要箇所の可視性も担保されたスキャナ配置が導出される保証が無い。また、事前知識に設計図面を用いているため、図面が現況を反映していない場合、無効なスキャナ配置が得られる可能性がある。
- ・ 3次元の事前知識を利用した TLS の最適配置の NBV 手法は、現況を反映した事前知識を活用し、スキャナ位置からの計測対象の可視性を3次元的に判定しているが、計測精度に影響を与える入射角や計測距離の制約を考慮していないため、要求される精度品質を満たす空調設備の as-built モデル化が行える保証がない。
- ・ いずれの既存研究でも、計測対象において、分類した計測重要度に応じた計測品質を満たす TLS の最適配置を導出している例がない。そして、スキャナの配置候補点は人間があらかじめ手動で与えているが、候補点周辺に十分な空間があり、スキャナが物理的に設置できるか否かの条件も考慮した TLS の最適配置を保証している例はない。さらに、計算機が導出した TLS の最適配置と現状の熟練者が決定した配置との差異を、計測の効率性や最終的な as-built モデル化の精度品質の観点から実験的に評価している例も報告されていない。

1.3 本研究の目的および特徴

以上より、TLS を対象とした最適スキャナ配置計画に関する既存研究を空調設備の as-built モデル化を目的としたレーザ計測に応用しようとした場合の問題点は、以下の5点にまとめられる。

- 1) 計画に現況を反映した3次元の事前知識が活用されていない点
- 2) 設備の as-built モデル化の精度に影響を与えるレーザ光入射角・計測距離の制約条件が考慮されていない点

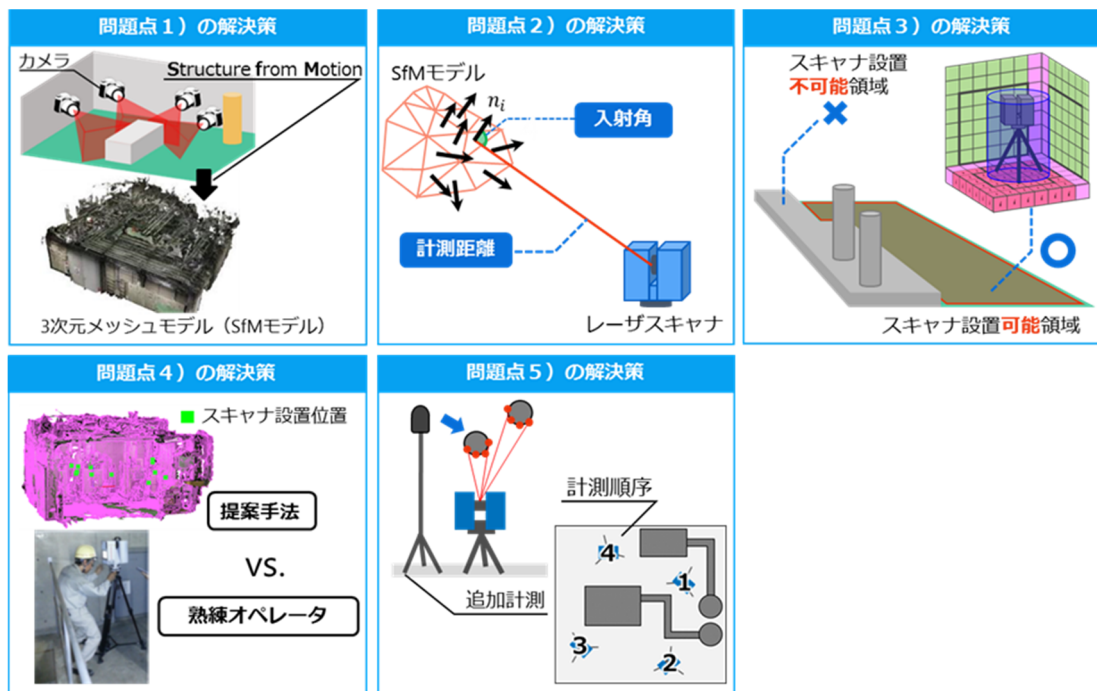


図 1.17 1.3 節の各問題点に対する解決策

- 3) スキャナの物理的な設置可能性の判定が不十分な点
- 4) 最適スキャナ配置による計測による as-built モデルの品質向上効果に関する有効性検証が十分でない点
- 5) 実務展開を考えた際、床面上からの計測では解消できない未計測領域への対応、および効率的な計測のための計測順序が検討されていない点

そこで、本研究では、これらの問題点を解決する空調設備の as-built モデル向け TLS 最適配置計画のための計算手法を新たに提案する。図 1.17 に示すように、まず上記の問題点 1) は、事前調査時にカメラで撮影した多数の写真から Structure-from-Motion (SfM) を用い、計測対象の現況形状の粗い 3 次元メッシュモデル (SfM モデル) を生成し、最適スキャナ配置の事前知識として活用することにより解決する。問題点 2) は、SfM モデルが持つ計測対象物の近似的な表面と法線の情報を利用し、これをスキャナ配置探索の際の入射角・計測距離の制約条件の充足判定に用いることにより解決する。問題点 3) は、計測対象空間のボクセル分割表現を同時に利用し、配置候補点におけるスキャナの物理的な設置可能性の判定を行うことにより解決する。問題点 4) は、提案手法で導出された最適スキャナ配置と熟練オペレータによる配置を行った際の計測品質や as-built モデル化精度の差異を実験的に比較評価することにより解決する。最後に、問題点 5) は、床面上からでは計測できない面分に対して、未計測領域を完全に解

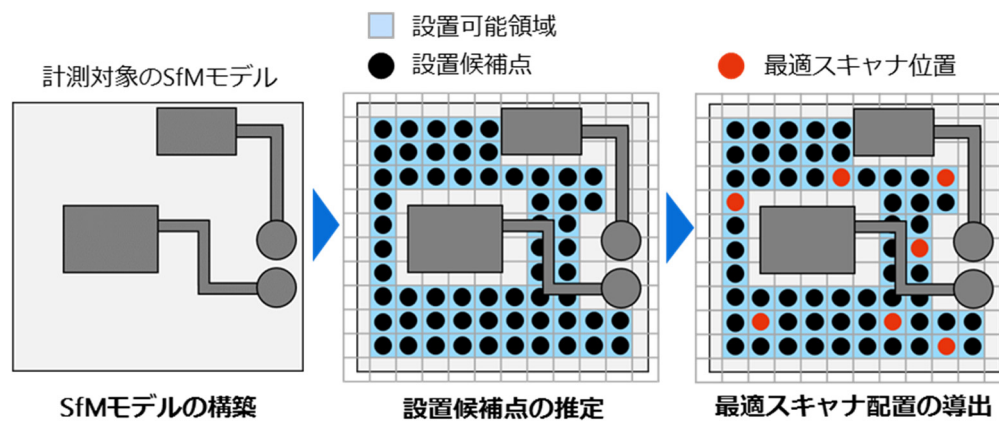


図 1.18 本研究の処理手順の概要

消するための TLS の追加計測位置を逆算することで計測の網羅性を確保する。また、TLS 配置位置間の移動距離が最短となる計測順序を算出することで計測の効率性を確保する。

これにより、計測対象の SfM モデルから工事目的に応じて計測重要度を分類し、計測重要度に応じた計測品質を満たし、計測必要箇所での計測率が最大となる空調設備の as-built3 次元モデル化のための TLS の最適スキャナ配置計画手法を提案する。

1.4 論文の構成

上記の目的を遂行するために、本論文では図 1.18 に示す手順により、計測対象の SfM モデルを事前知識として、計測空間内にスキャナ設置可能箇所を推定するとともに、計測品質に影響を与える入射角、計測距離および計測対象の可視性に関する制約条件、計測されたボクセルもしくは面分数を最大化する目的関数に基づいて、要求される計測品質を満たし、計測可能なボクセルもしくは面分数を最大化する最適スキャナ配置計画を計算機支援により導出可能なアルゴリズムを提案実装し、またその有効性を実験的に検証する。本論文の構成を以下に示す。

第 2 章 ボクセル表現と貪欲法を用いた準最適スキャナ配置計画アルゴリズムの開発

はじめに、SfM モデルを含む空間を一定幅の格子状に分割したボクセルで形状を表現した事前知識を用いて、近似最適化手法である貪欲法により準最適となるスキャナ配置を導出する手法の概要と詳細について述べる。次に、小規模で簡易な計測環境において、提案手法および熟練オペレータによるスキャナ配置におけるスキャン回数、計測率を比較し、本手法の妥当性・有効性を評価する。その後、中規模で複雑な計測

環境において本手法を適用し、同比較対象において、as-built モデル化精度を検証し、本手法の有効性を評価する。

第3章 メッシュモデル表現と整数計画法を用いた最適スキャナ配置計画アルゴリズムの開発

第2章で提案した手法の問題点について述べる。次に、これらの問題解決を図るため、SfM モデルの形状表現をメッシュモデルへの変更、GPU を用いた可視性判定、整数計画法を用いたスキャナ配置問題への定式化および導出手法について述べる。そして、本手法を実際の計測対象に適用し、第2章での提案手法および熟練オペレータによるスキャナ配置におけるスキャン回数、計測率、as-built モデル化精度を比較し、本手法の有効性を評価する。

第4章 実務への展開を考慮した最適スキャナ配置計画アルゴリズムへの拡張

第3章までで提案したアルゴリズムでは、実務展開を考慮した際、計測の網羅性、効率性、信頼性を確保する必要があるが、それに対応する未計測領域の解消、効率的な計測のための計測順序およびレジストレーションのためのオーバーラップが適用されていなかった。はじめに、TLS 計測を実務で適用する際の課題について述べる。次に、床面上からでは、計測できない箇所を計測するためのスキャナ位置を推定し、本手法の有効性を検証する。次に、導出した最適スキャナ位置における計測順序および最短移動ルートの導出手法の詳細について述べる。その後、本手法を実際の計測対象に適用し、本手法の妥当性を検証する。最後に、オーバーラップを考慮した最適スキャナ配置手法の詳細について述べる。その後、本手法を実際の計測対象に適用し、本手法の妥当性を検証する。

第5章 結論と今後の課題

本論文の結論を述べるとともに、提案手法の今後の課題について述べる。

第2章 ボクセル表現と貪欲法を用いた準最適 スキャナ配置計画アルゴリズムの開発

2.1 提案手法の概要

本章で提案する準最適スキャナ配置計画手法の概要を図 2.1 に示す。本提案手法は主に 3 ステップで構成される。

Step 1 Structure-from-Motion (SfM) による 3D モデル構築

まず、計測対象となる空間をカメラで撮影した画像から市販 SfM ソフトウェアにより、3次元メッシュモデル (SfM モデル) を自動構築するとともに、各画像の撮影位置・姿勢を推定する。その後、SfM モデル (点群) に対して、ユーザが対話的に工事目的に応じた計測重要度を指定する。さらに、SfM モデルに生じる欠損部を SfM により推定された撮影位置からのデプスマップを生成し、デプスマップに投影された欠損部を同視点の写真との RGB 類似性に基づいた置換処理[23]により補完することでモデルの欠損部を補完する。このモデルを計測対象の事前知識として利用する。

Step 2 スキャナ配置候補の推定

次に、Step 1 で構築した SfM モデルに基づいて、SfM モデルを含む空間内でスキャナを設置可能な領域を推定する。その際、計測対象の空間内において物体がない領域か物体を含む領域かを判定する必要がある。この判定が最も簡単にできるデータ構造としてボクセルがある。そこで、計測対象を含む計測空間をボクセルに分割し、Step 1 で推定した各カメラの位置からレイキャスティングを実行し、各ボクセルの空間占有状態を分類する。そして、空間占有状態に基づいて、SfM モデルの法線情報とユークリディアンクラスタリングにより、スキャナが設置可能な床面領域を抽出し、床面領域上でスキャナを設置した場合にスキャナと SfM モデルが干渉しない空間を探索し、スキャナ設置候補点として推定する。

Step 3 準最適スキャナ位置の導出

次に、計測対象となるボクセルを抽出する。Step 1 で推定されたカメラ位置から SfM

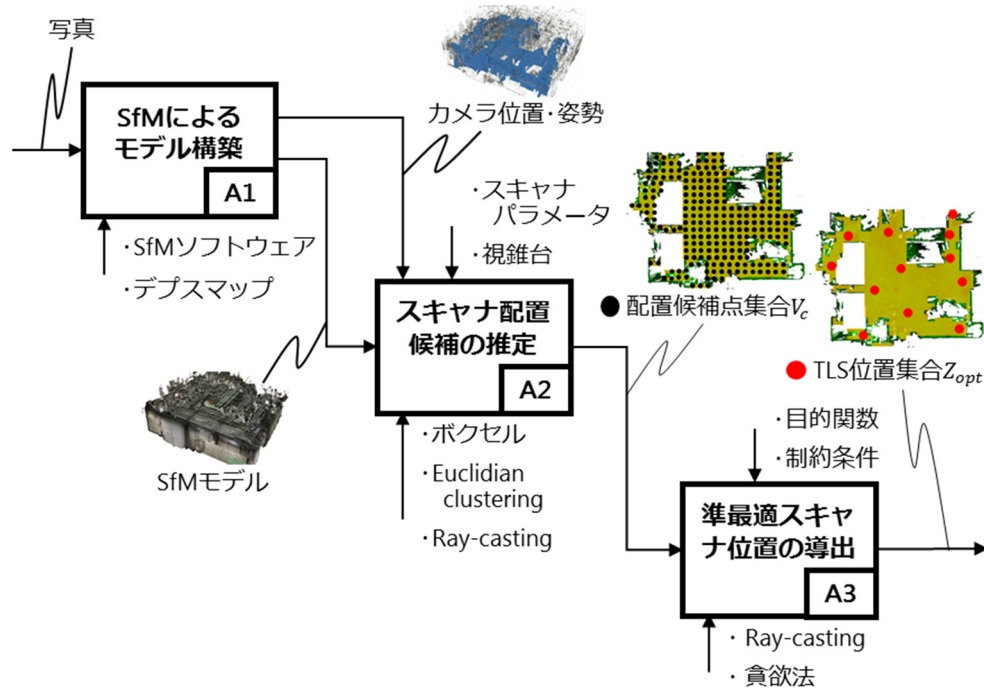


図 2.1 準最適スキャナ配置計画手法の概要

モデルを含むボクセルに対してレイキャスティングを実行し、可視となるボクセルのみを計測対象とする。最後に、Step 2 で推定されたスキャナ設置候補点の中から、入射角、計測距離、可視性、点群間重複の制約条件を満たし、計測可能となるボクセル数を最大化するスキャナ配置を近似解法である貪欲法を用いて導出する。

2.2 Structure-from-Motion (SfM) による 3D モデルの構築

SfM による 3D モデル構築の処理手順を図 2.2 に示す。本ステップは、SfM によるモデルの自動構築、計測重要度の分類、SfM モデル欠損部の補完の 3 つから構成されている。

2.2.1 SfM による 3D モデルの自動構築

現在、改修工事の事前調査において、既存設備の現況を把握するために TLS 計測を実施する際、計測対象となる設備が計測可能か否かを判定するために、TLS 計測のための事前調査を行っている。その際、計測作業者は、現場代理人に工事目的と計測必要な箇所をヒアリングし、どこにスキャナを配置するかを計画する。その計画に基づき、後日 TLS 計測を実施する。

そこで、本研究では、事前調査の際に、スキャナの配置計画を立てる代わりに、カ

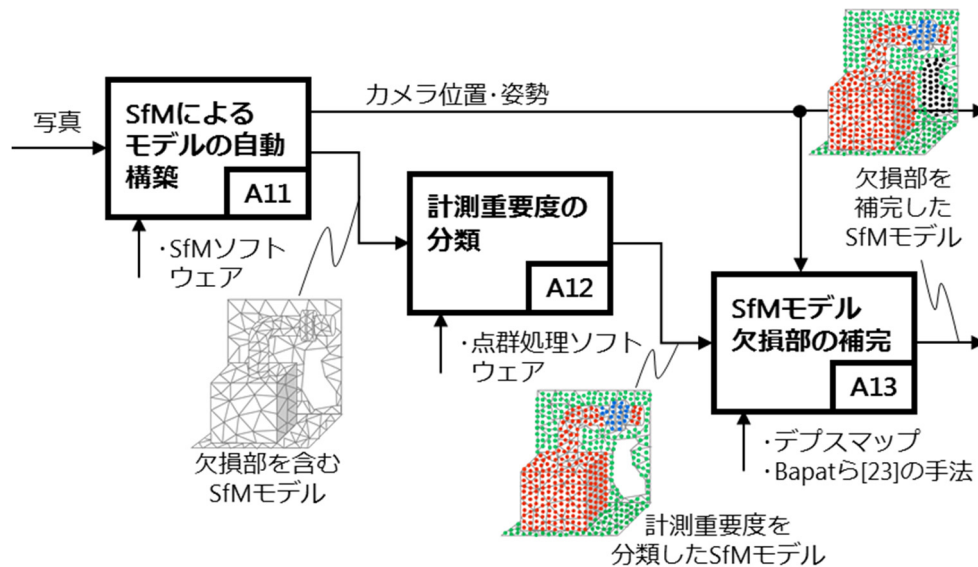


図 2.2 SfM による 3D モデル構築の処理手順

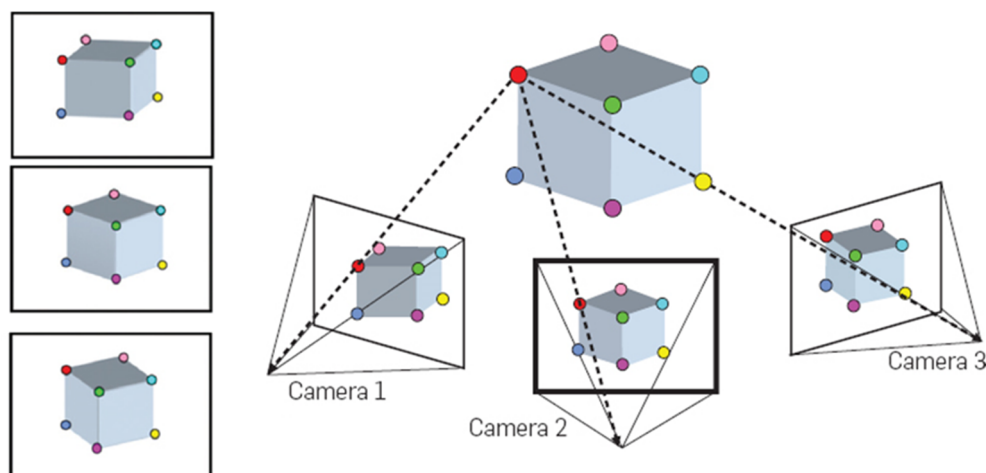


図 2.3 異なる視点の写真からの 3 次元形状の復元のイメージ[24]

メラを使い、計測対象となる空間を撮影し、複数枚の写真から Structure-from-Motion により 3D メッシュモデルを自動で構築するという業務フローを想定している。これにより、現場代理人が計測作業員の代わりに、計測対象の写真を撮影すれば、計測作業員は事前に現場に行くことなく、スキャナ配置計画の立案が可能になる。

ここで、Structure-from-Motion (SfM) とは、カメラの位置・姿勢と写真の特徴点の 3 次元座標を同時に算出する手法である。例えば、図 2.3 に示すように、カメラ位置姿勢が分かれば、各カメラ始点から写真に映る同一特徴点を結ぶ延長線が 1 点で交わる点はその特徴点の 3 次元座標となる。SfM では、カメラの視点を変えながら撮影した写

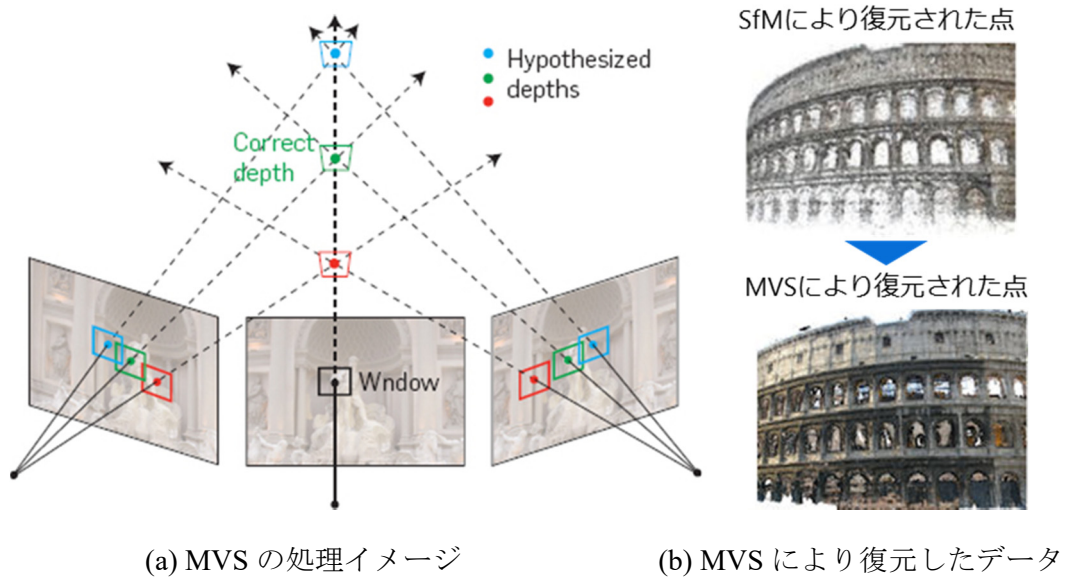


図 2.4 MVS による密な 3 次元点群の復元[24]

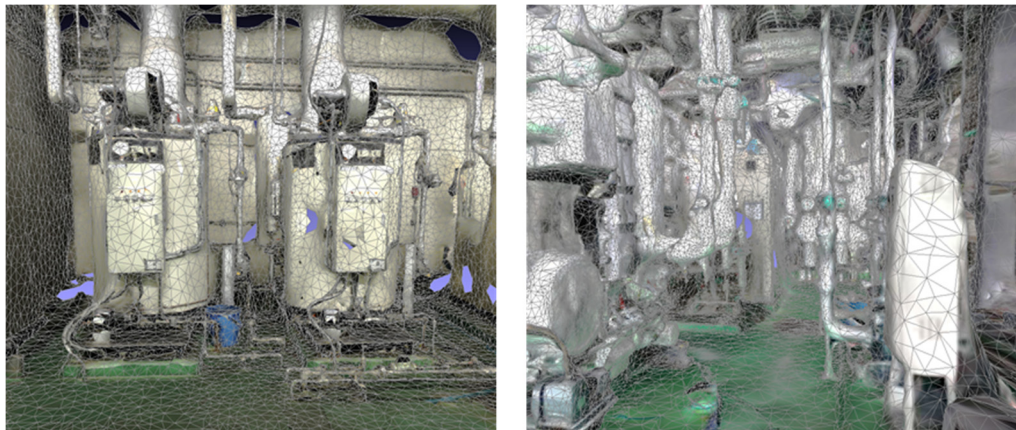


図 2.5 SfM ソフトウェアから構築された空調設備の SfM モデル

真から特徴点を抽出し、バンドル調整により、カメラの位置・姿勢および特徴点の 3 次元座標を同時に復元する[24]。しかし、この段階では、特徴点の 3 次元座標しかないため、疎な点群となっている。そこで、図 2.4 に示すように、Multi-view-stereo (MVS) を用いて、重複領域をもつ画像をクラスタリングし、クラスタ間で 3 次元点と各画像上へ投影したピクセルの RGB の一致度 (photo-consistency) を検証しながら 3 次元復元を行うことで密な 3 次元復元データを得ることができる[24]。

本研究では、市販の SfM ソフトウェア (Context Capture) [25]により、3 次元メッシュモデル (SfM モデル) を自動構築するとともに、各画像の撮影位置・姿勢を推定する。図 2.5 に示すように、SfM モデルは、空調設備配管等の表面を粗い解像度の三角

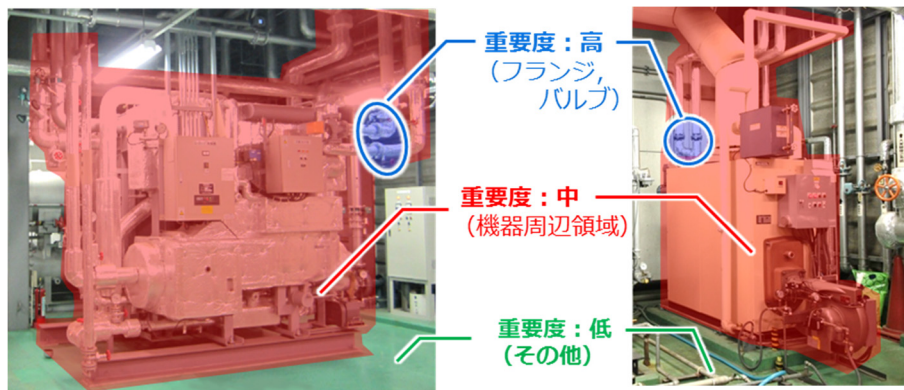


図 2.6 計測重要度の定義

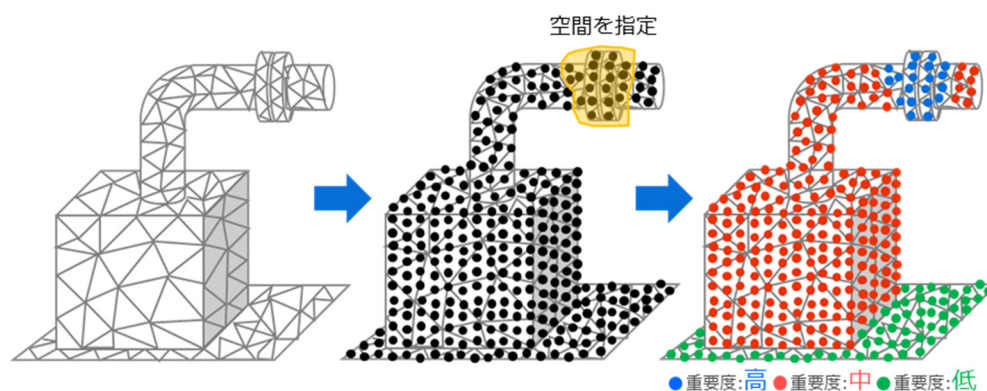


図 2.7 SfM モデルに対する計測重要度の分類

形メッシュで表現したモデルとして生成される。

2.2.2 計測重要度の分類

現状の改修工事の TLS 計測においては、計測漏れを防止するためにスキャナ設置箇所数が多くなり、計測作業に時間がかかるとともにデータが冗長となっている。これにより、レジストレーションやノイズ処理などの後処理において、処理時間の増加につながる。反対に効率的に計測しようとスキャナ設置箇所数をなるべく少なくした場合、予期せぬ計測漏れが発生する場合がある。

改修工事の際、プラントの設備全体を改修することはなく、一部の設備をその都度、改修することがほとんどである。そのため、プラント内の空間を漏れなく計測することは合理的でない。また計測対象の設備各部によって重要度は異なるため、要求される計測誤差の上限も異なる。たとえば、図 2.6 に示すように、冷凍機やボイラなどの機器を新しい機器に更新する場合、機器へとつながる配管の接続箇所であるフランジや

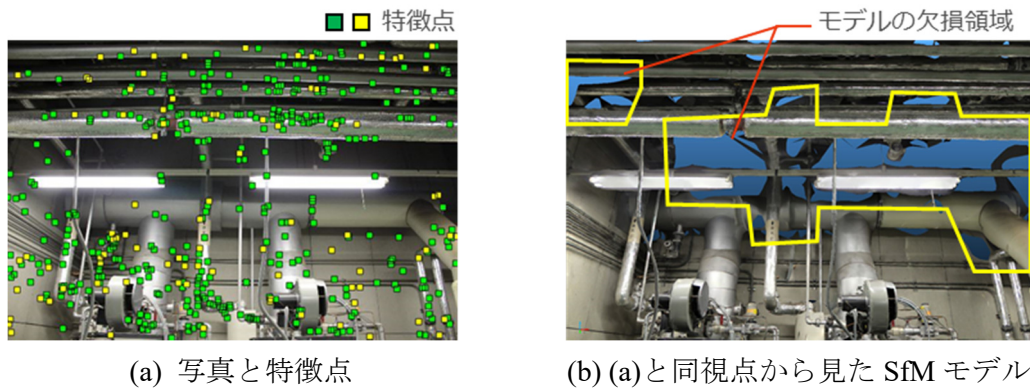


図 2.8 SfM モデルにおける欠損領域

バルブが一番重要な箇所となり，プレファブ工事による新設の加工管を既存配管と接続する場合，その計測誤差は 5mm 以下である必要がある．これらの箇所を『重要度：高』として定義する．続いて，機器周辺の設備群が重要となり，形状の異なる新設機器を設置する際，周辺の既存設備との干渉の有無を確認する場合，その計測誤差は，20mm 程度でもよい．これらの箇所を『重要度：中』として定義する．残りは，工事範囲外となる領域のため，積極的に計測する必要はない．これらの残りの領域を『重要度：低』として定義する．

上記の考え方にに基づき，SfM モデルに対して計測重要度を分類する．はじめに，点群処理ソフトウェア (CloudCompare) [26]を利用して，図 2.7 に示すように，2.2.1 項で構築した SfM モデルの各面分表面上に点群を生成させる．これにより，より細かい解像度で空間座標を指定することができる．その際，点間隔は約 5mm に設定した．その後，『重要度：高』に設定したい領域の 3 次元空間座標を対話的に指定し，その空間内に存在する点群の RGB 値を(r, g, 255)の青系色に設定する．次に，残りの点群において，『重要度：中』に設定したい領域を同様に指定し，空間内の点群の RGB 値を(255, g, b)の赤系色に設定する．最後に，残りの点群の RGB 値を(r, 255, b)の緑系色に設定する．この RGB 情報を利用して，2.3.2 項においてボクセルに計測重要度を付与する．

2.2.3 SfM モデル欠損部の補完

空調設備をはじめとするプラント設備において，SfM を用いて SfM モデルを構築する際，モデルに欠損が発生することがある．これは，図 2.8(a)に示すように，特徴点の不足に起因している．特に，屋内設備を SfM により 3 次元復元する場合，図 2.8(a)のように，天井面に配管が密集していると，その奥の空間は影となり黒つぶれになる．これにより特徴が少なくなるため，結果として図 2.8(b)のように，モデルが構築できな

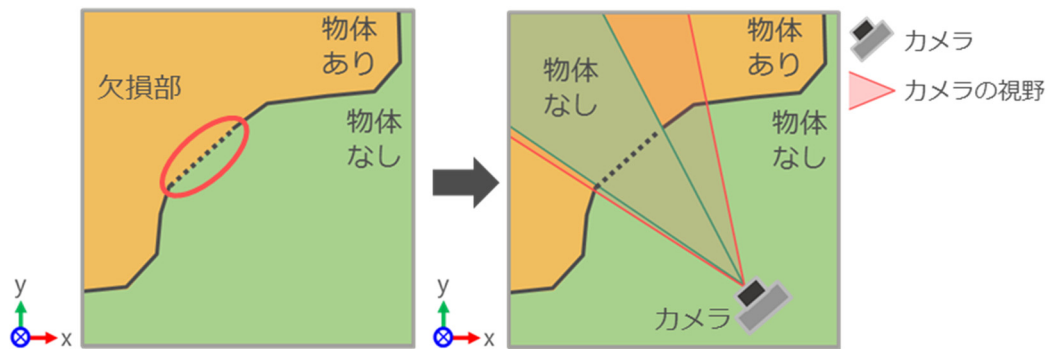


図 2.9 欠損部を含む SfM モデルに対する物体の有無の誤分類

くなる。

本研究において、最適スキャナ配置を導出する際、2.3 節に記述するようなスキャナ設置候補点を推定する必要がある。スキャナ設置候補点を推定するためには、計測対象の空間内のどこにスキャナが設置可能かを判定する必要がある。この判定には、空間内の物体の有無を事前に分類する必要がある。これには、SfM により推定されたカメラの位置・姿勢からの画像を用い、各画素に光線を飛ばして光線が通過した領域を「物体なし」とすることにより判別できる。しかし、欠損部を含む不完全なモデルに対して、上記の判別手法を適用した場合、図 2.9 に示すように、本来、「物体あり」と判別される領域において、外側境界まで光線が通過することにより、「物体なし」と誤分類されてしまう。この誤分類により、本来スキャナが設置不可能な領域が設置候補点となる可能性があるため、最終的に無効なスキャナ配置が導出される可能性がある。よって、事前に SfM モデルの欠損部を補完する必要がある。

本研究では、Bapat ら[23]の手法を応用して、デプスマップに投影された欠損部を同視点の写真との RGB 類似性に基づいた置換処理により補完することで SfM モデルの欠損部を補完する。

2.2.3.1 デプスマップの生成

はじめに、図 2.2 の A11 で推定された外部パラメータより、各カメラの位置・姿勢の情報を取得し、図 2.10 に示すように、画像面を *near* 平面とした視錐台を定義する。そして、*near* 平面から SfM モデルまでの距離が深さとなるデプスマップを生成する。この処理を繰り返し、全カメラ位置のデプスマップを生成する。その際、デプスマップ上の深さが最大となる画素には、欠損部が含まれている可能性がある。

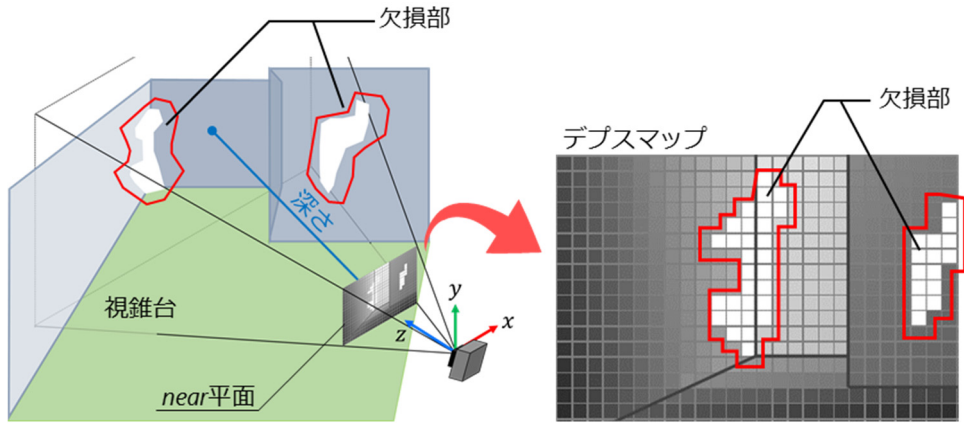


図 2.10 デプスマップの生成

2.2.3.2 SfM モデルの欠損部の補完

図 2.11 に示すように、欠損部の補完手法の概要は、写真から RGB 類似性マップを作成する。その後、欠損部に対応するマップ上の画素の RGB 類似性に基づいて、デプスマップの欠損部の画素はメディアンフィルタを実行した近傍デプス値へ置換される。この処理を反復することで欠損部を補完する。

はじめに、写真 I から RGB 類似性マップを作成する。画像左上の画素を原点 $(0,0)$ とした各画素値を $I(i,j)$ とし、画素 (i,j) の 9 近傍画素値配列を $N_I(i,j)$ とする。そして、式(2.1)のように、中央値 $M_I(i,j)$ を計算する。

$$M_I(i,j) = MED(N_I(i,j)) \quad (2.1)$$

ここで、 $MED()$ は、中央値を計算する関数である。

次に、式(2.2)のように、9 近傍画素値配列 $N_I(i,j)$ と中央値 $M_I(i,j)$ の差 $N'_I(i,j)$ を計算し、式(2.3)のように、 $N'_I(i,j)$ が類似性の閾値 C_{th} 未満の場合は、近傍画素との類似性があるとして、類似性近傍画素配列 $N_S(i,j) = 1$ とし、それ以外の場合を $N_S(i,j) = 0$ の二値画像を作成し、これを RGB 類似性マップとする。

$$N'_I(i,j) = |N_I(i,j) - M_I(i,j)| \quad (2.2)$$

$$N_S(i,j) = \begin{cases} 1, & N'_I(i,j) < C_{th} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases} \quad (2.3)$$

次に、デプスマップ D の左上の画素を原点 $(0,0)$ とした各画素値を $D(i,j)$ とし、画

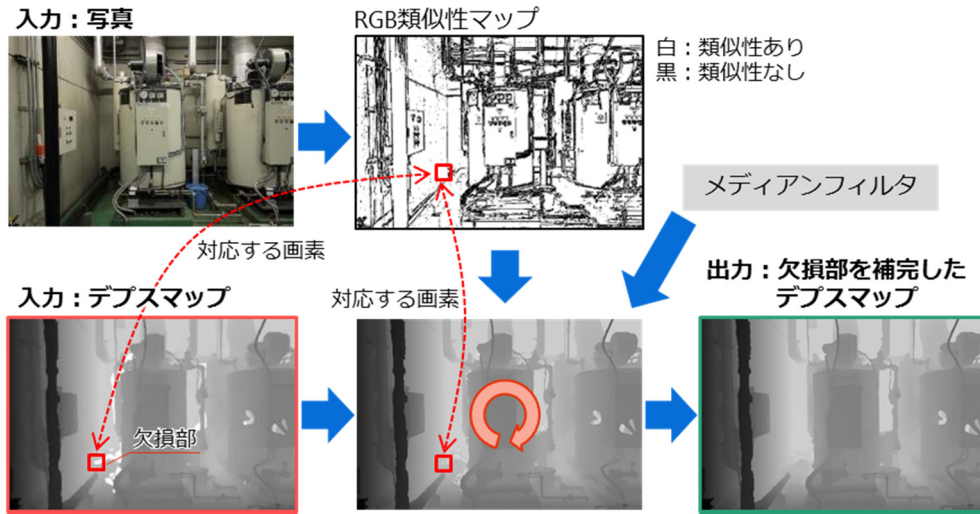


図 2.11 デプスマップによる欠損部の補完手法の概要

素 (i, j) の 9 近傍画素値配列を $N_D(i, j)$ とする. そして, 式(2.4)のように, 中央値 $M_D(i, j)$ を計算する. これを全画素において事前に計算し, 参照用デプスマップとする.

$$M_D(i, j) = MED(N_D(i, j)) \quad (2.4)$$

その後, 以下の手順で注目画素 (i, j) の置換処理を実行する.

- (1) デプスマップ D における各画素値 $D(i, j)$ の 9 近傍画素値配列を $N_a(i, j)$ とし, 式(2.5)のように, 中央値 $M_a(i, j)$ を計算する.

$$M_a(i, j) = MED(N_a(i, j)) \quad (2.5)$$

- (2) $D(i, j)$ の 9 近傍の全画素値 $D(p, q)$ において, $N_s(p, q) = 1$ で類似性があり, $D(p, q)$ が欠損部に相当する場合, 参照用デプスマップの注目画素の 9 近傍画素値配列 $M_D(p, q)$ と $M_a(i, j)$ を比較する.

