HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	大規模環境レーザ計測点群からのプラント配管系統の高度自動認識に関する研究
Author(s)	川島, 千明
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第11310号
Issue Date	2014-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11310
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55600
Type	doctoral thesis
File Information	Kazuaki_Kawashima.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

SSI-MT79115034

博士論文

大規模環境レーザ計測点群からのプラント配管系統の高度自動認識に関する研究

川島　千明

2014 年 1 月

北海道大学 大学院情報科学研究科
システム情報科学専攻

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

川島　千明

審査委員：	主査	金井　理	教授
	副査	小野里　雅彦	教授
		金子　俊一	教授
		山下　裕	教授
		伊達　宏昭	准教授

大規模環境レーザ計測点群からのプラント配管系統の高度自動認識に関する研究*

川島　千明

概要

近年，製品のライフサイクルの短命化に伴い，既存プラントの設備の変更・増設が繰り返されている．そこで現在，設備のレーザ計測点群を基に，既存設備の変更が反映された 3 次元形状モデル(as-built モデル)を作成することで，工程管理による作業の効率化を図る動きが出てきている．しかし，プラント設備をレーザスキャナで計測した点群データは，非常に膨大かつ大きな計測ノイズを多く含んでいる．そのため，点群データから配管などの 3 次元モデルを構築するには，現在多くの手作業に頼っており，その自動化が求められている．また，プラントのレーザ計測時において，計測点群には物体の陰に隠れて計測できないオクルージョン領域が多数存在し，領域内部の物体を認識することが困難である．こうした領域を解消するためには，異なる位置から計測した点群をレジストレーションする必要がある．しかし，現状ではこれらの計測位置は操作者の経験則に基づいて決定しているため，熟練者でなくては判断できないことに加えて，計測位置の選択が必ずしも効率的とは限らないといった問題がある．

そこで本研究では，プラント設備の 3 次元モデル化に必須の対象となる配管系統を対象とした以下の 2 つの手法を提案する : 1) プラント内部のレーザ計測点群から配管系統に含まれる直進パイプ，接続要素，及びそれらの接続関係を全自動で認識する手法，2) 配管系統のレーザ計測時におけるオクルージョンを最小化するスキャナ位置を自動で推定する手法

また本論文では，実際のプラントのレーザ計測点群とプラント内部を模した 3D モデルから生成した擬似計測点群に対して，認識精度と処理時間の評価を行い，本手法の有効性を検証する．

キーワード：レーザ計測，点群，配管系統，物体認識，Next Best View 問題

*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-MT79115034，2014 年 1 月 17 日

Advanced Automatic Recognition of Plant Piping Systems from Large-scale Laser-scanned Point Clouds†

Kazuaki Kawashima

Abstract

Recently, renovations of plant equipment have been more frequent because of the shortened lifespans of the products, and as-built models from large-scale laser-scanned data is expected to streamline rebuilding processes. However, the laser-scanned data of an existing plant has an enormous amount of points, captures intricate objects, and includes a high noise level. Thus, automation of the recognition and 3D model construction processes from point clouds need to be strongly promoted in the plant engineering field. Besides, the laser scanned data of the plant has many occluded regions which have no scanned point, and it is difficult to recognize the object in the regions. To solve the problem, other scanned data which scanned from different positions should be registered. However, the scanner positions are often decided by the operator's experimental rules. Thus, these positions are not necessarily efficient.

Therefore, the purpose of this research was to propose two algorithms for the piping system in the plant: 1) automatic recognition of straight pipes, connecting parts and their connection relationships of the piping systems from the terrestrial laser-scanned data of plant equipment, 2) automatic estimation of next best scanner position which can minimize the occluded region on the piping systems.

In this paper, we evaluate the recognition accuracy and running time, and demonstrate the effectiveness of this method from experiments using scanned data of real plants and a quasi-laser scanned data created from a 3D plant model.

Key words: Laser scanning, Point clouds, Piping system, Object recognition, Next best view problem

† Doctor candidate's Thesis, Division of Systems and Information Engineering, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, SSI-MT79115034, January 17, 2014.

目 次

第 1 章　緒論

1.1　本研究の背景…… 1
1.2　本研究の目的…… 3
1.3　本論文の構成…… 4

第 2 章　法線テンソル解析に基づく大規模レーザ計測点群からの配管系統の自動認識アルゴリズムの開発

2.1　背景…… 7
2.2　関連研究…… 7
2.3　本章の目的……11
2.4　提案手法の概要……11
2.5　背景点群の除去……13
　2.5.1　点分布特徴量の算出 ……13
　2.5.2　平面上の点群の抽出と除去 ……14
2.6　直進パイプ群の認識……14
　2.6.1　法線ベクトルの推定 ……15
　2.6.2　直進パイプ上の点群の抽出 ……16
　2.6.3　直進パイプ上の点群のグループ化 ……18
　2.6.4　直進パイプの定義パラメータの推定 ……18
　2.6.5　直進パイプの定義パラメータの高精度化 ……20
2.7　接続関係の認識……21
　2.7.1　直進パイプ上のオクルージョン部分の認識 ……21
　2.7.2　ジャンクション部分の認識 ……22
　2.7.3　エルボ部分の認識 ……22
　2.7.4　干渉する補完軸線分の除去 ……23
　2.7.5　配管系統の要素の分類 ……23
　2.7.6　同一配管上の軸線分の統合 ……24
2.8　認識実験結果……24
　2.8.1　PVC パイプのレーザ計測点群に対する検証……24
　2.8.2　大規模環境レーザ計測点群に対する検証 ……27
　2.8.3　各閾値の設定基準と計測環境による影響 ……28
　2.8.4　計測点群の品質による認識結果の変化 ……29
2.9　まとめ……29

第 3 章　大規模レーザ計測点群からの配管系統の自動認識アルゴリズムの高速・高精度化
3.1　前章での提案手法の課題と解決方法 …… 37
3.2　提案手法の概要 …… 39
3.3　法線ベクトルの推定 …… 40
3.4　配管系統内の配管の認識 …… 41
3.4.1　配管系統上の点群の抽出 …… 42
3.4.2　同一配管上の点群のグループ化 …… 43
3.4.3　配管の定義パラメータの推定 …… 44
3.5　配管系統の軸線の認識 …… 45
3.5.1　軸点列の生成 …… 46
3.5.2　初期軸線分の推定 …… 47
3.5.3　軸線分の補完と除去 …… 49
3.5.3.1　直進パイプ部分の軸線分の補完 …… 49
3.5.3.2　ジャンクション部分の軸線分の補完 …… 50
3.5.3.3　エルボ部分の軸線分の補完 …… 51
3.5.3.4　孤立した軸線分の除去 …… 51
3.6　認識実験結果 …… 52
3.6.1　大規模レーザ計測点群に対する検証 …… 52
3.6.2　各閾値の設定基準と認識結果に与える影響 …… 53
3.7　まとめ …… 54

第 4 章　配管系統上の未計測領域最小化のための最適スキャナ配置
4.1　研究背景 …… 63
4.2　関連研究 …… 64
4.3　本章の目的 …… 66
4.4　スキャナパラメータ …… 66
4.5　最適スキャナ配置の推定手法 …… 67
4.5.1　提案手法概要 …… 67
4.5.2　ボクセル空間の生成 …… 69
4.5.3　計測点群の取得 …… 69
4.5.4　スキャナ位置候補の推定 …… 70
4.5.5　計測対象領域の推定 …… 71
4.5.6　最適スキャナ配置の推定 …… 74
4.6　実験と結果 …… 75
4.6.1　入力メッシュモデルとパラメータ設定 …… 75
4.6.2　Potthast らの手法による計測結果と配管認識結果 …… 75
4.6.3　本提案手法による計測結果と配管認識結果 …… 76
4.7 まとめ …… 77

第 5 章　結論と今後の課題
5.1　結論 …… 91

5.2　今後の課題……92

謝辞 **93**

参考文献 **94**

付録

A　法線ベクトル推定精度のシミュレーションによる評価……97

B　研究業績目録 …… 104

図目次

1.1 3 次元レーザスキャナ……1
1.2 プラントの as-built モデル構築の流れ……2
1.3 スキャナ配置の変更によるオクルージョン領域の変化……2
1.4 本研究の処理の概要……3
2.1 増田らの手法による処理例……8
2.2 松沼らの手法による処理例……8
2.3 Rabbani らの手法による処理例……9
2.4 Aurelien らの手法による処理例……9
2.5 Vosseman らの手法による処理例……10
2.6 Belton らの手法による処理例……10
2.7 Lee らの手法による処理例……10
2.8 認識対象の配管要素と定義パラメータ……11
2.9 配管系統の認識手法の概要……12
2.10 局所点分布特徴量……13
2.11 平面上の点群の抽出……13
2.12 直進パイプ群の認識……15
2.13 法線ベクトルの推定……16
2.14 法線テンソルによる点群の分類……17
2.15 直進パイプの定義パラメータ初期値の推定……19
2.16 軸線分の生成……20
2.17 region-growing を用いた円筒面フィッティング……20
2.18 直進パイプ上のオクルージョン部分の認識……21
2.19 ジャンクション部分の認識……22
2.20 エルボ部分の認識……23
2.21 補完軸線分の干渉判定……23
2.22 同一配管の軸線分の統合……24
2.23 T ジャンクションの認識結果……25
2.24 エルボの認識結果……26
2.25 石油リグ内の配管系統上の点群の分類結果……31
2.26 石油リグ内の配管系統の認識結果……32
2.27 熱源機械室の配管系統上の点群の分類結果……33
2.28 熱源機械室の配管系統の認識結果……34
2.29 点密度に対する認識結果の変化……36

2.30 ノイズに対する認識結果の変化……36
3.1 法線テンソルを用いた直進パイプ上の点分類の失敗例 ……38
3.2 認識対象の配管要素と定義パラメータ……38
3.3 配管系統の認識手法概要……39
3.4 法線ベクトルの推定……40
3.5 配管系統内の配管の認識……41
3.6 配管上の点群の認識……42
3.7 配管上の点群の被覆角度……45
3.8 配管系統の軸線の認識……45
3.9 軸線追跡法……46
3.10 配管系統の軸点列の認識 ……46
3.11 円弧・線分フィッティング ……47
3.12 直進パイプ部分の軸線分の補完……49
3.13 ジャンクション部分の軸線分の補完……50
3.14 エルボ部分の軸線分の補完……51
3.15 石油リグの計測点群と配管系統の認識結果……56
3.16 石油リグの配管系統上の計測点群と配管系統の認識結果……57
3.16 化学プラントの計測点群と配管系統の認識結果……58
3.16 化学プラントの配管系統上の計測点群と配管系統の認識結果……59
3.17 τ_lに対する配管系統の認識結果の変化……61
3.14 τ_{iso}に対する配管系統の認識結果の変化 ……62
4.1 レーザ計測時のオクルージョン領域……63
4.2 Dan らの手法による処理例……65
4.3 Potthast らの手法による処理例 ……65
4.4 Dornhege らの手法による処理例 ……65
4.5 スキャナパラメータ……66
4.6 最適スキャナ配置の推定手法の概要……67
4.7 擬似計測点群の生成……68
4.8 スキャナを設置可能な床面セルの選択……70
4.9 配管系統上に現れるオクルージョンの種類……72
4.10 配管系統上に現れるオクルージョンに対応する unknown セル ……73
4.11 入力モデル点群 ……75
4.12 取得した擬似計測点群とスキャナ位置(Potthast らの手法)……79
4.13 擬似計測点群から認識された配管系統(Potthast らの手法)……80
4.14 配管系統の軸線(Potthast らの手法)……81
4.15 最適スキャナ配置決定時の期待値(Potthast らの手法)……82
4.16 取得した擬似計測点群(本提案手法) ……83
4.17 擬似計測点群から認識された配管系統(本提案手法) ……84
4.18 配管系統の軸線(本提案手法) ……85
4.19 計測対象セルのスコア(本提案手法) ……86

4.20　最適スキャナ配置決定時の期待値(本提案手法)…… 87
4.21　本提案手法と Potthast らの手法の比較結果…… 90
A.1　グリッド内の点群に対する移動放物面近似による法線ベクトル推定 …… 98
A.2　平面モデル(σ　= 0.50)の法線ベクトル推定結果 ……100
A.3　円筒面モデル(σ　= 0.50)の法線ベクトル推定結果 ……100
A.4　平面モデルに対する法線誤差ヒストグラム……101
A.5　円筒面モデルに対する法線誤差ヒストグラム……102
A.6　平均法線誤差……103

表目次

2.1 T ジャンクション内の直進パイプ半径の認識値と計測値……25
2.2 エルボ内の直進パイプ半径の認識値と計測値……26
2.3 石油リグ内の配管系統の認識率……32
2.4 熱源機械室内の配管系統の認識率……34
2.5 石油リグ内の配管系統の認識処理時間……35
2.6 熱源機械室内の配管系統の認識処理時間……35
3.1 石油リグ内の配管系統の認識率……57
3.2 化学プラント内の配管系統の認識率……59
3.3 石油リグ内の配管系統の認識処理時間……60
3.4 化学プラント内の配管系統の認識処理時間……60
3.5 τ_l に対する配管系統の配管系統の認識率の変化 ……61
3.6 τ_{iso} に対する配管系統の認識率の変化……62
4.1 Potthast らの手法による処理時間 ……88
4.2 本提案手法による処理時間……89
A.1 法線ベクトルの推定処理時間の比較結果…… 103

アルゴリズム目次

3.1　円弧・線分フィッティング …… 48

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，物体表面の3次元データを非接触で取得する方法として，図1.1のような3次元レーザスキャナが発達してきている．3次元レーザスキャナとは，スキャナから発射されたレーザをミラーで全方位に発射し，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発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得ることができる機器であり，周囲の環境内にある物体の配置や形状のデータを高速，かつ容易に得ることが可能である．こうした3次元のレーザ計測データの活用方法の一つとして，大規模プラント施設や生産設備の3Dモデリングの需要が高まっている．

化学・材料・食品プラントでは，製品のライフサイクルの短命化に伴い，既存設備の更新や変更の頻度が高まっている．しかし，設備の図面上ではそうした設備の変更点が反映されることが少ない，もしくは正しく反映されていないことが多く，図面上の設備と実際の設備の配置に齟齬が生じている．そうした図面を基に施工を行った結果，想定外の部材間の干渉が発生してしまい，現場での追加作業による工期の後れや追加費用の発生が頻繁に生じる問題がある．こうした問題に対して，図1.2に示すように，3次元レーザスキャナを用いてプラント設備を計測した3次元点群を取得し，この計測点群を基に作成した設備の現況を反映した3D形状モデル(as-builtモデル) を用いることで，施工計画