- (3) 式(2.6)のように, 9 近傍画素値配列 $M_D(p, q)$ と中央値 $M_a(i, j)$ の差 $M'_a(i, j)$ を計算し, 式(2.7)のように, $M'_a(i, j)$ がデプス閾値 D_{th} 未満の場合, デプスマップ D の注目画素 $D(i, j)$ の 9 近傍画素値配列 $D(p, q)$ を $M_D(p, q)$ に置換する. それ以外の場合, $D(p, q)$ を $M_a(x, y)$ に置換する.

$$M'_a(i, j) = |M_D(p, q) - M_a(i, j)| \quad (2.6)$$

$$D(p, q) = \begin{cases} M_D(p, q), & M'_a(i, j) < D_{th} \\ M_a(i, j), & \text{それ以外} \end{cases} \quad (2.7)$$

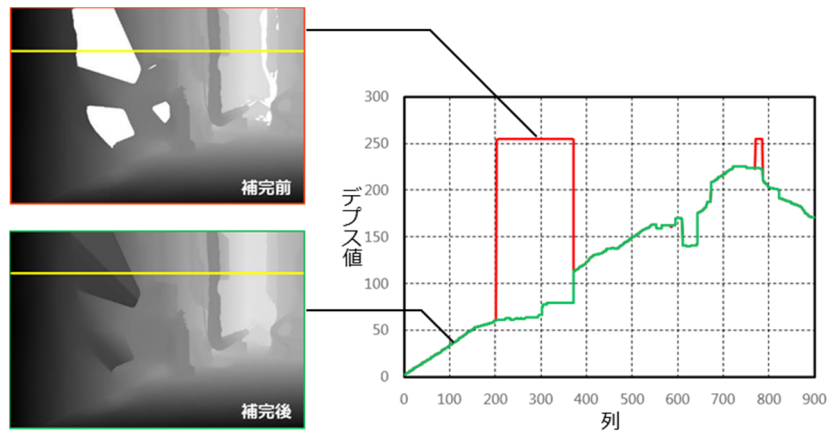


図 2.12 RGB 類似性に基づいたデプスの補完手法の適用

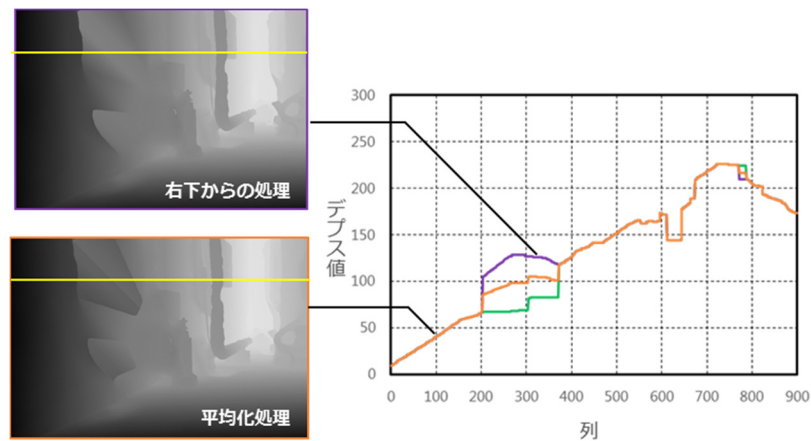


図 2.13 補完手法の方向依存性と平均化処理

この処理を全画素において計算する．そして，この処理を欠損部のデプスがなくなるまで繰り返し計算する．その際，繰り返し毎に，類似性の閾値 C_{th} を微小変化量 δ ずつ増加させていき，RGB 類似性マップを更新していくことで，欠損部を近傍画素値の中央値に置換していき，欠損部を徐々に埋めていく．

上記の RGB 類似性に基づいたデプスの補完手法を，実際に欠損部が存在するデプスマップに適用した結果を図 2.12 の左側に示す．デプスマップのサイズは 900×600 である．欠損部の白色の領域が補完処理により補完されていることが確認できる．また，デプスマップ中にある黄色のラインにおけるデプス値の変化を図 2.12 の右側に示す．補完前の赤色のグラフの突出したデプス値が緑色のデプス値になっていることが分かる．

Bapat らは，この補完手法を用いて，デプスセンサの計測時に発生するデプスマップ

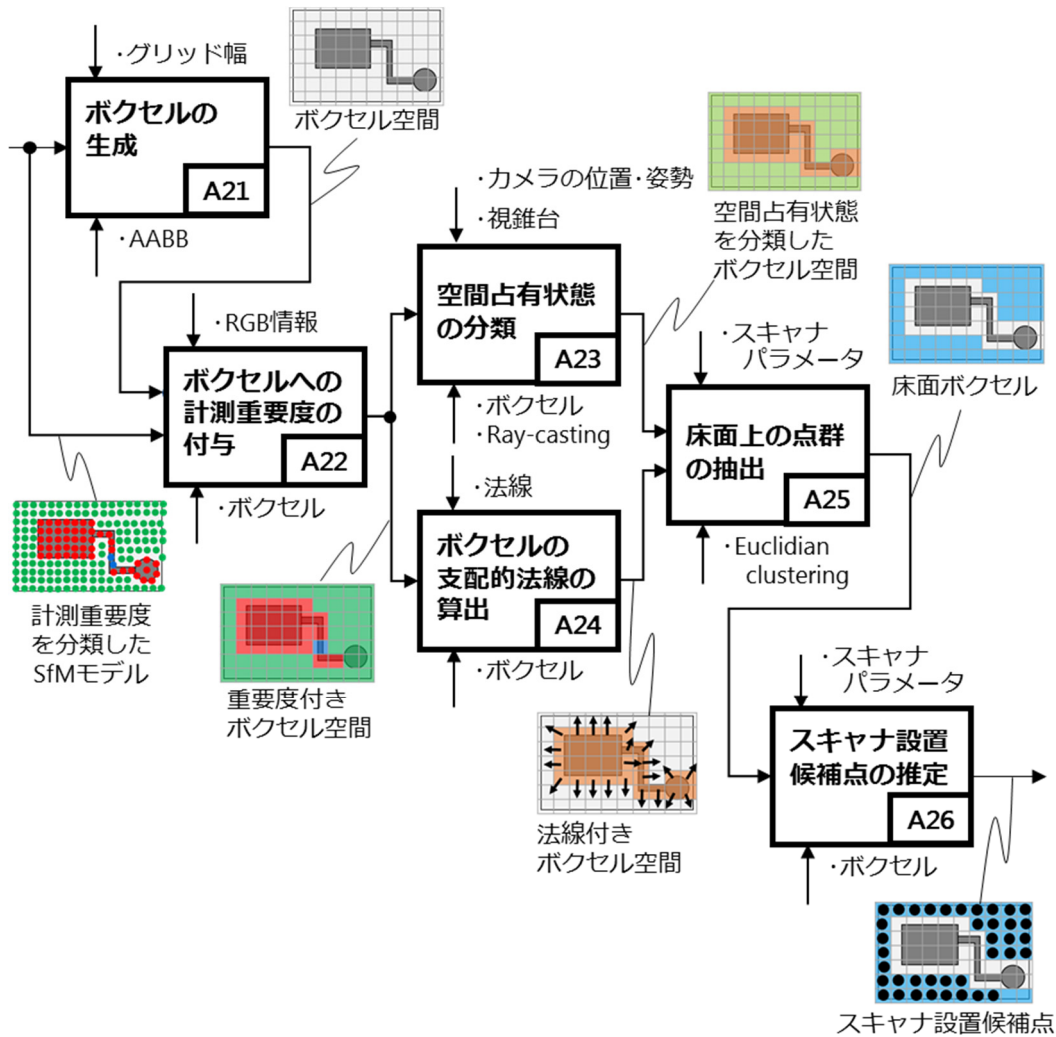


図 2.14 スキャナ配置候補の推定の処理手順

内に多数存在する微小な欠損領域を補完している。しかし、図 2.13 に示すように、比較的大きな欠損部を補完した場合、左上から処理した場合、列のデプス値は緑色のグラフとなり、右下から処理した場合、列のデプス値は紫色のグラフになっている。このように、処理する方向により補完されるデプス値が異なる。そのため、左上から右下へ処理したデプスマップと、右下から左上へ処理したデプスマップを用いて平均値を取ることで、図 2.13 に示すオレンジのグラフのように方向依存性の影響を小さくした。

2.3 スキャナ配置候補の推定

スキャナ配置候補の推定の処理手順を図 2.14 に示す。本ステップは、ボクセルの生

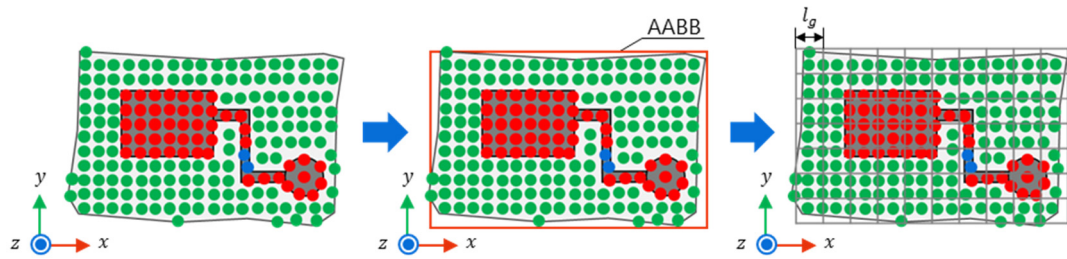


図 2.15 ボクセルの生成

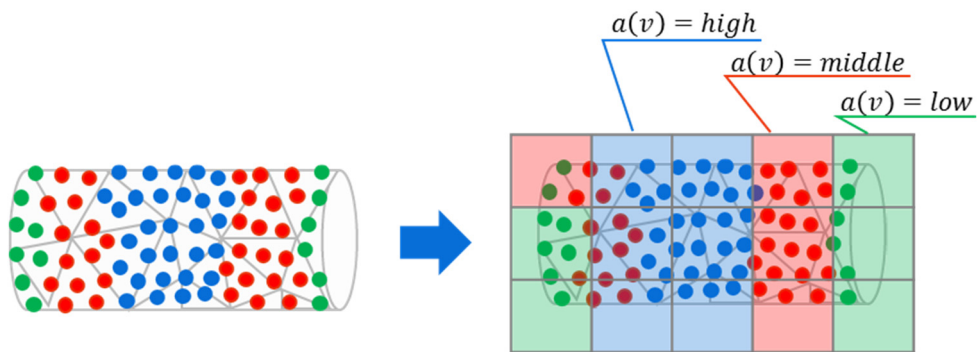


図 2.16 ボクセルへの計測重要度の付与

成，ボクセルへの計測重要度の付与，ボクセルを用いた空間占有状態の分類，ボクセルの支配的法線の算出，床面上の点群の抽出，スキャナ設置候補点の推定の 6 つから構成される。

2.3.1 ボクセルの生成

本研究では，スキャナ配置候補を推定する際に，ボクセルを用いている．その理由は，ボクセルは様々な属性情報を格納することができ，オープンスペースとクローズドスペースを区別する際の最も簡単なデータ構造を有しているためである．SfM モデルを配置し，その空間をボクセルで分割することにより，ボクセル内の物体の有無が判別でき，オープンスペースが明確になることで，スキャナが設置可能な空間を推定することができ，本研究においては，ボクセルを用いることが適切であると考えた．

ボクセルの生成は，はじめに，図 2.15 に示すように，計測対象を含む SfM モデルの AABB (Axis-aligned bounding box) を生成する．続いて，AABB を一辺の幅 l_g の立方体に分割する．

2.3.2 ボクセルへの計測重要度の付与

次に，2.2.2 項で SfM モデルの点群に分類した計測重要度の情報をボクセルに付与す

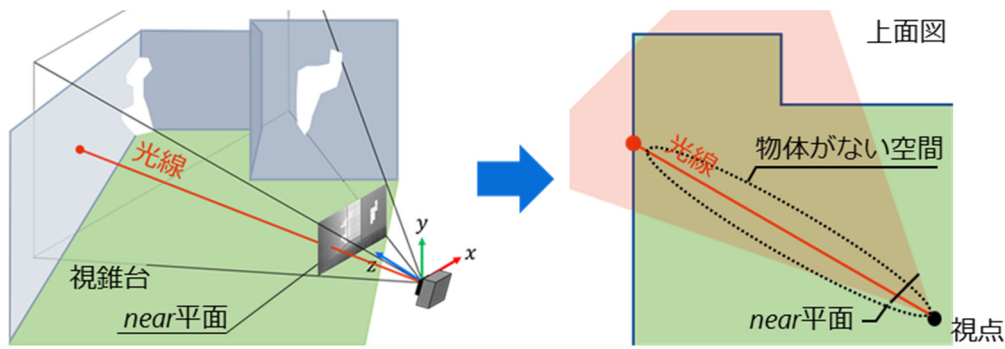


図 2.17 光線による空間占有状態の判別

る．図 2.16 に示すように，各ボクセル内に SfM モデル表面上に生成した点群が存在するか否かを判別する．そして，ボクセル内に点群が存在する場合，各計測重要度に該当する RGB 情報を持つ点群をカウントし，式(2.8)の条件に基づいて，ボクセル v に分類された計測重要度の属性 $a(v)$ を付与する．『重要度：高』の点群が 1 つでも入っていれば， $a(v) = high$ に分類し，『重要度：中』の点群数が多ければ， $a(v) = middle$ に分類し，『重要度：低』の点群数が多ければ， $a(v) = low$ に分類する．もし同数の場合は，重要度が高いほうを優勢とする．

$$a(v) = \begin{cases} high, & |p_b| \geq 1 \\ middle, & |p_r| > |p_g| \wedge |p_b| = 0 \\ low, & |p_g| > |p_r| \wedge |p_b| = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

ここで， $|p_b|, |p_r|, |p_g|$ は，それぞれ，各ボクセル内において，『重要度：高』に分類した青系色の RGB 情報をもつ点群数，『重要度：中』に分類した赤系色の RGB 情報をもつ点群数，『重要度：低』に分類した緑系色の RGB 情報をもつ点群数である．

2.3.3 ボクセルを用いた空間占有状態の分類

次に，各ボクセルに物体が含まれているのか否かを分類するため，ボクセルの空間占有状態を検証する．そのために，2.2.1 項の SfM で推定されたカメラの位置・姿勢情報と 2.2.3.1 目で作成したデプスマップを利用する．図 2.17 に示すように，一般的な手法として，推定されたカメラ位置から *near* 平面に置かれたデプスマップの各画素を通る直線上に光線を飛ばす．この光線は，必ず注目画素 $D(i, j)$ のデプス値を 3 次元空間に逆投影した際の点に到達する．これにより，光線が通過した空間は，光線を遮断するものがないと判断され，何もないオープンスペースであることが保証される．この考え方を利用して，ボクセルの空間占有状態进行分类する．

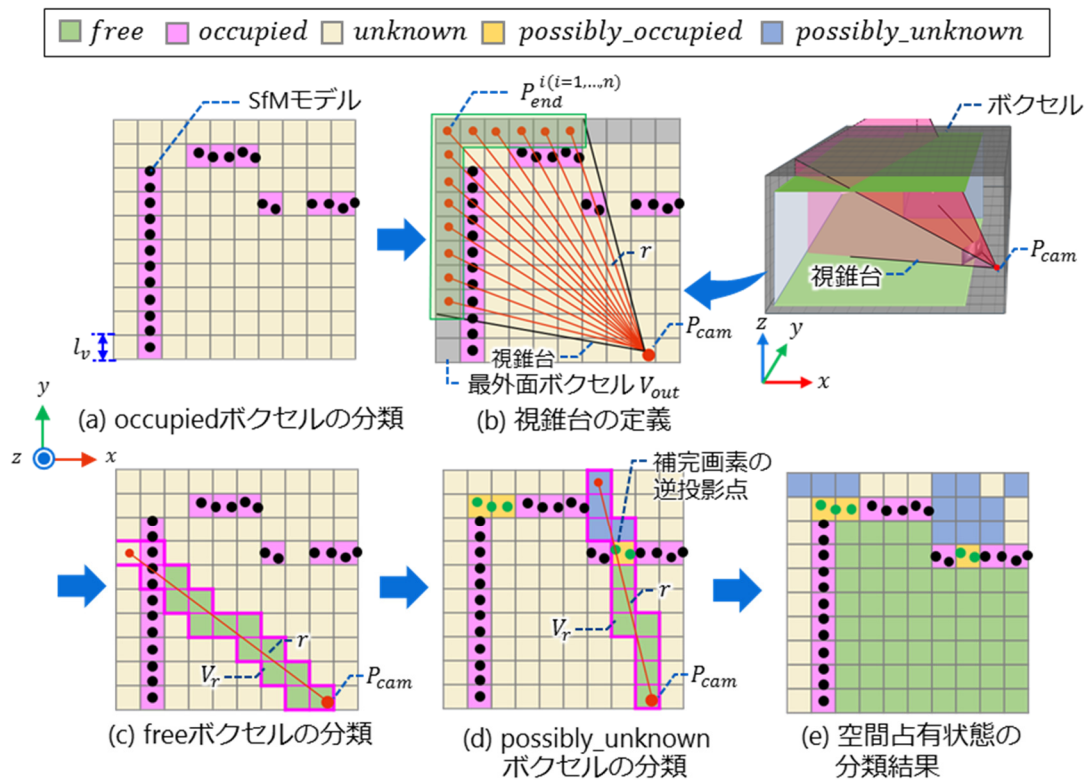


図 2.18 ボクセルを用いた空間占有状態の分類手順

ここで、本研究では、ボクセルの空間占有状態 $b(v)$ は、次の 5 つの状態に分類される。 $b(v) \in \{free, occupied, unknown, possibly_occupied, possibly_unknown\}$ 。ここで、 $b(v) = free$ は、ボクセル内に何も存在しない状態、 $b(v) = occupied$ は、ボクセル内に SfM モデルを含む状態、 $b(v) = unknown$ は、ボクセル内の物体の有無が不明な状態、 $b(v) = possibly_occupied$ は、ボクセル内にデプスマップにより欠損部を補完した画素の逆投影点が存在しており、実際に物体を含んでいる可能性が高い状態、 $b(v) = possibly_unknown$ は、 $possibly_occupied$ ボクセルの背後に存在し、物体の有無が不明の可能性が高い状態である。

ここで、空間占有状態は以下の手順で分類する。

- ① 全ボクセルの空間占有状態 $b(v) = unknown$ に初期化する。
- ② 図 2.18(a)に示すように、SfM モデルが含まれているボクセルは既に判明しているため、 $b(v) = occupied$ に更新する。
- ③ 図 2.18(b)に示すように、2.2.1 項の SfM によって推定された各カメラ撮影位置の視点 P_{cam} からカメラ視錐台を定義し、視錐台内にあるボクセル空間の AABB の境

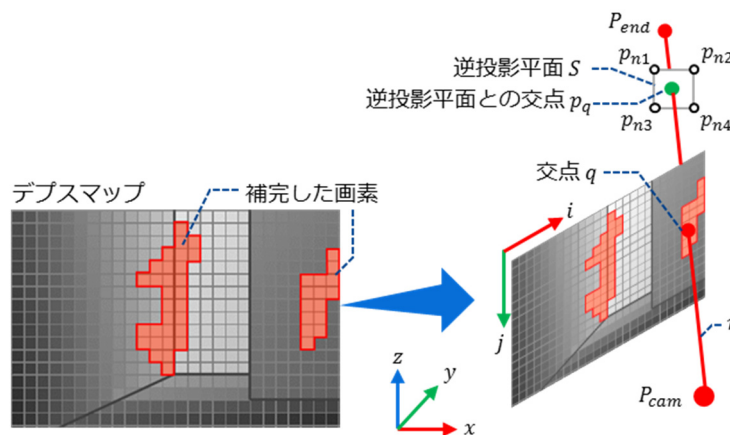


図 2.19 デプスマップの補完画素を光線が通過する際の処理

界面ボクセル（最外面ボクセル） V_{out} のみを抽出する．抽出されたボクセル群の各ボクセル重心を P_{end}^i とし， P_{cam} から P_{end}^i に向けて光線 r を飛ばすレイキャスティングを行う．これにより，光線が通過しないボクセルをなくすことができ，分類漏れをなくすことができる．

- ④ その際，図 2.18(c)に示すように，光線 r が貫通したボクセル群 V_r を P_{cam} 側から順番に検証し，ボクセル $v_r \in V_r$ が *unknown* であれば，*free* に更新する．そして，*occupied* ボクセルに到達した場合，そこで処理を終了する．
- ⑤ 図 2.18(d)に示すように，SfM モデルの欠損部を光線が通過する場合，図 2.19 に示す処理を行う．

- カメラ視点 P_{cam} から P_{end} へ向かう光線 r と *near* 平面にあるデプスマップの交点 q が，2.2.3.2 目で補完した画素に対応している場合，ボクセル空間にはモデルがないため，補完した画素のデプス値を 3 次元空間に逆投影し，レイキャスティング時の各ボクセルの状態判定に用いる．

- その際，光線 r は， P_{cam} と P_{end} を結ぶ直線のため，デプスマップとの交点 q が画素中心を貫通しているとは限らない．そこで，交点の画素 $q(i, j)$ の 4 近傍画素 $n1(i - 1, j + 1)$ ， $n2(i + 1, j - 1)$ ， $n3(i - 1, j - 1)$ ， $n4(i + 1, j + 1)$ の逆投影点 $p_{n1}, p_{n2}, p_{n3}, p_{n4}$ を生成する．

- うち任意の 3 点から逆投影平面 S を生成し，光線 r と逆投影平面 S の交点 p_q を逆投影点として生成する．ここでは， p_{n1}, p_{n2}, p_{n3} を選択している．

- 図 2.18(d)に示すように，光線 r が貫通したボクセル群 V_r を P_{cam} 側から順番に検証し，ボクセル v_r が *unknown* であれば，*free* に更新する．そして，逆投影点を

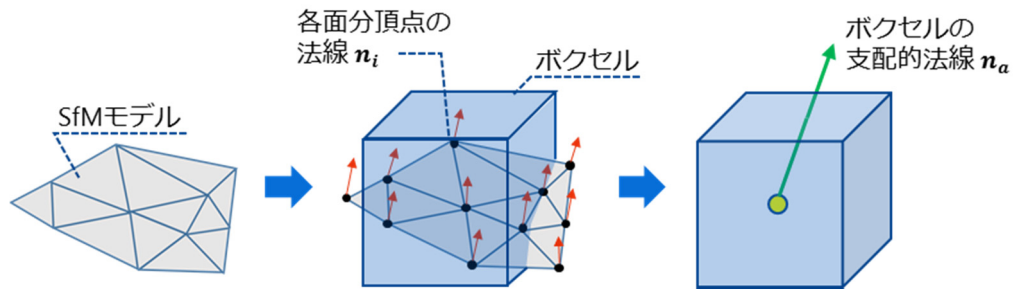


図 2.20 ボクセルの支配的法線

含むボクセル v_r を *possibly_occupied* に更新し、それ以降のボクセル v_r が、*unknown* であれば、*possibly_unknown* に更新する。

- ⑥ 図 2.18(e)に示すように、①から⑤までの処理を全カメラ位置に対して実行することにより、ボクセル空間全体の占有状態を分類することができる。

2.3.4 ボクセルの支配的法線の算出

スキャナが設置可能な領域の推定や計測品質を満たすための入射角の制約を課すためには、物体の向き（法線）の情報が必要になる。SfM モデルには、各面の法線が格納されているが、ボクセルには向きの情報がないため、SfM モデルの法線をもとに、ボクセルの法線を近似的に算出する必要がある。

はじめに、図 2.20 に示すように、各*occupied*ボクセル内を探索して SfM モデルの各面分頂点の有無を判定する。その後、ボクセル内にある各面分頂点 i の法線ベクトル \mathbf{n}_i を平均化する。これをボクセルの支配的法線ベクトル \mathbf{n}_a として定義する。また、注目するボクセルに面分頂点が含まれていなかった場合は、探索領域を 9 近傍ボクセルに拡大して探索を行い、領域内の法線ベクトル \mathbf{n}_i を平均化した法線ベクトルを注目するボクセルの支配的法線ベクトル \mathbf{n}_a として定義する。

2.3.5 床面上の点群の抽出

計測対象となる SfM モデル内でスキャナを設置することができる領域を推定するために床面を抽出する。通常、地上型レーザスキャナ (TLS) は、水平面に設置することがほとんどである。そのため、図 2.21 (a)に示すように、2.3.4 項で算出したボクセルの支配的法線を利用する。式(2.9)のように、床面の法線ベクトルとして z 軸方向の単位ベクトル $\mathbf{n}_z = (0,0,1)$ と各ボクセル重心の支配的法線ベクトル \mathbf{n}_a の内積をとり、鉛直上向きに近いボクセル、つまり、その値が閾値 τ_{floor} 以上となるボクセル重心点を床

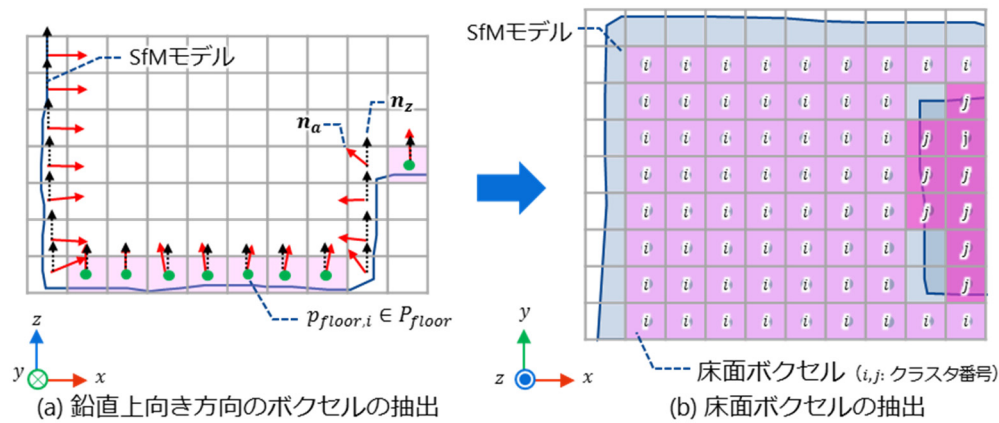


図 2.21 床面ボクセルの抽出

面上に分布する点 P_{floor} として抽出する.

$$\mathbf{n}_z \cdot \mathbf{n}_a \geq \tau_{floor} \quad (2.9)$$

ここで, SfM モデル表面は, きれいな平面にならずに歪んでいることが多いため, 本研究では $\tau_{floor} = 0.93$ と設定した.

次に, 抽出した点集合 P_{floor} をユークリディアンクラスタリングを用いてクラスタ化する. 処理の手順は以下のとおりである.

- (1) P_{floor} に対して kd 木を構築する.
- (2) 空のクラスタリスト C を構築し, 検査が必要な点のクリエ Q を構築する.
- (3) P_{floor} に含まれる全ての点 $p_{floor,i}$ に対して次の処理を行う.
 - $p_{floor,i}$ をクエリ Q に加える.
 - Q に含まれる各点 $p_{floor,i}$ に対して次の処理を行う.
 - $p_{floor,i}$ を中心とする半径の球面内 r に存在する $p_{floor,i}$ の近傍点集合 $P_{floor,i}^k$ を探索する.
 - 全ての点 $p_{floor,i}^k \in P_{floor,i}^k$ について, 処理済でなければ, $p_{floor,i}^k$ を Q に加え, 処理済であれば, $p_{floor,i}^k$ を Q に加えない.
 - Q に含まれる全ての点 $p_{floor,i}$ が処理したら, Q をクラスタリスト C に加え, Q を空にする.
- (4) P_{floor} に含まれる全ての点 $p_{floor,i}$ が処理され, クラスタリスト C に含まれてい

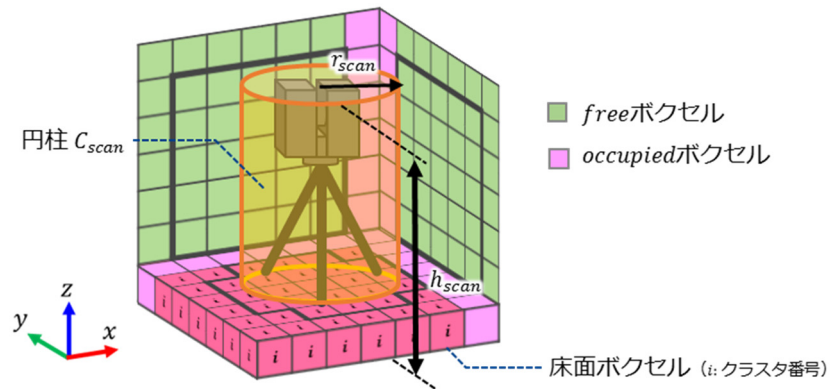


図 2.22 三脚を含む TLS の包絡形状を近似した円柱

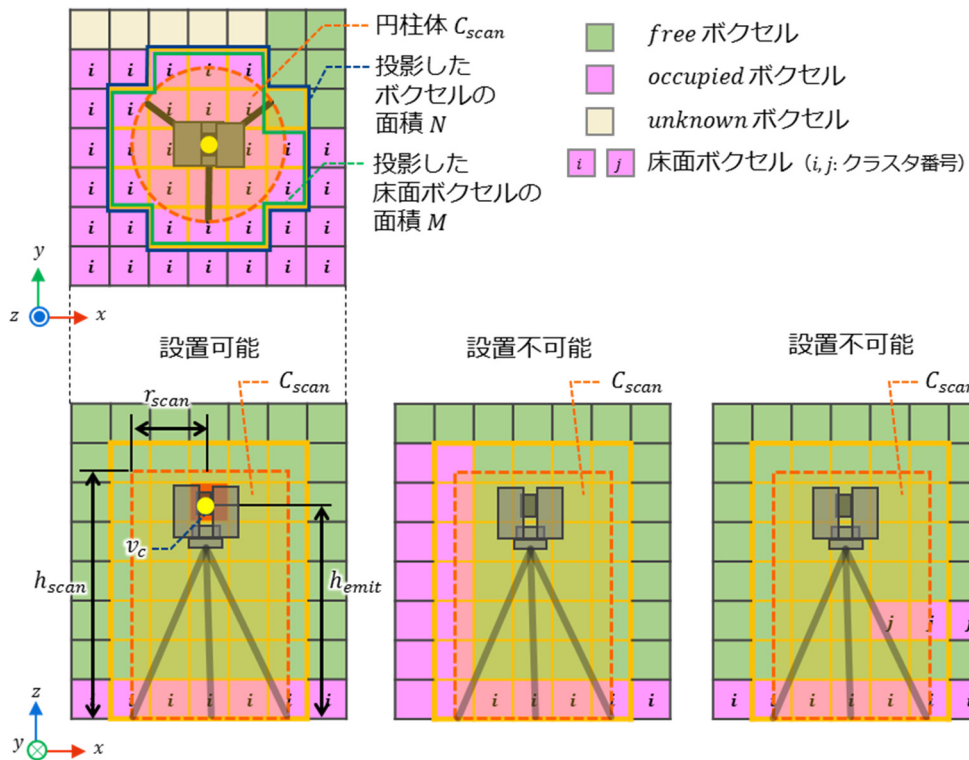


図 2.23 スキャナが設置可能な床面領域の推定

るなら、アルゴリズムを終了する。

また、図 2.21 (b)に示すように、クラスタ化された点群を含むボクセルを床面ボクセルとして、クラスタ番号を付与する。

2.3.6 スキャナ設置候補点の推定

次に、2.3.5 項で抽出した各床面ボクセルに対して、その上方にスキャナ設置領域として、図 2.22 に示すように、ボクセルの重心点を通る z 軸方向の単位ベクトルを回転軸とし、三脚を含む TLS 本体を包括する半径 r_{scan} 、高さ h_{scan} の円柱 C_{scan} を考える。円柱 C_{scan} の内部に含まれるボクセル集合 V_{scan} が以下の条件を満たす場合、その床面ボクセルがスキャナを設置可能な床面領域であるとみなす。

- (1) スキャナを設置するための十分な床面積がある。すなわち、図 2.23 に示すように、 V_{scan} に含まれるボクセルを z 軸方向に投影したとき、投影平面において、式(2.10)のように、投影後のボクセルの全面積 N と投影後の床面ボクセル面積 M が閾値 τ_{place} 以上であることである。

$$M/N \geq \tau_{place} \quad (2.10)$$

ここで、本研究では $\tau_{place} = 0.90$ と設定した。

- (2) スキャナが設置不可能となる障害物が存在しない。すなわち、図 2.23 に示すように、 V_{scan} に含まれるボクセルが *free* ボクセル、*unknown* ボクセル、もしくは、床面ボクセルに付与されたクラスタ番号と同一のクラスタ番号を持つ *occupied* ボクセルのいずれかであることである。

スキャナ設置可能な床面領域を求めた後、図 2.23 に示すように、これらのボクセル重心点から高さ h_{emit} となる *free* ボクセルをスキャナ設置可能ボクセルとする。さらに、ボクセル解像度 l_g に対してスキャナ設置位置間隔はもっと大きくてよい。そのため、 l_g の 3 倍程度の間隔になるように、スキャナ設置可能ボクセルの中から、ダウンサンプリングしたボクセルの重心点をスキャナ設置候補点 $v_c \in V_{candidate}$ として選択する。

2.4 準最適スキャナ位置の導出

準最適スキャナ位置の導出の処理手順を図 2.24 に示す。本ステップは、計測対象となるボクセルの選定、準最適スキャナ位置の導出の 2 つから構成されている。

2.4.1 計測対象となるボクセルの選定

はじめに、*occupied* ボクセルの中から、計測対象となるボクセルを選定する。2.2.1 項で実施した SfM は各写真から 3 次元復元をするが、写真に写っていない箇所も自動である程度補完した SfM モデルが構築される。SfM モデル構築時に補完された箇所は、モデルの精度が低いため、計測対象から除外する。ここで、この対象となる箇所は矩

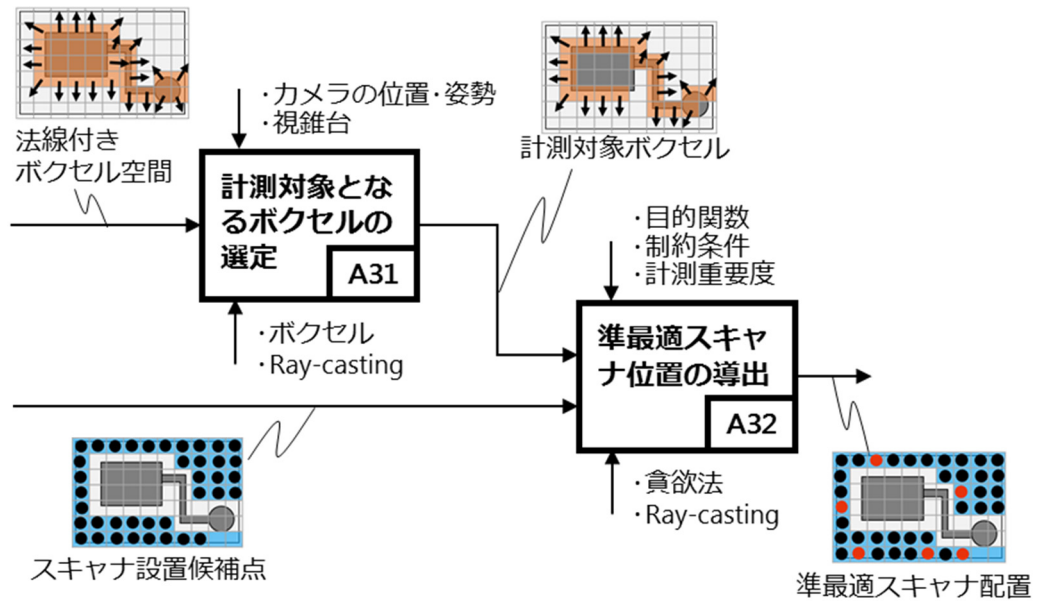


図 2.24 準最適スキャナ位置の導出の処理手順

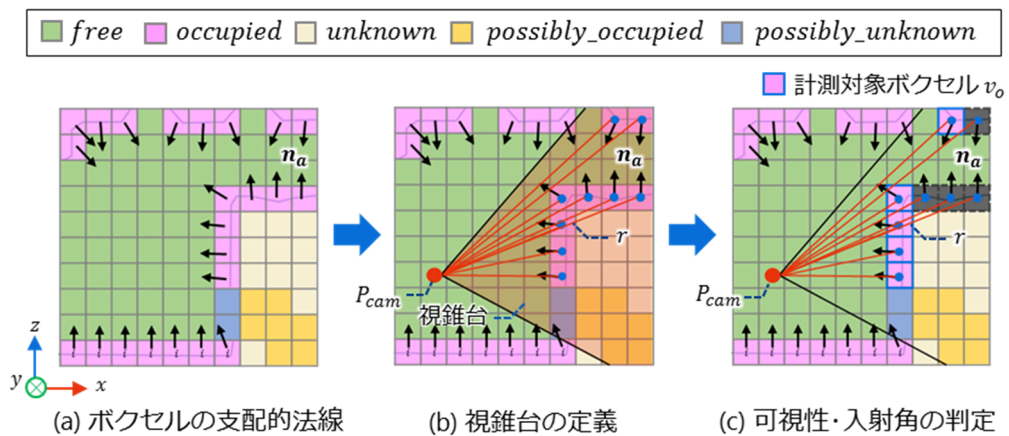


図 2.25 計測対象となるボクセルの選定

形形状の機器上面や背面に多い。空調設備においては、基本的に工事に必要な配管やフランジは天井面から吊るされており、床面からの写真撮影時にも写真に写っている。

また、工事に必要な箇所は写真撮影時にも把握しているため、重点的に撮影している。そのため、工事に必要な箇所が写らずに計測対象から除外されるという状況は生じない。そこで、2.2.1 項の SfM によって推定された各カメラの位置から見えていない *occupied* ボクセルを計測対象から除外する。計測対象となるボクセルは以下の手順で選定する。

- (1) はじめに、図 2.25(a) のような状態を考える。つぎに、図 2.25(b) に示すように、

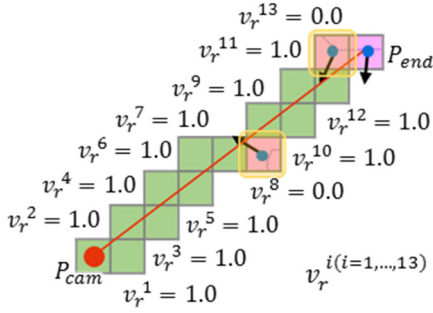


図 2.26 可視性の算出

表 2.1 光線の通過確率 $p(v_r)$

ボクセルの属性	通過確率 $p(v_r)$
<i>free</i>	1.0
<i>occupied</i>	0.0
<i>unknown</i>	0.5
<i>possibly_occupied</i>	0.25
<i>possibly_unknown</i>	0.75

2.2.1 項の SfM によって推定された各カメラ撮影位置の視点 P_{cam} からカメラ視錐台を定義し、 P_{cam} から視錐台内にある *occupied* ボクセルのボクセル重心 P_{end} に向けて光線を飛ばすレイキャスティングを実行する。

- (2) つぎに、光線 r が P_{end} まで到達可能かを検証することで可視性を判定する。そのために、光線 r が貫通したボクセル群 $v_r^i \in V_r$ に対して、表 2.1 のように、各ボクセルの占有状態の属性に基づき設定した光線の通過確率 $p(v_r)$ を式(2.11)のように掛け合わせていき、閾値 $\tau_{visible}$ 以上の場合、『可視』と判定する。

$$\prod_{v_r \in V_r(P_{cam}, P_{end})} p(v_r) > \tau_{visible} \quad (2.11)$$

ここで、表 2.1 に示すように、通過確率 $p(v_r)$ はボクセルの属性によって決定され、*free* の場合は必ず光線が通過できるため、 $p(v_r) = 1.0$ に設定する。*occupied* の場合は光線が物体に遮断されるため、 $p(v_r) = 0.0$ に設定する。*unknown* の場合は状態が不明のため、 $p(v_r) = 0.5$ に設定する。*possibly_occupied* の場合は、*occupied* に状態が近いため、 $p(v_r) = 0.25$ に設定する。*possibly_unknown* の場合は、*unknown* に状態が近いため、 $p(v_r) = 0.75$ に設定する。また、本研究では、 $\tau_{visible} = 0.0$ に設定した。

- (3) つぎに、物体の表側が見えているかを判定する。可視性を見るだけでは、SfM モデルの裏側を『可視』とする可能性がある。そのために、式(2.12)のように、光線 r とボクセルの支配的法線ベクトル \mathbf{n}_a との角度（入射角）が 90° 未満であれば、物体の表面が『可視』とする。

$$\text{ang}\{r(P_{end}, P_{cam}), \mathbf{n}_a(P_{end})\} < 90^\circ \quad (2.12)$$

ここで、 $r(P_{end}, P_{cam})$ は P_{end} と P_{cam} を結ぶ線分で、 $\mathbf{n}_a(P_{end})$ は P_{end} のボクセルの支配的法線ベクトルである。

- (4) そして、式(2.11)の可視性と式(2.12)の入射角の条件の両方を満たす *occupied* ボクセルを計測対象ボクセル $v_o \in V_{object}$ として選定する。

2.4.2 スキャナ配置問題の定式化

本研究では、計測対象ボクセル集合 V_{object} において、『計測可能』なボクセル数 $|v_o|$ が最大となるスキャナ設置位置のボクセル列 S_{seq} をスキャナ設置候補点集合 $V_{candidate}$ の中から選出する。ここで、『計測可能』とは、以下の4つの制約条件を満たす計測対象ボクセル v_o である。

- ① 計測品質に関わる光線 r とボクセルの支配的法線ベクトル \mathbf{n}_a との角度（入射角）が閾値以下
- ② 計測品質に関わるスキャナ位置 s_j から対象ボクセル v_q までの計測距離が閾値範囲内
- ③ スキャナ位置 s_j から対象ボクセル v_q に対する可視性が閾値以上
- ④ レジストレーションに必要な点群間重複が閾値以上

そして、上記のスキャナ配置問題は式(2.13)のように定式化できる。

$$\left| \begin{array}{l} \underset{S_{seq} \subset V_{candidate}}{\text{maximize}} \\ \text{subject to} \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} \bigcup_{s_j \in S_{seq}} V'_{object}(s_j) \\ \forall v_q \in V'_{object}(s_j) \subset V_{object} \\ C_{ang}(s_j, v_q) \wedge C_{range}(s_j, v_q) \wedge C_{olap}(s_j) \wedge C_{vis}(s_j, v_q) \end{array} \right| \quad (2.13)$$

ここで、 $S_{seq} = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ は、 M 個のスキャナ設置候補点の順序集合である。そして、 $s_j \in S_{seq}$ は、スキャナ設置候補ボクセル集合 $V_{candidate}$ のひとつである j 番目のスキャナ位置である。 $V'_{object}(s_j)$ は、制約条件を満たしたボクセルのみから構成される計測対象ボクセル集合 V_{object} の部分集合である。 $C_{ang}(s_j, v_q)$, $C_{range}(s_j, v_q)$, $C_{olap}(s_j)$, $C_{vis}(s_j, v_q)$ は、スキャナ位置 s_j から対象ボクセル v_q に向けて光線を飛ばした時、入射角、計測距離、点群間重複、可視性の条件を満たすか否かを表現したブール関数である。

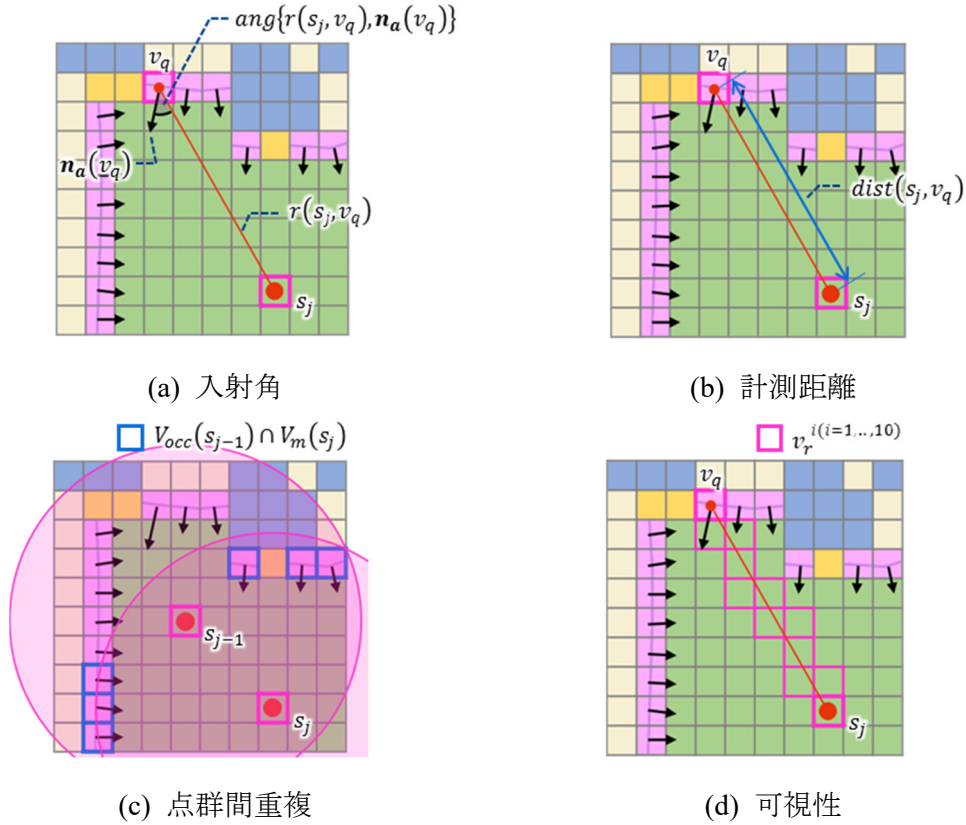


図 2.27 各種制約条件

2.4.3 制約条件

2.4.2 項で説明した入射角，計測距離，点群間重複，可視性の制約条件は，それぞれ以下のように定義する．

- 1) 図 2.27(a)に示すように，入射角の制約条件 $C_{ang}(s_j, v_q)$ は，式(2.14)を満たす場合に真となる．

$$ang\{r(s_j, v_q), \mathbf{n}_a(v_q)\} \leq \theta_\alpha \quad (2.14)$$

ここで， $r(s_j, v_q)$ は，スキャナ位置 s_j と対象ボクセル v_q を結ぶ線分であり， θ_α は，最大許容入射角である．

- 2) 図 2.27(b)に示すように，計測距離の制約条件 $C_{range}(s_j, v_q)$ は，式(2.15)を満たす場合に真となる．

$$d_{min} < dist(s_j, v_q) \leq d_{max} \quad (2.15)$$

ここで、 $dist(s_j, v_q)$ は、スキャナ位置 s_j と対象ボクセル v_q を結ぶ線分の長さであり、 d_{min} と d_{max} は、それぞれ最小／最大許容距離である。