図 1.1　3 次元レーザスキャナ

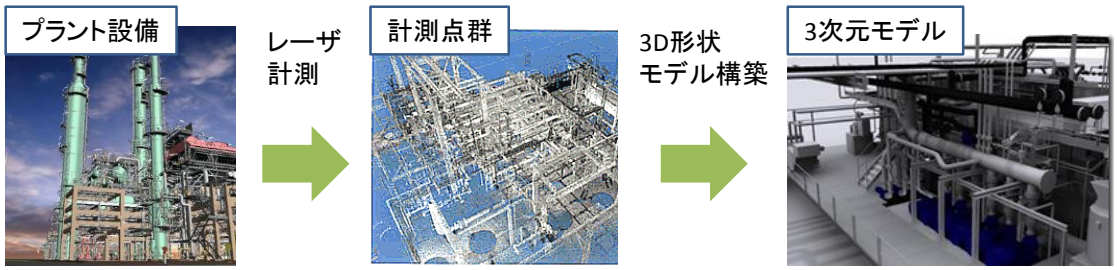


図 1.2　プラントの as-built モデル構築の流れ

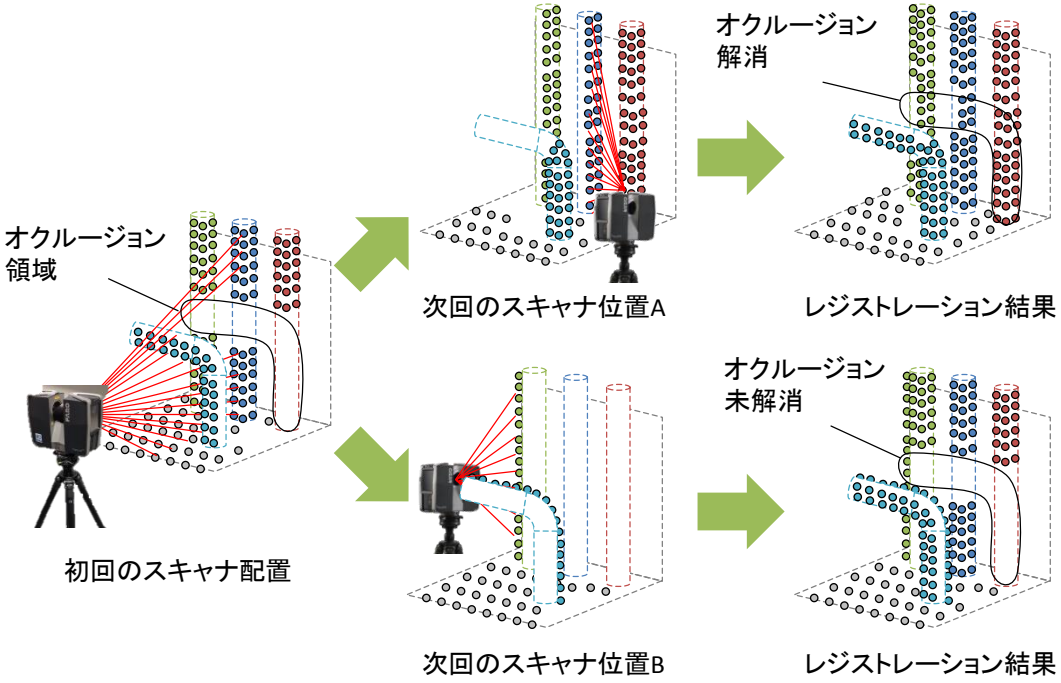


図 1.3　スキャナ配置の変更によるオクルージョン領域の変化

の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．プラントは非常に多くの種類の部品で構成されているが，特に配管系統はその中でもプラント機能の中核をなす必要不可欠な部品で，更新頻度も高いため，3Dモデル化の需要が高い．

しかし，プラント設備をレーザスキャナで計測し，得られた計測点群から配管系統のas-builtモデルを作成するためには，現在大きく二つの問題を抱えている．

一つは，プラント設備の計測点群は非常に入り組んだ構造と莫大な計測点群，及び計測ノイズを含んでいる．現在，計測点群から配管系統のas-builtモデルを構築するには，PC上で配管系統上にある点群を選択し，3Dモデルをフィッティングするという作業を手動で行う必要がある．しかし，入り組んだ構造内に含まれる配管上の点群のみを選択し，モデルをフィッティングする作業を手動で行うには莫大な作業時間と人員を必要とする．

そのため.プラント設備全体のレーザ計測点群からの配管系統上の点群の認識･抽出と，配管系統上の点群への3Dモデルのフィッティング手法を自動化する必要がある.

第二の問題点は図1.3に示すように，物体表面で反射したレーザをスキャナが計測するというレーザスキャナの性質上，スキャナと物体の間に他の物体が存在する場合，その影となる箇所へレーザが届かず計測点群が取得できないオクルージョン領域が存在する.プラント設備は非常に入り組んだ構造を持つため，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の形状を推測することが不可能である．こうしたオクルージョン領域を解消するためには，その領域を計測可能な別の位置にスキャナを改めて設置して計測を行った後，得られた点群同士をレジストレーションする必要がある．しかし，実際のレーザ計測では，スキャナの配置は操作者の経験則に基づいて決定している事が多く，そのスキャナ位置からの計測が効率的にオクルージョン領域を解消するとは限らない．そのため，計測を行って得られた計測データに含まれるオクルージョン領域を最小化するためのスキャナ配置を，計算機支援により推定する手法が必要となる.

1.2　研究目的

1.1 節で述べた課題解決のため，本研究では，プラント設備の 3 次元大規模レーザ計測点群を対象とした以下の二つの手法の開発を目的とする.

1. レーザ計測点群から直進パイプ，エルボ，ジャンクション等で構成される配管系統を全自動で認識する手法
2. 配管系統のレーザ計測時において配管部の効率的な認識を目的としたオクルージョン領域の最小化を行うスキャナ配置の自動推定手法

本研究の処理の流れを図 1.4 に示す．まず，プラント内の配管系統をあるスキャナ位置から計測して得られた点群から配管系統の自動認識手法によって配管系統のモデルを認識する．その後，そのモデルを用いて，配管系統の未計測領域の最小化を可能とする最適スキャナ配置の推定手法によって配管のさらなる認識にとって障害となるオクルージョンを最小化するスキャナ位置を自動決定し，改めてその位置から計測を行うことで計測点群を更新する．以上の処理を，計測対象としている配管系統全体が認識可能となるまで繰り返すことで完全な配管系統のモデルを得る.