- 3) 図 2.27(c)に示すように、点群間重複の制約条件 $C_{olap}(s_j)$ は、式(2.16)を満たす場合に真となる。

$$\frac{|V_{occ}(s_{j-1}) \cap V_m(s_j)|}{|V_m(s_j)|} \geq \tau_{overlap} \quad (2.16)$$

ここで、 $V_{occ}(s_{j-1})$ は、 $j-1$ 番目までのスキャンで計測した *occupied* ボクセルの和集合、 $V_m(s_j)$ は、 j 番目のスキャンで計測した *occupied* ボクセルの部分集合である。そして、 $\tau_{overlap}$ は最小許容重複率である。

- 4) 図 2.27(d)に示すように、可視性の制約条件 $C_{vis}(s_j, v_q)$ は、式(2.17)を満たす場合に真となる。

$$\prod_{v_r \in V_r(s_j, v_q)} p(v_r) > \tau_{visible} \quad (2.17)$$

ここで、 $p(v_r)$ は、スキャナ位置 s_j から対象ボクセル v_q に向けて飛ばした光線 r が貫通したボクセル $v_r \in V_r$ における光線の通過確率であり、表 2.1 に示したボクセルの属性に基づいて決定される。そして、 $\tau_{visible}$ は最小許容可視率であり、本研究では、 $\tau_{visible} = 0.0$ に設定した。

ここで、各制約条件で設定されている閾値は、ボクセルに付与されている計測重要度によって異なる。『重要度：高』の場合は、精度よく計測する必要があるため、入射角の閾値 θ_α は、なるべく小さいほうが良い。また、計測距離の閾値 d_{max} は、榎本ら [8]の研究によって判明している精度よく計測できる距離である 20m 以内で計測することが望ましい。さらに、計測点密度は距離が近くなるにつれて高密度になるため、範囲内であっても、なるべく近い距離から計測することが望ましい。一方、『重要度：中』の場合は計測できればよいため、入射角の閾値 θ_α は、『重要度：高』よりも大きくて構わない。また、計測距離の閾値 d_{max} も上記の範囲内であれば、『重要度：高』よりも遠くから計測しても構わない。

2.4.4 貪欲法による準最適スキャナ配置の導出

最後に、2.4.2 項の式(2.13)で定式化したスキャナ配置問題を解き、スキャナ配置を導出する。ここで、式(2.13)のスキャナ配置問題は、最適化問題でよく知られている問題

クラスに帰着することが出来ないため、大局的な最適解を探索するためのアルゴリズムが存在しない。したがって、本研究では、計測率による終了条件を付与した近似解法である貪欲法を採用して準最適なスキャナ配置を導出する。導出方法は、はじめに、『重要度：高』の対象ボクセル v_q の数を最大化するスキャナ配置を導出した後、『重要度：中』の対象ボクセル v_q の数を最大化するスキャナ配置を導出することで、最終的な準最適スキャナ配置とする。ここで、『重要度：高』における最適スキャナ設置位置を導出した後、『重要度：中』における最適スキャナ設置位置を導出する理由は、実務において、『重要度：高』の寸法情報を精度よく計測することが重要とされるため、第一に『重要度：中』を考慮しない配置を導出した。

ここで、貪欲法とは、問題の要素を複数の部分問題に分割し、それぞれを独立に評価し、評価値の高い順に取り込んでいくことで解を得る方法である。動的計画法と異なり、一度選択した要素を再考することがないため、得られる解が最適解であるとは限らない。しかし、部分問題の解法と単純なソートのみでプログラムを実装することが可能であり、多くの問題に対して多項式時間での近似アルゴリズムとなる。

準最適スキャナ配置は以下の手順で導出する。

- (1) 順序インデックスを $j \leftarrow 1$, 順序集合を $S_{seq} \leftarrow \{ \}$ に初期化する。
- (2) 『重要度：高』の属性をもつ対象ボクセル v_{oh} に対し、スキャナ設置候補点集合 $V_{candidate}$ から光線を飛ばすレイキャスティングを実行する。
- (3) 式(2.18)のように、 $V'_{object}(s_j)$ のボクセル数を最大化する j 番目の準最適スキャナ位置 \tilde{s}_j をスキャナ設置候補点集合 $V_{candidate}$ の中から選定する。

$$\tilde{s}_j = \arg \left\{ \underset{s_j \in V_{candidate}}{\text{maximize}} |V'_{object}(s_j)| \right\} \quad (2.18)$$

- (4) 順序集合の j 番目の要素に準最適スキャナ位置 \tilde{s}_j を挿入する。そして、スキャナ設置候補点集合 $V_{candidate}$ を $V_{candidate} \leftarrow V_{candidate} - \{\tilde{s}_j\}$ として更新する。
- (5) 実際に計測された計測対象ボクセル数 $|V_m(s_j)|$ が式(2.19)を満たした場合、アルゴリズムを停止し、準最適スキャナ位置の順序集合として S_{seq} を出力する。

$$|V_m(s_j)|/|V_o| \leq \tau_c \quad (2.19)$$

ここで、 τ_c は事前に定義した上昇率の閾値である。一方、式(2.19)を満たさない場合は、順序インデックスを $j \leftarrow j + 1$ に更新し、(1)から(4)までの処理を繰り返す。

- (6) 次に、『重要度：中』の属性をもつ対象ボクセル v_{om} に対し、スキャナ設置候補点集合 $V_{candidate}$ から光線を飛ばすレイキャスティングを実行する。
- (7) 『重要度：高』と同様に(3)から(5)の処理を実行する。
- (8) 最終的に出力された S_{seq} を準最適スキャナ配置の順序集合とする。

また、アルゴリズムとしては、表 2.2 のようになる。

表 2.2 最適スキャナ配置の導出アルゴリズム

```

1: 順序インデックスを  $j \leftarrow 1$ , 順序集合を  $S_{seq} \leftarrow \{ \}$  に初期化
2: while 上昇率  $\leq \tau_c$  do
3:   for all スキャナ設置候補点  $s_j \in V_{candidate}$  do
4:     for all 『重要度:高』の『未計測』計測対象ボクセル  $v_o \in V_{object}$  do
5:        $s_j$  から  $v_o$  に向けたレイキャスティング
6:       全制約条件を満たす  $v_o$  を  $v_q$  として定義し,  $v_q$  数を集計
7:       準最適スキャナ位置  $\hat{s}_j \leftarrow$  集計数が最大となるスキャナ設置候補点  $s_j$ 
8:     end for
9:   end for
10:   $\hat{s}_j$  から  $\forall v_o$  に向けたレイキャスティング
11:  全制約条件を満たす  $v_o$  を『計測済』に更新
12:  上昇率  $\leftarrow |V_m(s_j)|/|V_o|$ 
13:   $j \leftarrow j + 1$ 
14:   $V_{candidate} \leftarrow V_{candidate} - \{\hat{s}_j\}$ 
15: End while
16: Return  $S_{seq}$ 

```

2.5 小規模で簡易な計測環境におけるスキャナ配置の導出結果

本節では、2.4 節までで説明した準最適スキャナ配置計画アルゴリズムの有効性を検証するために、実際の計測環境に本アルゴリズムを適用する。小規模で簡易な計測環境において、提案手法、計測重要度を考慮しない手法および熟練オペレータによるスキャナ配置のスキャン回数、計測率を比較する。これにより、計測重要度の効果、計測品質の充足率を評価することで、提案手法の有効性を検証する。

2.5.1 計測対象

これから、2.4 節までで説明した準最適スキャナ配置計画アルゴリズムの有効性を検証するために、実際の計測環境に本アルゴリズムを適用する。本節で扱う計測対象は、

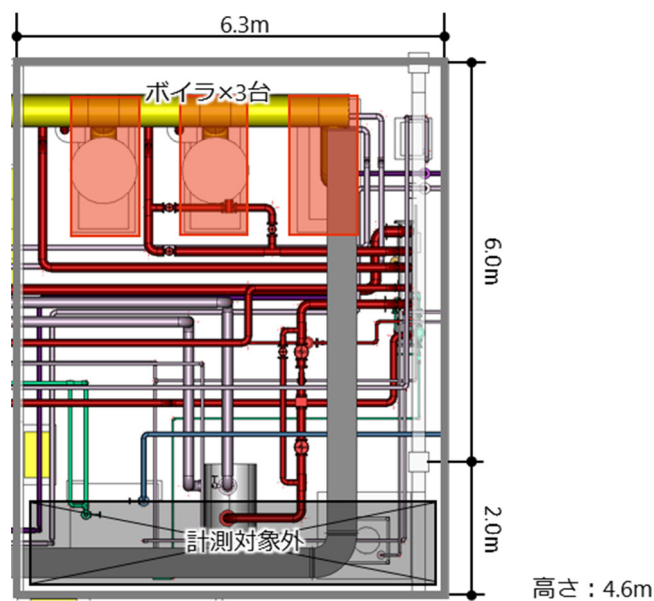


図 2.28 計測対象となるボイラ室の図面（上面図）

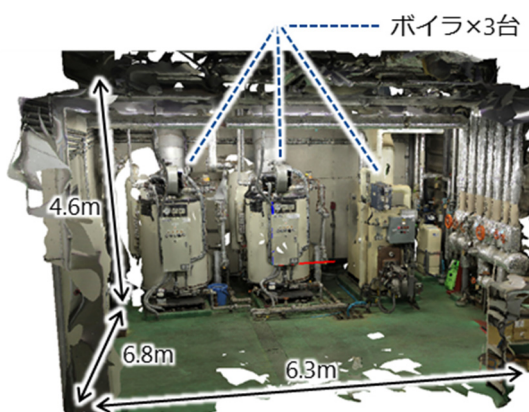


図 2.29 計測対象の SfM モデル
（ボイラ室）

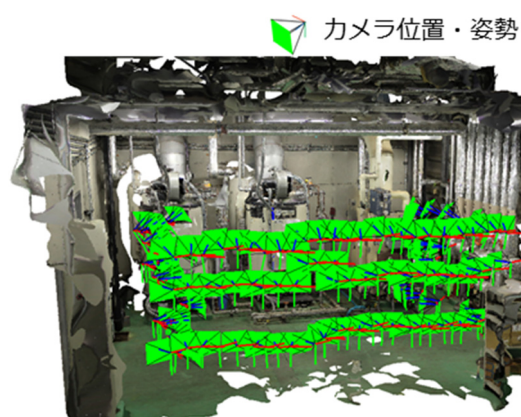


図 2.30 SfM により推定されたカメラの位置姿勢（ボイラ室）

新菱冷熱工業株式会社中央研究所内にあるボイラ室である。図 2.28 に示すような図面の施設となっており、室内の規模は、 $6.3\text{m} \times 6.8\text{m} \times 4.6\text{m}$ となっている。ボイラ 3 台が並んでおり、壁面と天井面付近に配管が通っている。このボイラが 3 台並んでいる左側を計測対象とし、右側の黒枠で囲った領域は計測対象外としている。

はじめに、計測対象の事前知識となる SfM モデルを作成するため、表 2.3 に示すデジタル一眼レフカメラを使用し、様々な方向から計 153 枚の写真を撮影し、市販の SfM ソフトウェア (Context Capture) [25] により 3 次元復元が行われ、図 2.29 に示すように、SfM モデルが自動構築される。構築された SfM モデルは、壁面や天井面に欠損部

表 2.3 SfM に使用したカメラの仕様

機種名	Canon EOS Kiss X5
撮像素子サイズ	約 22.3×14.9mm
有効画素	約 1800 万画素
素子タイプ	CMOS センサ
アスペクト比	3 : 2

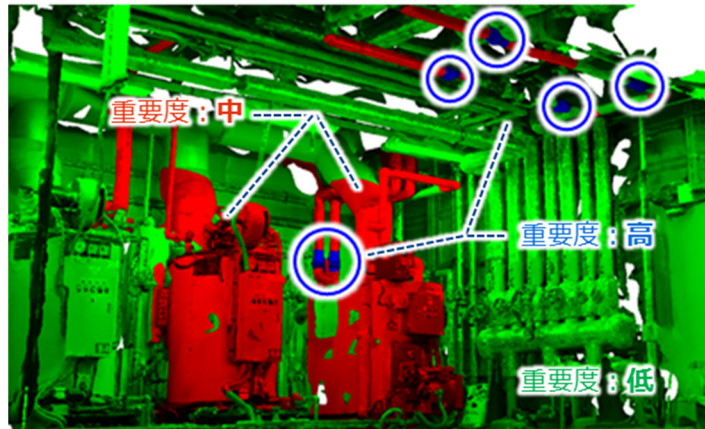


図 2.31 ボイラ室の SfM モデルへの計測重要度の付与

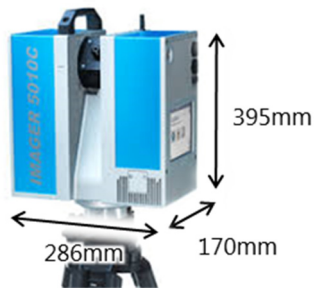


図 2.32 本研究で使用した地上型レーザスキャナ (TLS)

表 2.4 本研究で使用した TLS の仕様

機種名	Z+F IMAGER® 5010C
最大計測距離	187.3m
最小計測距離	0.3m
直線性誤差	≤ 1mm
筐体サイズ	170×286×395mm

が存在していることが分かる。さらに、図 2.30 に示すように、SfM よって撮影したカメラの位置姿勢が推定される。ここで構築された SfM モデルの面分数は 124,998 で、頂点数は 63,492 である。この SfM モデル構築まで要した時間は、現地での写真撮影が約 15 分、SfM ソフトウェアによるメッシュモデルの自動構築が約 3 時間である。

2.5.2 計測重要度の設定

次に、2.2.2 項で説明したように、SfM モデルに計測重要度を設定する。今回の検証

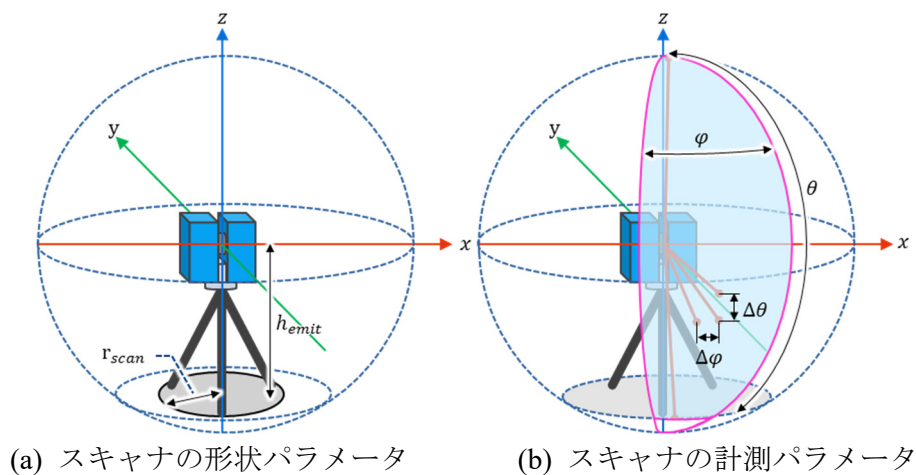


図 2.33 スキャナパラメータの定義

実験では、図 2.31 に示すように、青丸で囲った 5 箇所のフランジ周辺の領域を『重要度：高』に設定した。続いて、3 台あるボイラの内の左 2 台とその周辺の配管を『重要度：中』に設定した。最後に、残りの領域を『重要度：低』に設定した。

2.5.3 各種パラメータの設定

次に、本アルゴリズムを検証するにあたり、計算時に必要となるスキャナのパラメータと制約条件の閾値を設定する。

2.5.3.1 スキャナパラメータの設定

準最適スキャナ配置アルゴリズムによるスキャナ配置を導出する際には、計測器の形状を表すパラメータと計測条件を表すパラメータを設定する必要がある。図 2.32 に示すように、本研究では Zoller+Fröhlich 社の Z+F IMAGER® 5010C[27]を用いて実験を実施する。使用する地上型レーザスキャナの仕様は、表 2.5 のとおりである。そのため、準最適スキャナ配置の導出についても、同機種の種類パラメータおよび計測パラメータを適用した。図 2.33 に示すように、スキャナパラメータを定義しており、その値は、表 2.5 に示すとおりである。ここで、 r_{scan} は三脚を含めたスキャナの設置半径であり、スキャナ設置可能領域の推定の際に使用する。 h_{emit} は、床面からスキャナのレーザ照射部までの高さである。この h_{emit} に相当する高さにあるボクセルの重心点がスキャナ設置候補点として推定される。 φ は水平方向の視野角であり、 360° 計測可能である。 θ は鉛直方向の視野角であり、 180° が計測可能である。 $\Delta\varphi$ および $\Delta\theta$ は、水平方向および鉛直方向の計測ピッチであり、 0.072° は、 10m 先において 12.6mm の間隔で計測できる値となっており、実務において一般的に使用する計測密度である。

表 2.5 スキャナパラメータの設定値

スキャナパラメータ	設定値
r_{scan}	0.3m
h_{emit}	1.4m
φ	360° ($0^\circ \leq \varphi < 360^\circ$)
θ	180° ($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)
$\Delta\varphi$	0.072°
$\Delta\theta$	0.072°

2.5.3.2 制約条件の設定

2.4.3 項で定義した 4 つの制約条件は、それぞれ閾値を設定する必要がある。さらに、その設定値は 2.5.2 項で分類した計測重要度により異なる。本研究では、表 2.6 のように閾値を設定した。

表 2.6 制約条件の設定値

	計測重要度		
	高	中	低
最大許容入射角 θ_α	45°	90°	90°
最小許容計測距離 d_{min}	0.3m	0.3m	0.3m
最大許容計測距離 d_{max}	5.0m	8.0m	20.0m
最小許容重複率 $\tau_{overlap}$	20.0%	20.0%	-

ここで、最大許容入射角 θ_α は、『重要度：高』については、精度よく計測するために 45° 未満に設定している。『重要度：中』および『重要度：低』については、計測できれば良いため、物体を表面から計測できる条件である 90° 未満に設定した。最大許容入射角 d_{min} は、表 2.4 にも記載しているように、スキャナの最小距離が 0.3m となっている。これより近距離では計測できないため、 $d_{min} = 0.3m$ に設定した。最大許容入射角 d_{max} は、2.4.3 項でも述べたように、20m 以下なるように設定している。さらに、『重要度：高』については、空調設備においては直径が約 20mm の配管が最小径のため、この配管に少なくとも 3 点以上は計測できる距離 $d_{max} = 5.0m$ に設定した。『重要度：高』については、約 10mm 間隔で計測できるような距離 $d_{max} = 8.0m$ に設定した。最小許容重複率 $\tau_{overlap}$ は、『重要度：高』および『重要度：中』については、レジストレーションするための点群間の重複が必要なるため、20.0% 以上に設定した。

2.5.4 準最適スキャナ配置の導出結果

2.5.2 項の計測重要度と 2.5.3 項の各種パラメータに基づいて、提案手法により準最適スキャナ配置を導出する。ボクセル幅は、 $l_g = 0.05\text{m}$ に設定した。これは、計測対象とするフランジが空調設備に使用するサイズの場合、直径が 135mm 以上になる。このフランジを少なくとも 3 個以上のボクセルで包含できるサイズに設定した。また、解像度を高くすることも可能だが、設置箇所にオペレータがスキャナを設置する際の誤差を考えると、0.05m 程度が妥当であると考えた。また、使用した計算機は CPU: Corei7-4810MQ2.80GHz, GPU: NVIDIA QuadroK2100M である。

ボクセルへの計測重要度の付与、ボクセルによる空間占有状態の分類、スキャナ設置可能領域およびスキャナ設置候補点の推定結果を図 2.44 に示す。これによると、計測対象となるボクセル数および、スキャナ設置候補点数は、表 2.7 のようになっている。

表 2.7 計測対象ボクセル数とスキャナ設置候補点数 (ボイラ室)

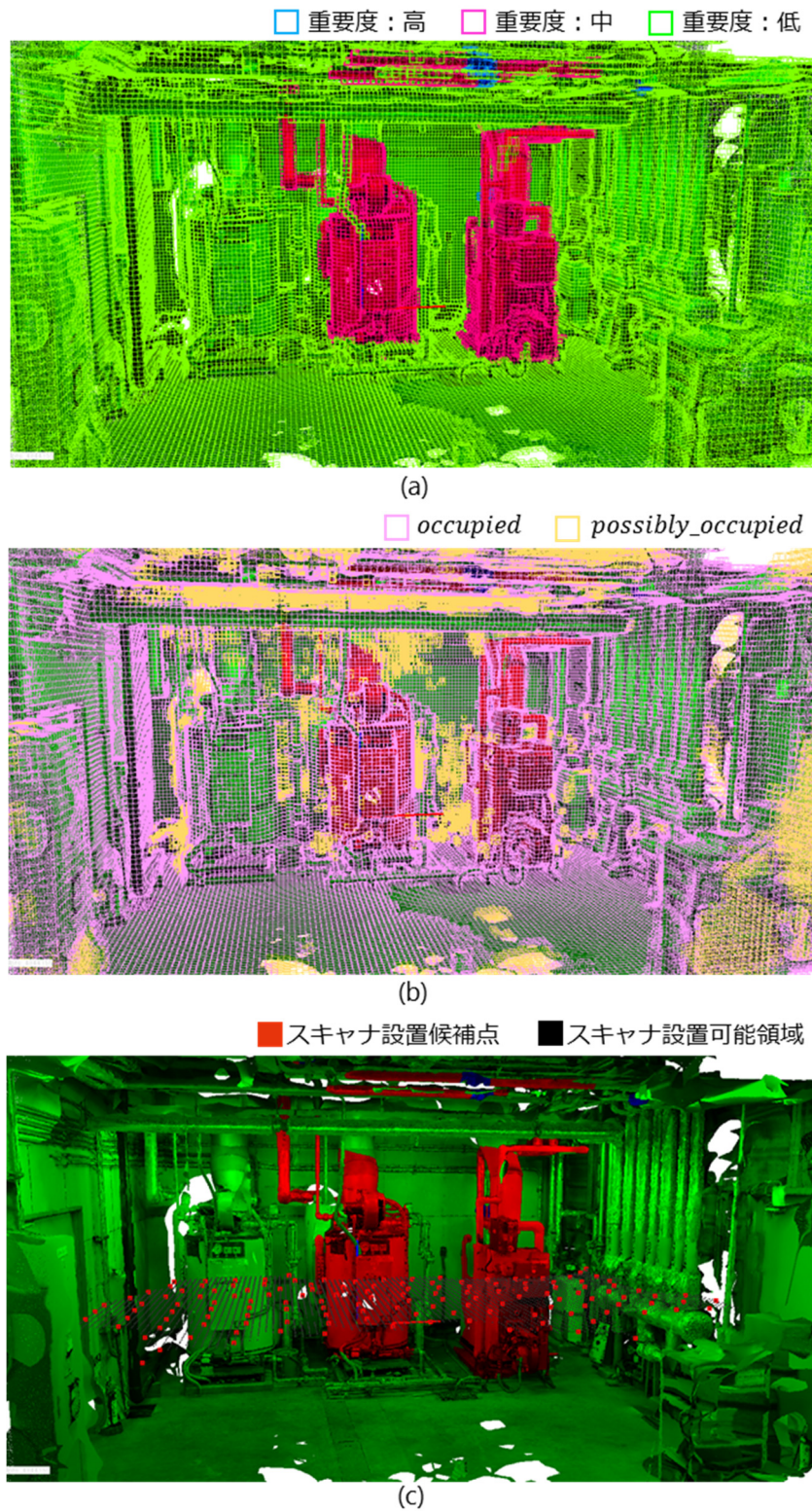
計測対象ボクセル数	75,390 (高: 233, 中: 8,148, 低: 67,013)
スキャナ設置候補点数	137

ここで、今回はスキャナ設置候補点の高さが床面から $h_{emit} = 1.4\text{m}$ のみに設定した理由は、実務で計測する際、スキャナの設置高さを変えなく計測することが多いためである。そして、準最適スキャナ配置結果を図 2.45 に示す。SfM モデル内に分布している黒色の点はスキャナ設置可能ボクセルとなっており、赤点がスキャナ設置可能ボクセルからダウンサンプリングしたスキャナ設置候補点 v_c である。青枠が 2.5.2 項で設定した『重要度：高』に設定したフランジ分布になっている。赤枠は『重要度：中』に設定した 2 台のボイラである。そして、赤丸が提案手法により導出した最適スキャナ設置位置である。ここで、本章における提案手法はスキャナ設置位置の順序集合となるため、導出された順番を記載する。スキャナ設置箇所数は 9 箇所になった。うち 1~9 箇所目までが『重要度：高』に対するボクセル数を最大にするスキャナ位置で、10 番目は『重要度：中』に対するボクセル数を最大にするスキャナ位置を計算したが、計測率の上昇率が閾値以下だったため、最適スキャナ位置として採用せずに計

表 2.8 準最適スキャナ配置の計測率 (ボイラ室)

	計測重要度		
	高	中	低
計測率	84.9%	91.3%	94.6%

算を終了した。また、計測対象ボクセルに対する計測されたボクセル数の割合となる計測率を算出する。その結果を表 2.8 に示し、図 2.36 に『未計測』となったボクセルの分布を示している。これにより、『重要度：高』に対する計測率が他に比べて低くなっていることが分かる。これは、制約条件の中でも特に入射角の制約を厳しく設定しているため、床面からでは計測することができなかつたためだと考えられる。また、計測された領域の中に未計測のボクセルが点在している。これは、可視性判定の際に、ボクセル解像度の影響により、『不可視』と誤分類されたためだと考えられる。



(a) 計測重要度の付与 (b) 空間占有状態の分類 (c) スキャナ設置候補点

図 2.34 スキャナ設置候補点の推定までの処理結果 (ボイラ室)

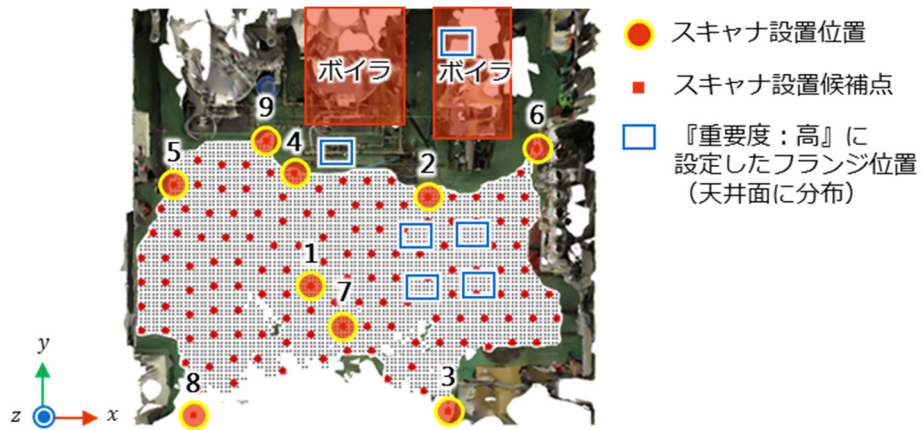


図 2.35 準最適スキャナ配置結果 (ボイラ室)

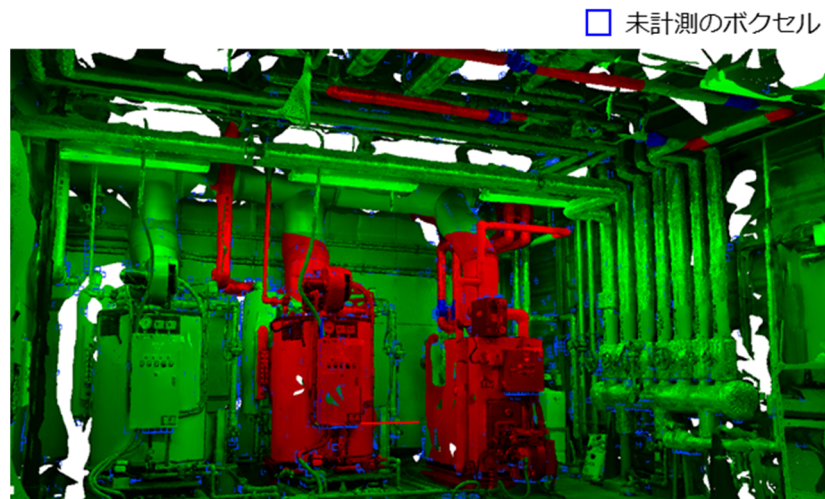


図 2.36 『未計測』となったボクセルの分布 (ボイラ室)

表 2.9 準最適スキャナ配置の計算時間 (ボイラ室)

処理工程	計算時間[s]
SfM モデル欠損部の補完	334.3
空間占有状態の分類	20.1
ボクセルの支配的法線の算出	5.2
スキャナ設置候補点の推定	24.5
計測対象ボクセルの選定	42.7
『重要度：高』に対する準最適スキャナ配置の導出	33.5
『重要度：中』に対する準最適スキャナ配置の導出	10.6
合計	470.9

つぎに、各処理工程における計算時間を表 2.9 に示す。全体の計算時間は約 7.8 分となり、実用的な時間で計算できている。処理工程のうち、SfM モデル欠損部の補完に一番時間がかかっていることが分かる。これは、欠損部が大きく複数箇所にわたっていたため、1 枚のデプスマップに対する繰り返し計算の回数が多かったためだと考えられる。SfM モデルの構築に要する時間は撮影含めて約 3 時間となっている。実務においては、計測日より前に事前調査を行うため、計測日当日までにスキャナ配置計画を立てられれば良いため、SfM モデルの構築時間の長さは実務において支障をきたすことはないと考えている。

2.5.5 計測重要度による制約条件の効果

つぎに、本研究で提案した計測重要度による制約条件がスキャナ配置結果に与える効果について検証する。比較対象として、計測重要度を考慮せずに計算したスキャナ配置結果と比較する。具体的には、2.5.2 項で分類した『重要度：高』と『重要度：中』を区別せずに、この 2 つの属するボクセルを計測対象ボクセルに設定し、その際の制約条件は、表 2.10 に示すように、表 2.6 の『重要度：低』に対する閾値と同じ設定にした。これにより、計測できていればよいという条件のスキャナ配置が導出される。

上記の条件に基づいて、導出したスキャナ配置結果を図 2.37 に示す。導出されたス

表 2.10 計測重要度を考慮しないスキャナ配置の制約条件の設定値 (ボイラ室)

	設定値
最大許容入射角 θ_{α}	90°
最大許容計測距離 d_{min}	0.3m
最大許容計測距離 d_{max}	20.0m
最小許容重複率 $\tau_{overlap}$	0.0%

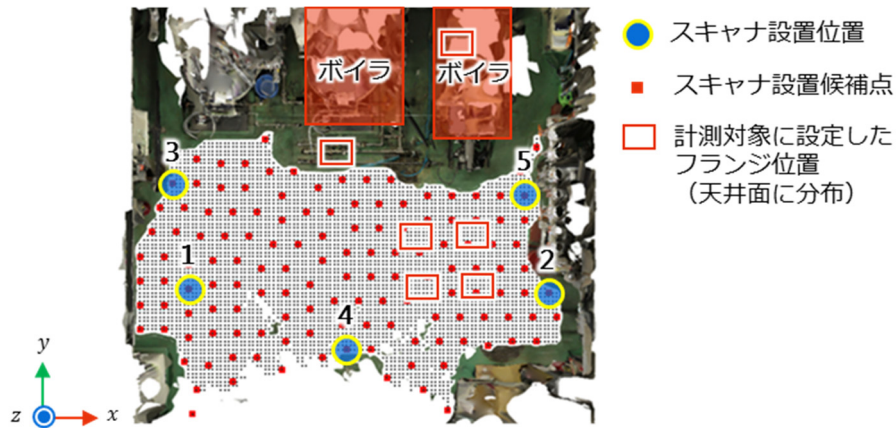


図 2.37 計測重要度を考慮しない場合のスキャナ配置結果 (ボイラ室)

スキャナ位置は 5 箇所となった。

また、計測率を表 2.11 に示す。表では 2.5.2 項で分類した計測重要度の領域ごとに計測率を算出した。

表 2.11 計測重要度を考慮しないスキャナ配置の計測率 (ボイラ室)

	計測重要度		
	高	中	低
計測率	97.0%	92.1%	91.3%

ここで、2.5.4 項で導出した計測重要度を考慮したスキャナ配置結果を Case1 とし、本項で導出した計測重要度を考慮しないスキャナ配置結果を Case2 とする。これによると、計測重要度を考慮しない配置 (Case2) は、計測重要度を考慮した配置 (Case1) よりも少ないスキャナ設置回数でより高い計測率で計測できていることから、Case1 よりも性能がよく見える。しかし、Case2 の各計測重要度に分布する『計測済』のボクセルに対し、2.5.3.2 目で設定した本来の各計測重要度の制約条件 (計測品質) を満たすか否かを検証する。

計測品質を満たさないボクセルの分布を図 2.38 に示す。これによると、本来『重要度：中』に分類されているボイラ周辺は、計測品質を満たさないボクセルは存在しない。しかし、本来『重要度：高』に分類されているフランジ周辺は、計測品質を満たさないボクセルが存在していることが分かる。計測品質を満たさないボクセルの割合を表 2.12 に示す。これによると、『重要度：中』は存在しないが、『重要度：高』については、計測されたボクセルのうち、41.6%が計測品質を満たしていないことになる。

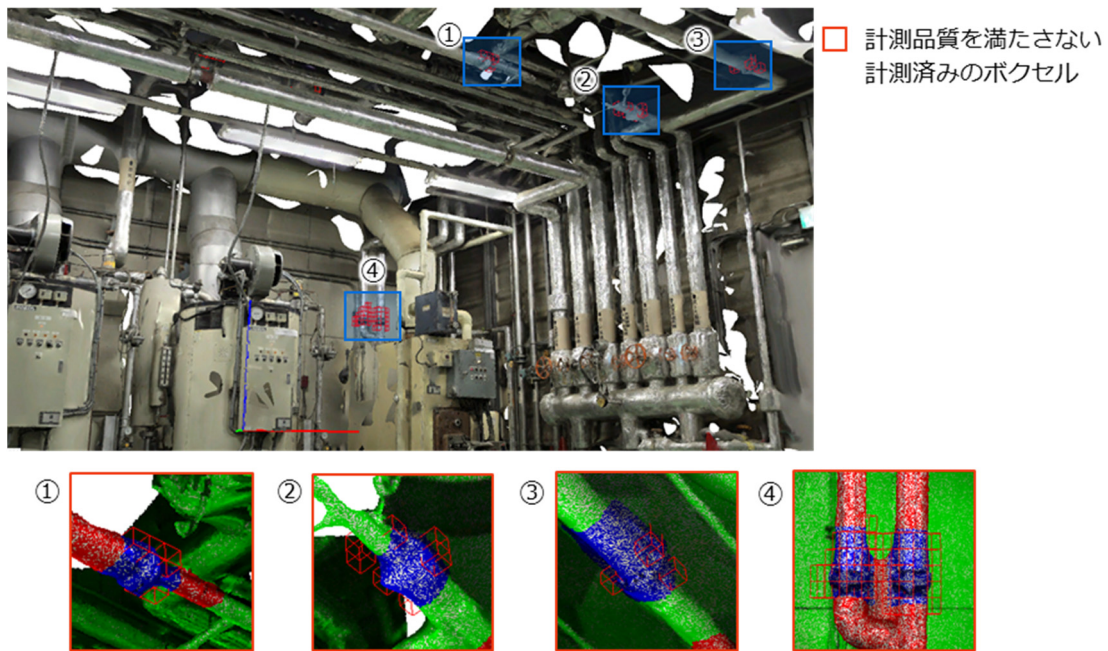


図 2.38 計測品質を満たさないボクセルの分布 (ボイラ室)

表 2.12 計測品質を満たさないボクセルの割合 (ボイラ室)

	計測重要度		
	高	中	低
計測率	41.6%	0.0%	0.0%

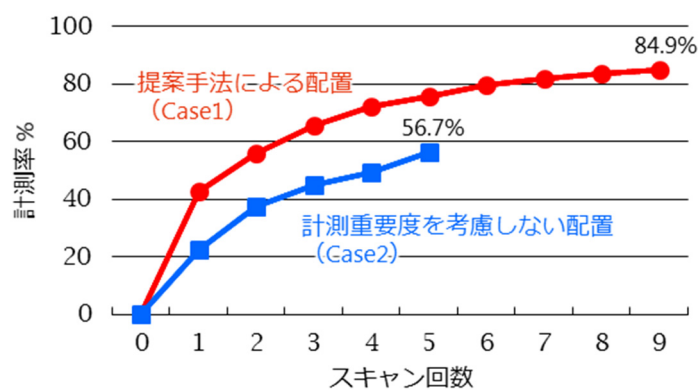


図 2.39 計測品質を満たす『重要度：高』のボクセルに対する計測率の推移 (ボイラ室)

そこで、Case1 と Case2 の計測率の結果から、『重要度：高』の計測対象ボクセルにおいて、本来の計測品質を満たすボクセルのみの計測率に補正し、各スキャン回数の計測率の推移を図 2.39 に示す。これにより、提案手法による配置 (Case1) は、各スキャン回数において、計測重要度を考慮しない配置 (Case2) の計測率を上回った。

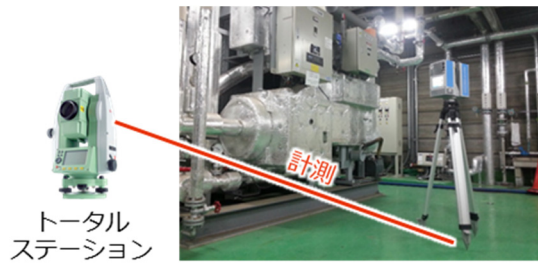


図 2.40 スキャナ設置位置の計測方法

その結果、計測重要度を考慮した制約条件を適用したスキャナ配置を導出する提案手法は、計測品質を満たす高精度なスキャナ計測のための配置を効率的に決定することができた。

2.5.6 オペレータによる配置結果との比較

続いて、提案手法の有効性を検証するために、熟練オペレータによるスキャナ配置結果と比較する。

2.5.6.1 実験条件

比較対象となる熟練オペレータは、実験当時、4年以上のスキャナ計測経験があり、空調設備に関連する現場を100件以上計測した実績がある。また、空調設備工事の施工管理の経験があり、設備工事については熟知している人物である。

実験は以下の手順で実施する。

- (1) 2.5.2 項で分類した計測重要度の図をオペレータに見せた後、分類箇所を現地で確認してもらう。
- (2) 『重要度：高』『重要度：中』に該当する箇所が計測漏れのないように計測し、かつ『重要度：高』に該当する箇所が精度よく計測できる位置にスキャナを設置して計測するように伝える。
- (3) 従来の現地調査のとおり、スキャナ設置箇所および設置箇所数を計画してもらい、計画通りにスキャナを設置して計測してもらう。
- (4) 図 2.40 に示すように、トータルステーションを用いてスキャナ設置位置の3次元座標を計測する。
- (5) 計測したスキャナ設置位置の3次元座標データを開発したソフトウェアに取り込み、スキャナ設置箇所からの計測シミュレーションを実行し、計測率を算出

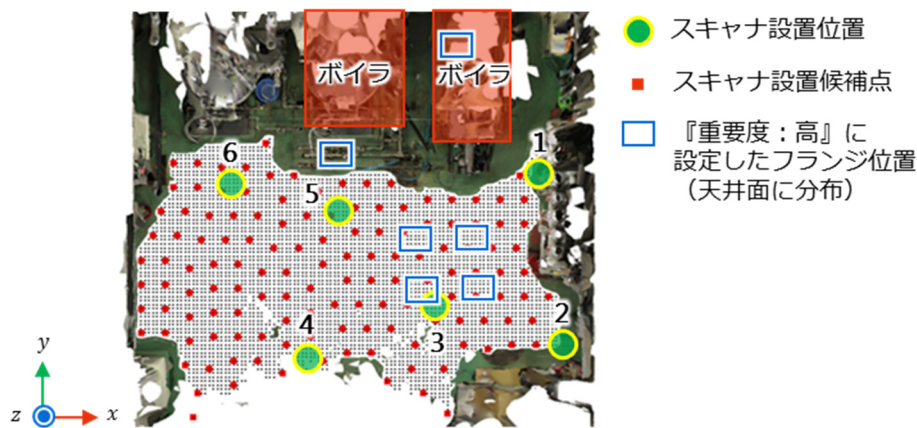


図 2.41 熟練オペレータによるスキャナ配置結果（ボイラ室）

する。

2.5.6.2 オペレータによるスキャナ配置との比較評価

実験手順に基づいてオペレータが配置したスキャナ位置を図 2.41 に示す。これにより、スキャナ設置箇所数は 6 箇所になった。オペレータの場合は、スキャナ設置候補点上に置かれる可能性は低く、2 番目の設置位置のようにスキャナ設置可能領域外に設置する場合もみられた。また、2.5.3.2 目で設定した計測品質を満たすボクセルの計測率を表 2.13 に示す。さらに、図 2.42 に各ケースの計測率の推移を示す。