1.3　論文の構成

上記目的を遂行するため，本論文では下記に示す手順により大規模レーザ計測点群か

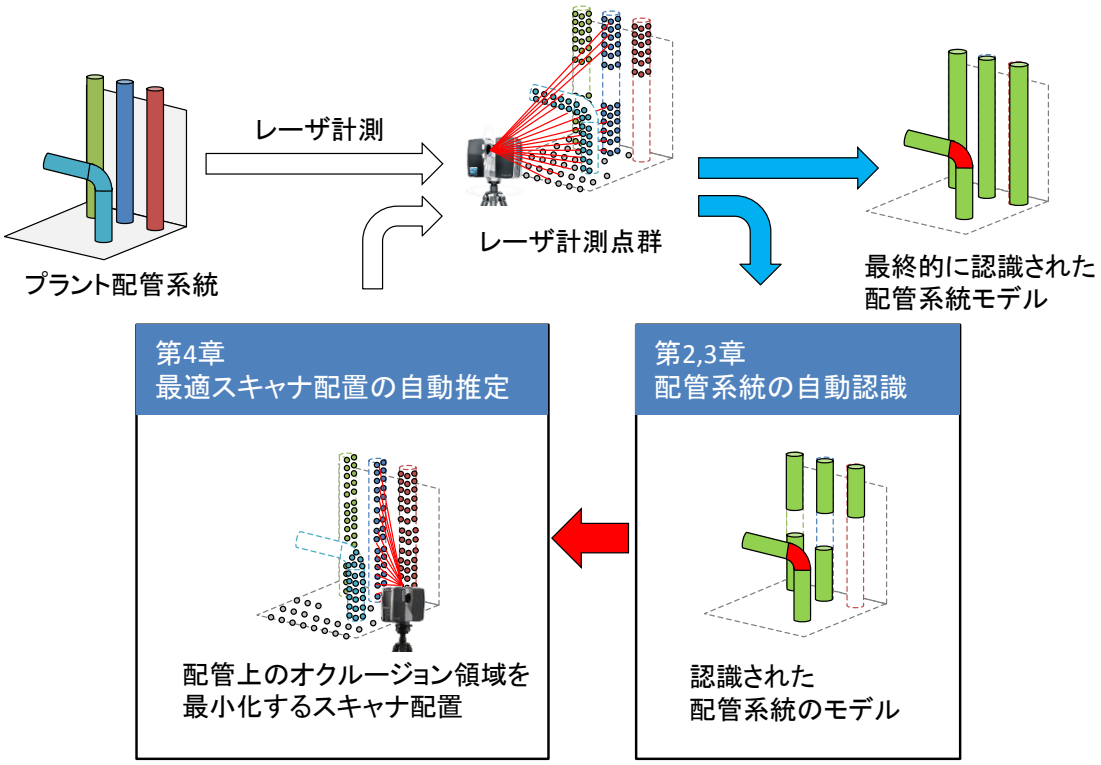


図 1.4　本研究の処理の概要

らのプラント配管系統の高度自動認識手法の確立を行う．本論文の構成を以下に示す．

第 2 章　法線テンソル解析に基づく大規模レーザ計測点群からの配管系統の自動認識アルゴリズムの開発

初めにレーザ計測点群からの配管系統の認識に関連する研究としてレーザ計測点群からの物体認識手法に関連する研究を紹介し，それらに対する本手法の位置付けを示す．その後，本手法を構成する法線ベクトル推定，法線テンソルに基づく直進パイプ認識，直進パイプ間の軸線の補完による接続要素と接続関係の認識手法について述べる．最後に，実際のプラントの計測点群に対して提案手法を適用した結果とそれに対する考察，及び問題点を述べる．

第 3 章　大規模レーザ計測点群からの配管系統の自動認識アルゴリズムの高速・高精度化

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，本研究で開発したグリッドセルを用いた効率的な法線ベクトル推定，法線ベクトルに基づくregion-growingを用いた配管系統上の点群抽出，軸線追跡による接続要素と接続関係の認識手法について述べる．最後に，実際のプラントの計測点群に対して提案手法を適用した認識結果とそれに対する考察を述べる．

第 4 章　配管系統上の未計測領域最小化のための最適スキャナ配置

初めに，関連研究としてNext-Best-View問題に関連する研究を紹介し，それらに対する本研究の位置づけを示す．その後，本研究で開発した最適スキャナ配置の推定手法について述べる．最後に，配管系統を含むプラントCADデータを入力としたシミュレーション上での提案手法の適用結果とそれに対する考察を述べる．

第 5 章　結論と今後の課題

本研究の結論と今後の課題について述べる．

第2章　法線テンソル解析に基づく大規模レーザ計測点群からの配管系統の自動認識アルゴリズムの開発

2.1 背景

プラント設備の計測点群は非常に入り組んだ構造と莫大な計測点群，及び計測ノイズを含んでいるため，計測点群から配管系統のas-builtモデルを構築するには，莫大な作業時間と人員を必要とする．そのため．プラント設備全体のレーザ計測点群からの配管系統上の点群の認識・抽出と，配管系統上の点群への3Dモデルのフィッティング手法を自動化する必要がある．

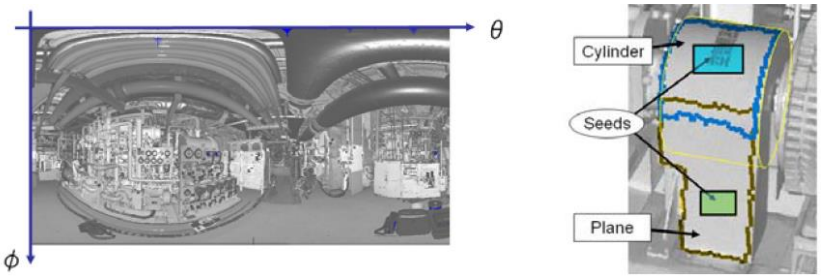
プラントの計測点群から配管系統を自動認識するにあたって，以下の必要条件を考えなければならない．

1. 配管系統の完全な形状を持つ計測点群を得るには，異なる位置から計測した点群をレジストレーションする必要がある．しかし，レジストレーションされた点群では，点の座標値情報のみが保存される場合がほとんどであるため，点群の座標値のみから認識可能である必要がある．
2. 配管系統の認識からモデル構築までの作業効率化のため，全ての処理が全て自動で行えることが望ましい．
3. 実際のプラント内部には，配管系統以外にも非常に数多くの物体が存在するため，配管系統以外の対象の計測点群も多く含まれるプラント全体の計測点群から，配管系統のみを選択的に認識できる必要がある．
4. 配管系統に含まれる配管要素として，直進パイプのみならずエルボ，ジャンクション，バルブや計器類が存在するため，これらの多様な配管要素のクラスを出来るだけ多く認識可能であることが望ましい．

2.2 関連研究

これまでレーザ計測点群から配管系統や柱状物体の3Dモデルを認識する手法がいくつか提案されている．

図2.1に示される通り，増田ら[1]は1スキャンの計測点群から計測時のレーザの水平・



(a) 計測点群の透視投影画像　(b) 選択したシード領域と得られた曲面

図 **2.1**　増田らの手法[1]による処理例

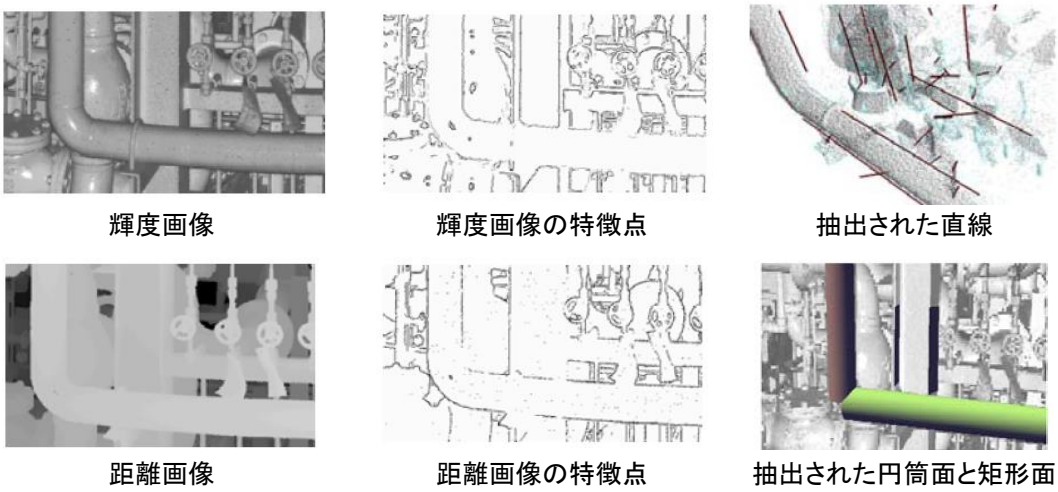
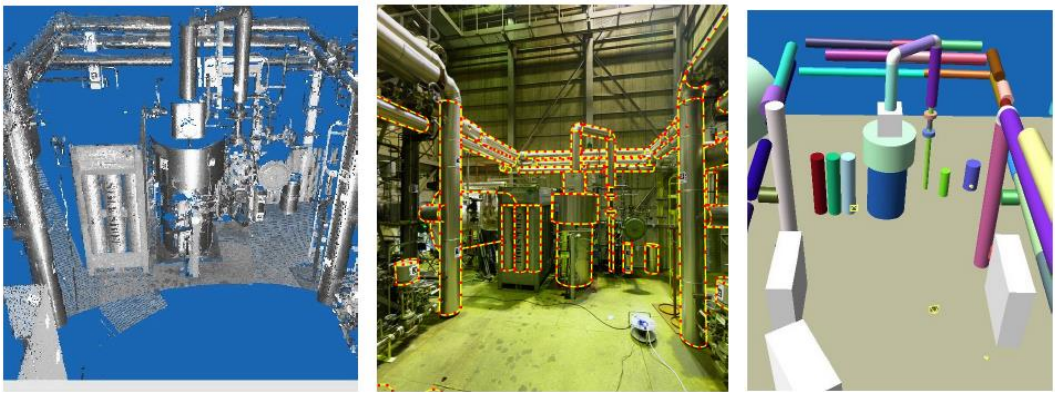