表 2.13 熟練オペレータによるスキャナ配置の計測率（ボイラ室）

	計測重要度		
	高	中	低
計測率	71.2%	89.0%	91.9%

ここで、熟練オペレータによるスキャナ配置結果を Case3 とする。熟練オペレータは、3 回目のスキャン回数から計測重要度を考慮しない配置（Case2）の計測率を上回っており、本ソフトウェアが可視性のみを考慮して導出したスキャナ配置よりも計測品質を考慮して配置できていることが分かる。一方、オペレータは提案手法（Case1）よりも低い計測率となった。図 2.43 に示すように、オペレータの計測率を算出する際に考慮している 2.5.3.2 目で設定した各制約条件の閾値を 5%緩和させて計測率を評価したとしても、提案手法（Case1）の計測率を上回ることはできなかった。その結果、提案手法は、オペレータよりも優れた配置を導出可能なことが確認できる。

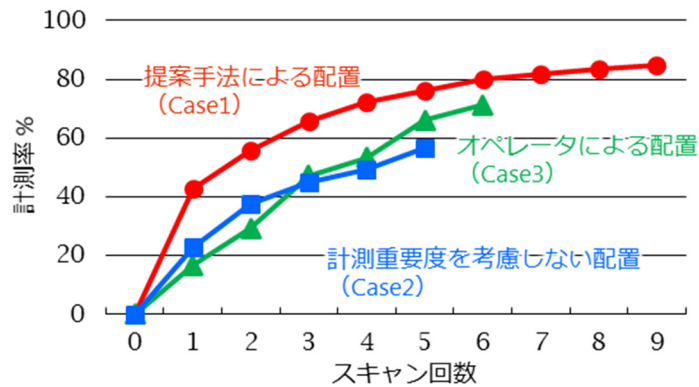


図 2.42 各ケースにおける計測率の推移 (熱源機械室)

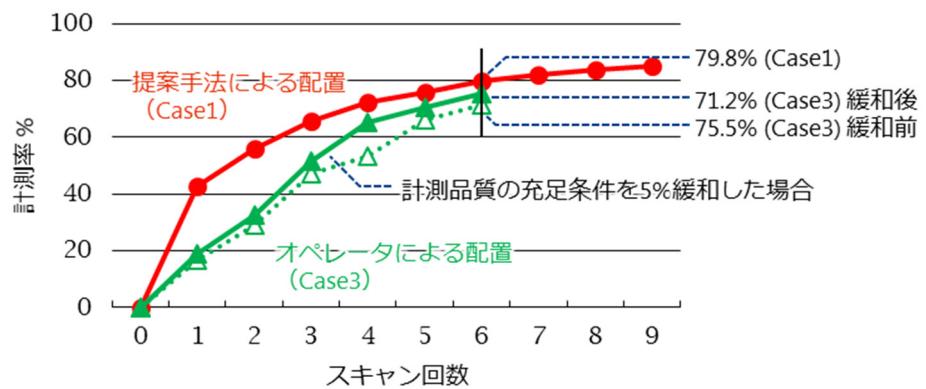


図 2.43 計測品質の充足条件を緩和した場合の計測率の変化 (熱源機械室)

以上の比較から、提案手法は、入射角・計測距離・点群間重複の品質条件を満たしつつ計測必要箇所の見視性を出来る限り確保するスキャナ配置の発見に有効であるといえる。

2.6 中規模で複雑な計測環境におけるスキャナ配置の導出結果

本節では、2.5 節まで検証した準最適スキャナ配置計画アルゴリズムが、より規模が大きく、より複雑な計測対象においても正しく動作するかを検証する。そこで、中規模で複雑な計測環境において、2.5 節と同様に、提案手法、計測重要度を考慮しない手法および熟練オペレータによるスキャナ配置のスキャン回数、計測率を比較し、計測重要度の効果、計測品質の充足率を評価する。さらに、スキャナを用いて実測し、取得した点群を用いて as-built モデル化した対象物のモデリング精度についても比較し、提案手法の有効性を検証する。

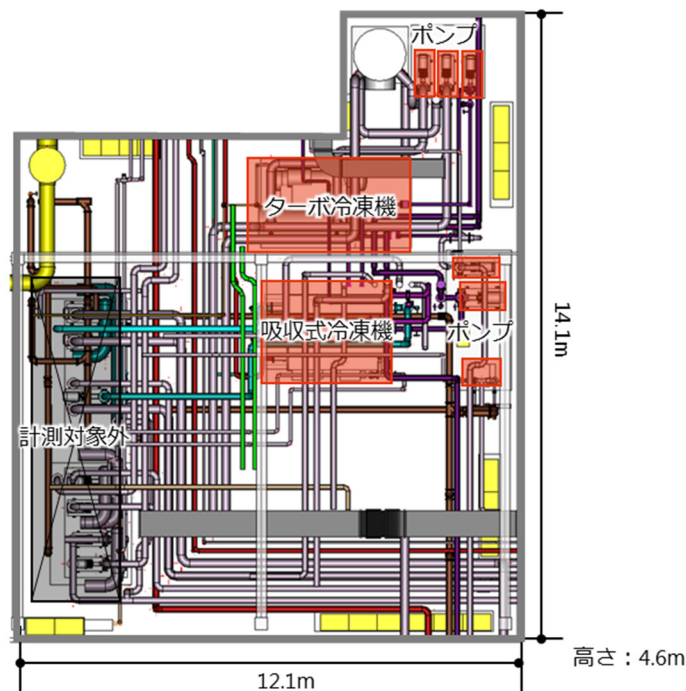


図 2.44 計測対象となる熱源機械室の図面（上面図）

2.6.1 計測対象

本節で扱う計測対象は、新菱冷熱工業株式会社中央研究所内にある熱源機械室である。図 2.44 に示すような図面の施設となっており、室内の規模は、12.1m×14.1m×4.6m となっている。中央に吸収式冷凍機が設置されており、その周りにターボ冷凍機、ポンプが 6 台設置されている。冷凍機とポンプをつなぐ配管が壁面および天井面に通っている。また、天井面には、熱源となる冷水や温水が通る比較的大きい配管が複数層で通っている。また、計測空間の左下にもポンプが複数台設置してあるが、この黒枠で囲った領域は計測対象外としている。

はじめに、計測対象の事前知識となる SfM モデルを作成するため、表 2.3 に示すデジタル一眼レフカメラを使用し、様々な方向から計 486 枚の写真を撮影し、市販の SfM ソフトウェア[25]により 3 次元復元が行われ、図 2.45 に示すように、SfM モデルが自動構築される。SfM モデルでは吸収式冷凍機の手前に資材が置かれていることが確認できる。この資材は図面には記載されておらず、図面情報をもとにした既存のスキャナ配置計画手法[14][16]では、実際には置くことができない位置をスキャナ設置位置として選出する可能性がある。さらに、図 2.46 に示すように、SfM よって撮影したカメラの位置姿勢が推定される。ここで構築された SfM モデルの面分数は 429,105 で、頂点数は 214,191 である。この SfM モデル構築まで要した時間は、現地での写真撮影が

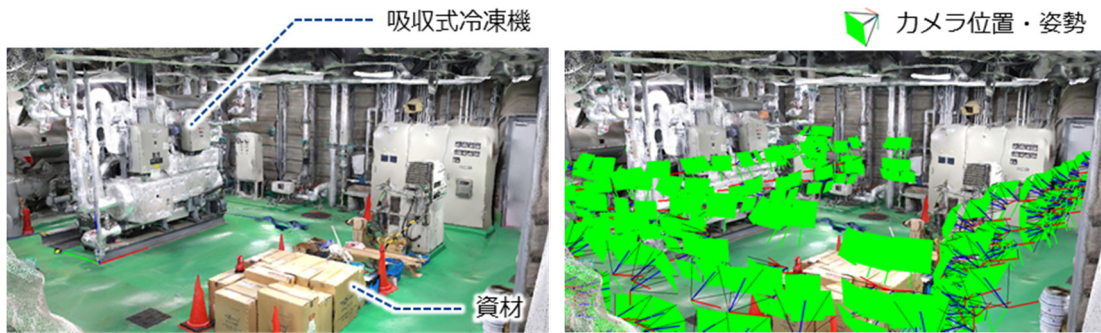


図 2.45 計測対象の SfM モデル
(熱源機械室)

図 2.46 SfM により推定されたカメラ
の位置姿勢 (熱源機械室)

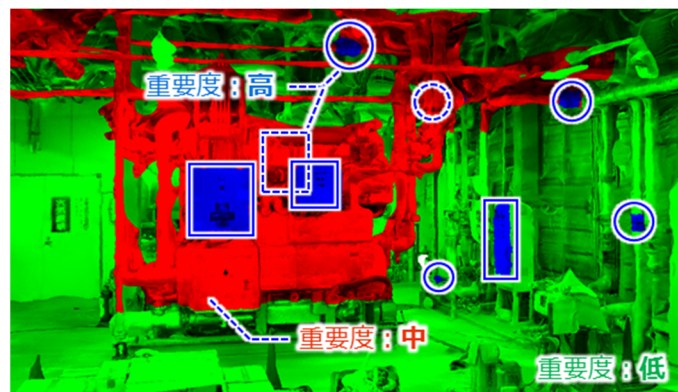


図 2.47 熱源機械室の SfM モデルへの計測重要度の付与

約 50 分、SfM ソフトウェアによるメッシュモデルの自動構築が約 3 時間である。

2.6.2 計測重要度の設定

次に、2.2.2 項で説明したように SfM モデルに計測重要度を設定する。今回の検証実験では、図 2.47 に示すように、青丸で囲った 5 箇所フランジ周辺の領域と青四角で囲った 4 箇所の平面を『重要度：高』に設定した。続いて、吸収式冷凍機とその周辺の配管を『重要度：中』に設定した。最後に残りの領域を『重要度：低』に設定した。

2.6.3 各種パラメータの設定

スキャナパラメータと制約条件の閾値については、2.5.3 項の設定値と同じ値を使用した。

2.6.4 準最適スキャナ配置の導出結果

2.6.2 項の計測重要度と 2.6.3 項の各種パラメータに基づいて、提案手法により準最

適スキャナ配置を導出する。ボクセル幅は、2.5 節のボイラ室と同様の $l_g = 0.05\text{m}$ に設定した。計算機は CPU: Corei7-4810MQ2.80GHz, GPU: NVIDIA QuadroK2100M である。

ボクセルへの計測重要度の付与、ボクセルによる空間占有状態の分類、スキャナ設置可能領域およびスキャナ設置候補点の推定結果を図 2.48 に示す。これによると、計測対象となるボクセル数および、スキャナ設置候補点数は、表 2.14 のようになった。

表 2.14 熱源機械室における計測対象ボクセル数とスキャナ設置候補点数

計測対象ボクセル数	319,960 (高: 1,182, 中: 33,515, 低: 285,263)
スキャナ設置候補点数	596

そして、準最適スキャナ配置結果を図 2.49 に示す。SfM モデル内に分布している黒色の点はスキャナ設置可能ボクセルとなっており、赤点がスキャナ設置可能ボクセルからダウンサンプリングしたスキャナ設置候補点 v_c である。青枠と青四角が 2.6.2 項で設定した『重要度：高』に設定したフランジおよび平面の分布になっている。赤枠は『重要度：中』に設定した吸収式冷凍機である。そして、赤丸が提案手法により導出した最適スキャナ設置位置である。スキャナ設置箇所数は 12 箇所になった。うち 1～10 箇所目までが『重要度：高』に対するボクセル数を最大にするスキャナ位置で、11,12 番目は『重要度：中』に対するボクセル数を最大にするスキャナ位置である。また、計測対象ボクセルに対する計測されたボクセル数の割合となる計測率を算出する。その結果を表 2.15 に示し、図 2.50 に『未計測』となったボクセルの分布を示している。

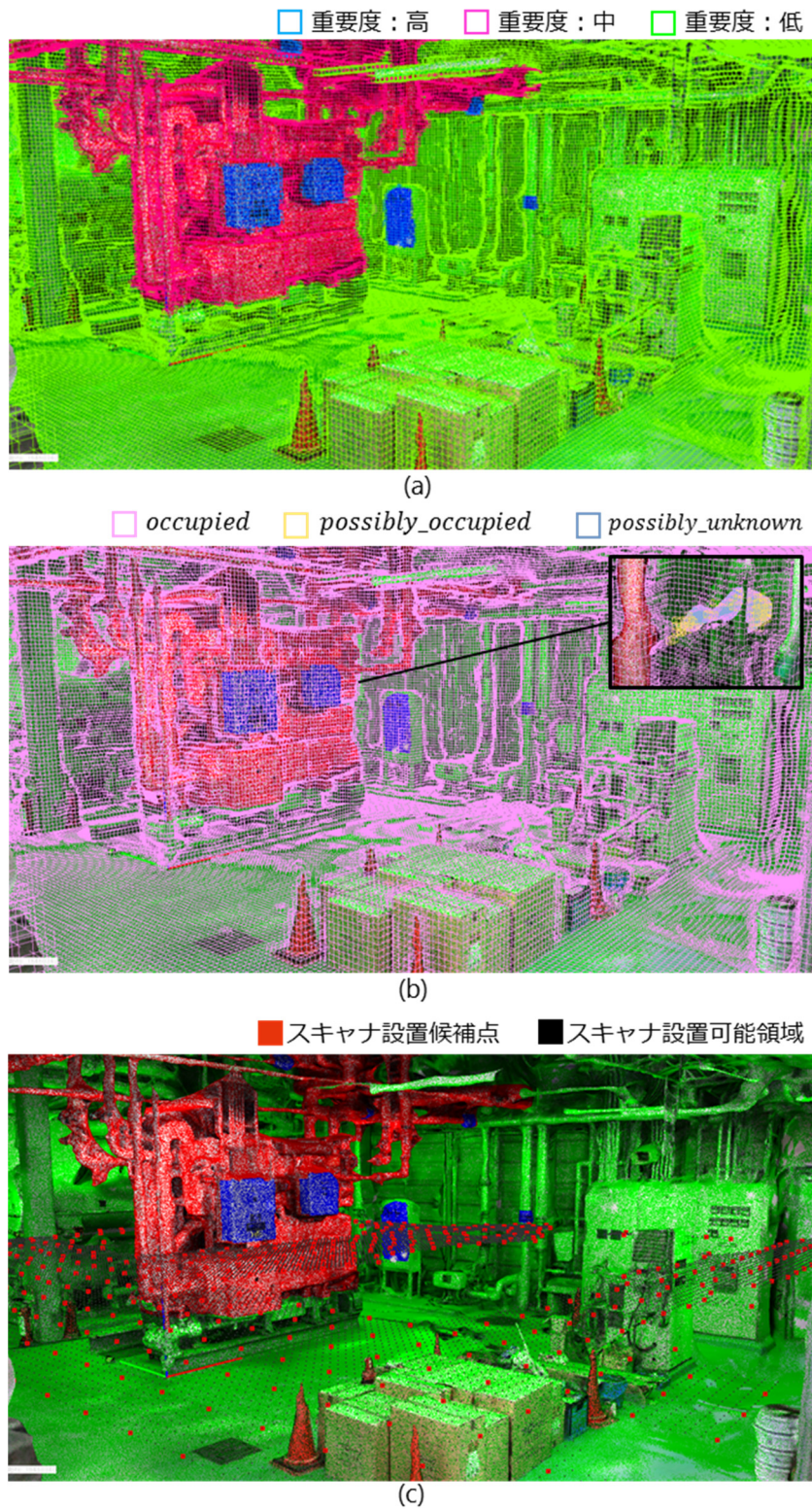


図 2.48 熱源機械室におけるスキャナ設置候補点の推定までの処理結果

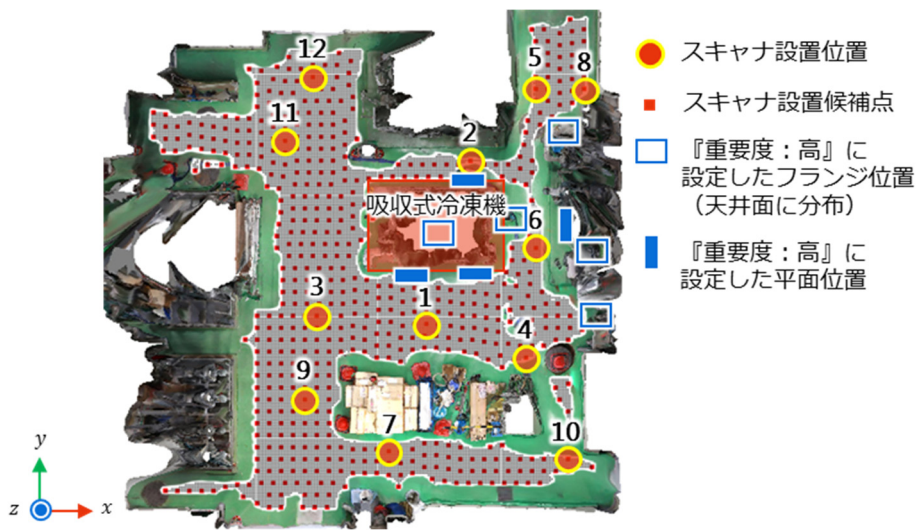


図 2.49 準最適スキャナ配置結果布（熱源機械室）

表 2.15 準最適スキャナ配置の計測率（熱源機械室）

	計測重要度		
	高	中	低
計測率	88.0%	92.7%	91.9%

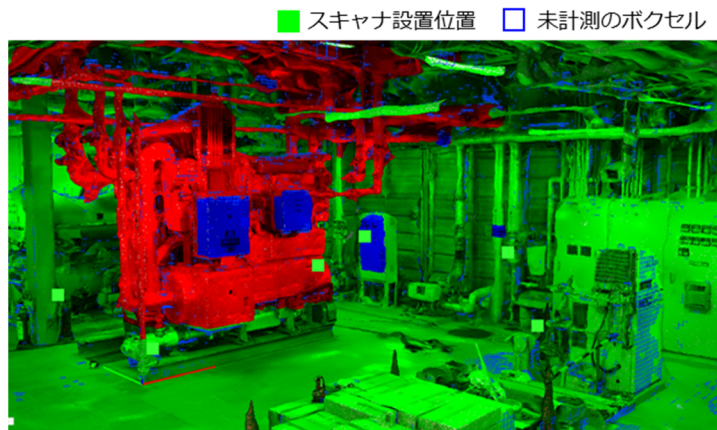


図 2.50 『未計測』となったボクセルの分布（熱源機械室）

表 2.16 準最適スキャナ配置の計算時間（熱源機械室）

処理工程	計算時間[s]
SfM モデル欠損部の補完	612.1
空間占有状態の分類	311.2
ボクセルの支配的法線の算出	2.2
スキャナ設置候補点の推定	143.4
計測対象ボクセルの選定	890.6
『重要度：高』に対する準最適スキャナ配置の導出	555.0
『重要度：中』に対する準最適スキャナ配置の導出	1,170.4
合計	3684.9

つぎに、各処理工程における計算時間を表 2.16 に示す。これによると、全体の計算時間は約 61.4 分となり、2.5 節のボイラ室と比較すると計算時間が大幅に増加していることが分かる。これは、写真枚数がボイラ室は 153 枚に対して熱源機械室は 486 枚となっている。また、計測対象ボクセル数とスキャナ設置候補点数も大きく異なり、可視性判定時のレイキャスティングを実行する回数が増加してしまうためである。規模が大きくなるにつれて、処理時間への影響が顕著になるため、計測対象の数にあまり影響されない可視性判定手法を検討する必要がある。

2.6.5 計測重要度の制約による効果

つぎに、2.5.5 節でも検証したように、提案した計測重要度による制約条件がスキャナ配置結果に与える効果について、複雑な環境においても同様の効果があるのかを検証する。比較対象は、2.5.5 節と同条件に基づき、計測重要度を考慮せずに計算したスキャナ配置結果と比較する。導出したスキャナ配置結果を図 2.51 に示す。導出されたスキャナ位置は 9 箇所となった。

また、本来の計測重要度の領域ごとに算出した計測率を表 2.17 に示す。

表 2.17 計測重要度を考慮しないスキャナ配置の計測率（熱源機械室）

	計測重要度		
	高	中	低
計測率	95.3%	92.1%	87.0%

ここで、2.6.4 項で導出した計測重要度を考慮したスキャナ配置結果を Case1 とし、本項で導出した計測重要度を考慮しないスキャナ配置結果を Case2 とする。これによると、ボイラ室でのシミュレーション結果と同様に、計測重要度を考慮しない配置 (Case2)

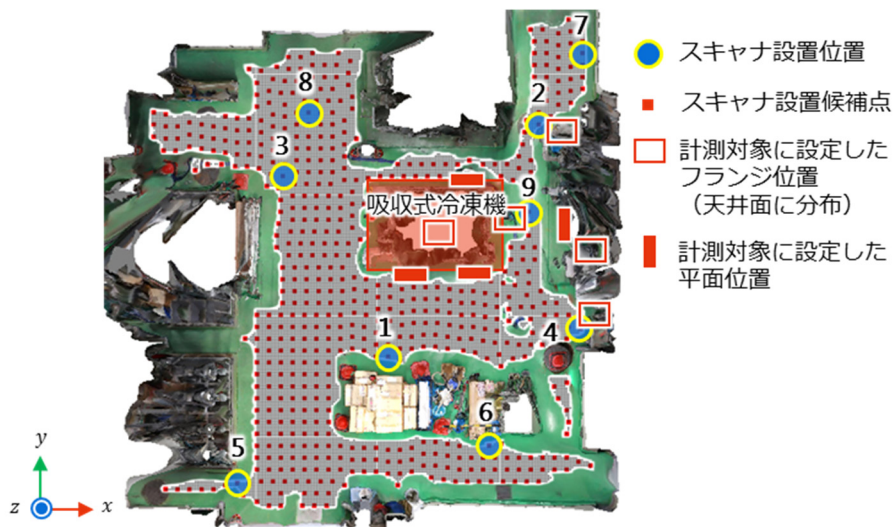


図 2.51 計測重要度を考慮しない場合のスキャナ配置結果（熱源機械室）

は、計測重要度を考慮した配置（Case1）よりも少ないスキャナ設置回数でより高い計測率で計測できている。しかし、Case2 の各計測重要度に分布する『計測済』のボクセルに対し、2.5.3.2 目で設定した本来の各計測重要度の制約条件（計測品質）を満たすか否かを検証すると、計測品質を満たさないボクセルは、図 2.52 のような分布になる。これによると、熱源機械室は計測範囲が広いため、本来『重要度：中』に分類されている吸収式冷凍機周辺でも、計測品質を満たさないボクセルが存在した。また、本来『重要度：高』に分類されているフランジ周辺にも存在していることが分かる。計測品質を満たしていないボクセルの割合を表 2.18 に示す。

表 2.18 計測品質を満たさないボクセルの割合（熱源機械室）

	計測重要度		
	高	中	低
計測率	27.0%	0.0%	0.0%

これによると、『重要度：高』については、計測されたボクセルのうち、41.6%が計測品質を満たしていないことになる。そこで、『重要度：高』の計測対象ボクセルにおいて、本来の計測品質を満たすボクセルのみの計測率に補正し、各スキャン回数の計測率の推移を図 2.53 に示す。これにより、ボイラ室と同様に、提案手法による配置（Case1）は、各スキャン回数において計測重要度を考慮しない配置（Case2）の計測率を上回った。その結果、計測重要度を考慮した制約条件を適用したスキャナ配置を導出する提案手法は、規模が大きく複雑な環境においても、計測品質を満たす高精度なスキャナ計測のための配置を効率的に決定することができた。

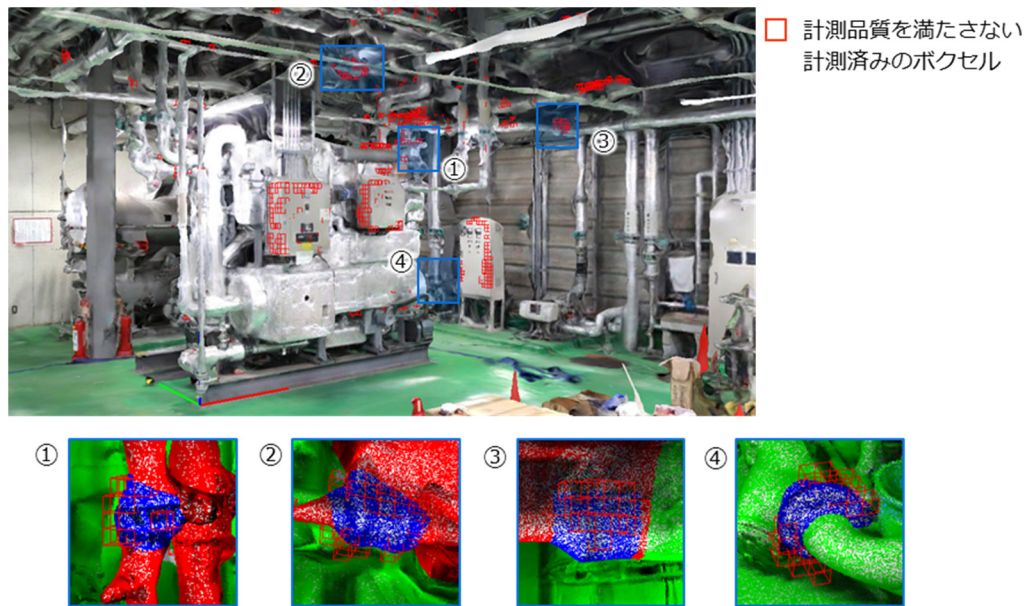


図 2.52 計測品質を満たさないボクセルの分布（熱源機械室）

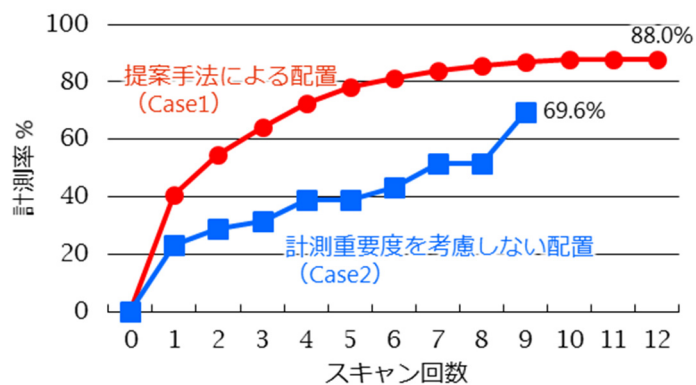


図 2.53 計測品質を満たす『重要度：高』のボクセルに対する計測率の推移（熱源機械室）

2.6.6 オペレータによる配置結果との比較

続いて、提案手法の有効性を検証するために、熟練オペレータによるスキャナ配置結果と比較する。

2.6.6.1 実験条件

比較対象となるオペレータおよび、実験手順は、2.5 節のボイラ室における計測と同条件である。



図 2.54 熟練オペレータによるスキャナ配置結果（熱源機械室）

2.6.6.2 オペレータによるスキャナ配置との比較評価

実験手順に基づいてオペレータが配置したスキャナ位置を図 2.54 に示す。これにより、スキャナ設置箇所数は 6 箇所になった。また、2.6.6.1 目で設定した計測品質を満たすボクセルの計測率を表 2.19 に示す。さらに、図 2.55 に各ケースの計測率の推移を示す。

表 2.19 熟練オペレータによるスキャナ配置の計測率（熱源機械室）

	計測重要度		
	高	中	低
計測率	59.6%	83.6%	78.4%

ここで、熟練オペレータによるスキャナ配置結果を Case3 とする。熟練オペレータが計測を終了した 6 回目までの計測率を比較すると、計測重要度を考慮しない配置（Case2）の計測率を上回っており、本ソフトウェアが可視性のみを考慮して導出したスキャナ配置よりも計測品質を考慮して配置できていることが分かる。一方、ボイラ室でのシミュレーション結果と同様に、オペレータは提案手法（Case1）よりも低い計測率となった。図 2.56 に示すように、オペレータの計測率を算出する際に考慮している 2.5.3.2 目で設定した各制約条件の閾値を 5%緩和させて計測率を評価したとしても、提案手法（Case1）の計測率を上回ることにはできなかった。その結果、提案手法は、オペレータよりも優れた配置を導出可能なことが確認できた。

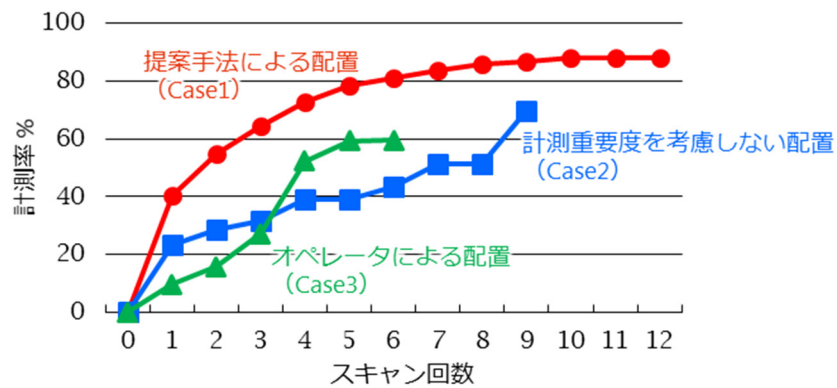


図 2.55 各ケースにおける計測率の推移（熱源機械室）

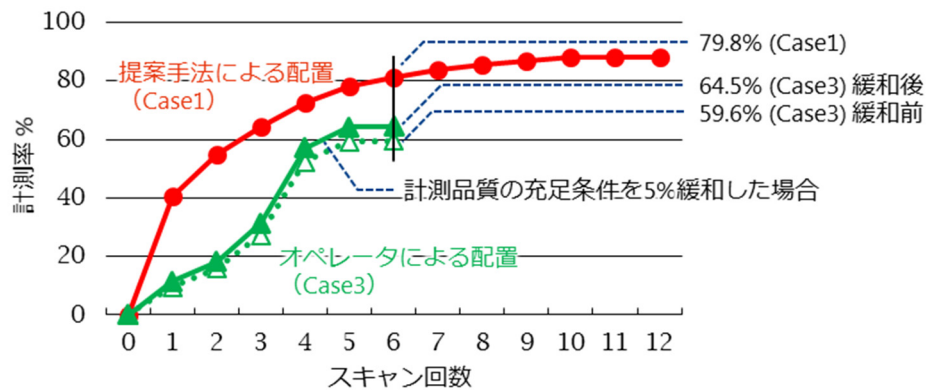


図 2.56 計測品質の充足条件を緩和した場合の計測率の変化（熱源機械室）

以上の比較から、より大きな規模で複雑な計測環境においても、提案手法は、入射角・計測距離・点群間重複の品質条件を満たしつつ計測必要箇所の見え方を出来る限り確保するスキャナ配置の発見に有効であると言える。

2.6.7 As-built モデル化精度の定量評価

続いて、熱源機械室において、実際に計測したレーザ計測点群から as-built モデルを生成し、モデル化精度の検証を行い、提案手法の有効性を検証した。

2.6.6.1 実験条件

モデル化対象は、『重要度：高』に設定したフランジである。トータルステーションで計測したフランジの直径およびフランジ端面の中心位置の3次元座標値を真値とする。提案手法によるスキャナ配置 (Case1)、計測重要度を考慮しないスキャナ配置 (Case2)、および熟練オペレータによるスキャナ配置 (Case3) に基づいて実測で取得

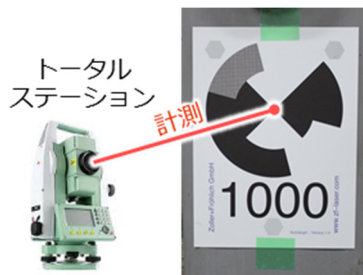


図 2.57 白黒ターゲット

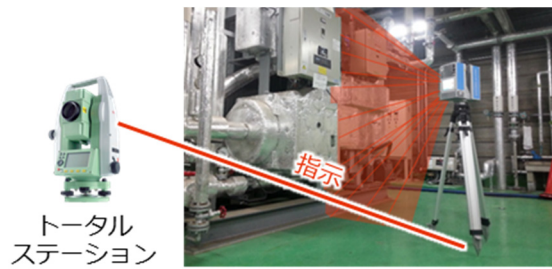


図 2.58 導出したスキャナ設置位置の指示方法

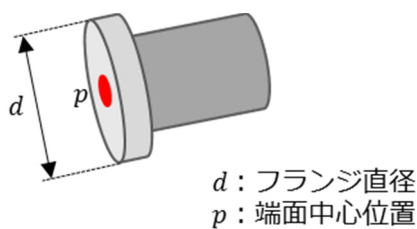


図 2.59 評価対象となるフランジのパラメータ

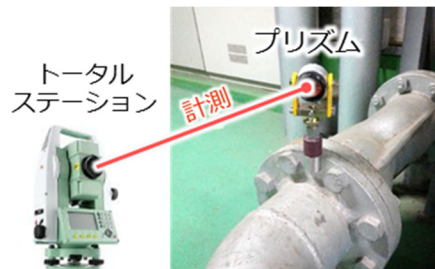


図 2.60 トータルステーションによるフランジ計測

したレーザ計測点群から as-built モデルを生成して得られたパラメータ値を真値と比較することにより，計測精度を定量的に評価する。

計測は以下の手順で実施する。

- (1) 環境内の絶対座標に点群データを合わせるために，図 2.57 に示す白黒ターゲットを複数箇所に設置し，ターゲットの中心座標をトータルステーションで計測する。
- (2) Case1, 2 の計算により導出されたスキャナ位置の 3 次元座標データをトータルステーションに取り込み，図 2.58 に示すように，実際の熱源機械室の床面上にレーザ光でマーキングする。
- (3) そのレーザスポットの真上にスキャナを設置し，2.6.3 項で設定した計測パラメータに基づいて空調設備，ダクト，配管を計測する。
- (4) 点処理ソフトウェア[28]を用いて，取得した点群データをレジストレーションし統合する。そして，(2)で計測した絶対座標に点群データを移動させる。
- (5) 図 2.59 に示すように，フランジ直径と端面の中心位置を検証するためのパラメ



図 2.61 点群データからのフランジパラメータの取得

ータとする。そして、図 2.60 に示すように、フランジ計測専用のプリズムをフランジの角に当てて、プリズムの位置を変えながらフランジ円周上の 3 点をトータルステーションで計測する。

- (6) 取得した 3 点の 3 次元座標値からフランジ直径とフランジ端面の中心位置を算出し、真値とする。

ここで、計測に使用したトータルステーションは、機種名：ライカ TPS1201，測角精度：1 秒，測距精度：1mm+1.5ppm（プリズム測定時）である。

2.6.6.2 モデル化手順

点群データから評価対象となるフランジのパラメータを取得するために、円筒と平面のフィッティングを行う。図 2.61 に示すように、はじめに、レジストレーションした点群データから評価対象となるフランジ周辺の点群を切り取り、フランジ面の点群を手動でセグメントする。その後、セグメントした点群に対して、Levenberg-Marquardt 法[29]により円筒面の精密フィッティングを行い、フランジ直径 d を算出する。また、RANSAC による平面フィッティングを行い、平面と円筒軸の交点を端面中心位置 p として算出する。

2.6.6.3 モデル化精度の評価結果

図 2.62 に示すように、各ケースのスキャナ設置位置の分布と『重要度：高』に分類した領域内にある計 10 箇所のフランジを対象として、統合点群から as-built モデル化を行い、そのフランジ直径とフランジ端面の中心位置を評価する。フランジ直径は、JISB2220[32]によると、規格品は 5～15mm 間隔でサイズが決定されるため、間違いなくサイズを決定するためには、レーザスキャナによる計測時に 5mm 以下の誤差で計測する必要がある。ここで、図 2.63 に各ケースにおけるフランジ直径のモデリング誤差を示す。フランジ直径の計測誤差の絶対値は、平均値が 1.32mm (Case1)，6.39mm



図 2.62 各ケースのスカナ設置位置分布と評価対象となるフランジ

(Case2), 2.68mm (Case3) となった。これにより、提案手法 (Case1) およびオペレータ (Case3) は、どちらも規格サイズの同定に必要な許容値 ($\pm 5\text{mm}$) を下回った。

一方、フランジの端面中心位置は、プレファブ工事により、既存の機器や配管と新設する機器や配管の接続のため、その実務上の誤差許容値は 5mm 以下で、可能な限り少ないことが望ましい。図 2.64 に各ケースにおけるフランジ端面の中心位置のモデリング誤差を示す。中心位置の計測誤差は、平均値が 3.64mm (Case1), 9.31mm (Case2), 6.98mm (Case3) となった。これにより、提案手法 (Case1) のみが、平均値が許容誤差 5mm 以下を達成することができた。一方、計測重要度を考慮しない場合 (Case2) とオペレータ (Case3) は、ほとんどのフランジで誤差許容値を超過しており、このスカナ配置で計測された点群データでは、要求精度品質でのモデル化ができない場合があることが分かった。

以上の結果より、提案手法は、空調設備の改修に要求される as-built モデルの精度を満足するレーザ計測点群生成に有効なスカナ配置を導出可能であることが分かった。

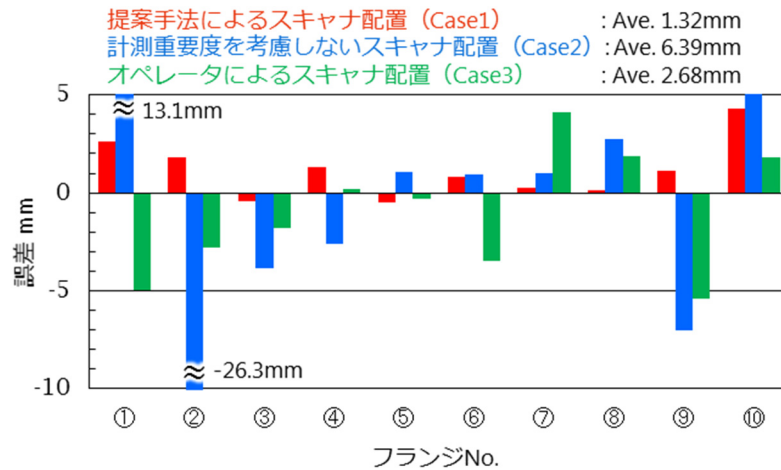


図 2.63 フランジ直径のモデリング誤差

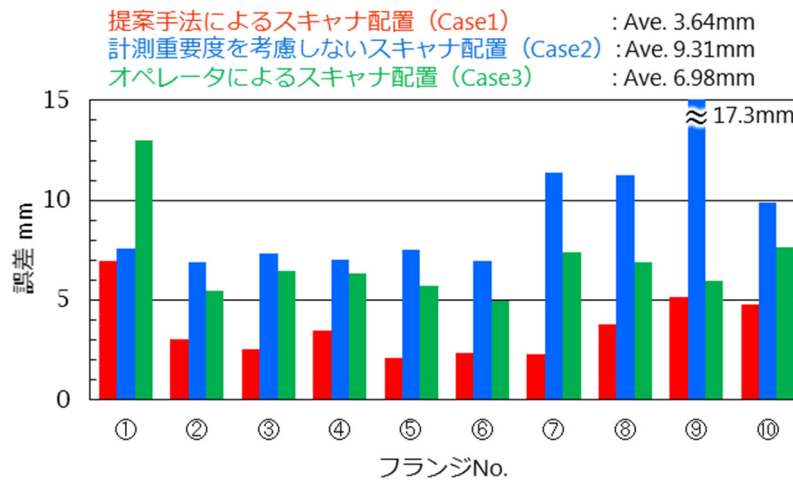


図 2.64 フランジ端面の中心位置のモデリング誤差

2.7 まとめ

本章のまとめを以下に述べる。

- 空調設備の as-built モデル化を対象に、事前知識となる計測対象の SfM モデルを構築する。そして、工事目的により異なる計測重要度をユーザが対話的に分類し、SfM モデルを含む計測対象空間をボクセル表現する。その後、地上型レーザスキャナ計測時の計測品質に関わる入射角・計測距離、レジストレーションのための点群間重複、および可視性の制約を満たし計測必要箇所の計測率を最大にする準最適スキャナ配置を近似最適化手法である貪欲法を用いて導出する手法を提案した。

- レーザスキャナ計測の事前調査の際に撮影した複数枚の写真から構築した SfM モデルを事前知識として用いることにより、現況に即して物理的にスキャナが設置可能な領域を自動的に指定し、正確にスキャナ設置候補点を選出することが可能となった。
- 規模が大きく複雑な環境においても、計測必要箇所の計測品質を満たす高精度なスキャナ計測のための配置を効率的に決定することが可能である。
- 提案手法は、空調設備の改修に要求される as-built モデルの精度を満足するレーザ計測点群生成に有効なスキャナ配置を導出可能であることが分かった。

また、本章における提案手法の問題点として以下が挙げられる。

- カメラ位置もしくはスキャナ設置候補点から対象のボクセルに向けて光線を飛ばし、貫通した各ボクセルの光線通過確率に基づき可視か否かを判定するボクセルベースの可視判定を行った。しかし、空間分割解像度の限界から、本来は『可視』のボクセルが『不可視』と誤分類されるケースが見られる。
- 可視判定をボクセル上のレイキャスティングにより処理するため、テストすべき光線の本数が膨大となり計算負荷が大きくなる。ボイラ室における計算時間が約 3.5min に対して、熱源機械室における計算時間は約 50.9min のように、計測対象の規模が計算時間に大きく影響する。
- 近似解法である貪欲法を用いているため、導出されたスキャナ配置が大局的な最適解となっている厳密な保証がない。

第3章 メッシュモデル表現と整数計画法を用いた最適スキャナ配置計画アルゴリズムの開発

3.1 前章における提案手法の課題と解決策

2章で提案したボクセル表現の貪欲法を用いた準最適スキャナ配置計画アルゴリズムの課題は、以下の3点にまとめられる。

1) 可視性判定の高速化

前章における提案手法では、各スキャナ設置候補点 s_j から表 2.5 に示すスキャナパラメータの視野角内にある全ての計測対象ボクセル v_q に対しボクセル上のレイキャスティングにより処理するため、テストすべき光線の本数が膨大となり、計算負荷が大きい。ボイラ室における計算時間が約 3.5min に対して、熱源機械室における計算時間は約 50.9min のように、計測対象ボクセルとスキャナ設置候補点の個数に大きく依存しており、大規模環境でも現実的な時間で処理が可能ないように可視性判定を高速化する必要がある。

2) 可視性判定の高精度化

前章における提案手法では、スキャナ設置候補点から対象のボクセルに向けて光線を飛ばし、貫通した各ボクセルの光線通過確率に基づき可視か否かを判定するボクセルベースの可視判定は、空間分割解像度の限界から、本来は『可視』のボクセルが『不可視』と誤分類される。これにより、図 3.1 に示すように、床面や壁面などにおいて未計測となるボクセルが点在するケースが見られる。そのため、可視性判定をより正確に行う必要がある。

3) 厳密解法による最適スキャナ配置の導出

前章における提案手法では、近似解法である貪欲法を用いている。貪欲法はダイクストラ法のように厳密解が求まることが証明されている例もあるが、本研究におけるスキャナ配置問題は初期値に依存するため、大局的な最適解となる厳密

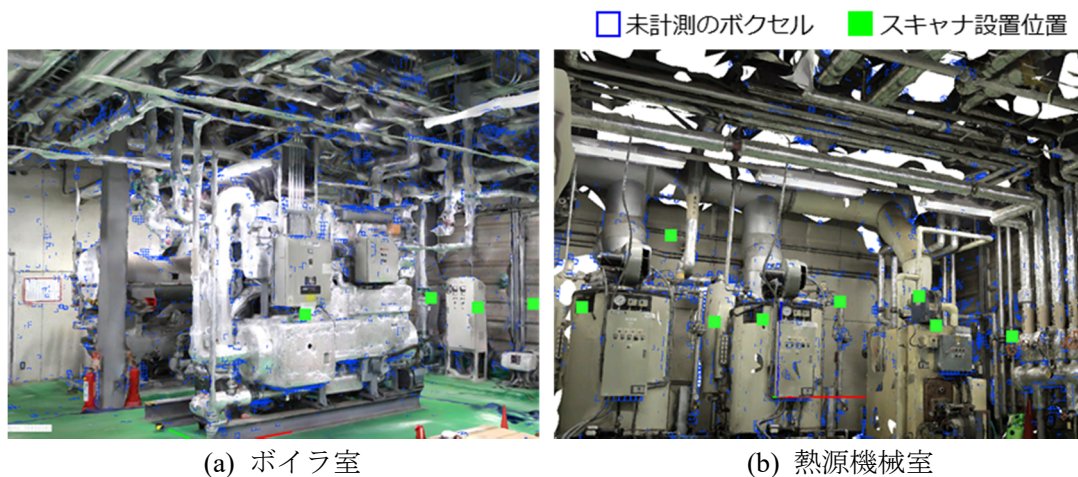


図 3.1 可視性の誤分類により未計測となるボクセル

な保証がない。そのため、厳密解法により最適スキャナ配置を導出する必要がある。

そこで、本章では、これらの問題を解決するため、

- 1) SfM モデルの表現方法をメッシュモデル表現へ変更し、GPU と各スキャナ位置からの展開画像を用いたメッシュベースの可視性判定により高速化と高精度化を図る。
- 2) スキャナ配置問題を整数計画法の問題クラスに定式化し、厳密解法により最適解を導出する。

3.2 提案手法の概要

本章で提案する準最適スキャナ配置計画手法の概要を図 3.2 に示す。本提案手法は、主に 3 ステップで構成されており、図 3.2 の赤色で記載した箇所が前章からの改良点となっている。

Step 1 Structure-from-Motion (SfM) による 3D モデル構築

前章と同様に計測対象となる空間をカメラで撮影した画像から市販 SfM ソフトウェアにより、3 次元メッシュモデル (SfM モデル) を自動構築するとともに、各画像の撮影位置・姿勢を推定する。その後、SfM モデル (点群) に対して、ユーザが対話的に工事目的に応じた計測重要度を指定する。さらに本章では、各面分に計測重要度の属性を付与する。そして、SfM モデルに生じる欠損部を SfM により推定された撮影位

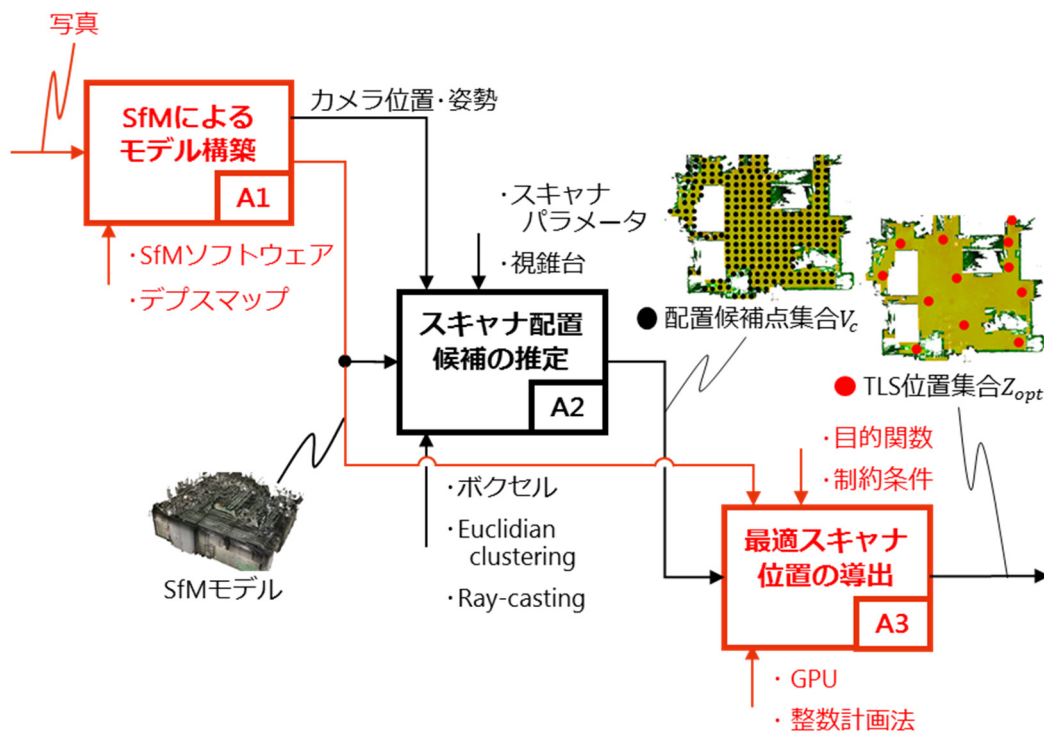


図 3.2 最適スキャナ配置計画手法の概要

置からのデプスマップを生成し、デプスマップに投影された欠損部を同視点の写真との RGB 類似性に基づいた置換処理[23]により補完することでモデルの欠損部を補完する。このモデルを計測対象の事前知識として利用する。

Step 2 スキャナ配置候補の推定

次に、Step 1 で構築した SfM モデルに基づいて、SfM モデルを含む空間内でスキャナを設置可能な領域を推定する。その際、前章と同様にボクセルを用いる。計測対象を含む計測空間をボクセルに分割し、Step 1 で推定した各カメラの位置からレイキャスティングを実行し、各ボクセルの空間占有状態を分類する。そして、空間占有状態に基づいて、SfM モデルの法線情報とユークリディアンクラスタリングにより、スキャナが設置可能な床面領域を抽出し、床面領域上でスキャナを設置した場合にスキャナと SfM モデルが干渉しない空間を探索し、スキャナ設置候補点として推定する。

Step 3 最適スキャナ位置の導出

次に、スキャナ配置問題を整数計画問題のクラスに定式化する。そして、Step 1 で推定されたカメラ位置から可視となる面分のみを計測対象とする。最後に、Step 2 で推定されたスキャナ設置候補点から、各面分に対して入射角、計測距離、可視性の制約

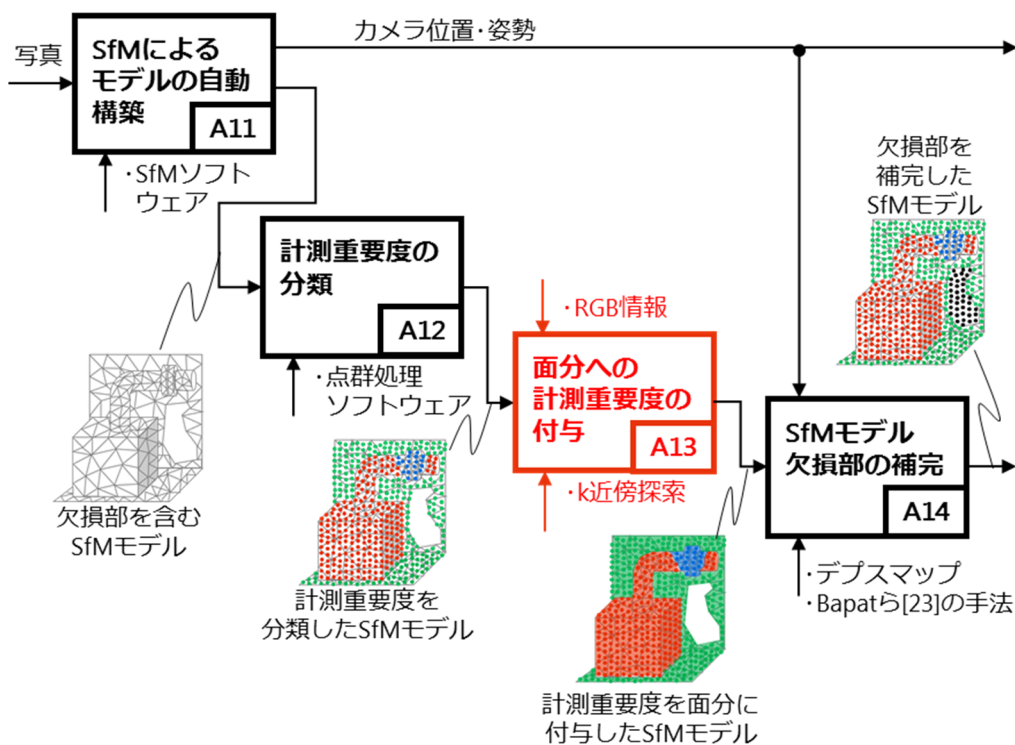


図 3.3 SfM による 3D モデル構築手法の概要

条件を満たすか否かを判定した情報をパラメータとして与え、最適化問題を数理解法により求解することで、観測可能となる面分数を最大化する最適なスキャナ配置を導出する。

本章では、前章からの改良点である Step 1 および Step 3 について説明する。

3.3 Structure-from-Motion (SfM) による 3D モデル構築

本章においても前章と同様に事前知識として SfM モデルを用いる。そして、SfM モデルをボクセル表現ではなく、メッシュモデルで表現し、最適スキャナ位置を導出する。本節では、図 3.3 に示すように、本節では前章からの変更点である計測重要度のメッシュモデルへの付与についてのみ説明する。

3.3.1 面分への計測重要度の付与

前章では SfM モデルをボクセルで表現していたため、図 2.14 の処理 A22 において、計測重要度を分類した情報を各ボクセルに付与した。本章では SfM モデルをメッシュモデルで表現するため、SfM モデルを構成する各三角形面分へ計測重要度の情報を付与する必要がある。

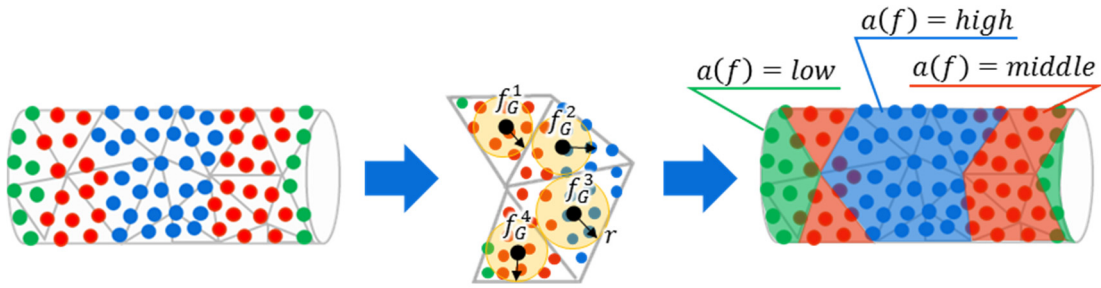


図 3.4 面分への計測重要度の付与

はじめに、図 3.3 の処理 A12 において、SfM モデル表面に生成させた点群に対し、各重要度に設定したい領域の 3 次元空間座標を対話的に指定することで分類をした。図 3.4 に示すように、この分類した点群に対して以下の手順で分類する。

- (1) 各三角形面分 f における重心点 f_G を中心として、面分の外接球を定義する。 f_G をクエリ点として、内接球の半径 r_G 内にある点群を探索する。
- (2) 探索した点群の計測重要度の属性を投票し、式(3.1)の条件に基づいて、面分 f に分類された計測重要度の属性 $a(f)$ を付与する。『重要度：高』の点群が 1 つでも入っていれば、 $a(f) = high$ に分類し、『重要度：中』の点群数が多ければ、 $a(f) = middle$ に分類し、『重要度：低』の点群数が多ければ、 $a(f) = low$ に分類する。もし同数の場合は、重要度が高いほうを優勢とする。

$$a(f) = \begin{cases} high, & |p_b| \geq 1 \\ middle, & |p_r| > |p_g| \wedge |p_b| = 0 \\ low, & |p_g| > |p_r| \wedge |p_b| = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

ここで、 $|p_b|, |p_r|, |p_g|$ は、それぞれ、半径 r_G 内において、『重要度：高』に分類した青系色の RGB 情報をもつ点群数、『重要度：中』に分類した赤系色の RGB 情報をもつ点群数、『重要度：低』に分類した緑系色の RGB 情報をもつ点群数である。

3.4 最適スキャナ位置の導出

本章では、図 3.5 に示すように、可視性判定にレイキャスティングを使用せず、GPU により各スキャナ設置候補点からのスキャナ計測した際の視野内にあるシーンを展開画像としてレンダリングすることにより、可視性の判定を行う。また、最適スキャナ位置の導出においては、スキャナ配置問題を整数計画問題のクラスに定式化し、最適化計算することにより、最適解を導出する。本節では、はじめにスキャナ配置問題において整数計画問題を採用した理由および定式化について説明する。つぎに、最適化

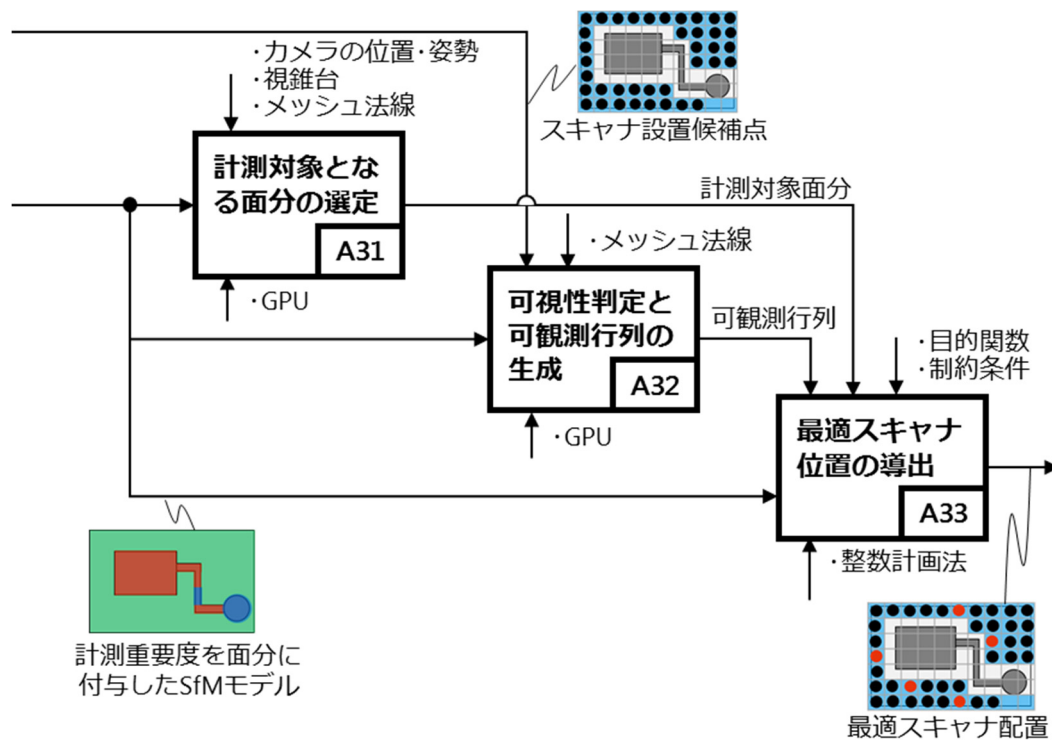


図 3.5 最適スキャナ位置の導出手法の概要

問題を解くために必要な可観測行列の生成について説明する。最後に、整数計画法による最適スキャナ配置の導出手法について説明する。

3.4.1 スキャナ配置問題の定式化

本章では、本研究で定義した入射角・計測距離・可視性の制約を満たし計測必要箇所の計測率を最大にするスキャナ配置を導出する問題を整数計画問題のクラスに定式化する。ここで、前章の制約条件で課していた点群間重複は、同問題のクラスに定式化することが出来ないため考慮しないこととした。

3.4.2 整数計画問題の採用理由

本研究で取り上げたスキャナ配置問題を、スキャナの位置や方向を連続量とする制約付き非線形最適化問題として定式化するという考え方もある。しかし本研究では、下記の理由から、スキャナ設置候補点の定義域を離散点集合とし、可観測となる面分数を最大化する配置をその離散点集合の中から整数計画法で発見する手法の方が、本研究の目的に合致すると考え採用した。

- ① 本研究では、計測対象物の事前知識である SfM モデル上の可観測面分数を目的関

数として最大化する最適スキャナ設置位置の発見を目的としている。SfM モデルは、計測対象表面を微小三角形面分で離散近似しているため、あるスキャナ位置近傍においては、可観測面分数が一定値をとる場合（目的関数の勾配がゼロの場合）と、可観測面分数が急激に変化する場合（目的関数の勾配が無限大の場合）の二通りが存在する。さらに他物体による隠蔽がある時も、可観測面分数が不連続に変化する。すなわち本研究で取り扱う問題では、スキャナ位置を変数とした目的関数は本質的に不連続な関数となる。

このような不連続な目的関数に対し、スキャナ位置を連続量とした非線形最適化を行うことは、解探索の効率性・安定性などの観点から困難を伴うと考えた。一方、スキャナ設置候補点を 0-1 変数で表し、その中で実際にスキャナを設置する点を見つける組み合わせ最適化（整数計画問題）の場合、上述の目的関数の不連続性は問題にはならず、自然な定式化が行える。したがって、整数計画問題として定式化する方法を採用した。

- ② 本研究では実務応用を考え、スキャナが物理的に設置できる空間の中のみで、最適スキャナ位置を発見することを条件としている。空調設備は狭い空間に多数の機器が設置されており、このスキャナ設置可能空間は、非常に複雑な境界面を持つ。もしスキャナ位置を連続変数とした最適化問題で定式化を試みた場合、このスキャナ設置可能空間の境界を規定する制約条件の表現が非常に複雑なものとなり、解探索の効率化に影響を及ぼすと思われる。

一方、整数計画問題で定式化する場合は、あらかじめ限られた個数のスキャナ設置候補点において、スキャナは物理的に配置可能か否かのみをテストし、そのテストを通過した設置候補点に一对一に対応する離散変数を割り当てるのみで良く、連続的な最適化の場合のように、スキャナ設置可能空間の境界面を規定する制約条件を陽に定式化する必要がなくなる。

- ③ 本研究で必要とするのは、1箇所最適なスキャナ位置ではなく、可観測面分数を最大化できる「複数スキャナ位置の最適な組み合わせ」となる。整数計画問題では、このスキャナ位置の最適な組み合わせを自然に導出できる。

一方、連続的な最適化問題で定式化した場合、1箇所の最適なスキャナ位置の導出は厳密に行える可能性はあるが、複数スキャナ位置の最適な組み合わせを1回の最適化で取得することが困難と思われる。

- ④ 本ソフトウェアで導出した最適スキャナ位置へは、オペレータが手動でスキャナを設置することを前提としている。手動で設置するため、最適スキャナ位置は

5cm~10cm 程度の空間分解能で求めれば良く、整数計画問題として定式化すれば、スキャナ設置候補点をその分解能に一致させて設定できる。

また、地上型レーザスキャナでは、方位角 φ は $0\sim 360^\circ$ 、仰角は $-90^\circ\sim 90^\circ$ に固定した計測が標準的であるため、計測方向のパラメータは最適化の変数としては不要となる。したがって、離散変数で表されたスキャナ設置候補点の中から、可観測面分数を最大化する位置の組み合わせを発見する方が定式化としては妥当である。

- ⑤ 現場応用を考慮した場合、できるだけ短時間で最適配置が得られる必要があるが、本研究のように 0-1 整数計画法として定式化した場合、分枝限定法のような最適解導出のための数理解法が確立されており、本研究の問題程度の規模であれば、最適解の導出が数分程度で取得できる可能性が高いと思われる。

3.4.3 定式化

本章では、スキャナ配置問題を式(3.1)に示すような 0-1 整数計画問題に定式化した。

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 \text{maximize} \\
 x_f
 \end{array}
 \sum_{f \in F} x_f \\
 \text{subject to} \\
 \sum_{v_c \in V_{\text{candidate}}} z_{v_c} \leq T \\
 \sum_{v_c \in V_{\text{candidate}}} a_{v_c, f} z_{v_c} \geq x_f \quad (f \in F) \\
 z_{v_c} \in \{0, 1\} \quad (v_c \in V_{\text{candidate}}) \\
 x_f \in \{0, 1\} \quad (f \in F)
 \end{array}
 \tag{3.2}$$

ここで、

【集合】

V_c : スキャナ設置候補点の集合

F : SfM モデルを構成する『重要度：高』の三角形面分の集合

【変数】

$$z_{v_c} := \begin{cases} 0, & \text{設置候補点 } v_c \text{ に TLS を配置しない} \\ 1, & \text{設置候補点 } v_c \text{ に TLS を配置する} \end{cases}$$

$$x_f := \begin{cases} 0, & \text{『重要度：高』の面分 } f \text{ が計測されない} \\ 1, & \text{『重要度：高』の面分 } f \text{ が計測される} \end{cases}$$

【パラメータ】

T := スキャナ設置回数の上限値

$$a_{v_c, f} := \begin{cases} 0, & v_c \text{ から } f \text{ が観測不可} \\ 1, & v_c \text{ から } f \text{ が可観測} \end{cases}$$

式(3.2)の目的関数は、計測される面分 f の最大化を表している。制約条件の第 1 式は、規定のスキャナ設置箇所数以下であることを表している。第 2 式は、面分 f が計測されたか否かを表している。

この最適化問題の定式化は、北田[20]らの研究と類似しているが、以下の 2 点で異なっている。

- ① 本研究では、入射角、計測距離など、TLS による計測品質に重要な影響を与える要因をスキャナ配置の制約条件に採用している。
- ② 本研究が対象とする空調設備は複雑形状のため、最適スキャナ配置の探索過程において、『重要度：高』に指定した面分すべてを観測可能なスキャナ配置が必ずしも得られない場合が多い。したがって、式(3.3)および式(3.4)に示す北田[20]らの最適化のように、面分を少なくとも 1 回以上計測する条件を制約条件とすると、実行可能な解が導出されない場合が現れる。これを避けるため、本研究では指定された最大スキャン回数 T 以下の制約条件下で、少なくとも 1 箇所以上から計測された『重要度：高』の面分数を目的関数として最大化する定式化を行っている。

なお、式(3.2)の第 2 制約式の左辺は、「面分 f が異なるスキャナ位置から計測された回数」を表しているが、今回の問題で考慮したいのは、「面分 f が計測されたか否か」のみである。そこで、右辺に 0-1 整数変数である x_f を導入した。面分 f が 1 回も計測されなかった場合は制約式の左辺 = 0 となり、 x_f は 0 となる。一方、面分 f が 1 回以上計測された場合、左辺 ≥ 1 となる。 x_f は、0 もしくは 1 のいずれかの値でも良いが、 x_f の和が目的関数として最大化されるため、 x_f は 1 をとることになる。これにより、スキャナ配置箇所の重複を避けた配置が可能となる。

以下に北田[20]ら定式化を示す。

問題 1：総スキャン回数を最小化する最適化問題

$$\begin{cases} \underset{x_i}{\text{minimize}} & \sum_{i \in I} x_i \\ \text{subject to} & \sum_{i \in I} d_{i,j} x_i \geq 1 (\forall j \in J) \\ & x_i \in \{0,1\} (\forall i \in I) \end{cases} \quad (3.3)$$

問題 2 : 問題 1 で求めたスキャン回数以下で総スキャン点数を最大化する最適化問題

$$\begin{cases}
 \text{maximize}_{x_i} & \sum_{i \in I} a_{i,j} x_i \\
 \text{subject to} & \sum_{i \in I} d_{i,j} x_i \geq 1 (\forall j \in J) \\
 & \sum_{i \in I} x_i \geq r \\
 & x_i \in \{0,1\} (\forall i \in I)
 \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで,

【集合】

I : スキャナ設置候補点の集合

J : 三角形面分の集合

【変数】

$$x_i := \begin{cases} 0, & \text{設置候補点 } i \text{ に TLS を配置しない} \\ 1, & \text{設置候補点 } i \text{ に TLS を配置する} \end{cases}$$

【パラメータ】

r := スキャナ配置回数の上限値

$$d_{i,j} := \begin{cases} 0, & i \text{ から } j \text{ が計測不可能} \\ 1, & i \text{ から } j \text{ が計測可能} \end{cases}$$

$$a_{i,j} := \begin{cases} 0, & d_{i,j} = 0 \\ i \text{ から計測可能な } j \text{ 上の点数}, & d_{i,j} = 1 \end{cases}$$

3.4.4 計測対象となる面分の選定

SfM モデルを構成する三角形面分の中から、計測対象となる面分を選定する。2.4.1 項の計測対象となるボクセルを選定した時と同様に、2.2.1 項の SfM によって推定された各カメラの位置から見えていない面分を計測対象から除外する。ここで、三角形メッシュモデルと GPU を活用した可視判定手法[30]を導入する。計測対象となる面分は、各面分への ID 付与、カメラ撮影位置からの画像生成、画像走査による可視性判定の 3 ステップで構成される。

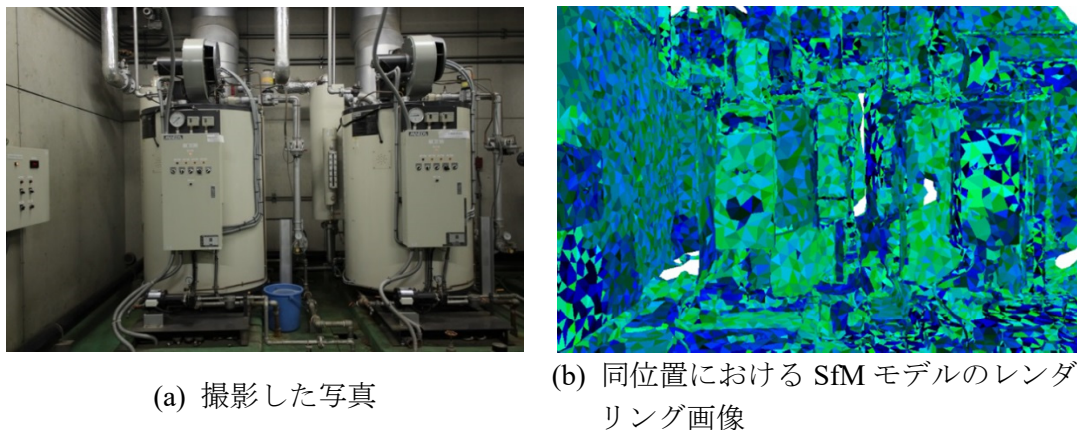


図 3.6 SfM モデルを構成する各面分への固有 RGB 値の付与 (ボイラ室)

3.4.4.1 各面分への ID 付与

SfM で推定されたカメラ撮影位置からシーンをレンダリングし、表示されている画像はカメラ視点から可視である事が保証されている。そこで、画像に移っている面分を特定することができれば、その面分は可視であることが確認できる。画像は RGB 情報しか持っていないため、色と面分が一对一对応できれば画像を走査するだけで、可視となる面分を選定できる。そこで、SfM モデルを構成する全面分に、固有の RGB 値を付与し、この RGB 情報を各面分の ID と対応させる。ここで、RGB 各色は 8bit で表現しているため、16,777,216 色表現できる。そのため、SfM モデルの面分数も 16,777,216 個まで対応できる。

3.4.4.2 カメラ撮影位置からの画像の生成

次に、2.2.1 項で SfM によって推定された内部パラメータと外部パラメータの情報により、カメラの位置・姿勢および画角の情報から視錐台を定義し、全面分に固有の RGB 値を付与した SfM モデルを各カメラ撮影位置から GPU を用いてレンダリングする。図 3.6 にあるカメラ撮影位置からレンダリングした画像を示す。

3.4.4.3 画像走査による可視性の判定

最後に、以下の手順で計測対象となる面分を選定する。

- (1) はじめに、図 3.7 に示すように、レンダリングした画像に対して各画素を検査して可視性を判定する。まず、画像 I を左上から右下に向けて走査し、画素 $I(i, j)$ の RGB 値を検査する。各面分 ID とそれに対応する RGB 値は既に分かっている

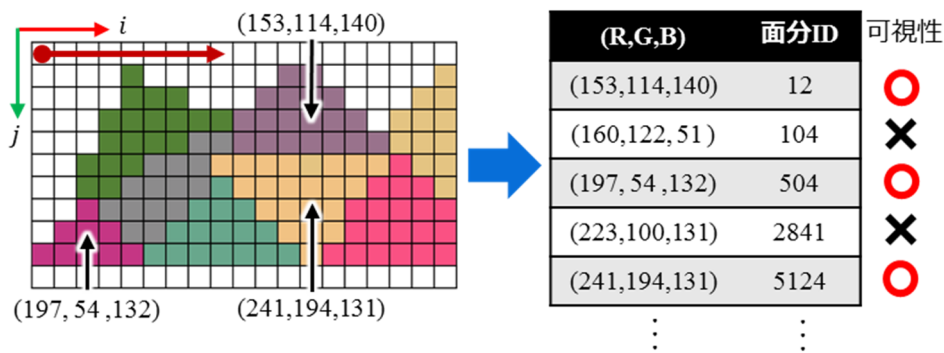


図 3.7 画像走査による『可視』となる面分の抽出

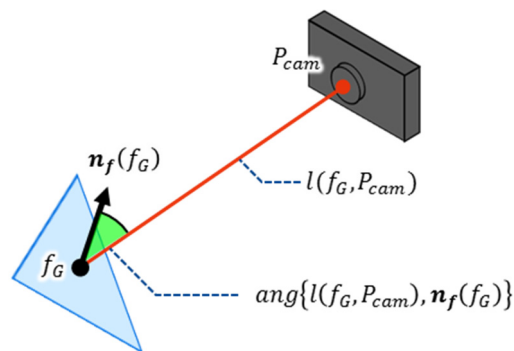


図 3.8 入射角の検査

るため、各画素 $I(i,j)$ の RGB 値に対応する面分 ID を持つ面分を『可視』となる面分として抽出する。

- (2) つぎに、抽出した面分の表側が見えているかを判定する。たとえば、SfM モデルの欠損により、面分の裏側が見えている可能性があるため、計測対象から除外する必要がある。そこで、図 3.8 に示すように、入射角を検査する。式(3.5)のように、抽出した面分のみに対して線分 l と三角形面分の重心点における法線ベクトル \mathbf{n}_f との角度（入射角）が 90° 未満であれば、その面分を『可視』とする。

$$\text{ang}\{l(f_G, P_{cam}), \mathbf{n}_f(f_G)\} < 90^\circ \quad (3.5)$$

ここで、 $l(f_G, P_{cam})$ は f_G と P_{cam} を結ぶ線分で、 $\mathbf{n}_f(f_G)$ は f_G の法線ベクトルである。

- (3) この処理を全カメラ撮影位置に対して実行することにより、式(3.5)の入射角の条件をみたす面分を計測対象面分 $f_o \in F_{object}$ として選定する。

ここで、本可視性の判定手法では、三角形面分が部分的に重なっていた場合、奥側の面分が少しでも見えていれば、『可視』としている。

3.4.5 可観測行列の生成

3.4.3 項の定式化で記述した式(3.2)の中にパラメータ $a_{v_c, f}$ がある。この $a_{v_c, f}$ は事前に計算して最適化問題の計算時に代入する必要がある。そこで、スキャナ設置候補点 v_c に置かれたスキャナから、SfM モデル上の各三角形面分 f が『可観測』か『観測不可』が以下に示す要素 $a_{v_c, f}$ に記載された可観測行列 $A = \{a_{v_c, f}\}$ を事前に生成する。

$$a_{v_c, f} = \begin{cases} 0, & \text{スキャナ設置候補点 } v_c \text{ から面分 } f \text{ が観測不可} \\ 1, & \text{スキャナ設置候補点 } v_c \text{ から面分 } f \text{ が可観測} \end{cases}$$

ここで、『可観測』とは、スキャナ設置候補点 v_c から面分 f が可視で計測品質条件を満たすことである。一方、『観測不可』とは、 v_c から f が不可視もしくは計測品質条件を満たさないことである。

3.4.5.1 スキャナ視点からのパノラマ展開画像の生成

この $a_{v_c, f}$ の値を高速に評価するために、3.4.4 項で述べた手法と同様に、GPU を用いてレンダリングした画像を走査する事による可視判定手法を導入する。はじめに、各スキャナ設置候補点 v_c からスキャナの視野内にあるシーンのパノラマ展開画像を生成する。

まず、3.4.4.1 目で固有の RGB 値を付与した SfM モデルの各面分に対し、SfM モデルの頂点座標を式(3.6)により、3次元直交座標系表現から各スキャナ設置候補点 v_c をスキャナ原点(0,0,0)とする3次元極座標系表現に変換する。

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \theta = \tan^{-1} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \varphi = \tan^{-1} \frac{y}{x} \end{cases} \quad (3.6)$$

次に、図 3.9 に示すように、画像横方向および縦方向を、それぞれスキャナ方位角 $\varphi (0 \leq \varphi < 2\pi)$ 、仰角 $\theta (-0.5\pi \leq \theta \leq 0.5\pi)$ とした展開画像上で、SfM モデルの全三角形面分をレンダリングする。ここで、画像の解像度は、 2500×1250 画素に設定した。これは、スキャナの計測ピッチ $\Delta\varphi, \Delta\theta = 0.144^\circ$ と同等の解像度となっている。

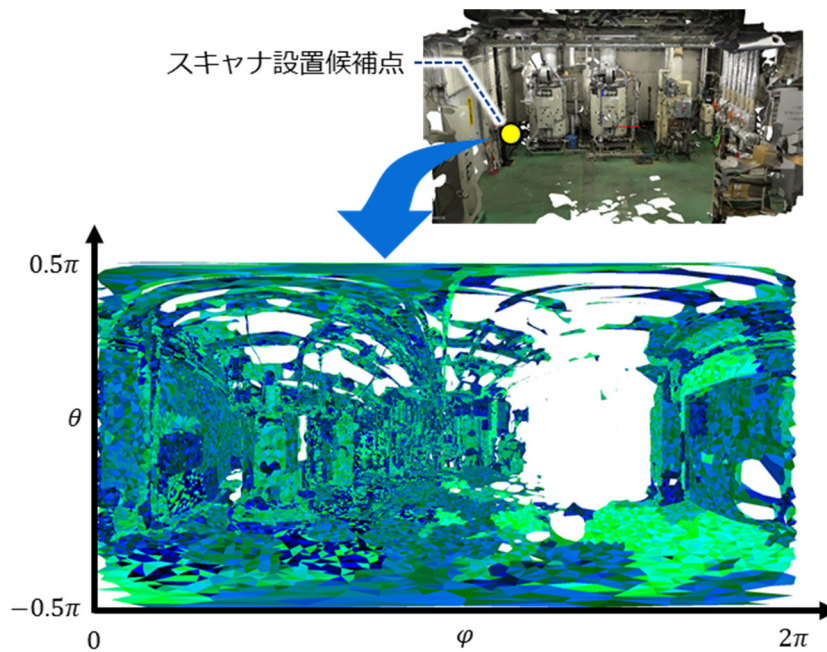


図 3.9 スキャナ視点からのパノラマ展開画像の生成

3.4.5.2 画像走査による可視性と計測品質条件の判定

最後に、以下の手順で可視性と計測品質条件を判定し、可観測行列を生成する。

- (1) はじめに、可観測行列 A の全要素を 0 に初期化する。
- (2) 次に、3.4.4.3 目と同様の手順により、レンダリングしたパノラマ展開画像に対して各画素を検査して可視性を判定する。まず、図 3.7 に示すように、パノラマ展開画像 PI を左上から右下に向けて走査し、画素 $PI(i, j)$ の RGB 値を検査する。
- (3) そして、各画素 $I(i, j)$ の RGB 値に対応する面分 ID を持つ面分を『可視』となる面分として抽出する。
- (4) つぎに、抽出した面分が計測品質を満たすか否かを判定する。そこで、図 3.10 に示すように、抽出した面分のみに対して、スキャナの視野角および入射角と計測距離を検査する。そして、式(3.7), (3.8), (3.9)の 3 つの条件を満たす場合、そのスキャナ設置候補点 v_c と面分 f の組み合わせからなる可観測行列 A の要素 $a_{v_c, f}$ を $a_{v_c, f} = 1$ に更新する。

$$\text{ang}\{l(f_G, v_c), z\} < \theta_{th} \quad (3.7)$$

$$\text{ang}\{l(f_G, v_c), \mathbf{n}_f(f_G)\} < \theta_\alpha \quad (3.8)$$

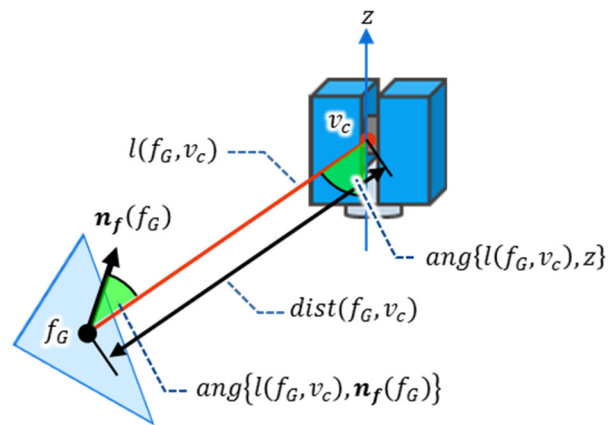


図 3.10 計測品質条件の検査

$$d_{min} < dist(f_G, v_c) \leq d_{max} \quad (3.9)$$

ここで、 $l(f_G, v_c)$ は f_G と v_c を結ぶ線分で、 $\mathbf{n}_f(f_G)$ は f_G の法線ベクトルである。そして、 $dist(f_G, v_c)$ は v_c から f_G までの距離である。

- (5) この処理を全スキャナ設置候補点に対して実行することにより、可観測行列 A の全要素の値を計算し、可観測行列 A を生成することができる。

3.4.6 整数計画法による最適スキャナ配置の導出

最後に、整数計画法により、3.4.3 項の式(3.2)で定式化したスキャナ配置における 0-1 整数計画問題の最適解を求解する。ソルバには、Numerical Optimizer[31]を用い、求解アルゴリズムには分枝限定法を用いた。本研究における定式化では、スキャナ設置

表 3.1 計測対象となる SfM モデルの詳細

	ボイラ室	熱源機械室
計測対象の規模	6.3m×6.8m×4.6m	12.1m×14.1m×4.6m
SfM モデル面分数	124,998	214,552
SfM モデル頂点数	63,492	106,895

回数上限値 T を増分させて繰り返し計算し、計測率が収束する時点での T 値を採用することにより、付随的に最少スキャナ設置回数としている。以下の手順で最適スキャナ配置の導出する。

- (1) はじめに、スキャナ設置回数上限値 T に初期値を入力し、式(3.2)のスキャナ配置問題の最適化計算を行う。これにより、最大化された計測された面分 x_f の合

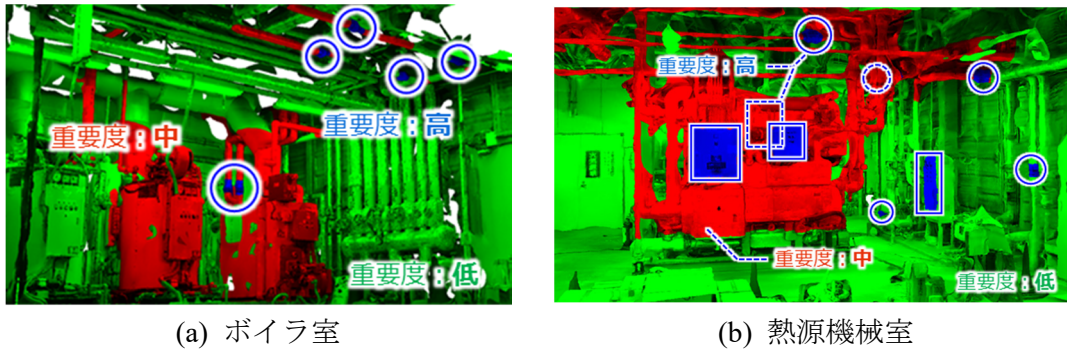


図 3.11 計測対象となる SfM モデルの計測重要度の分類

計値 $|N_f|$ とスキャナが置かれた候補点が 1 となる z_{v_c} が求まる. ここで、『重要度: 高』の計測対象面分数に対する計測された面分数の割合を計測率 C_f として定義する.

- (2) 次に, T を 1 つ増分させ, 再度最適化計算を行う.
- (3) そして, 式(3.10)に示すように, T 回目の計測率と $T - 1$ 回目の計測率と差が閾値 τ_c 以下になるまで(2)の処理を繰り返す.

$$C_f^T - C_f^{T-1} \leq \tau_c \quad (3.10)$$

- (4) 最終的な解において, $z_{v_c} = 1$ となったスキャナ設置候補点 v_c を最適スキャナ設置位置の組み合わせ Z_{opt} とする.

3.5 最適スキャナ配置の導出結果

3.5.1 計測対象および計測重要度の設定

本章では, 前章で扱ったボイラ室および熱源機械室を計測対象とする. 事前知識となる SfM モデルの詳細を表 3.1 に示す. さらに, 図 3.11 に示すように, 計測重要度においても前章と同様に分類している.