図 **2.2**　松沼らの手法[2]による処理例

垂直角度を軸パラメータとする透視投影画像を作成した後，対話的に選択した画像上の領域に対応する点群をシード点とするregion-growingを行い，円筒面や平面の抽出を行う手法を提案している．しかしこの手法では，多くの対話的処理を必要とするため，効率的な3Dモデルの再構築が不可能である．

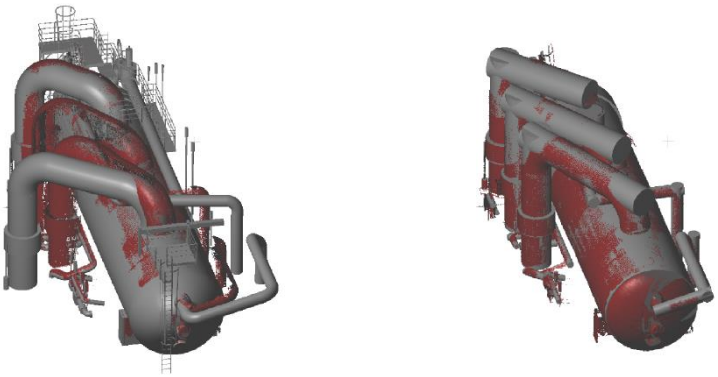
図 2.2 に示される通り，松沼ら[2]は 1 スキャンのレーザ計測時に得られる点群の距離画像と輝度画像から，円柱体の母線や矩形面のエッジを抽出し，これらの直線ペアから円筒面と矩形面の抽出を行う手法を提案している．また図 2.3 に示される通り，Rabbani ら[3]は滑らかな曲面上の点群を法線ベクトルに基づく region-growing によってセグメンテーションし，各セグメントに対してハフ変換を用いて円筒面と平面を認識した後，計測位置と同じ位置から取得した写真画像のエッジを用いて直方体や円柱体といった CSG モデルのマッチングを行う手法を提案している．[2]と[3]の手法は，1 スキャン毎の計測点群に対する計測原点の座標の情報が必要となるため，レジストレーション済みの点群データに対しては適用することが出来ないことが多い．

図2.4に示される通り，Aurelienら[4]は既存のプラントの3Dモデルに含まれる円筒面を初期モデルとして，付近の計測点群とのマッチングを繰り返し，計測点群に円筒面をフ



(a) 計測点群　　(b) 計測画像　　(c) 再構築された 3D モデル

図 **2.3**　Rabbani らの手法[3]による処理例

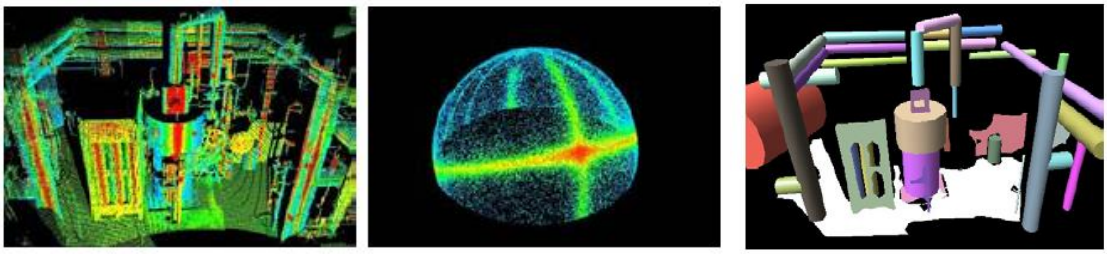


(a) 計測点群とプラント 3D モデル　　(b) フィッティング円筒面

図 **2.4**　Aurelien らの手法[4]による処理例

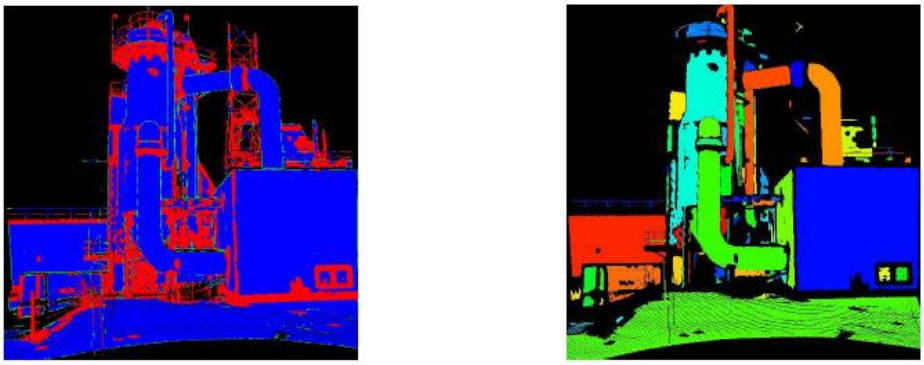
ィッティングする手法を提案している．この手法は計測点群の付近に類似した向きと径を持つ3Dモデルを手動でマッチングする必要がある．Johnsonら[5]はデータベース内にある機械部品のCADメッシュモデルと計測点群のそれぞれに対して作成したspin imageを用いて，CADモデルと点群のマッチングを行っている．しかし，この手法は直進パイプやH型鋼といった不変な長さパラメータをもつ部材のマッチングには適していない．

溝口ら[6]はマンハッタンワールド仮説に従う配管の認識を行っている．まず，計測点群から支配的な 3 軸を認識し座標変換を行う．次に，点群をボクセルデータ化し，ボクセルデータ中の直線成分を認識した後に，隣接する同一直線成分をグループ化することで，点群のグループ化を行う．図 2.5 に示される通り，Vosselman ら[7]は 3D ハフ変換を用いてプラントの計測点群から円筒面と平面を認識する手法を提案している．また，El-Harawany ら[8]は Mobile mapping system から得られた計測点群を入力として，電柱や標識といった柱状物体を固有値解析に基づくセグメンテーションと直線の特徴抽出，円筒面フィッティングを併用して認識する手法を提案している．これらの手法は計測点群のみを入力としているが，認識可能な配管系統のクラスは直進パイプのみである．