ここで, 本章における GPU を用いた可視性判定では, パノラマ展開画像の解像度と計測対象物までの距離, 面分サイズに依存する. たとえば, 面分サイズが小さくスキャナ視点から遠くにある面分をレンダリングした場合, 図 3.12 に示すように, 面分サイズが画像の解像度を下回ってしまい, 1 つの画素に複数の面が対応してしまう. そのため, 実際には可視となる面分が不可視と誤分類されるケースが生じる. そこで,

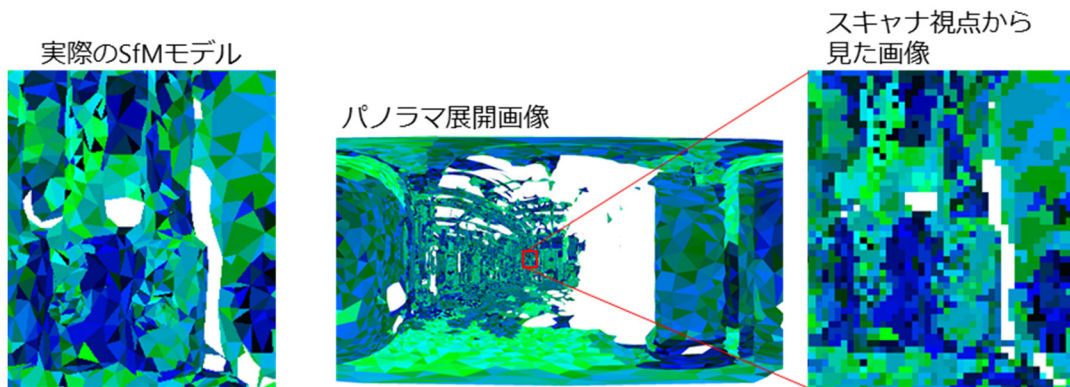


図 3.12 解像度以下の面分のレンダリング結果

本研究では、そのような状況が起こらないように面分サイズを調整した。

3.5.2 項に示す制約条件閾値において、『重要度：中』の最大許容計測距離は 8m に設定している。そこで、スキャナ視点から 8m 先にある面分は、必ず 1 画素以上になるように、SfM によって自動構築されたメッシュモデルの最小面分サイズを調整した。このため、面分の最小エッジ長を約 30mm に設定した。8m より遠方では、面分サイズが 1 画素未満になることはあるが、この面分はスキャナの許容計測範囲外にあり『観測不可』に分類されるため、最適スキャナ配置の導出には、実質上影響がない。

3.5.2 スキャナパラメータおよび制約条件閾値の設定

スキャナパラメータと制約条件については、表 3.2 のように 2.5.3 項の設定値と同じ値を使用した。ただし、本章では最小許容重複率 $\tau_{overlap}$ については採用していない。表 3.3 に制約条件の閾値を再度示す。

表 3.2 スキャナパラメータの設定値

スキャナパラメータ	設定値
r_{scan}	0.3m
h_{emit}	1.4m
φ	360° ($0^\circ \leq \varphi < 360^\circ$)
θ	180° ($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)
$\Delta\varphi$	0.072°
$\Delta\theta$	0.072°

表 3.3 制約条件の設定値

	計測重要度		
	高	中	低
最大許容入射角 θ_α	45°	90°	90°
最小許容計測距離 d_{min}	0.3m	0.3m	0.3m
最大許容計測距離 d_{max}	5.0m	8.0m	20.0m

3.5.3 最適スキャナ配置結果

3.5.1 項の計測重要度と 3.5.2 項の各種パラメータに基づいて、提案手法により最適スキャナ配置を導出する。計測対象となる面分数および、スキャナ設置候補点数は、表 3.4 のようになっている。

表 3.4 計測対象面分数とスキャナ設置候補点数

	ボイラ室	熱源機械室
計測対象面分数	109,397 (高: 427, 中: 14,628, 低: 94,342)	144,828 (高: 652, 中: 19,531, 低: 124,645)
スキャナ設置候補点数	137	596

そして、『重要度：高』に分類された計測可能な面分数を最大にするスキャナ配置を導出した。各計測対象室の最適スキャナ配置結果を、それぞれ図 3.13 と図 3.14 に示す。SfM モデル内に分布している黒色の点はスキャナ設置可能ボクセルとなっており、赤点がスキャナ設置可能ボクセルからダウンサンプリングしたスキャナ設置候補点 v_c である。

スキャナ設置箇所数は、ボイラ室が 6 箇所、熱源機械室が 7 箇所である。また、計測対象面分に対する計測された面分数の割合となる計測率を算出する。その結果を表 3.5 に示し、図 3.15 に『観測不可』となった面分の分布を示す。

表 3.5 最適スキャナ配置の計測率

	計測重要度		
	高	中	低
ボイラ室	88.3%	90.4%	94.1%
熱源機械室	88.2%	85.3%	81.4%

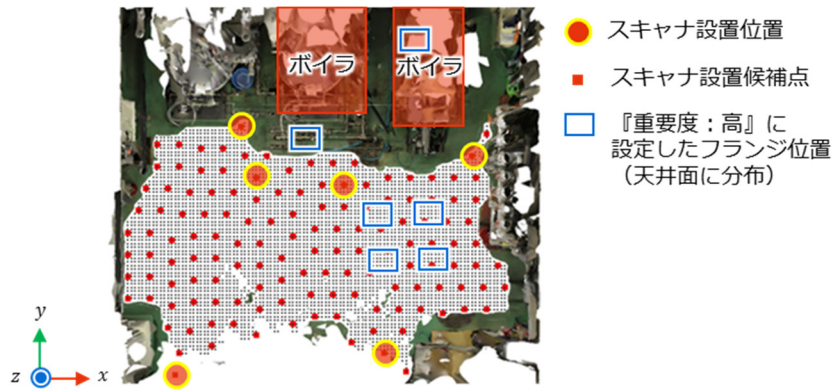


図 3.13 ボイラ室における最適スキャナ配置結果

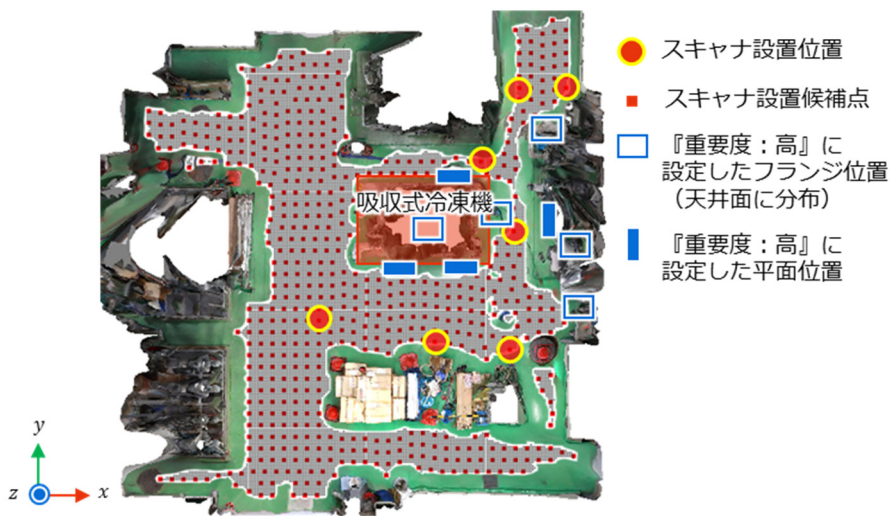


図 3.14 熱源機械室における最適スキャナ配置結果

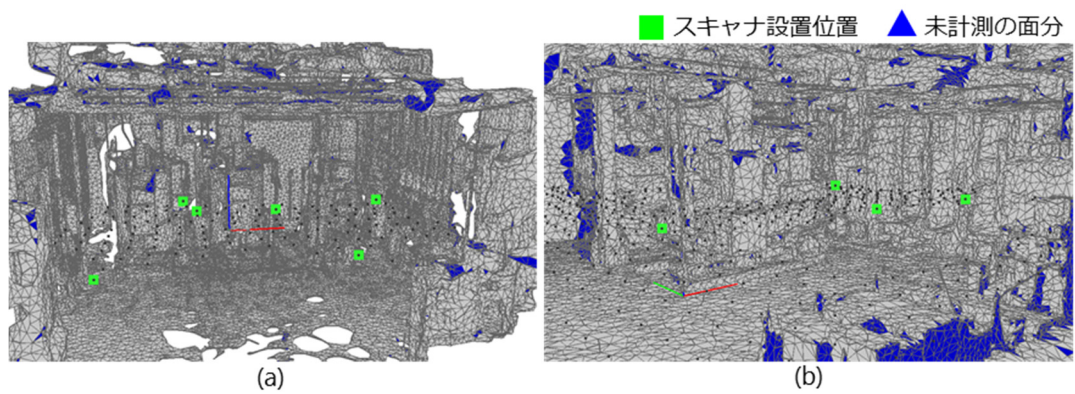


図 3.15 『観測不可』となった面分の分布 (a:ボイラ室, b:熱源機械室)

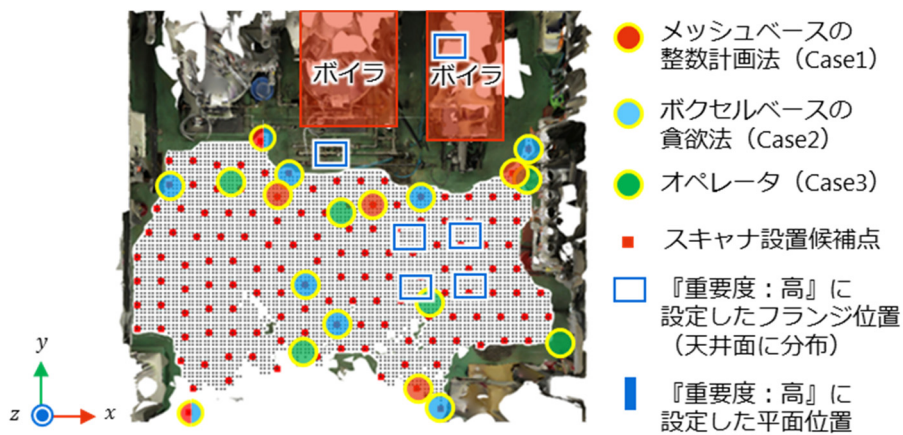


図 3.16 各ケースのスキャナ配置の比較 (ボイラ室)



図 3.17 各ケースのスキャナ配置の比較 (熱源機械室)

3.5.4 前章の結果との比較

続いて、本章の提案手法の効果を検証するために、ボイラ室と熱源機械室において、前章で導出した準最適スキャナ配置結果と本章で提案した最適スキャナ配置結果において、『重要度：高』のボクセル数および、面分数を最大にするスキャナ配置を導出し、スキャナの設置回数と計測品質条件を満たす『重要度：高』の面分の計測率を比較する。さらに前章で評価した熟練オペレータが手動で決定したスキャナ配置結果とも比較する。図 3.16 と図 3.17 にそれぞれ、ボイラ室および熱源機械室における各ケースのスキャナ配置を示す。ここで、本章での提案手法を、メッシュベースの整数計画法

(Case1) と定義する。前章における提案手法をボクセルベースの貪欲法 (Case2) と定義し、熟練オペレータによる配置をオペレータ (Case3) と定義する。これによると、Case1 と Case2 は同じ位置に配置されている箇所が存在する。さらに、各ケースのスキャナ設定箇所数を表 3.6 に、計測対象面分に対する計測された面分数の割合となる計測率を表 3.7 にまとめる。

表 3.6 各ケースのスキャナ設置箇所数

	メッシュベースの 整数計画法 (Case1)	ボクセルベースの 貪欲法 (Case2)	オペレータ (Case3)
ボイラ室	6 箇所	9 箇所	6 箇所
熱源機械室	7 箇所	10 箇所	5 箇所

表 3.7 各ケースの計測品質を満たす計測率

	ボイラ室			熱源機械室		
	計測重要度			計測重要度		
	高	中	低	高	中	低
メッシュベースの 整数計画法 (Case1)	88.3%	90.4%	94.1%	88.2%	85.6%	82.0%
ボクセルベースの 貪欲法 (Case2)	84.9%	91.3%	94.6%	87.9%	85.3%	81.4%
オペレータ (Case3)	71.2%	89.0%	91.9%	59.1%	78.8%	73.0%

これによると、ボイラ室においては、メッシュベースの整数計画法 (Case1) は、前章の提案手法 (Case2) と比較して 3 箇所少なく、オペレータと同じスキャナ設置箇所数となった。それにもかかわらず、計測品質を満たす計測率は、『重要度：高』において、一番高い計測率になった。熱源機械室においては、メッシュベースの整数計画法 (Case1) は、前章の提案手法 (Case2) と比較して 3 箇所少なく、オペレータよりも 2 箇所多いスキャナ設置箇所数となった。計測率は、『重要度：高』において、一番高い計測率となり、その他の重要度については、前章の提案手法 (Case2) と同程度の計測率で計測できることが確認できた。この理由は、Case2 では、ボクセルで SfM モデルの可視性を判定しているため、空間分割解像度が低い場合、実際には『可視』な計測対象表面が『不可視』と誤分類される可能性があり、『重要度：高』の面計測のために、より多くのスキャン回数が必要になったからだと考えられる。また、熟練オペレータ (Case3) によるスキャナ配置の場合、『重要度：高』の可視性のみを考慮した計測率では、88.5% と高くなる。しかし、表 3.7 のように、入射角と計測距離の条件を満たす計測率は 59.1%

に減少する。つまり、熟練オペレータであっても、入射角と計測距離の複雑な制約条件を全て満たすようなスキャナの最適配置を決定することは困難であることが分かる。

以上の比較から、提案する最適スキャナ配置計画手法は、入射角や計測距離の品質条件を満たしつつ、計測必要箇所の可視性をできる限り確保するスキャナ配置箇所の発見に有効であると言える。

3.7 As-built モデル化精度の定量評価

続いて、熱源機械室において、実際に計測したレーザ計測点群から as-built モデルを生成し、モデル化精度の検証を行い、本章における提案手法の有効性を検証する。

3.7.1 実験条件およびモデル化手順

モデル化対象は、2章の図 2.62 で評価対象として設定した 10 箇所のフランジである。トータルステーションで計測したフランジの直径およびフランジ端面の中心位置の 3 次元座標値を真値とする。メッシュベースの整数計画法によるスキャナ配置 (Case1)、ボクセルベースの貪欲法によるスキャナ配置 (Case2)、および熟練オペレータによるスキャナ配置 (Case3) に基づいて実測で取得したレーザ計測点群から as-built モデルを生成して得られたパラメータ値を真値と比較することにより、計測精度を定量的に評価する。

実験条件およびモデル化手順は、2.6.6.1 目、2.6.6.2 目と同条件および同手順で実測し as-built モデルを生成する。

3.7.2 前章の結果との比較

フランジ直径は、JISB2220[32]の規格品から間違いなくサイズを決定するためには、5mm 以下の誤差で計測する必要がある。図 3.18 に各ケースにおけるフランジ直径のモデリング誤差を示す。フランジ直径の計測誤差の絶対値は、平均値が 1.56mm (Case1)、1.32mm (Case2)、2.68mm (Case3) となった。これにより、メッシュベースの整数計画法 (Case1) およびボクセルベースの貪欲法 (Case2) は、同程度の計測精度となり、どちらも規格サイズの同定に必要な許容値 ($\pm 5\text{mm}$) を下回った。

一方、フランジ端面の中心位置は、プレファブ工事により、既存の機器や配管と新設する機器や配管の接続のため、その実務上の誤差許容値は 5mm 以下で、可能な限り少ないことが望ましい。図 3.19 に各ケースにおけるフランジ端面の中心位置のモデリング誤差を示す。中心位置の計測誤差は、平均値が 3.63mm (Case1)、3.64mm (Case2)、

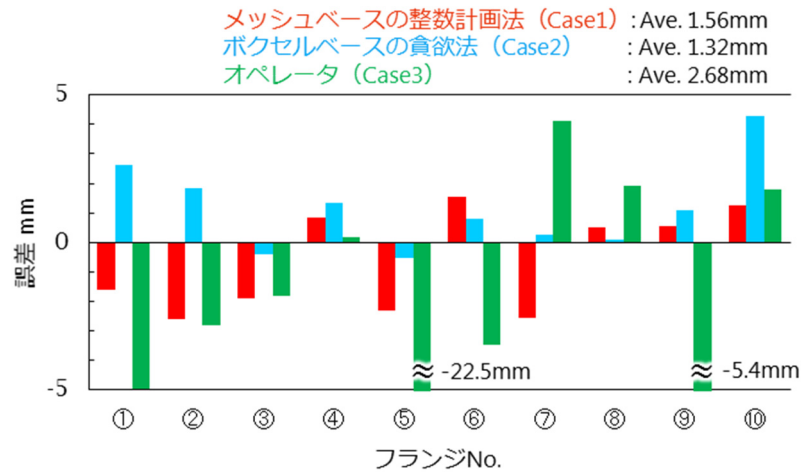


図 3.18 フランジ直径のモデリング誤差

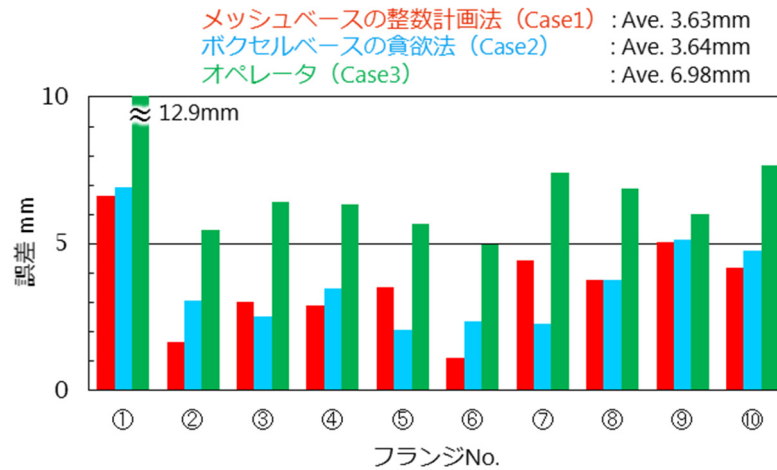


図 3.19 フランジ端面の中心位置のモデリング誤差

6.98mm (Case3) となった。こちらも、メッシュベースの整数計画法 (Case1) およびボクセルベースの貪欲法 (Case2) は、同程度の計測精度となり、どちらも実務上の誤差許容値を下回っている。

また、モデル化結果の中には、Case1 が Case2 よりも誤差が大きくなっている箇所もある。これは、入射角および計測距離の充足判定条件では、閾値以下であれば、全て合格としている。そのため、合格した中にも入射角が 0° に近いものから 45° に近いものまで様々ある。最適スキャナ配置を決定する際、制約条件を満たしていれば、計測可能な計測対象の表面を最大にするような解を算出するため、計測箇所によっては、Case2 の誤差が大きくなることもある。さらに、フランジ①については、スキャナ設置高さとはほぼ同じ高さにフランジが配置されているため、フランジの端面を十分に計測

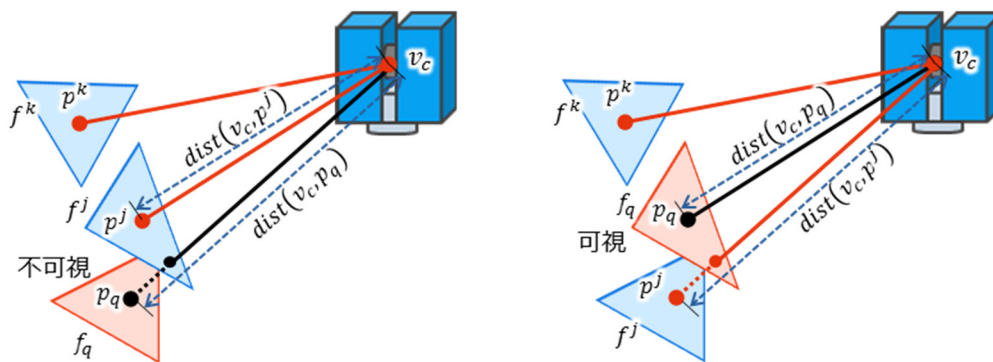


図 3.20 全探索の交差判定による可視性判定

することができなかった。そのため、モデル化の誤差が大きくなったため、許容値である 5mm を超えたと考えている。

以上の結果より、メッシュベースの整数計画法は、より少ないスキャナ設置箇所数で、空調設備の改修に要求される as-built モデルの精度を満足するレーザ計測点群生成に有効なスキャナ配置を導出可能であることが分かった。

3.8 処理時間の比較

本節では、本章での提案手法であるメッシュベースの整数計画法の処理時間を検証する。提案手法では、GPU を用いた可視性判定を行っており、このメッシュベースによる高速可視性判定手法の改良効果を検証する。

3.8.1 GPU による可視性判定の効果

3.4 節で説明した GPU を用いた可視性判定手法の効果を検証するために、全探索による交差判定を幾何学的に行う手法と処理時間を比較する。

3.8.1.1 全探索の交差判定による可視性判定手法

全探索による交差判定は以下の手順で行う。

- (1) はじめに、スキャナ設置候補点 v_c と全三角形面分 $f^i(i=1, \dots, n)$ の中から可視判定の対象となる三角形面分 f_q の重心点 p_q とを結ぶ線分 $l(v_c, p_q)$ を考える。
- (2) f_q 以外の $n - 1$ 個の面分 $f^j(j=1, \dots, n-1)$ に対しても、スキャナ設置候補点 v_c と三角形面分の重心点とを結ぶ線分 $l(v_c, p^j)$ を考え、三角形面分 f_q に線分 $l(v_c, p^j)$ が貫通しているか否かを判定する。どの線分 $l(v_c, p^j)$ も貫通していない場合、三角

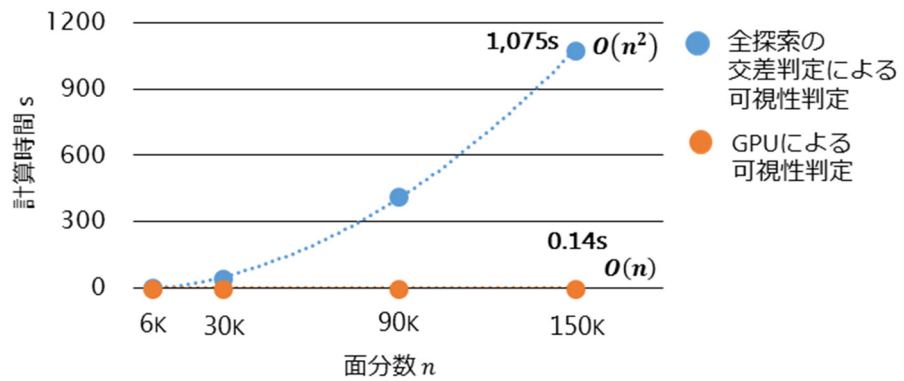


図 3.21 面分数に対する可視性判定の計算時間の推移 (実測値)

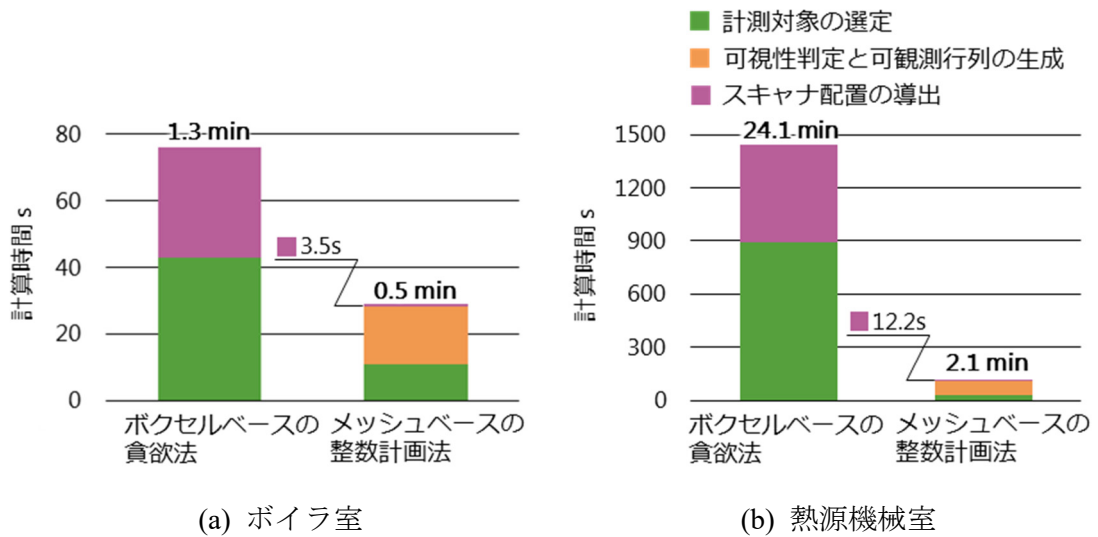


図 3.22 最適スキャナ位置の導出 (A3) における計算時間

形面分 f_q は『可視』となる。

- (3) もし三角形面分 f_q に線分 $l(v_c, p^j)$ が交差する場合、スキャナ設置候補点 v_c から三角形面分 f_q までの距離 $dist(v_c, p_q)$ と、 v_c から p^j までの距離 $dist(v_c, p_j)$ を比較し、 $dist(v_c, p_q) > dist(v_c, p_j)$ の場合、三角形面分 f_q は『不可視』となる。一方、 $dist(v_c, p_q) < dist(v_c, p_j)$ の場合、三角形面分 f_q は『可視』となる。
- (4) この処理を全スキャナ設置候補点 $\forall v_c \in V_{candidate}$ に対して実行することで、全三角形面分の可視性を判定する。

3.8.1.2 全探索の交差判定による可視性判定との比較

GPU を用いた可視性判定と 3.8.1.1 目で説明した全探索の交差判定による可視性判

定で、SfM モデルの面分数 n の変化に対する実際の計算時間の推移を図 3.21 に示す。計算機は CPU: Corei7-4810MQ2.80GHz, GPU: NVIDIA QuadroK2100M である。これにより、全探索による交差判定による可視性判定は、ほぼ計算量 $O(n^2)$ となった。一方、GPU を用いた可視性判定手法は、全面分のレンダリングでよいため、ほぼ計算量 $O(n)$ となり、面分数の増加に対する影響をほとんど受けずに可視性判定を行えることが分かった。

3.8.2 全体の処理時間の比較

続いて、本章での提案手法の各処理工程における計算時間を表 3.8 に示す。

表 3.8 最適スキャナ配置の計算時間（ボイラ室および熱源機械室）

処理工程	計算時間[s]	
	ボイラ室	熱源機械室
SfM モデル欠損部の補完	334.3	612.1
空間占有状態の分類	20.1	311.2
ボクセルの支配的法線の算出	5.2	2.2
スキャナ設置候補点の推定	24.5	143.4
計測対象となる面分の選定	10.7	31.9
可視性判定と可観測行列の生成	17.6	81.0
『重要度：高』に対する最適スキャナ配置の導出	3.5	12.3
合計	415.9	1194.1

これによると、ボイラ室において全処理工程に要した時間が、前章の提案手法では約 3.6min に対して、本章での提案手法は約 2.8min となり、処理時間を約 9.6%削減できた。一方、熱源機械室においては、前章の提案手法が約 33.5min に対して、本章での提案手法は約 10.8min となり、処理時間を約 67.6%削減できた。さらに、本章で改良した処理（A3）のみの計算時間を比較したグラフを図 3.22 に示す。これによると、ボイラ室においては約 58.3%削減でき、熱源機械室においては、約 91.3%削減できた。特に、計測対象ボクセルの選定とスキャナ配置の導出における削減効果が大きくなり、GPU を用いた可視性判定が有効であり、規模が大きくなるにつれて、大きな効果を得られることが分かった。

3.9 まとめ

本章のまとめを以下に述べる.

- 空調設備の as-built モデル化を対象に, 事前知識となる計測対象の SfM モデルを構築する. そして, 工事目的により異なる計測重要度をユーザが対話的に分類し, SfM モデルを含む計測対象空間をメッシュモデル表現する. その後, 地上型レーザースキャナ計測時の計測品質に関わる入射角・計測距離, および可視性の制約を満たし計測必要箇所の計測率を最大にするスキャナ配置問題を整数計画問題のクラスに定式し, 厳密解法である整数計画法を用いて導出する手法を提案した.
- 提案したメッシュベースの整数計画法による導出手法により, 設備内の計測必要箇所の計測品質を, ボクセルベースの貪欲法を用いた手法よりも少ないスキャナ設置箇所数にも関わらず, 同程度の計測率とモデル化精度で計測できるスキャナ配置が導出できた.
- 提案したメッシュベースの整数計画法による導出手法によるスキャナ配置は, 計測品質を考慮した計測率の観点で, 熟練オペレータによるスキャナ配置を上回る事が分かった.
- 提案手法によって導出されたスキャナ位置からのレーザー計測点群を用いたモデル化精度は, 改修工事に求められる精度条件を十分に満足し, 他の手法によるスキャナ配置に基づいた計測よりも良好な精度をもつことを実験的に示した.
- GPU を用いた可視性判定は, 事前知識となる SfM モデルの面分数の増加にあまり影響を受けずに可視性判定を行うことができ, 最適スキャナ配置の導出処理は数分程度と高速であり, 実務への適用が十分可能な性能をもつことが分かった.

第4章 実務への展開を考慮した最適スキャナ配置アルゴリズムへの拡張

4.1 実務で適用する際の課題と解決策

2, 3章で提案したスキャナ配置計画アルゴリズムを実務で適用する際、以下の3つ課題が残る。

- (1) TLS の初期配置候補点にスキャナを設置しただけでは、未計測領域を完全には解消できない場合があり、その未計測領域を解消するための追加計測位置が求められない。

第2章、3章で提案したスキャナ配置計画アルゴリズムでは、地上型レーザスキャナを初期に与えられた配置候補点上に選択的に設置することを仮定していた。また、その配置候補点は、標準的な高さをもつ三脚上に TLS を取り付け、その三脚を床面上に設置して計測することを仮定して、定義されていた。しかし、図 3.15 に示すように、空調設備は機器や配管が密集していたり、天井面付近に敷設されていたりする場合、この初期配置候補点のいずれに TLS を設置しても、計測が不可能な領域が存在し、計測率は 100%とはならない。特に、天井付近に『重要度：高』に設置した領域がある場合、それらの領域は TLS のレーザビーム入射角の制約が厳しいため、計測率が低くなる傾向にある。工事において、その箇所が特に重要な場合は、TLS を標準的な高さ以外の位置に追加的に設置して、可能な限り計測を実施し、計測の網羅性を確保する必要がある。この場合、未計測領域を完全に解消するための TLS の追加計測位置を逆算する必要がある。

- (2) 計測すべき空間が大きい場合、TLS 配置位置の間を効率的に移動できる計測順序がわからない。

第3章で提案したスキャナ配置計画アルゴリズムでは、作業者は導出されたスキャナの配置位置に、どのような順序でスキャナを設置してもよく、スキャナの設置順序に計測率は依存しない。したがって、計測順序は作業者に委ねられている。また実務でのスキャナ計測は、現場での作業時間が限られていることが多く、

なるべく効率的に計測する必要がある。しかし、大規模なプラント設備などのように数百 m にもわたる大規模な測定対象においては、計測経験のない作業者の場合、スキャナ設置位置が提示されていても、迷うことなく効率的に計測するのは困難である。さらに、計測作業時の TLS 配置位置間の移動時間の割合も無視できない。そのため、計測経験のない作業者でも迷うことなく、効率的な計測を行うために、TLS 配置位置間の総移動距離が最短となる計測順序を作業者に提示する必要もある。

(3) TLS 配置計画においてレジストレーションのための点群間重複を考慮していない。

第 3 章におけるメッシュモデル表現を用いた整数計画法による最適スキャナ配置計画アルゴリズムは、レジストレーションのための点群間重複の制約を考慮していない。地上型レーザスキャナは一箇所ですべて計測できる範囲が広いこと、屋内の空調設備のような環境においては、点群間重複を考慮しなくても、結果的にこの条件を満たしていることがほとんどである。しかし、空港ターミナルのような大規模な計測空間の場合、計測必要箇所の位置関係によっては、点群間の重複条件を満たさない計測位置が最適計画として求められてしまうことがある。

そこで、本章では、これらの問題を解決するため、上記の課題 (1)~(3) に対し、それぞれ以下の 1)~3) ように最適スキャナ配置アルゴリズムの拡張を行い、その有効性を計算機シミュレーションにより検討することを目的とする。

- 1) 未計測となる面分を抽出し、未計測面分が計測可能な計測候補点を 3 次元的に探索し、未計測面分の全てが最小計測回数で計測可能となるスキャナ計測配置を導出する問題を整数計画問題として定式化し、最適解を求解する。
- 2) 導出された最適スキャナ設置位置を各都市とする巡回セールスマン問題として定式化し、スキャナ設置位置を巡回できる最短経路を探索する。
- 3) スキャナ配置の整数計画問題において、点群の平面領域間の重複を目的関数に組み込んだ問題への拡張を行う。

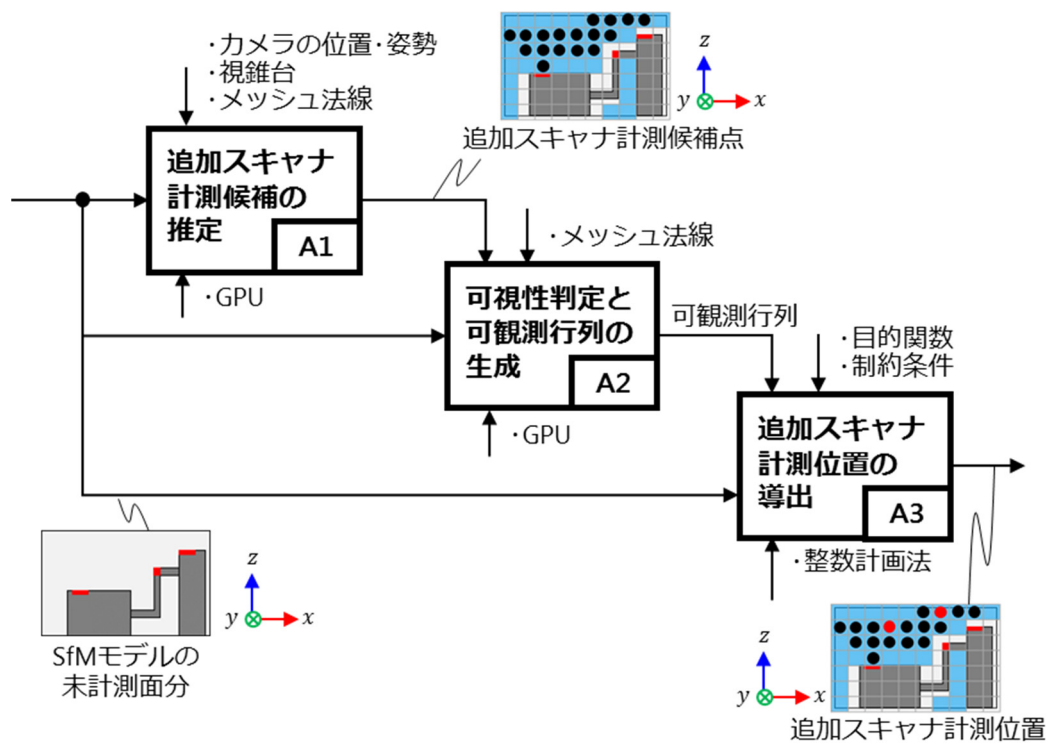


図 4.1 未計測領域のための追加スキャナ計測位置推定手法の概要

4.2 未計測領域を防止する追加スキャナ計測位置推定アルゴリズム

4.2.1 提案手法の概要

4.2 節で提案する未計測領域のための追加スキャナ計測位置推定手法の概要を図 4.1 に示す。この追加スキャナ計測位置推定手法は、初期配置候補点に設置したスキャナからでは解消できない未計測領域を解消するための追加計測位置を推定することを目的とする。本提案手法は、主に 3 ステップで構成されている。

Step 1 追加スキャナ計測候補の推定 (A1)

3 章で導出された最適スキャナ配置からでは計測できなかった『重要度：高』の面分を計測するために、SfM モデルから未計測の面分を抽出する。その後、各面分の法線ベクトルに基づき、面分が計測可能な *free* ボクセルの中心位置を面分側から探索し、追加スキャナ計測候補点として推定する。

Step 2 可視性判定と可観測行列の生成 (A2)

次に、Step 1 で推定した追加スキャナ計測候補点から、各候補点を画像中心とする展開画像を生成し、GPU を用いて未計測面分の可視性判定を行う。その後、Step 3 の最適化問題の計算の際に利用する各面分が入射角、計測距離、可視性の制約条件を満たすか否かを判定した情報をもつ可観測行列を生成する。

Step 3 追加スキャナ計測位置の導出 (A3)

最後に、追加スキャナ計測配置問題を整数計画問題のクラスに定式化する。そして、Step 2 で生成した可観測行列をパラメータとして与え、最適化問題を数理解法により求解することで、最小スキャン回数で未計測面分を全て計測可能となる最適な追加スキャナ計測位置を導出する。また、追加スキャナ計測位置は、床面からの高さが 2m 以上の高所が選出されることも少なくない。安全面や作業効率の観点から、床面からの高さなるべく低い位置から計測したほうがよい。そこで、目的関数として、導出された追加スキャナ計測位置の z 座標ができるだけ低い値になるように定式化した。

4.2.2 定式化

本項における追加スキャナ計測位置を推定する問題を 3 章と同様に式(4.1)に示すような 0-1 整数計画問題に定式化した。

$$\left| \begin{array}{l} \underset{z_{v_s}}{\text{minimize}} \\ \text{subject to} \end{array} \right. \begin{array}{l} \sum_{v_s \in V_{\text{scanner}}} z_{v_s} (1 + \alpha h_{v_s}) \\ \sum_{v_s \in V_{\text{scanner}}} b_{v_s, f_u} z_{v_s} \geq 1 \quad (f_u \in F_{\text{unmeasure}}) \\ z_{v_s} \in \{0, 1\} \quad (v_s \in V_{\text{scanner}}) \end{array} \quad (4.1)$$

ここで、

【集合】

V_{scanner} : 追加スキャナ計測候補点の集合

$F_{\text{unmeasure}}$: SfM モデルを構成する『重要度：高』の未計測面分の集合

【変数】

$$z_{v_s} := \begin{cases} 0, & \text{追加スキャナ計測候補点 } v_s \text{ に TLS を配置しない} \\ 1, & \text{追加スキャナ計測候補点 } v_s \text{ に TLS を配置する} \end{cases}$$

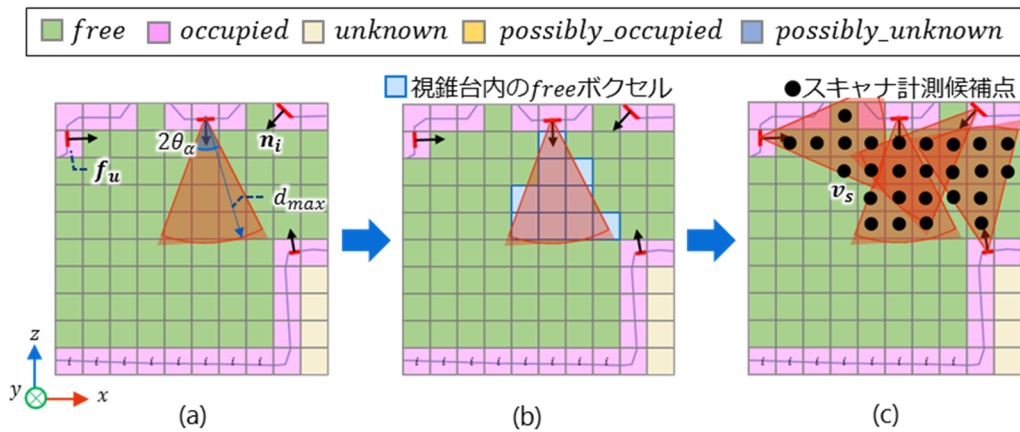


図 4.2 追加スキャナ計測候補の推定

【パラメータ】

$$b_{v_s, f_u} := \begin{cases} 0, & v_s \text{ から } f_u \text{ が観測不可} \\ 1, & v_s \text{ から } f_u \text{ が可観測} \end{cases}$$

h_{v_s} = 追加スキャナ計測候補点 v_s の z 座標

式(4.1)の目的関数は、追加スキャナ設置箇所数と選択される候補点の z 座標の合計値の最小化を表している。これにより、選択される候補点になるべく低くなるような配置が得られる。係数 α は選択される候補点の z 座標の合計値が 0.0~0.5 程度になるように設定する。制約条件の第 1 式は、未計測の面分を必ず 1 回以上は計測することを表している。

4.2.3 追加スキャナ計測位置候補の推定

床面から一定高さ h_{emit} に分布したスキャナ設置候補点からでは、計測できなかった面分が未計測面分となる。この未計測面分が計測可能な領域を *free* ボクセルの中から推定する。この追加スキャナ配置の候補位置を推定するためには、未計測面分側から追加スキャナ計測候補位置の探索を行う。その探索は、以下の手順で行われる。

- (1) はじめに、図 4.2 (a)に示すように、3.5.2 項で定義した制約条件に基づき、未計測面分 f_u に対して f_u の重心点を視点、物体の外向き単位法線ベクトル \mathbf{n}_i を軸方向中心、垂直および水平方向の視野角を θ_α 、*near* 平面を d_{min} 、*far* 平面を d_{max} とする視錐台を定義する。ここで、本来なら、面分 f_u が計測可能となる領域は、重心点を中心として半径 d_{max} の球面で視野角が $2\theta_\alpha$ となる錐体となるが、錐体内のボクセルを取得する計算の簡単化のために視錐台に近似した。

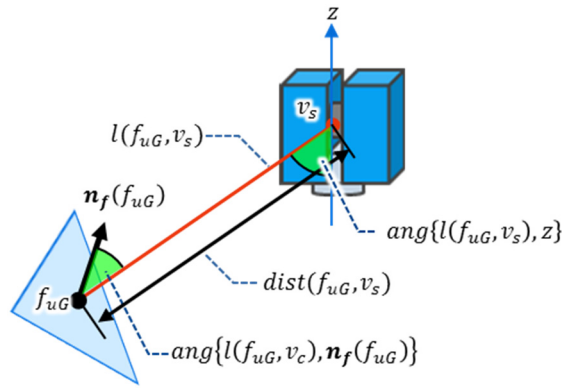


図 4.3 未計測面分の計測品質条件の検査

- (2) つぎに，図 4.2(b)に示すように，視錐台内にボクセル重心点をもつ *free* もしくは *possibly_occupied* ボクセルに投票する．
- (3) (2)の処理を全未計測面に対して実行し，1 票以上投票されたボクセルの重心点を追加スキャナ計測候補点 $v_s \in V_{scanner}$ として抽出する．

4.2.4 可視性判定と可観測行列の生成

4.2.2 項の定式化で記述した式(4.1)の中には，スキャナ位置 v_s からの面分 f_u の可観測性を表すパラメータ b_{v_s, f_u} があるが，これらの値は最適化計算前に事前計算しておく必要がある．そこで，追加スキャナ計測候補点に置かれたスキャナから SfM モデル上の未計測面分 f_u が『可観測』か『観測不可』が以下に示す要素 b_{v_s, f_u} に記載された可観測行列 $B = \{b_{v_s, f_u}\}$ を事前に生成する．

$$b_{v_s, f_u} := \begin{cases} 0, & \text{追加スキャナ計測候補点 } v_s \text{ から未計測面分 } f_u \text{ が観測不可} \\ 1, & \text{追加スキャナ計測候補点 } v_s \text{ から未計測面分 } f_u \text{ が可観測} \end{cases}$$

ここで，『可観測』とは，追加スキャナ計測候補点 v_s から未計測面分 f_u が可視で計測品質条件を満たすことである．一方，『観測不可』とは， v_s から f_u が不可視もしくは可視であっても計測品質条件を満たさないことである．

可視性判定と可観測行列の生成は，3.4.5 項と同様の以下の手順で行う．

- (1) はじめに，3.4.4.1 目で固有の RGB 値を付与した SfM モデルの各面分に対し，SfM モデルの頂点座標を式(3.6)により，3 次元直交座標系表現から各追加スキャナ計測候補点 v_s をスキャナ原点(0,0,0)とする 3 次元極座標系表現に変換する．
- (2) 次に，画像横方向および縦方向を，それぞれスキャナ方位角 $\varphi (0 \leq \varphi < 2\pi)$ ，仰

角 $\theta(-0.5\pi \leq \theta \leq 0.5\pi)$ とした展開画像上で, SfM モデルの全三角形面分をレンダリングする.

- (3) その後, 可観測行列 B の全要素を 0 に初期化する.
- (4) 3.4.4.3 目と同様の手順により, レンダリングしたパノラマ展開画像の各画素に対して RGB 値を検査する. そして, 未計測面分に対応する RGB 値が検出されたら, その未計測面分を『可視』となる面分として抽出する.
- (5) 次に, 抽出した面分が計測品質を満たすか否かを判定する. そこで, 図 4.3 図 3.10 に示すように, 抽出した面分のみに対して, スキャナの視野角および入射角と計測距離を検査する. そして, 式(4.2), (4.3), (4.4)の3つの条件を満たす場合, その追加スキャナ計測候補点 v_s と未計測面分 f_u の組み合わせからなる可観測行列 B の要素 b_{v_s, f_u} を $b_{v_s, f_u} = 1$ に更新する.

$$\text{ang}\{l(f_{uG}, v_s), z\} < \theta_{th} \quad (4.2)$$

$$\text{ang}\{l(f_{uG}, v_s), \mathbf{n}_f(f_{uG})\} < \theta_\alpha \quad (4.3)$$

$$d_{min} < \text{dist}(f_{uG}, v_s) \leq d_{max} \quad (4.4)$$

ここで, $l(f_{uG}, v_s)$ は f_{uG} と v_s を結ぶ線分で, $\mathbf{n}_f(f_{uG})$ は f_{uG} の法線ベクトルである. そして, $\text{dist}(f_{uG}, v_s)$ は v_s から f_{uG} までの距離である.

- (6) この処理を全追加スキャナ計測候補点に対して実行することにより, 可観測行列 B の全要素の値を計算し, 可観測行列 B を生成することができる.

4.2.5 追加スキャナ計測位置の導出

最後に, 整数計画法により, 4.2.2 項の式(4.1)で定式化した追加スキャナ計測配置における 0-1 整数計画問題の最適解を求解する. ソルバには, 3 章と同様に Numerical Optimizer[31]を用い, 求解アルゴリズムには分枝限定法を用いた. そして, 得られた解において, $z_{v_s} = 1$ となった追加スキャナ計測候補点 v_s を最適な追加スキャナ計測位置の組み合わせ 3 章で導出した最適スキャナ設置位置の組み合わせ Z_{opt} に追加する.

4.2.6 追加スキャナ計測配置の導出結果

4.2.6.1 計測対象および未計測面分

本項では, 前章で扱ったボイラ室および熱源機械室を計測対象とする. また, 前章

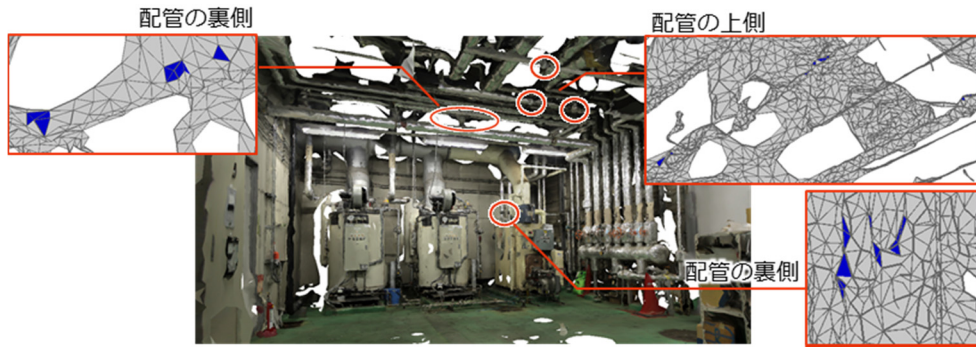


図 4.4 『重要度:高』の未計測面分の分布 (ボイラ室)

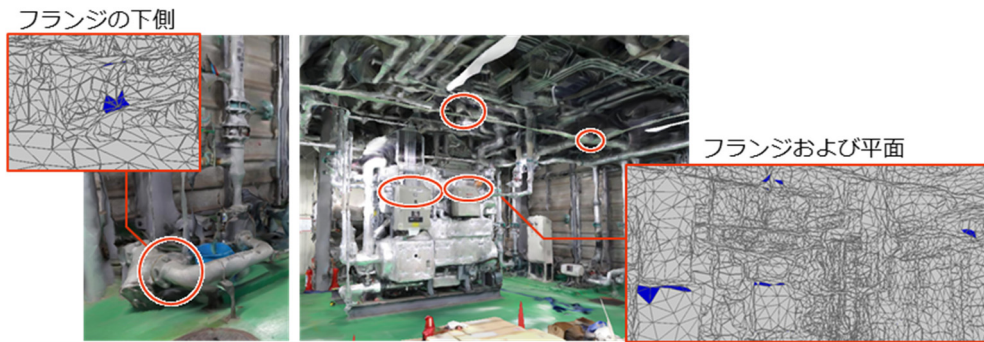


図 4.5 『重要度:高』の未計測面分の分布 (熱源機械室)

の最適スキャナ配置からの計測で未計測となった『重要度：高』に分類される面分の分布は、図 4.4, 図 4.5 に示すように、スキャナ設置候補点からでは計測できなかった、配管の裏側、天井面に敷設された配管の上側、ボックスの上面に存在している。

4.2.6.2 スキャナパラメータおよび制約条件閾値の設定

スキャナパラメータと制約条件については、表 3.2 と同じ値を使用した。ただし、追加スキャナ計測位置は、未計測面分の位置により床面からの高さが異なるため、スキャナ設置高さ h_{emit} は設定していない。また、制約条件の閾値は、追加スキャナ計測位置の導出 (A3) で使用し、表 3.3 と同じ値に設定した。また、ボクセル幅は 0.3m に設定した。式(4.1)の係数は $\alpha = 0.01$ に設定した。

4.2.6.3 追加スキャナ計測配置結果

4.2.2.1 目の未計測面分と 4.2.2.2 目の各種パラメータに基づいて、提案手法により追加スキャナ計測配置を導出する。計測対象となる未計測面分数および、追加スキャナ計測候補点数は、表 4.1 のようになっている。

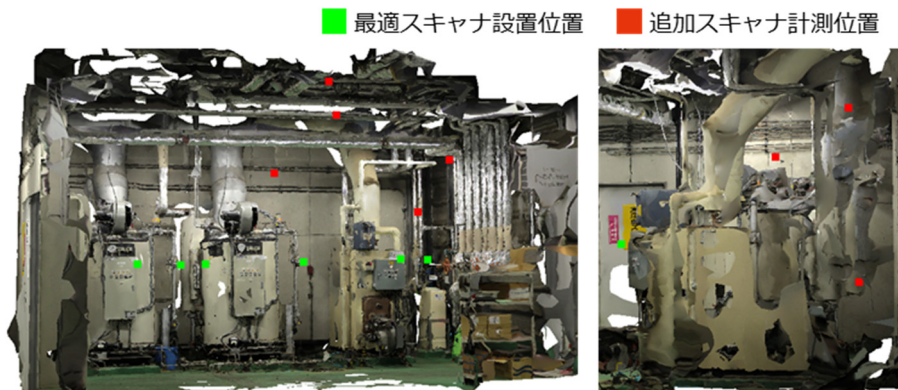


図 4.6 ボイラ室における追加スキャナ計測配置結果

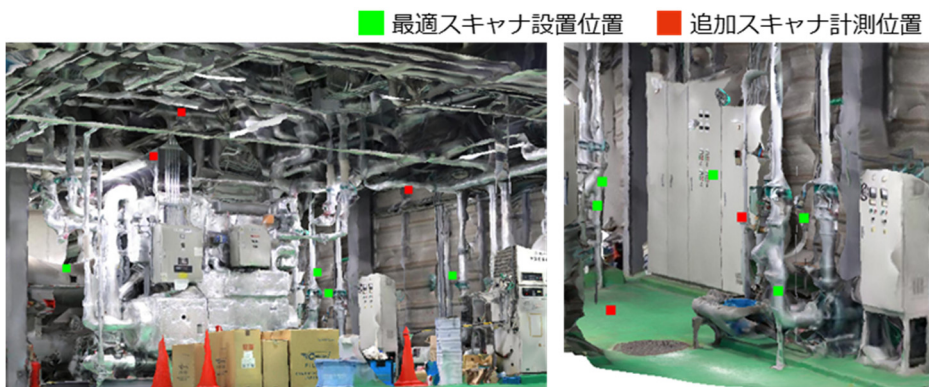


図 4.7 熱源機械室における追加スキャナ計測配置結果

表 4.1 未計測面分数と追加スキャナ計測候補点数

	ボイラ室	熱源機械室
未計測面分数	52 (面分数：431)	48 (面分数：421)
追加スキャナ計測候補点数	979	2,258

そして、最小のスキャン回数で『重要度：高』に分類された未計測面分を全て計測可能な追加スキャナ計測配置を式(4.1)に示す最適化問題の解として導出した。各計測対象室の最適スキャナ配置結果を、それぞれ図 4.6 と図 4.7 に示す。SfM モデル内に分布している黄緑色の点は 3 章で導出した『重要度：高』に分類された計測可能な面分数を最大にするスキャナ配置点となっており、赤色の点が今回の提案手法で導出した追加スキャナ計測配置点である。追加されたスキャナ計測箇所数はそれぞれの表 4.2 ようになっている。

表 4.2 追加スキャナ計測箇所数

	ボイラ室	熱源機械室
追加スキャナ計測箇所数	6 箇所	5 箇所

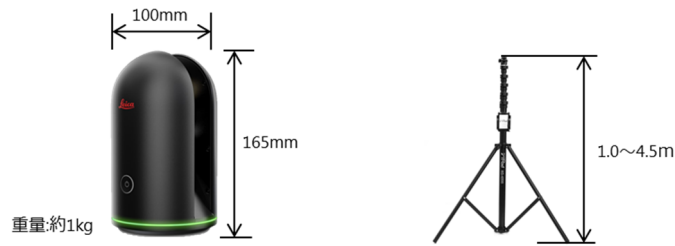


図 4.8 小型 3D レーザスキャナおよび高所用の三脚

これによると、ボイラ室においては、図 4.6 に示すように、スキャナ設置候補点には無かったボイラの裏側に追加スキャナ計測点が 3 箇所導出され、残りの 3 箇所は、天井面付近の配管を計測するために、床面からの高さ約 3.6m や 2.6m 付近から計測するような追加スキャナ計測点が導出された。一方、熱源機械室においては、天井面付近やボックス上面を計測するために、図 4.7 左図のように、床面から高さ約 4.0m や 2.9m 付近から計測するような追加スキャナ計測点のほかに、図 4.7 右図のように、高さ約 0.17m から計測する追加スキャナ計測点が導出された。これらの追加スキャナ計測により、『重要度：高』の計測率は、両方とも 100% になった。

また、式(4.1)の目的関数に高さを最小化する項を入れたことによるスキャナ配置位置の相違を表 4.3 に示す。

表 4.3 高さの最小化を考慮したことによるスキャナ配置位置の違い（ボイラ室および熱源機械室）

	導出された追加スキャナ計測位置の 3 次元座標			
	ボイラ室		熱源機械室	
	高さ最小化を考慮しない場合	高さ最小化を考慮した場合	高さ最小化を考慮しない場合	高さ最小化を考慮した場合
1	(-0.62, 1.95, 1.20)	(-1.52, 1.35, 0.90)	(0.22, -1.10, 2.88)	(0.22, -1.10, 2.88)
2	(0.58, -3.15, 3.00)	(0.58, -3.15, 3.00)	(2.02, 1.60, 4.08)	(2.02, 1.60, 4.08)
3	(0.88, -1.65, 3.90)	(0.88, -1.65, 3.60)	(2.62, -3.80, 2.88)	(2.32, -3.50, 2.28)
4	(0.88, 1.65, 2.70)	(0.88, 1.65, 2.70)	(4.12, 2.20, 2.88)	(5.02, 3.40, 1.08)
5	(2.68, -4.35, 2.40)	(1.48, -4.35, 2.40)	(4.12, 4.30, 0.18)	(4.12, 4.30, 0.18)
6	(3.28, 1.35, 2.10)	(2.98, 1.35, 2.10)	-	-

これによると、高さの最小化を考慮した場合は、赤字で示すように、ボイラ室の場合は 6 箇所中 2 箇所、熱源機械室の場合は 5 箇所中 2 箇所、考慮しない場合と比較してより低い候補点を選出されていることが分かる。追加スキャナ計測を実施する場合、高所や狭隘部に計測器を設置することになる。床面上からの計測で使用していた TLS

は、重量が 9.8kg、本体サイズが幅 170mm×奥行 286mm×高さ 395mm となっており、重量物であるため、このような高所に TLS を三脚で持ち上げて設置することは困難であるため、より小型の計測器を用いなければならない。例えば、小型のスキャナについては、図 4.8 左図に示すようなスキャナ[33]が近年販売されており、当社においても使用している。また、高所の計測においても図 4.8 右図のようなカメラ用の三脚も販売されている。選定された追加スキャナ計測位置にこのような計測器および三脚を用いてアプローチすることにより、高所および狭隘部における計測も可能となる。

また、各処理における計算時間を表 4.4 に示す。使用した計算機は CPU: Corei7-4810MQ2.80GHz, GPU: NVIDIA QuadroK2100M である。

表 4.4 追加スキャナ計測位置の計算時間（ボイラ室および熱源機械室）

処理工程	計算時間[s]	
	ボイラ室	熱源機械室
追加スキャナ計測候補の推定	0.05	0.08
可視性判定と可観測行列の生成	169.8	575.8
追加スキャナ計測位置の導出	0.2	1.4
合計	170.1	577.3

これによると、追加スキャナ候補点数がそれぞれ、979 箇所と 2,258 箇所となっており、可視性判定の処理時間が多くなっていることが分かる。しかし、計算時間はそれぞれ、約 2.8 分と約 9.6 分のため、現場でのスキャナによる追加計測の計画立案には、実用的な時間で計算できていることが分かる。

以上の結果により、提案する未計測領域のための追加スキャナ計測位置推定手法は、最適スキャナ配置計画手法では、計測しきれなかった未計測面分に対し、計測品質を満たし、最小スキャン回数で計測可能な追加スキャナ計測位置を導出することができ、計測に必要な箇所を高品質に計測漏れなく計測することが可能となり、実務における「必要箇所の網羅的計測」という課題を解決するのに有効であると言える。

今回提案した手法は、3 章で導出した最適スキャナ配置に追加することにより、未計測面分を解消している。そのため、追加スキャナ位置を導出したことにより、3 章で導出したスキャナ設置位置が不要になる可能性もある。この解決方法としては、追加スキャナ計測位置を導出した後、その位置から未計測となる面分を必ず 1 回以上計測可能でスキャン回数を最小にする最適化問題を解くことにより、追加スキャナ計測位置も含めてスキャン回数が最小となる設置位置を導出することができると思われる。

また、第 3 章において、本節での提案手法のように計測対象面分側から、その面分

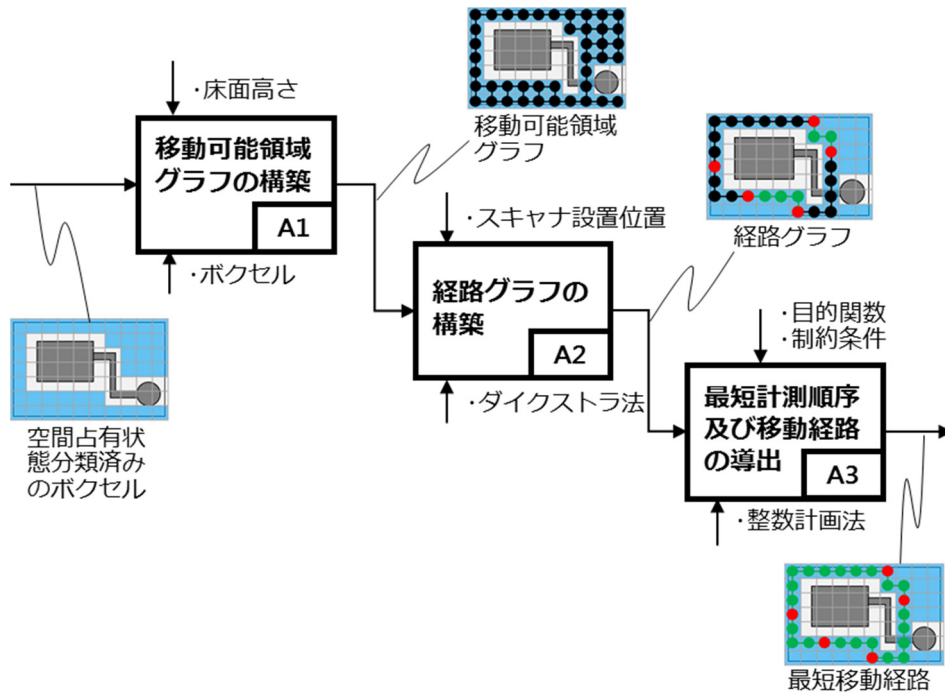


図 4.9 最短計測順序および移動経路の導出手法の概要

を計測可能なスキャナ設置位置を逆方向探索で求めていくことも可能である。しかし、可視性判定のための GPU のレンダリングの必要画像生成回数を考えた場合、設置候補点数よりも計測必要面分数はかなり多くなるため、処理時間の問題で、3 章では、設置候補点から計測可能な面分を探す順方向探索を行っている。

4.3 最短計測順序および移動経路導出アルゴリズム

4.3.1 提案手法の概要

4.3 節で提案する最短計測順序および最短移動ルートの導出手法の概要を図 4.9 に示す。この最短計測順序および最短移動ルートの推定手法は、第 2, 3 章で導出された最適スキャナ設置位置において、スキャナ設置位置間の総移動距離が最短となる計測順序を推定することを目的とする。

本提案手法は、主に 3 ステップで構成されている。

Step 1 移動可能領域グラフの構築

はじめに、SfM モデル内からオペレータが TLS 設置位置の間を移動する経路を導出するための補助表現として「移動可能領域グラフ」を構築する。2 箇所の TLS 設置位

置の間で直線的に移動しようとした場合、その移動が機器や配管等にブロックされる可能性があるため、節点間のユークリッド距離が最短経路長を与えるとは限らない。従って、経路グラフ上の節点間距離は、移動可能な領域内を通過する経路の最小長さとして与える必要がある。そのため、まず、2.3.3 項の空間占有状態を分類したボクセルの情報を再利用し、オペレータが移動可能な領域内にある移動可能ボクセルの重心を節点とし、隣接ボクセル間に節点間の辺を定義した無向グラフを構築する。

Step 2 経路候補グラフの構築

次に、2 章もしくは 3 章で導出したスキャナ設置位置において、2 点間の組み合わせを全て取り出し、ダイクストラ法により移動可能領域グラフにおける 2 点間の最短移動経路と距離コストを推定し、スキャナ設置位置を含むボクセルの重心を節点とし、推定した 2 点間の最短移動経路を辺、辺の属性として距離コストを付加した無向グラフとして「経路候補グラフ」を定義する。

STEP3 最短計測順序および移動経路の導出

最後に、移動経路問題を巡回セールスマン問題として定式化し、スキャナ設置位置と Step 2 で算出した 2 点間の距離コストをパラメータとして与え、全スキャナ設置位置を巡回するための移動経路の距離コストの合計値を最小化する経路を求める最適化問題を数理解法により求解することで、総移動距離が最小となる計測順序およびその移動経路を導出する。

4.3.2 定式化

実際の空調設備におけるスキャナ計測では、出発地点に機材等を仮置きして計測を開始する。そして、最終的に出発地点に戻り計測を終了する。そのため、本項におけるスキャナ計測のための移動経路を推定する問題は、式(4.5)のような、巡回セールスマン問題として定式化できる。

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 \text{minimize} \\
 \text{subject to}
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 \sum_{i \in V_{opt}} \sum_{j \in V_{opt}} dist_{i,j} x_{i,j} \\
 \sum_{j \in V_{opt}} x_{i,j} = 1 \quad (\forall i \in V_{opt}) \\
 \sum_{i \in V_{opt}} x_{i,j} = 1 \quad (\forall j \in V_{opt}) \\
 y_i - y_j + (n - 1)x_{i,j} \leq n - 2 \quad (\forall i, j \in V_{opt} \setminus \{1\}, i \neq j) \\
 x_{i,j} \in \{0,1\} \quad (\forall i, j \in V_{opt})
 \end{array} \quad (4.5)
 \end{array}$$

ここで,

【集合】

V_{opt} : 最適スキャナ設置位置の集合

【変数】

$$x_{i,j} := \begin{cases} 0, & \text{スキャナ設置位置 } i \text{ からスキャナ設置位置 } j \text{ に移動しない} \\ 1, & \text{スキャナ設置位置 } i \text{ からスキャナ設置位置 } j \text{ に移動する} \end{cases}$$

y_j := スキャナ設置位置 j を通る順番

【パラメータ】

n := 集合 V_{opt} の要素数

$dist_{i,j}$:= スキャナ設置位置 i とスキャナ設置位置 j の距離

式(4.5)の目的関数は、経路長の最小化を表している。制約条件の第 1,2 式は、それぞれ、スキャナ設置位置 i, j から別地点の 1 つに移動することを表している。第 3 式は、部分巡回路除去制約となっており、全てのスキャナ設置位置を通過しない経路を削除するための制約を表している。

4.3.3 移動可能領域グラフの構築

計測対象を含む SfM モデル内から移動可能な領域を抽出し、移動可能領域グラフを構築するために、2.3.3 項の空間占有状態を分類したボクセルの情報を利用し、2.3.5 項で抽出した床面ボクセルと 2.3.6 項のスキャナ設置候補点の推定の際のパラメータを人間サイズに置き換えることにより移動可能領域を抽出し、移動可能領域グラフを構築する。この移動可能領域グラフとは、床面ボクセルから以下に記す手順で抽出された移動可能ボクセルの重心が節点、隣接ボクセル間の節点間が辺とする無向グラフを表す。図 4.10 に示すように、ボクセルの重心を通る z 軸方向の単位ベクトルを回転軸とし、人間を包括する半径 r_{human} 、高さ h_{human} の円柱 C_{human} を考える。円柱 C_{human} の内部に含まれるボクセル集合 V_{human} が以下の条件を満たす場合、その床面ボクセルが移動可能ボクセルであるとみなす。

条件： オペレータが移動するための十分な床面積がある。すなわち、図 4.10 に示すように、 V_{human} に含まれるボクセルを z 軸方向に投影したとき、投影平

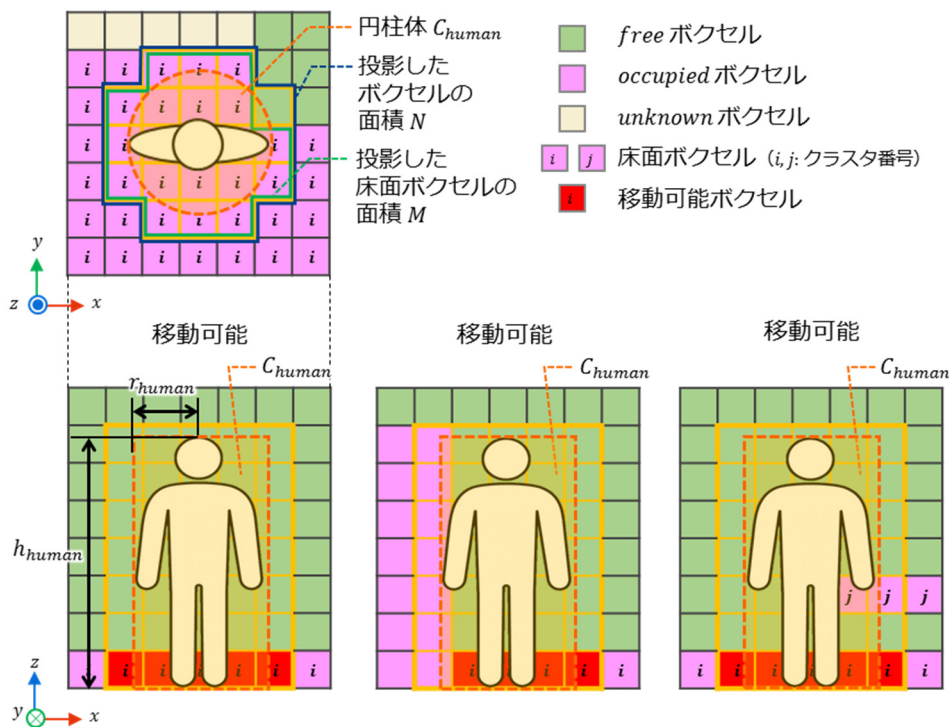


図 4.10 移動可能領域の推定

面において、式(4.6)のように、投影後のボクセルの全面積 N と投影後の床面ボクセル面積 M が閾値 τ_{place} 以上であることである。

$$M/N \geq \tau_{place} \quad (4.6)$$

ここで、本研究では $\tau_{place} = 0.80$ と設定した。

2.3.6 項では、円柱 C_{human} 内に床面以外の障害物が含まれてはいけなかったが、今回は移動可能であれば良いことを考慮して、図 4.10 の下図のような状況においても移動可能とした。

つぎに、移動可能領域グラフを構築するために、図 4.11 に示すように、移動可能ボクセルを 2 次元平面に投影し、AABB 内の 2 次元平面を移動可能ボクセルと移動不可能ボクセルに分類する。そして、移動可能ボクセルの重心を節点として設定する。その後、平面に投影したボクセル V を左下から走査し、注目ボクセル $V(k, l)$ が移動可能ボクセルの場合、4 近傍ボクセルの属性を確認し、移動可能ボクセルの場合、注目ボクセルの節点と接続する。この処理を投影平面の全ボクセルに対して実行し、図 4.11 に示すような移動可能領域グラフを構築する。

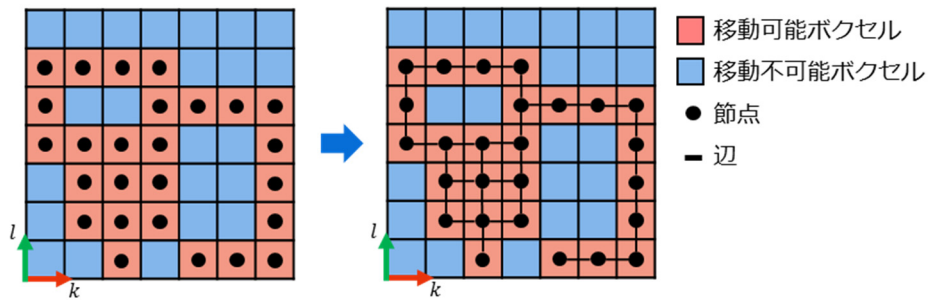


図 4.11 移動可能領域グラフの構築

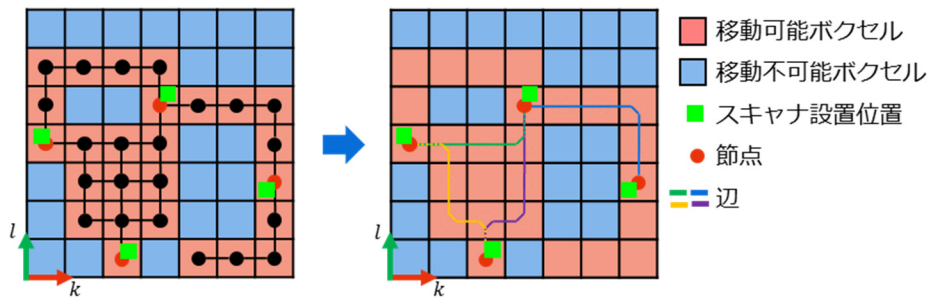


図 4.12 経路グラフの構築

4.3.4 経路候補グラフの算出

つぎに、経路グラフを構築する。この経路グラフとは、第2もしくは3章で導出したスキャナ設置位置を含むボクセルの重心を節点とし、以下に記す手順で推定した2点間の最短移動経路を辺、辺の属性として距離コストを付加した無向グラフとして「経路候補グラフ」を定義する。

はじめに、前章で導出したスキャナ設置位置を同じく2次元平面に投影する。その際、提案手法で得られたスキャナ位置は、ボクセルの重心点に位置しているため、節点と一致しているが、オペレータの場合は、図4.12のように、ボクセルの重心点と必ず一致するとは限らない。そこで、スキャナ設置位置に一番近い節点をスキャナ設置位置の節点とみなす。つぎに、全スキャナ設置位置から2点のスキャナ設置位置 i, j を取り出し、ダイクストラ法により2点間の最短経路およびその距離コストを算出する。距離コストは2点間の最短経路の辺数とした。これを全組み合わせ実行し、式(4.5)で定義したパラメータ $dist_{i,j}$ に距離コストを格納する。

4.3.5 最短移動経路の導出

最後に、整数計画法により、4.4.2項の式(4.5)に $dist_{i,j}$ およびスキャナ設置箇所数 n

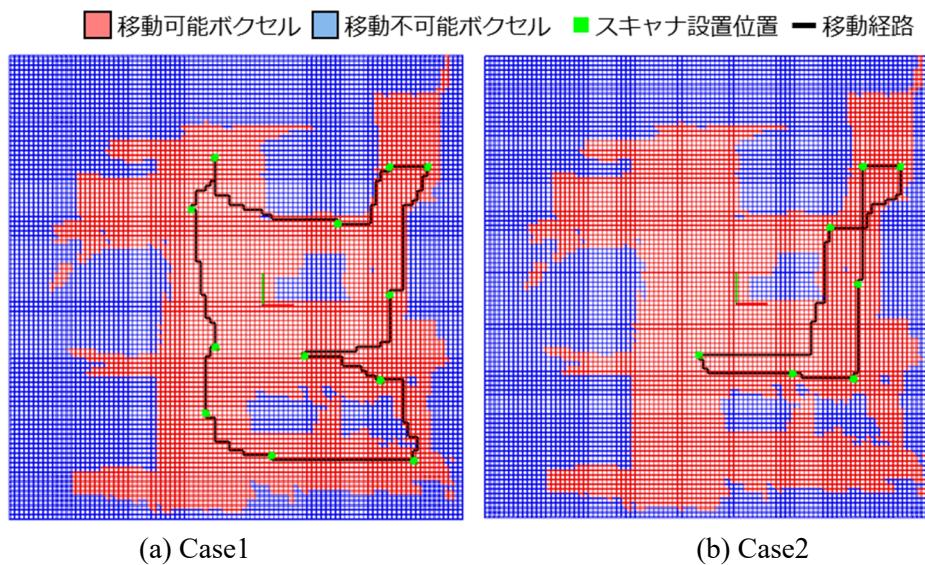


図 4.13 熱源機械室における最短移動経路の導出結果（上面図）

を代入し，最適解を求解する．ソルバには，Numerical Optimizer[31]を用い，求解アルゴリズムには分枝限定法を用いた．そして，最終的な解において，目的関数が最小となる距離コストになり， y_j ($1 \leq y_j \leq n$) に格納された値が計測する順序となる．

4.3.6 計測順序および最短移動経路の導出結果

4.3.6.1 導出対象および設定パラメータ

本項では，2章および3章で扱った熱源機械室を導出対象とし，2章のボクセルベースの貪欲法により導出したスキャナ設置箇所数は12箇所をCase1と定義する．3章のメッシュモデルベースの整数計画法により導出したスキャナ設置箇所数は7箇所をCase2と定義する．また，経路グラフを構築する際に使用する設定パラメータ表4.5に示す．

表 4.5 グラフ構築のパラメータの設定値

パラメータ	設定値
r_{human}	0.3m
h_{human}	1.6m
ボクセル幅	0.15m

表 4.6 最短移動経路の計算時間（熱源機械室）

処理工程	計算時間[s]	
	Case1	Case2
経路グラフの構築	309.3	309.3
各設置位置間の距離コストの算出	0.2	0.1
最短移動経路の導出	0.4	0.3
合計	309.9	309.7

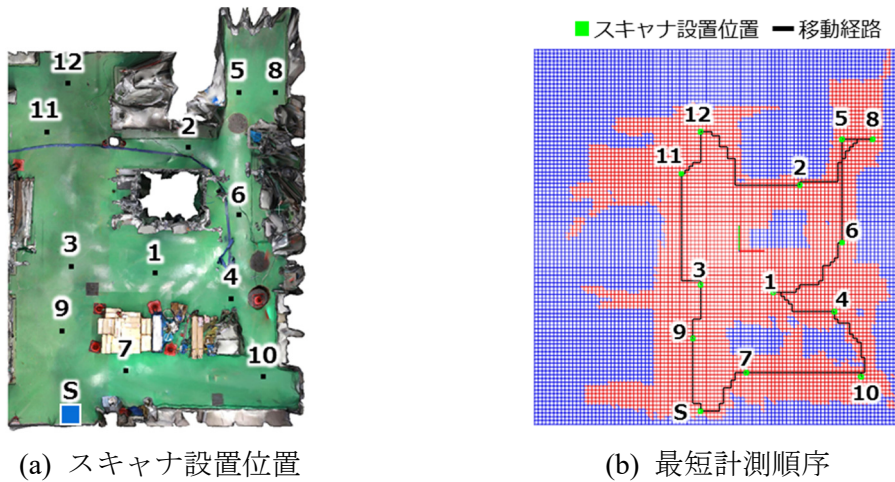


図 4.14 スキャナ設置位置と導出した最短計測順序（上面図）

4.3.6.2 計測順序および最短移動経路結果

はじめに、抽出された移動可能ボクセル数は 4399 個である。そして、提案手法により導出した最短移動経路結果を図 4.13 に示す。これによると、Case1, Case2 ともに移動可能ボクセル上を移動して最短移動経路が導出されていることが分かる。本提案手法を用いることにより、最短の巡回ルートが導出されるため、任意の開始地点から巡回ルートにある順に計測していくことにより、スタート地点に戻るまでの最短移動距離での計測が可能となる。また、各処理ステップにおける計算時間を表 4.6 に示す。これによると、経路グラフの構築に 5 分程度かかるが、距離コストの算出および最短移動経路は 1 秒以下で計算可能となった。

4.3.6.3 最短計測順序の効果検証

つぎに、最短計測順序の効果を検証するために、計測経験のない対象者数名および熟練オペレータが選んだ計測順序との差異を比較する。実験手順を以下に示す。

はじめに、図 4.14(a)に示すように、熱源機械室を対象として、本節で提案した最短経路順序導出手法により 12 箇所を計測するための最短計測順序を導出する。その際、この熱源機械室は左下が出入り口となっているため、この位置をスタート地点 S としてスタート地点 S に戻るまでの巡回経路を導出する。その結果を図 4.14(b)に示す。

つぎに、計測経験のない対象者 6 名および熟練オペレータ 1 名に、位置 S をスタート地点とし、提示された 12 箇所の全て計測し、スタート地点に戻るまでの計測順序を検討してもらった。選出された計測順序および移動距離、移動時間の結果を表 4.7 に示す。

表 4.7 提案手法および作業による計測順序および移動距離、移動時間の違い

	計測順序	移動距離	移動時間
提案手法	S→9→3→11→12→2→8→5→6→1→4→10→7→S	48.6 m	36.0 s
対象者 A	S→9→3→11→12→2→5→8→6→1→4→10→7→S	56.4 m	41.8 s
対象者 B	S→12→11→2→5→8→6→4→10→7→9→3→1→S	56.4 m	41.8 s
対象者 C	S→1→3→9→7→10→4→6→8→5→2→11→12→S	48.6 m	36.0 s
対象者 D	S→7→10→4→1→6→8→5→2→12→11→3→9→S	54.0 m	40.0 s
対象者 E	S→7→9→3→1→4→10→6→8→5→2→11→12→S	48.6 m	36.0 s
対象者 F	S→5→8→2→12→11→9→3→1→6→4→10→7→S	69.3 m	51.3 s
熟練作業	S→9→3→11→12→2→5→8→6→1→4→10→7→S	48.6 m	36.0 s

ここで、2 点間の移動距離は、4.3.4 項で算出した 2 点間の距離コストにボクセル幅を掛けて算出した。また、移動速度は一般的な移動速度である分速 80m とした。

これによると、提案手法と熟練作業者の計測順序は同じになった。一方、計測経験のない対象者は、それぞれ計測順序が異なる結果となった。提案手法の移動距離は 48.6m に対し、対象者の平均値は 55.6m、最大値は 69.3m となり、それぞれ提案手法に対して 1.14%、1.43%増加した。また、移動時間も同様に提案手法に対し、平均 1.15%、最大 1.43%増加した。今回対象とした約 120m² の熱源機械室において、計測時間が 1 箇所につき 7 min とした場合、計測時間と移動時間の合計である作業時間に対する移動時間が占める割合は、提案手法の場合でも 0.71%程度のため、計測順序の違いによる影響はあまり出ない。

一方、屋外プラントのような大規模環境の計測では、過去の計測実績によると、平均計測面積：8,817 m²、平均スキャン回数：107 回、平均作業時間：19.8 h である。ここから計測時間、移動時間を算出すると、平均計測時間は、12.5 h で平均移動時間は 7.3 h となる。ここで同じく計測経験のない作業者の移動時間が 1.43%増加すると仮定

した場合、移動時間は 6.3min 増加する。しかし、実際は計測対象の規模が大きくなり、スキャナ設置箇所数の増加に伴い、最短経路を選択することは困難になる。そのため、最短経路との差異は確実に増加し、これ以上の差が生じる。

スキャナ計測業務において、発注者側は移動時間の差は考慮に入れないで費用を支払うため、受注側は出来るだけ短い経路にすることが望ましい。また、計測経験のない作業者を対象とした場合、最短となる計測順序が一意に決まることで、作業者は迷うことなく効率的な計測できるため、とても有効である。

以上の結果により、提案する計測順序および最短移動経路導出手法は、作業者が移動可能な領域を自動で抽出し、整数計画法により得られた最適スキャナ配置の組み合わせから巡回経路が最短になるようなスキャナ計測順序を導出することができた。これにより、大規模な都市の熱源プラント施設や空港ターミナルビル等の大規模な屋内環境の空調設備の計測など、計測箇所数が膨大になる環境においても効率的な計測が可能になり、スキャナ計測経験のない作業者でも本提案手法の計画に従い簡単かつ効率的に計測作業を行うことができる。

4.4 レジストレーションのためのオーバーラップを考慮したスキャナ配置計画アルゴリズム

4.4.1 提案手法の概要

4.4 節で提案するレジストレーションのためのオーバーラップを考慮したスキャナ配置計画手法の概要を図 4.15 に示す。このスキャナ計測位置推定手法は、計測可能な面分数を最大にしつつ、レジストレーション可能なペアを最大にするスキャナ設置位置を推定することを目的とする。

空調設備を TLS で計測した点群同士のレジストレーションは、計測点群の複数の平面領域との対応により行っている。そのため、レジストレーションの信頼性を確保するために、平面領域間の重複を考慮したスキャナ配置問題に拡張する必要がある。従って本来は、主成分分析により SfM モデルの一定面積以上の平面領域を自動で抽出し、その平面についてのオーバーラップを考えるべきであるが、今回は簡単のために手動で任意の平面領域を選択し、その平面領域のオーバーラップを考える。