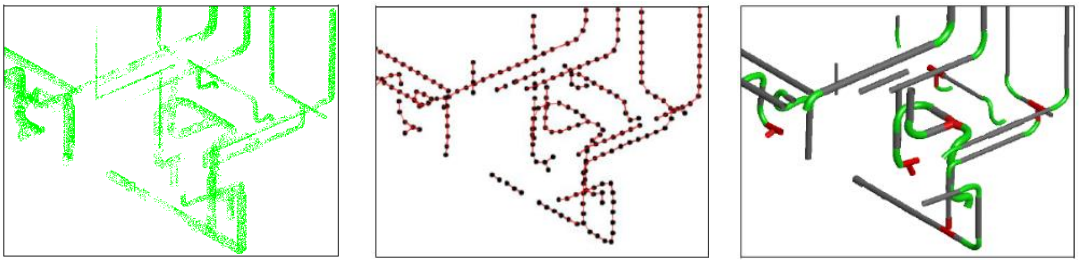
(a) 計測点群　　(b) 法線ガウスイメージ　　(c) 認識結果

図 **2.5**　Vosselman らの手法[7]による処理例



(a) 法線の変化による点の分類　　(b) セグメンテーション結果

図 **2.6**　Belton らの手法[9]による処理例

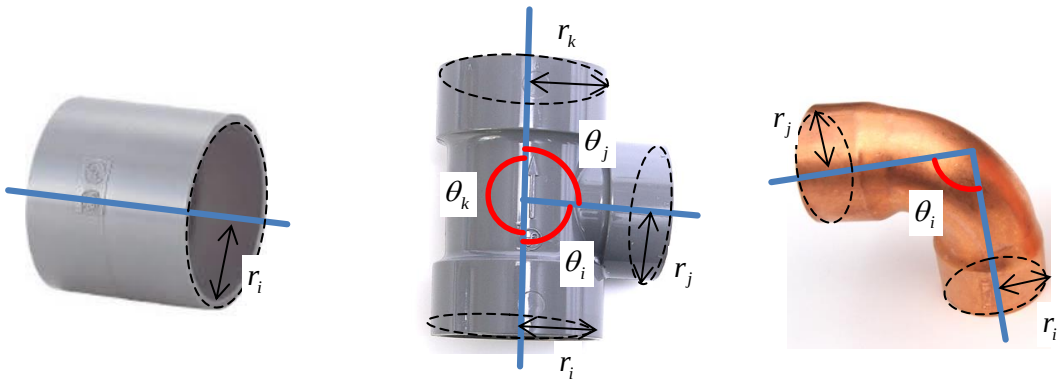


(a) 計測点群　　(b) 軸線上の点列　　(c) 認識された 3D モデル

図 **2.7**　Lee らの手法[11]による処理例

図2.6に示される通り，Beltonら[9]とRabbaniら[10]は，共分散行列の固有値解析と法線ベクトルに基づくregion-growing，平面フィッティングを用いて，プラントの計測点群を平面上に分布する点群と円筒面上に分布する点群に分類する手法を提案している．しかし，エルボやジャンクション上に分布する点群を分類できない他，各直進パイプ間の接続関係を認識していない．

図 2.7 に示される通り，Lee ら[11]は配管系統の計測点群から，ボロノイ図を用いて配管の軸線上にある点列を認識した後，点列を結ぶ線分間の角度から，軸線上の各点を直進パイプとエルボ，ジャンクションの軸線のいずれかに分類することで，配管系統のモデルを認識している．この手法では，直進パイプとエルボ，ジャンクションのみで構成された配管系統上の計測点群のみを用いており，バルブやフランジ，支持材といった部材は含まないため，一般的に配管系統以外の計測点が含まれるプラントの計測点群に対



（a）直進パイプ　　（b）ジャンクション　　（c）エルボ

図 **2.8**　認識対象の配管要素と定義パラメータ

しては適用できない．

これらの研究から配管系統以外の物体上の点を含むプラント全体のレジストレーション済みの計測点群を入力として，配管系統に含まれる直進パイプ，エルボ，ジャンクションといった配管要素を選択的に抽出し，さらにこれらの要素間の接続関係を全自動で認識する手法は，未だ提案されていない．

2.3　本章の目的

本章では，プラント全体のレジストレーション済みの計測点群を入力として，配管系統に含まれる直進パイプ，エルボ，ジャンクションといった配管要素や要素間の接続関係を全自動で認識する手法の開発を目的とする．本手法で認識可能な配管要素のクラスとその定義パラメータを図 2.8 に示す．

2.4　提案手法の概要

本章で提案する配管系統の認識手法の概要を図2.9に示す．本手法は主に3ステップで構成される．

Step.1)　背景点群の除去

まず，配管系統の他に床面，壁面，H型鋼等を含むプラント全体のレーザ計測点群を入力として，レーザ計測点群の各点に対して，分散共分散行列の固有値解析に基づく局所点分布特徴量[12]を求め，この特徴量を基準に平面上に分布すると思われる点を選択する．次に，選択した点をシード点として平面フィッティングを併用したRegion-growingを行うことで，床面や壁面といった平面で構成される構造物上に分布する点群領域を抽

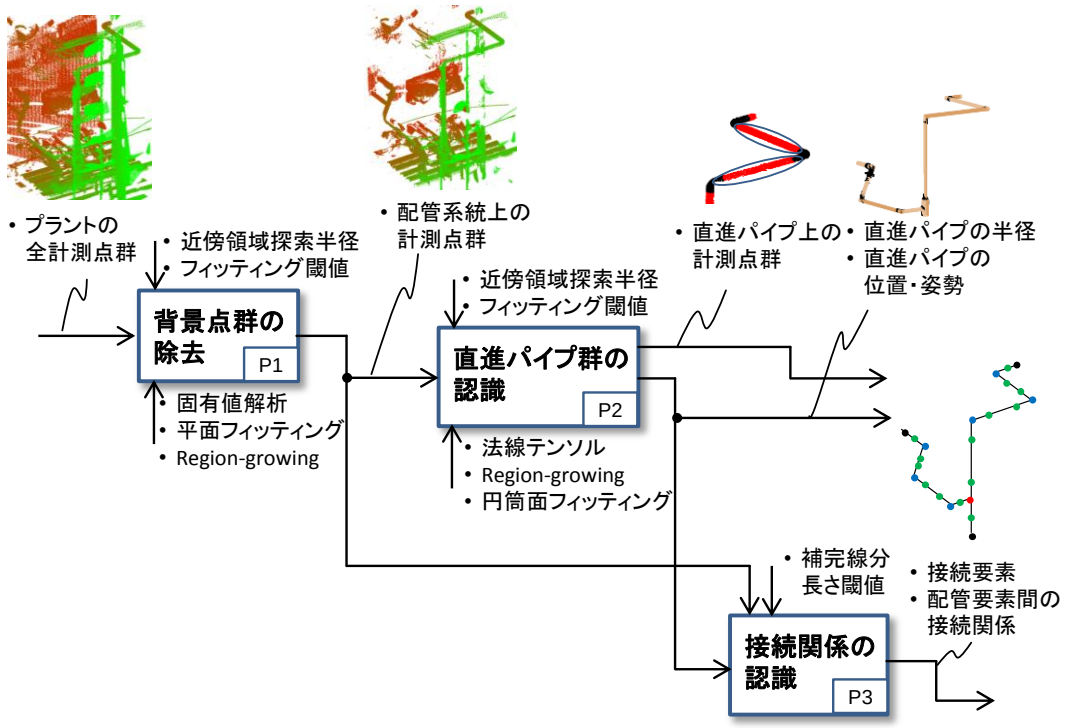


図 **2.9**　配管系統の認識手法の概要

出する．最後に抽出した点群を除去することで，計測点群全体から配管系統上の点群を大まかに抽出する．

Step.2)　直進パイプ郡の認識

Step1 で抽出された点群の各点について，その近傍内に含まれる点群への分散共分散行列の固有値解析[13]と二次陽曲面フィッティング[14]から，点の法線ベクトルを求める．次に，抽出された点群の各点に対して，近傍内に含まれる点群の法線ベクトルから法線ベクトルテンソル[15]の算出と固有値解析を行うことで，直進パイプ上に存在する点の特徴量を求め，全点の特徴量分布から直進パイプ上にある点群を抽出する．そして，この点群を対象とした Region-growing を行い，各直進パイプに対応する点群にグループ化する．最後に，各グループに含まれる点群に対して円筒面をフィッティングし，直進パイプの径と長さ，軸線の通過点と方向ベクトルを推定する．