本提案手法は、主に以下の 3 ステップで構成されている。

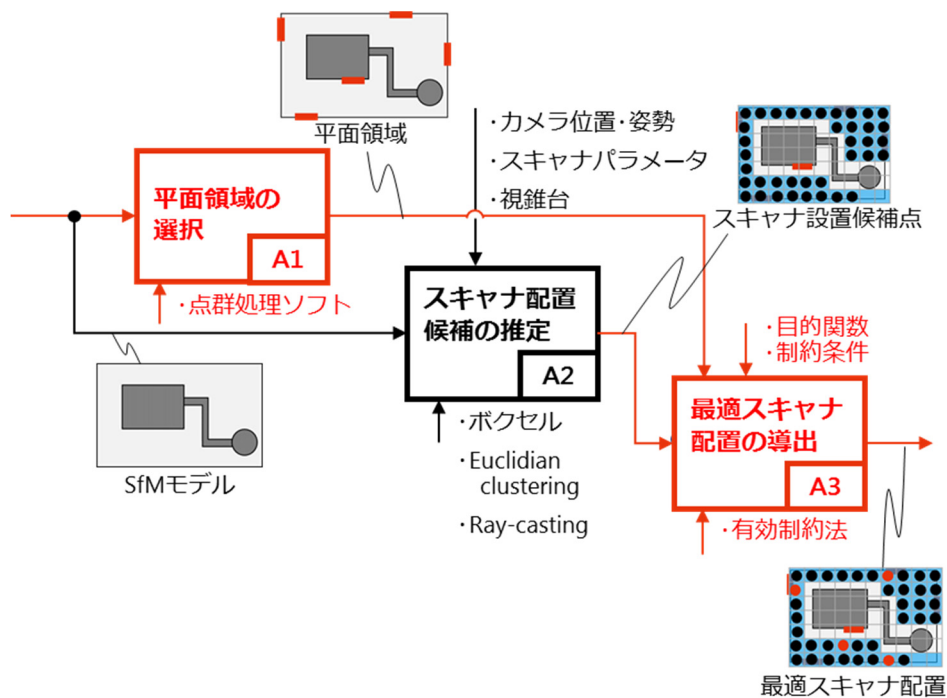


図 4.15 オーバーラップを考慮した最適スキャナ配置計画手法の概要

Step 1 平面領域の選択

SfM モデル（点群）に対して、ユーザが対話的に平面領域を選択し、SfM モデルを構成する三角形面分に平面領域の情報を付与する。

Step 2 レジストレーションスコアの算出

次に、3章と同様に、Step 1 で構築した SfM モデルに基づいて、SfM モデルを含む空間内でスキャナを設置可能な領域を推定する。その際、前章と同様にボクセルを用いる。計測対象を含む計測空間をボクセルに分割し、Step 1 で推定した各カメラの位置からレイキャスティングを実行し、各ボクセルの空間占有状態を分類する。そして、空間占有状態に基づいて、SfM モデルの法線情報とユークリディアンクラスタリングにより、スキャナが設置可能な床面領域を抽出し、床面領域上でスキャナを設置した場合にスキャナと SfM モデルが干渉しない空間を探索し、スキャナ設置候補点として推定する。

Step 3 最適スキャナ配置の導出

次に、オーバーラップを考慮したスキャナ配置問題を定式化する。そして、Step 2 で推定されたスキャナ設置候補点から、各面分に対して入射角、計測距離、可視性の制約条件を満たすか否かを判定したパラメータおよび共通する平面領域が計測可能か否

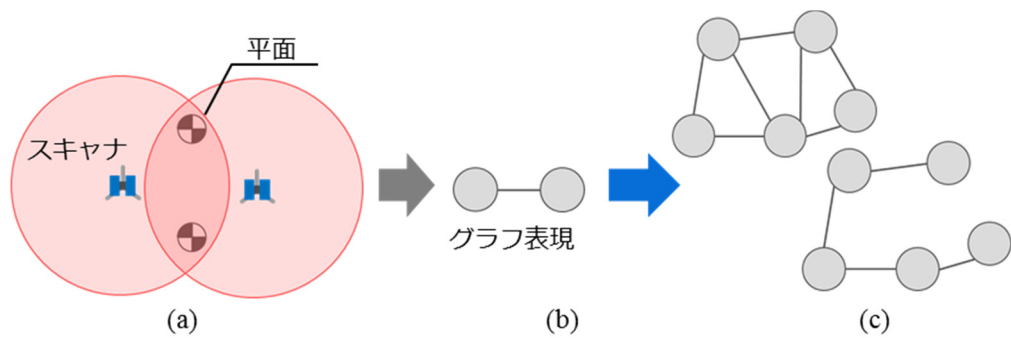


図 4.16 レジストレーションが可能な条件

かを判定したパラメータを与え、最適化問題を有効制約法により求解することで、観測可能となる面分数および共通する平面領域を最大化する最適なスキャナ配置を導出する。

本章では、3章から拡張した点である Step 1 および Step 3 について説明する。

4.4.2 平面領域の選択

本項では3章と同様に、SfMモデルをメッシュモデルで表現するため、SfMモデルを構成する各三角形面分へユーザが選択した平面領域の情報を付与する必要がある。

はじめに、SfMモデル表面に生成させた点群に対し、平面領域に設定したい領域の3次元空間座標を対話的に指定することで分類をした。次に、3.3.1項の処理と同様に、各三角形面分 f における重心点 f_G を中心として、面分の外接球を定義する。 f_G をクエリ点として、内接球の半径 r_G 内にある点群を探索する。その後、探索した点群において、平面領域の点群が1つでも入っていれば、三角形平面の属性を平面 $p(f) = plane$ に分類する。その後、複数箇所選択した平面領域に対して、平面領域を構成する各三角形面分の重心点集合に対してユークリディアンクラスタリングを行い、面分に平面ごとに平面IDとして属性を付与する。

4.4.3 最適スキャナ配置の導出

4.4.3.1 レジストレーションが可能な条件

本項では、まず平面を用いたレジストレーションを考える。複数箇所からのレーザー計測点群をレジストレーションする場合、図4.16(a)に示すように、異なる2箇所間においては、共通する2個以上の平行関係にない平面が可視となる必要がある。ここで、レーザースキャナはz軸方向を自動で補正し水平を保つため、z軸まわりの回転のみを

考えればよいと、2 個あれば位置を決定できる。この表現を図 4.16 (b)に示すようなスキャナ設置位置を節点、レジストレーションが可能なスキャナ設置位置間を辺とするグラフにすると、複数箇所から取得したレーザ計測点群をレジストレーションするためには、図 4.16 (c)に示すように、どの節点も他の節点と辺で繋がっている必要がある。また、位置合わせに寄与する平面上の点の数が増えることにより、自由度の拘束条件がより多くなり、精密レジストレーション精度が向上するため、より多くの平面が共通しているほうが良い。このターゲットを平面領域に置き換えることにより、同様の考え方でレジストレーションが可能である。

本論文では、まず図 4.16 (a)に示す異なる 2 箇所間のレジストレーションのみを考慮したスキャナ配置を検討した。

4.4.3.2 定式化

本章では、レジストレーションを考慮したスキャナ配置問題を式(4.7)のように定式化した。

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 \text{maximize}_{x_f, z_i} \quad \sum_{f \in F} x_f + \sum_{i \in V_c} \sum_{j \in V_c} z_i z_j d_{i,j} \\
 \text{subject to} \quad \sum_{i \in V_c} z_i \leq T \\
 \sum_{i \in V_c} a_{i,f} z_i \geq x_f \quad (\forall f \in F) \\
 z_i \in \{0,1\} \quad (\forall i \in V_c) \\
 x_f \in \{0,1\} \quad (\forall f \in F)
 \end{array} \right\} \quad (4.7)
 \end{array}$$

ここで、

【集合】

V_c : スキャナ設置候補点の集合

F : 計測対象となる『重要度:高』の面分の集合

【変数】

$z_i := \begin{cases} 0, & \text{設置候補点 } i \text{ に TLS を配置しない} \\ 1, & \text{設置候補点 } i \text{ に TLS を配置する} \end{cases}$

$x_f := \begin{cases} 0, & \text{『重要度:高』の面分 } f \text{ が計測されない} \\ 1, & \text{『重要度:高』の面分 } f \text{ が計測される} \end{cases}$

【パラメータ】

T := スキャナ設置回数

$$a_{i,f} := \begin{cases} 0, & i \text{ から } f \text{ が観測不可} \\ 1, & i \text{ から } f \text{ が可観測} \end{cases}$$

$$d_{i,j} := \begin{cases} 0, & \text{観測された } i \text{ と } j \text{ に共通するターゲットが } 1 \text{ つ以下もしくは観測不可} \\ p, & i \text{ と } j \text{ に共通するターゲットが } 2 \text{ つ以上観測可能} \end{cases}$$

ここで、 p は共通するターゲット数である。

式(4.7)の目的関数は、計測される面分 f と 2 点間のレジストレーションが可能となるペアの最大化を表している。制約条件の第 1 式は、規定のスキャナ設置箇所数であることを表している。第 2 式は、面分 f が計測されたか否かを表している。

4.4.3.3 可視性判定と可観測行列の生成

式(4.7)のパラメータ $a_{i,f}$ は、事前に計算して最適化問題の計算時に代入する必要がある。そこで、スキャナ設置候補点 i に置かれたスキャナから、SfM モデル上の各三角形面分 f が『可観測』か『観測不可』が要素 $a_{i,f}$ に記載された可観測行列 $A = \{a_{i,f}\}$ を事前に生成する。

生成手順は、3.4.5 項の可視性判定と可観測行列の生成と同じである。

4.4.3.4 レジストレーションスコアの算出

次に、式(4.7)のパラメータ $d_{i,j}$ も事前に計算して最適化問題の計算時に代入する。 $d_{i,j}$ は、同一のスキャナ設置候補点集合 V_c の中から異なる 2 箇所のスキャナ位置 i, j を選択し、 i, j から共通するターゲットが 2 個以上見えるか否かが要素 $d_{i,j}$ に記載されたレジストレーション行列 $D = \{d_{i,j}\}$ を事前に生成する。このレジストレーション行列は、まず、スキャナ候補点 i からターゲット t が可観測か否かを 0,1 で表したターゲット可観測行列 $E = \{e_{i,t}\}$ を作成する。そして、この行列の異なる 2 行を取り出し、その行ベクトル間の内積を計算することで、共通するターゲット有無を判別できる。

生成手順は以下のとおりである。

- (1) はじめに、レジストレーション行列 D とターゲット可観測行列 E の全要素を 0 に初期化する。
- (2) 4.4.3.3 目で『重要度:高』の面分を対象として可視性判定を行うのと同時に、平面領域に分類された三角形面分 f_p に対しても可視性判定を行う。

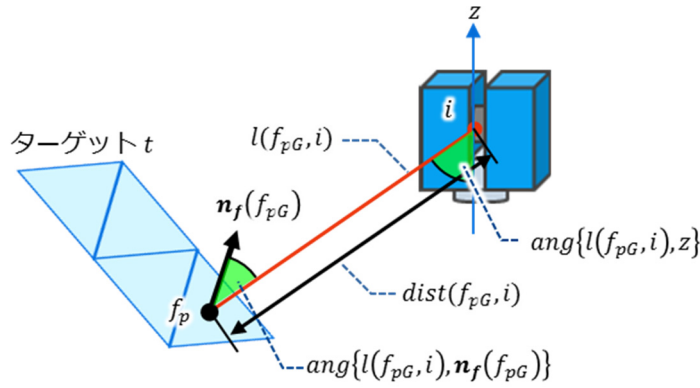


図 4.17 ターゲットを構成する面分の計測品質条件の検査

- (3) 次に、可視となった面分 f_p に対して、計測品質を満たすか否かを判定する。そこで、図 4.17 に示すように、スキャナの視野角および入射角と計測距離を検査する。そして、式(4.8), (4.9), (4.10)の 3 つの条件を満たす場合、そのスキャナ設置候補点 i から面分 f_p は『可観測』とする。

$$\text{ang}\{l(f_{pG}, i), z\} < \theta_{th} \quad (4.8)$$

$$\text{ang}\{l(f_{pG}, i), \mathbf{n}_f(f_{pG})\} < \theta_t \quad (4.9)$$

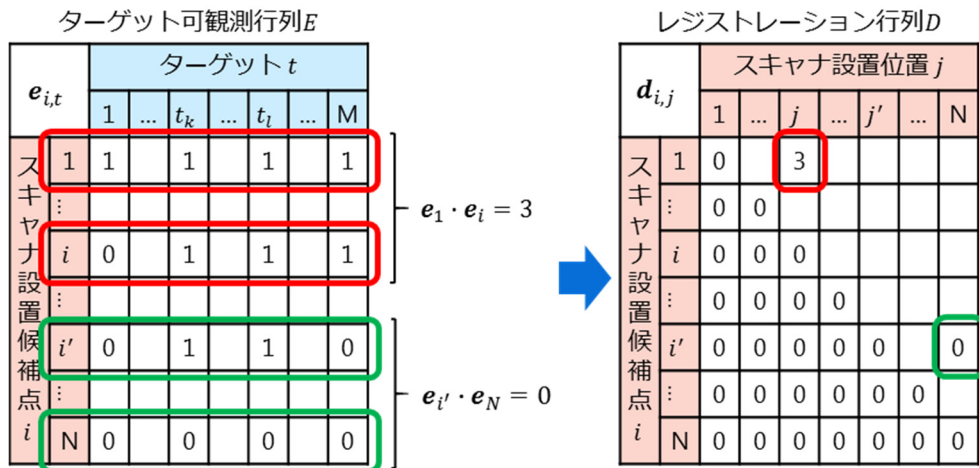
$$d_{min} < \text{dist}(f_{pG}, i) \leq d_{max} \quad (4.10)$$

ここで、 $l(f_{pG}, i)$ は f_G と i を結ぶ線分で、 $\mathbf{n}_f(f_{pG})$ は f_{pG} の法線ベクトルである。そして、 $\text{dist}(f_{pG}, i)$ は i から f_{pG} までの距離である。

- (4) その後、ターゲット t を構成する面分 f_p が『可観測』になった割合を示す計測率が τ_p 以上となった場合、ターゲット可観測行列 E の要素 $e_{i,t}$ を $e_{i,t} = 1$ にする。
- (5) 次に、図 4.18 に示すように、生成したターゲット可観測行列 E から異なる 2 行 (i 行, i' 行) を取り出し、内積を計算する。式(4.11)に示すように、内積が 2 以上だった場合、対応するレジストレーション行列の要素 $d_{i,j}$ を計算値に更新する。

$$d_{i,j} := \begin{cases} 0, & e_i \cdot e_{i'} < 2 \\ e_i \cdot e_{i'}, & e_i \cdot e_{i'} \geq 2 \end{cases} \quad (4.11)$$

- (6) この処理を全スキャナ設置候補点の組み合わせに対して実行することにより、レジストレーション行列 D を生成することができる。ここで、 $i = j$ となる対角成分は 0 にする。



4.4.3.3 オーバーラップを考慮した最適スキャナ配置の導出

最後に、4.4.3.2 目の式(4.7)で定式化したオーバーラップを考慮したスキャナ配置における凸二次計画問題の最適解を求解する。ソルバには、Numerical Optimizer[31]を用い、求解アルゴリズムには有効制約法を用いた。本研究における定式化では、スキャナ設置回数 T を設定し計算する。そして、 $z_i = 1$ となったスキャナ設置候補点 i を最適スキャナ設置位置の組み合わせ Z_{opt} とする。

4.4.4 オーバーラップを考慮した最適スキャナ配置の導出結果

4.4.4.1 計測対象および平面ターゲット

本項では、前章で扱った熱源機械室を計測対象とする。また、計測対象の SfM モデル内に図 4.19 に示すように、一定面積以上ある平面領域からその一部となる計 9 箇所の平面を選択した。

4.4.4.2 スキャナパラメータおよび制約条件閾値の設定

スキャナパラメータと制約条件については、表 3.2 と同じ値を使用した。さらに、選択平面が『可観測』となるための計測品質条件の閾値および選択平面を構成する面分の計測率の閾値を表 4.8 にまとめる。

表 4.8 平面ターゲットの計測品質条件および計測率の設定値

パラメータ	設定値
最大許容入射角 θ_α	60°
最大許容計測距離 d_{min}	0.3m
最大許容計測距離 d_{max}	20.0m
選択平面の計測率 τ_p	0.5

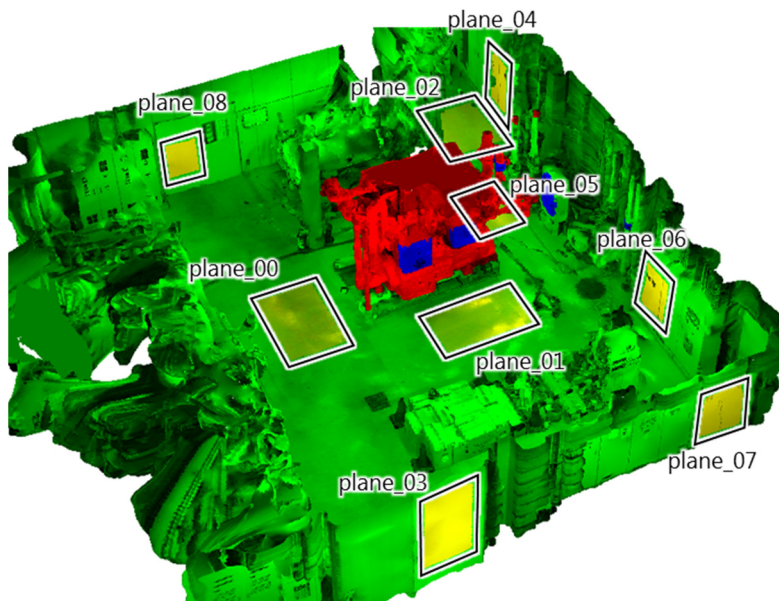


図 4.19 SfM モデル内の選択した平面領域（熱源機械室）

4.4.4.3 オーバーラップを考慮した最適スキャナ配置結果

4.4.3 項で提案した手法により導出したスキャナ配置結果の効果を検証するために、3 章で提案したオーバーラップを考慮していないメッシュベースの整数計画法を用いた最適スキャナ配置手法によって導出された結果と比較する。図 4.20 にそれぞれの導出結果を示す。オーバーラップを考慮した本節の提案手法は、3 章の提案手法で算出された $T = 7$ を利用して同じスキャ回数における結果を比較する。その結果、『重要度：高』に分類された面分の計測率は 86.5%となり、オーバーラップを考慮しないスキャナ配置 (88.2%) より 1.7%低い計測率となった。次に、導出結果をもとにレジストレーションが可能なペアを比較する。まず、各スキャナ位置から可観測となった平面を表 4.9 に示す。ここから、2 箇所のスキャナ設置位置を選択したとき、共通する平面が 2 つ以上ある場合はレジストレーション可能なペアとなる。

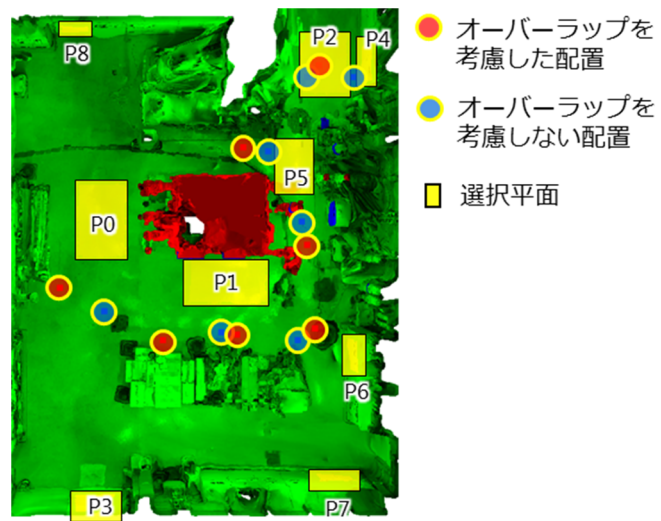
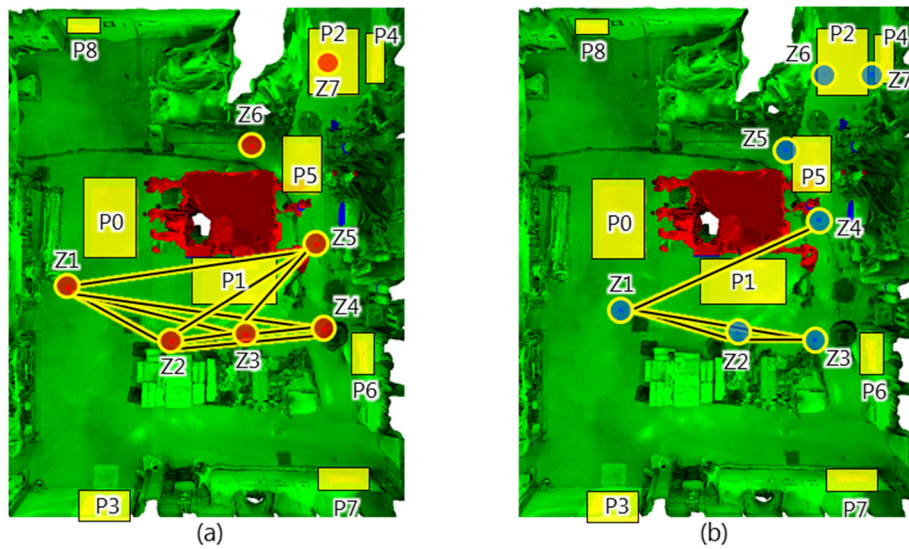


図 4.20 オーバーラップを考慮の有無によるスキャナ配置の違い

● ● スキャナ設置位置 — レジストレーションが可能なペア □ 選択平面



(a)オーバーラップを考慮した配置

(b)オーバーラップを考慮しない配置

図 4.21 レジストレーションが可能となるスキャナ設置位置ペア

本節でのスキャナ配置モデルは、レジストレーションが可能となるペアを最大化する項が目的関数に入っているため、表 4.9 (a)のオーバーラップを考慮した配置において可観測となった平面数が、表 4.9 (b)のオーバーラップを考慮しない配置よりも多いことが確認できる。

次に、レジストレーションが可能となるスキャナ設置位置ペアをエッジで繋いだ結果を図 4.21 に示す。これによると、図 4.21 (a)のオーバーラップを考慮した配置は、下

表 4.9 各スキャナ位置から可観測となる平面

(a)オーバーラップを考慮した配置

(b)オーバーラップを考慮しない配置

ターゲット

	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
スキャナ設置位置 Z1	●			●			●	●	●
Z2		●		●			●	●	●
Z3		●		●			●		
Z4		●		●			●	●	
Z5		●		●		●		●	
Z6						●			
Z7									

ターゲット

	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
スキャナ設置位置 Z1	●			●			●	●	●
Z2		●		●			●		
Z3		●		●			●		
Z4				●		●		●	
Z5						●			
Z6						●	●		
Z7									

側の z1, z2, z3, z4, z5 については、計 9 本のエッジでつながれており、どのペアもレジストレーション可能なことが分かる。また、表 4.9 (a)に示すように共通する面分が 3 つ以上のペアが多い。一方、図 4.21 (b)のオーバーラップを考慮しない配置は、下側の z1, z2, z3, z4 については、計 4 本の線分でつながれている。この 4 箇所においては、どのペアもレジストレーション可能であるが、表 4.9 (b)に示すように共通する面分が 2 つのペアが多い。そのため、レジストレーションを考慮した配置は、平面对上の点の数が増え、より高精度な精密レジストレーションが期待できる。

しかし、本節で提案したスキャナ配置モデルは、レジストレーション可能なペア最大化しているため、全体として全スキャナ設置位置がレジストレーション可能となる保証はない。レジストレーションを考慮した配置の場合も上側の z6, z7 については、エッジを結ぶことができないためレジストレーションできない。そのため、今後の課題として 4.4.3.1 目で説明したように、全てのスキャナ位置においてエッジを結ぶことができるようなモデルに拡張する必要がある。

また、今回規模の最適化計算であれば、凸二次計画問題として有効制約法により最適解を得ることができたが、候補点数や平面数によっては、目的関数が凸関数にならなくなることがあるため、最適解ではなく実行可能解が求まる場合や、解が求まらない場合がある。そのような場合は、メタヒューリスティックの解法を用いて計算する必要がある。

4.5 まとめ

本章のまとめを以下に述べる。

- スキャナ配置計画手法の計測の網羅性を確保するため、床面上からでは計測できない領域に対して、未計測となった対象面分側から計測品質を満たして計測可能な領域を抽出し、その領域内の追加スキャナ計測候補点から最少のスキャン回数で未計測の全面分が計測可能な追加スキャナ計測位置を整数計画問題のクラスに定式化し、整数計画法を用いて導出する手法を提案した。
- 提案した未計測領域のための追加スキャナ計測位置の導出手法により、設備内の計測必要箇所を高精度かつ最少スキャン回数で計測できる位置を導出することができ、計測漏れなく計測することが可能となる。さらに、追加スキャナ計測をする位置が事前に提示されることより、高所からの計測や狭隘部での計測などを事前に把握することができるため、より正確なスキャン計画を立てることができ、実務においてとても有効である。
- スキャナ配置計画手法の計測の効率性を確保するため、作業者が移動可能な領域を自動抽出し、スキャナ配置計画手法で得られたスキャナ設置位置の組み合わせから、2点間の最短となる距離コストをダイクストラ法により算出し、巡回セールスマン問題として定式化して巡回経路が最短になるようなスキャナ計測順序を導出する手法を提案した。
- 提案した最短計測順序および移動経路の導出手法により、任意の計測開始地点から効率的に計測するための計測順序および移動経路が作業者に提示されるため、スキャナ計測経験のない作業でも迷うことなく効率的な計測が可能になる。
- スキャナ配置計画手法の計測の信頼性を確保するため、計測可能な面分数を最大にするスキャナ配置に加え、レジストレーションのために必要となる平面のオーバーラップを確保するために、2つのスキャナ設置位置から観測できる共通平面が2箇所以上になるペアを最大にするスキャナ設置位置を凸二次計画問題のクラスに定式化し有制限約法を用いて導出する手法を提案した。
- 提案したオーバーラップを考慮したスキャナ設置位置の導出手法により、設備内の計測必要箇所の計測率を最大にするとともに、レジストレーションが可能ペアを最大にするスキャナ配置を導出することが可能になった。また、レジストレーション可能なペアを多くすることにより、共通する面分が増えるため、より精密なレジストレーションが期待できる結果となった。

また、4.4 節における問題点として以下があげられる。

- 全スキャナ設置位置においてレジストレーション可能となる条件を考慮していないため、レジストレーションができない設置位置が発生する可能性がある。そのため、全スキャナ設置位置間をレジストレーションが可能となるペアを示す辺で繋げる事ができるような条件を定式化しモデルに組み込む必要がある。

第5章 結論と今後の課題

5.1 結論

本論文では、空調設備の as-built モデル化に必要となる様々な制約条件を満たし、計測の効率性や網羅性を向上させる地上型レーザスキャナの合理的な配置を立案可能とするため、最適化手法に基づいた配置計画アルゴリズムを新たに提案するとともに、提案アルゴリズムの有効性を計算機シミュレーションならびに実験的に検証した。また、実務における様々な制約条件の拡張に対しても最適スキャナ配置を導出可能とする配置計画アルゴリズムの拡張手法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションにより検証した。

各章における本論文の結論を以下にまとめる。

- (1) 第 2 章では、空調設備の as-built モデル化を対象に、事前知識となる計測対象の SfM モデルを構築した。そして、工事目的により異なる計測重要度をユーザが対話的に分類し、SfM モデルを含む計測対象空間をボクセル表現した。その後、地上型レーザスキャナ計測時の計測品質に関わる入射角・計測距離、レジストレーションのための点群間重複、および可視性の制約を満たし計測必要箇所の計測率を最大にする準最適なスキャナ配置を近似最適化手法である貪欲法を用いて導出する手法を提案した。実際の空調設備に提案アルゴリズムを適用した結果、計測品質を考慮した計測率の観点で、熟練オペレータによるスキャナ配置を上回り、また熟練オペレータでは必ずしも導出できなかった設備の as-built モデル化精度品質を満足するレーザ計測点群の生成に有効なスキャナ配置を導出可能であることを確認した。一方、可視性判定の高精度化、高速化、および大局的最適解への拡張が課題であることを確認した。
- (2) 第 3 章では、第 2 章で提案した手法の可視性判定の高精度化および高速化を図るため、SfM モデルをメッシュモデル表現に変更し、GPU を用いた高速可視性判定手法を提案した。また、最適化手法を用いたスキャナ配置問題へ拡張するため、スキャナ配置問題を整数計画問題のクラスへ定式化し、分枝限定法を用いて最適スキャナ配置を導出する手法を提案した。実際の空調設備に提案アルゴリズムを

適用した結果、2章で提案した準最適スキャナ配置計画手法よりも少ないスキャン回数にもかかわらず、同程度の計測率とモデル化精度で計測可能なスキャナ配置ができることを確認した。さらに、計測品質を考慮した計測率の観点で、熟練オペレータによるスキャナ配置を上回ることを確認した。また、SfMモデルの面増加にあまり影響を受けずに可視判定を行うことができるため、大規模環境への適応可能性もあり、実務への適応が十分可能な性能をもつことが確認できた。

- (3) 第4章では、実務に適用する際に課題となる以下の3つの課題を解決するために、計測の効率性や網羅性を向上させる最適スキャナ配置アルゴリズムへの拡張を行い、その有効性を計算機シミュレーションにより検証した。
- 1: 床面上からでは計測できない領域を計測するための追加スキャナ計測位置を、未計測面分側から計測品質を満たし計測可能な位置を探索し、整数計画問題のクラスへ定式化し、最少のスキャナ回数で未計測の全面分が計測可能な追加スキャナ計測位置を導出する手法を提案した。実際の空調設備に適用した結果、未計測面分を全て計測可能な追加スキャナ計測位置を算出でき、最適スキャナ配置計画手法で得られた床面上からの計測と併せることにより、計測必要箇所を100%の計測率で計測可能な計測位置の導出が可能であることを確認できた。また、その計測位置は、高所からの計測や機器の裏側の狭隘部からの計測が必要なことが提示され、通常オペレータが設置しないような位置が導出されており、提案手法はより最適な計測位置の提示が可能であることを確認した。
 - 2: 最適スキャナ配置計画手法によって得られたスキャナ位置の組み合わせから、ダイクストラ法による2点間の最短距離コストの算出と巡回セールスマン問題としての最適化問題により、巡回経路が最短になるようなスキャナ計測順序を導出する手法を提案した。実際の空調設備に適用した結果、任意の開始地点から巡回する効率的な計測順序の提示が可能であることを確認した。
 - 3: 計測可能な面分数を最大にするスキャナ配置に加え、レジストレーションのために必要となる平面のオーバーラップを確保するために、2つのスキャナ設置位置から観測できる共通平面が2箇所以上になるペアを最大にするスキャナ配置位置を凸二次計画問題のクラスに定式化し有制限約法を用いて導出する手法を提案した。実際の空調設備に適用した結果、3章における提案手法と同程度の計測率を確保しつつ、レジストレーション可能なペアを最大にする配置が導出でき、より精密にレジストレーションが可能な配置の提示が可能であることを確認した。

以上の結論により、本論文で提案した最適スキャナ配置計画手法は、空調設備の as-built モデル構築のために、様々な計測時の制約条件を考慮しながら、高精度かつ効率的なスキャナ計測を可能にするためのスキャン計画の合理的導出に有効であることを確認できた。

5.2 今後の課題

本論文で提案したアルゴリズムに対する今後の課題について以下に述べる。

- (1) オーバーラップを考慮した最適スキャナ配置計画手法において、共通する平面を計測する際、自由度を拘束するために法線ベクトルが x, y, z 軸方向でそれぞれ異なる平面が選択されるような条件を考慮する必要がある。また、今回のオーバーラップを考慮したスキャナ配置においては、異なる 2 箇所の設置位置がレジストレーション可能な配置をなるべく多く選択するモデルになっており、全体としてレジストレーションできる保証はない。そのため、全体的なレジストレーションを考慮したスキャナ配置のモデルに拡張する必要がある。
- (2) 事前知識として使用する SfM モデルを構築するためには、計測対象の画図多くの写真が必要となる。また、計測必要箇所をきれいにモデル化するには、写真撮影の位置・姿勢・環境光などを気にしながら計測する必要があるため、簡単な作業ではあるが技術が必要となる。そのため、SfM モデルの品質や効率性を満たす写真撮影の Next-best-view 手法などの開発が必要となる。
- (3) 提案手法によって導出されたスキャナ位置どおりに、実空間に測量器等を使用せずに設置するのは難しく、多少の位置のズレが生じる。そのため、AR や MR 等の 3 次元計測技術と自己位置認識技術により、測量器を使わずに指定位置をナビゲーションするシステムの開発が必要となる。

参考文献

- [1] 国土交通省「平成 29 年度建設投資見通し」,(2017).
- [2] 国土交通省「建設工事施工統計調査報告（平成 27 年度実績）」,(2017).
- [3] 飯田恭一, 吉田倬郎: “オフィスビルの部材・設備の耐用年数の基礎的研究: 竣工時に先端的なオフィスビル改修記録から見た部材・設備の供用年数の調査”, 工学院大学研究報告, 114, pp.47-55, (2013).
- [4] 脇坂英佑: “3D レーザースキャナの設備工事への適用”, 建築設備と配管工事, 52(14), pp.13-17, (2014).
- [5] S. Soudarissanane, R. Lindenbergh, M. Menenti and P. Teunissen: “Incident angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points”, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp.183-188, (2009).
- [6] P. T. Kersten, K. Mechelke, M. Lindstaedt and H. Sternberg: “Geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanning systems”, Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 2009(4), pp.301-315, (2009).
- [7] W. Boehler, M. B. Vicent, and A. Marbs: “Investigating laser scanner accuracy”, The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(Part 5), pp.696-701, (2003).
- [8] 榎本昌一, 小栗昇悟, 増田宏, 田中一郎: “複数レーザースキャナによる平面計測精度の比較”, 精密工学会学術講演論文集 2012 年度精密工学会春季大会, pp.547-548, (2012).
- [9] P. S. Blaer, and P. K. Allen: “View planning and automated data acquisition for three-dimensional modeling of complex sites”, Journal of Field Robotics, 26(11-12), pp865-891, (2009).
- [10] R. Pito: “A solution to the next best view problem for automated surface acquisition”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21(10), pp.1016-1030, (1999).

- [11] M. Karaszewski, M. Adamczyk, and R. Sitnik: “Assessment of next-best-view algorithms performance with various 3D scanners and manipulator”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 119, pp.320-333, (2016).
- [12] W. R. Scott, G. Roth, and J.F. Rivest: “View planning for automated three-dimensional object reconstruction and inspection”, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 35(1), pp.64-96, (2003).
- [13] K. Kawashima, S. Yamanishi, S. Kanai, and H. Date: “Finding the next-best scanner position for as-built modeling of piping systems”, *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, KL-5, pp.313-320, (2014).
- [14] S. Soudarissanane, and R. Lindenbergh: “Optimizing terrestrial laser scanning measurement set-up”, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-5/W12, pp.127-132, (2011).
- [15] M. Svensson: “Accelerated Volumetric Next-Best-View Planning in 3D Mapping”, Ph.D. Thesis, Linköping University, (2014).
- [16] J. Ahn, and K. Wohn: “Interactive scan planning for heritage recording”, *Multimedia Tools and Applications*, pp.1-21, (2016).
- [17] M. Chen, L. Soibelman, and G. B. Becerik: “A proactive Scan Planning Framework for Courtyard-Centric Buildings”, *Proceedings of the 16th International Conference on Civil and Building Engineering Informatics*, pp.1444-1451, (2016).
- [18] P. S. Blaer, P. K. Allen: “View planning and automated data acquisition for three-dimensional modeling of complex sites”, *Journal of Field Robotics*, 26(11-12), pp.865-891, (2009).
- [19] C. Zhang, V. S. Kalasapudi and T. Pingbo: “Rapid data quality oriented laser scan planning for dynamic construction environments”, *Advanced Engineering Informatics*, 30(2), pp. 218-232, (2016).
- [20] 北田祐平, 安室喜弘, 檀寛成, 松下亮介, 西形達明: “SFM と MVS に基づいた現場のモデル化によるレーザスキャン計画の最適化とその運用”, *土木学会論文集 F3*, 71 卷(2015) 2 号, pp.169-175, (2015).
- [21] D. Wujanz, C. Holst, F. Neitzel, H. Kuhlmann, W. Niemeier, and V. Schwieger: “Survey

- configuration for terrestrial laser scanning”, Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 6(2016), pp.158-169, (2016).
- [22] C. Munkelt, P. Kühmstedt and J. Denzler: “Incorporation of a-priori information in planning the next best view”, International Archives of Photogrammetry Remote, Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVI-5, pp.37-42, (2006).
- [23] A. Bapat, A. Ravi, and S. Raman: “An iterative, non-local approach for restoring depth maps in RGB-D images”, Communications (NCC), 2015 Twenty First National Conference on. IEEE, pp.1-6, (2015).
- [24] S. Agarwal, Y. Furukawa, N. Snavely, I. Simon, B. Curless, S. M. Seitz and R. Szeliski, “Building Rome in a day”, Communications of the ACM, 54(10), pp.105-112, (2011).
- [25] Context Capture, <https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture>, 2018.4.28 アクセス.
- [26] CloudCompare, <http://cloudcompare.org/>, 2018.05.01 アクセス.
- [27] Z+F IMAGER® 5010C, http://www.zf-laser.com/Z-F-IMAGER-R-5010C.3d_laserscanner.0.html?&L=1, 2018.05.06 アクセス
- [28] InfiPoints, <http://www.elysium-global.com/productinfo/infipoints/>, 2018.05.09 アクセス.
- [29] C. M. Shakarji: “Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system”, Journal of research of the National Institute of Standards and Technology, 103(6), pp.633-641, (1998).
- [30] S. Kanai, D. Iyoda, H. Sakamoto and N. Kanatani: “Appearance preserving simplification of 3D CAD model with large-scale assembly structures”, International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 6(3), pp.139-154, (2012).
- [31] Numerical Optimizer, <https://www.msi.co.jp/~nuopt/>, 2018.05.09 アクセス.
- [32] JISB2220, Steel pipe flanges, Japanese Standard Association, (2004).
- [33] BLK360, <https://lasers.leica-geosystems.com/global/blk360>, 2018.05.29 アクセス

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 博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。論文執筆にあたり、多くの方々からのご指導、ご協力いただいたことに感謝の意を表します。

同専攻教授 金井理先生には指導教官として本研究の実施の機会を与えていただき、その遂行にあたって終始、ご指導いただきました。学会参加や国際会議での発表など多くの機会を与えていただき、研究者にとって貴重な経験ができました。ここに深謝の意を表します。

本論文の審査にあたり、同専攻教授 小野里雅彦先生、近野敦先生には、的確なご助言、ご指導を頂きました。ここに深謝の意を表します。また、同専攻准教授 伊達宏昭先生には、研究室に伺った際、研究内容や実装方法についての様々なご助言、ご指導を頂きました。審査の際にも的確なご助言、ご指導を頂きました。ここに深謝の意を表します。

本研究の実施にあたり、産業技術総合研究所 特別研究員 丸山翼博士には、研究室在学の際、実装方法について様々なご助言を頂きました。心より御礼申し上げます。

このほか、新菱冷熱工業株式会社 竹之内元執行役員、佐原恭彦部長、植田俊克部長、三上秀人次長、佐川美佳次長には、社会人博士課程として本研究の実施の機会を与えていただきました。ここに深謝の意を表します。

同社 中央研究所 酒本晋太郎課長には、本研究のテーマ立案からその遂行にあたって終始、ご指導いただきました。また、本研究を円滑に遂行していくためのサポートや環境づくりをしていただきました。ここに深謝の意を表します。また、富田裕行主任には、実験のサポートやアドバイスをいただきました。心より御礼申し上げます。同期である長澤雅俊主任には、仕事や研究について色々と相談にのっていただきました。心より御礼申し上げます。

株式会社ルプロ 森本和明氏には、2章および3章の実験において、計測オペレータとしてご協力いただきました。心より御礼申し上げます。

最後に、私をいつも応援してくれた妻に感謝します。

研究業績目録

1. 論文（学位論文関係）

I. 査読付学会誌等

- (1) Eisuke Wakisaka, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, “Model-based Next-best-view Planning of Terrestrial Laser Scanner for HVAC Facility Renovation”, *Computer-Aided Design and Applications*, 15(3), pp353-366, (2018).
- (2) 脇坂英佑, 金井理, 伊達宏昭, “空調設備の as-built モデル構築のための地上型レーザスキャナの最適配置計画”, *精密工学会誌*, 84(8), (2018)

II. 査読付国際会議プロシーディング

- (1) Eisuke Wakisaka, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, “Optimum Laser Scan Planning for As-built 3D Modeling of HVAC Systems with Difficult-to-measure Regions”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Civil and Building Engineering Informatics(ICCBEI2017)*, pp288-291, (2017).
- (2) Eisuke Wakisaka, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, “Model-based Next-best-view Planning of Terrestrial Laser Scanner for HVAC Facility Renovation”, *Proceedings of CAD’17, 2017*, pp227-231, (2017).
- (3) Eisuke Wakisaka, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, “Optimal Laser Scan Planning of Terrestrial Laser Scanner for As-built Modeling of HVAC Systems using an Integer Programming”, *ICPE2018*, (アブストラクト受理済み)

2. 論文（その他）

なし

3. 講演（学位論文関係）

- (1) 脇坂英佑, 金井理, 伊達宏昭, “難計測部をもつ空調設備 as-built 3次元モデル構築のための最適スキャナ配置計画 (第1報) -不完全な SfM モデルに基づいた計測対象空間の空間占有状態分類手法-”, 2016年度精密工学会秋季大会

学術講演会, pp479-480, (2016).

- (2) 脇坂英佑, 金井理, 伊達宏昭, “難計測部をもつ空調設備 as-built 3次元モデル構築のための最適スキャナ配置計画 (第2報)-計測重要度を考慮したスキャナ配置位置の推定と効果検証-”, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会, pp553-554, (2017).
- (3) 脇坂英佑, 金井理, 伊達宏昭, “難計測部をもつ空調設備 as-built 3次元モデル構築のための最適スキャナ配置計画 (第3報) -GPUによる可視性判定の高速化と数理計画法を用いたスキャナ最適配置の導出-”, 2018年度精密工学会春季大会学術講演会, pp545-546, (2018).

4. 特許

- (1) 出願番号: 特願 2017-033368, 発明者: 脇坂英佑, 金井理, 伊達宏昭, 発明の名称: 「計測機配置位置決定装置, 計測機配置位置決定方法およびプログラム」, 出願人: 新菱冷熱工業株式会社, 出願日: 2017/2/24.
- (2) 出願番号: 特願 2018-044710, 発明者: 脇坂英佑, 金井理, 伊達宏昭, 発明の名称: 「計測機配置位置決定装置, 計測機配置位置決定方法およびプログラム」, 出願人: 新菱冷熱工業株式会社, 出願日: 2018/3/12.