Step.3)　接続要素の認識

Step1で抽出した配管系統上の点群と，Step2で認識された直進パイプの径と長さ，軸線の通過点と方向ベクトルから，認識された直進パイプ間の軸線の接続関係を推定する．最後に，接続している軸線の本数と軸線間の方向ベクトルから接続要素の分類を行う．

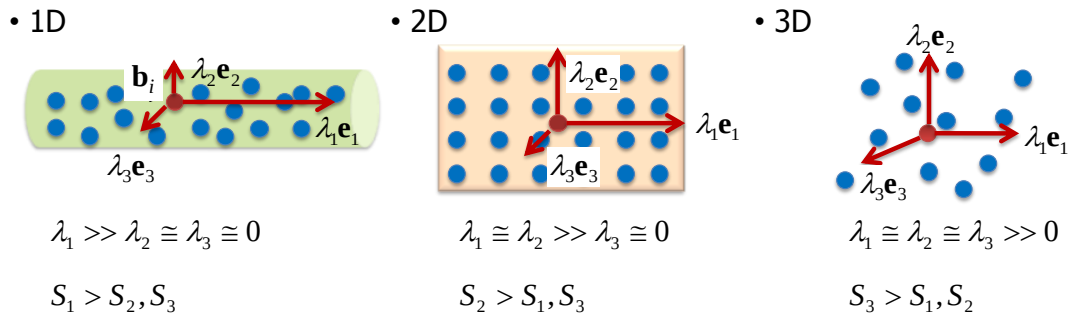


図 **2.10**　局所点分布特徴量

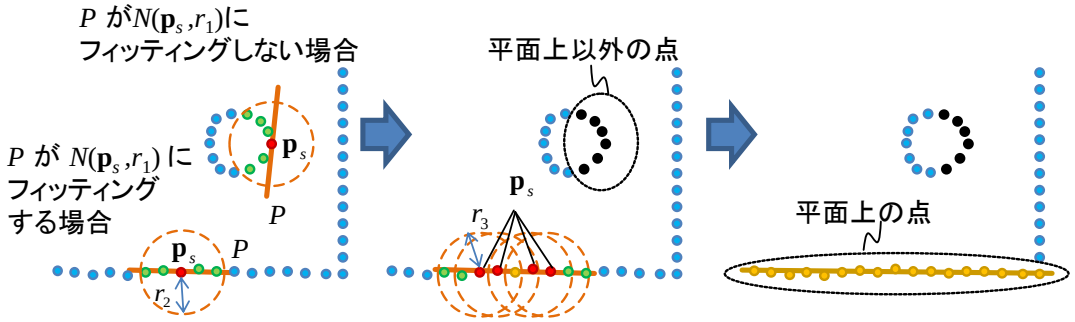


図 **2.11**　平面上の点群の抽出

2.5　背景点群の除去

2.5.1　点分布特徴量の算出

まず, レーザ計測点群 $\{\mathbf{p}_i\}$ の各点 $\mathbf{p}_i$ の近傍点群に対して, 式(2.1)の分散共分散行列 M_i を求める.

$$M_i = \frac{1}{|N(\mathbf{p}_i, r_1)|} \sum_{j=1}^{|N(\mathbf{p}_i, r_1)|} (\mathbf{p}_j - \mathbf{b}_i)^T (\mathbf{p}_j - \mathbf{b}_i) \tag{2.1}$$

ここで, $\mathbf{p}_i$ は1×3の点の座標値の行列, $N(\mathbf{p}_i, r_1)$ は点 $\mathbf{p}_i$ を中心とする半径 r_1 の球内に存在する点の集合, $\mathbf{b}_i$ は $N(\mathbf{p}_i, r_1)$ の重心点の位置ベクトルである.

次に, M_i に対して固有値解析を行い, 固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0)$ と対応する単位固有ベクトル $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ を得る. そして, これらから式(2.2)に示される局所点分布特徴量 S_1, S_2, S_3 を求める.

$$\begin{aligned} S_1 &= \lambda_1 - \lambda_2 \\ S_2 &= \lambda_2 - \lambda_3 \\ S_3 &= \lambda_3 \end{aligned} \tag{2.2}$$

ここで，図2.10に示すように，$N(\mathbf{p}_i, r_1)$ が1次元的な分布をしていると，$\lambda_1 \gg \lambda_2 \cong \lambda_3 \cong 0$ となり，$S_1 = \max(S_1, S_2, S_3)$ となる．$N(\mathbf{p}_i, r_1)$ が2次元的な分布をしていると，$\lambda_1 \cong \lambda_2 \gg \lambda_3 \cong 0$ となり，$S_2 = \max(S_1, S_2, S_3)$ となる．$N(\mathbf{p}_i, r_1)$ が3次元的な分布をしていると，$\lambda_1 \cong \lambda_2 \cong \lambda_3 \gg 0$ となり，$S_3 = \max(S_1, S_2, S_3)$ となる．そのため，各点について点分布特徴量 S_1, S_2, S_3 の大小を比較することで，近傍点群の点分布状態を1次元分布，2次元分布，3次元分布のいずれかに分類することができる．

2.5.2　平面上の点群の抽出と除去

図2.11に示すように，はじめに全計測点群中から $S_2 = \max(S_1, S_2, S_3)$ を満たし，かつ，最も S_2 が大きい点を，平面上に存在する可能性が最も高い点 $\mathbf{p}_s$ として選択する．そしてこの点の r_2 近傍点群 $N(\mathbf{p}_s, r_2)$ に対してLMedS法[16]を用いた平面フィッティングを行う．LMedS法とは，対象データ全体からランダムに選択したデータを用いてモデルパラメータの推定を繰り返し，データ全体とモデル間の二乗誤差の中央値が最も小さいモデルを最終的に選択するロバスト推定手法である．

このとき，フィッティング平面 P と点群 $N(\mathbf{p}_s, r_2)$ 間の距離平均が閾値 τ_p より大きい場合は，点群 $N(\mathbf{p}_s, r_2)$ が配管系統表面等の曲面上に分布しているとみなし，$N(\mathbf{p}_s, r_2)$ を平面以外の点群として分類する．

一方，P と $N(\mathbf{p}_s, r_2)$ 間の距離平均が閾値 τ_p 以下の場合は，点群 $N(\mathbf{p}_s, r_2)$ が床面や壁面といった平面上に分布していると判定し，シード点 $\mathbf{p}_s$ を中心とした r_3 近傍点群 $N(\mathbf{p}_s, r_3)$ の探索を行い，新しく得られた点群に対してLMedS法による平面フィッティングを行う．このとき，フィッティング平面と点群間の平均距離が閾値 τ_p 以下であれば，新しく得られた点群の一つ一つを新たなシード点として近傍点群の探索を繰り返し，平面上に存在する点群の領域を拡大する．この平面フィッティングとRegion-growingを探索範囲内に対象点が存在しなくなるか，フィッティング平面と得られた点群間の距離平均が閾値 τ_p を越えるまで繰り返し，最終的に得られた点群を一つの平面上に分布する点群として分類する．

以上の処理を全ての点群が判定済みとなるまで繰り返し，計測点群全体から平面上に存在すると判定された点群のみを除去することで，配管系統上の点群をおおまかに抽出する．

2.6　直進パイプ群の認識

2.5 節で抽出された点群から，配管系統内の直進パイプ上の点群の認識とその点群への円筒面フィッティングを行い，直進パイプの径と長さ，軸線の通過点と方向ベクトルを推定する．提案手法の概要を図 2.12 に示し，以下に各処理の詳細を述べる．

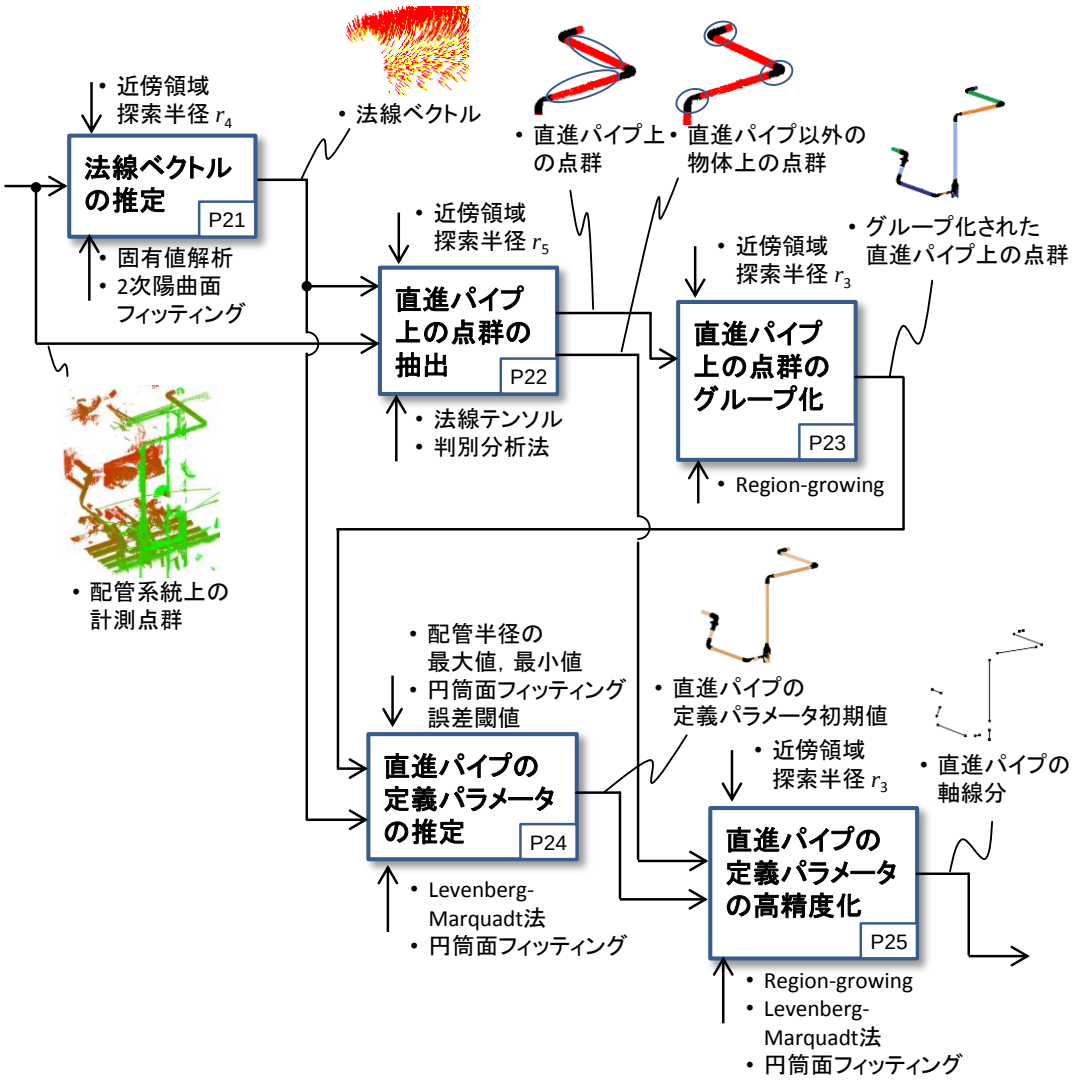
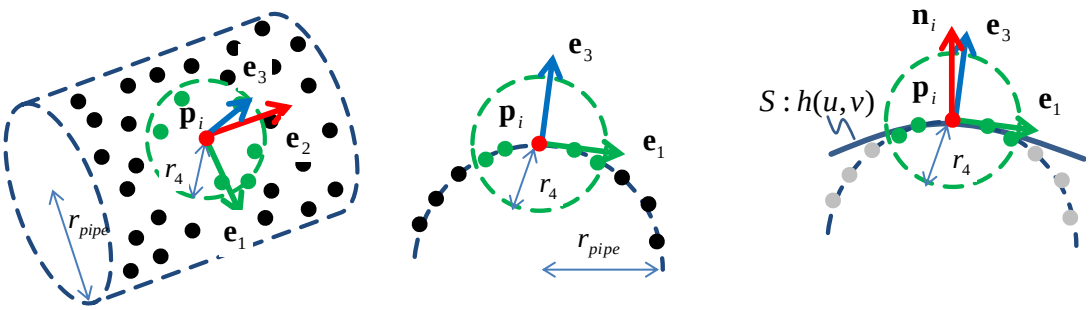


図 **2.12**　直進パイプ群の認識

2.6.1　法線ベクトルの推定

初めに，抽出された配管系統上の点群内の各点 $\mathbf{p}_i$ の近傍点群 $N(\mathbf{p}_i, r_4)$ に対して，式(2.1)と同様の分散共分散行列 M_i を求め，2.5.1 節と同様に固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ $(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0)$ と対応する単位固有ベクトル $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ を得る．このとき図2.13(a)に示すように，近傍探索半径 r_4 が，点 $\mathbf{p}_i$ が存在する直進パイプの半径 r_{pipe} と比較して十分小さければ，点群 $N(\mathbf{p}_i, r_4)$ は平面上にほぼ分布し，最小固有値に対応する固有ベクトル $\mathbf{e}_3$ は点 $\mathbf{p}_i$ における法線ベクトルの近似値をとる．そのため，$\mathbf{e}_3$ を点 $\mathbf{p}_i$ の法線ベクトルの初期値 $\mathbf{n}_i'$ とする．次に図2.13(b)に示すように，点 $\mathbf{p}_i$ を原点，$\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 (= \mathbf{n}_i')$ を u,v,w 軸とする局所座標系 $u-v-w$ を定義し，この座標系における $N(s, r_4)$ に含まれる計測点の座標値 $(u_k, v_k, w_k)(k \in N(i, r_4))$ を求める．そして，これらの点群に対して式(2.3)



(a) 初期法線ベクトルの算出　　(b) 陽曲面フィッティング

図 **2.13**　法線ベクトルの推定

の二次陽曲面 $S : w = h(u,v)$ を最小二乗法を用いてフィッティングする．

$$w = h(u,v) = a_0u^2 + a_1v^2 + a_2uv + a_3u + a_4v + a_5 \tag{2.3}$$

最終的に，点 $\mathbf{p}_i$ を曲面 S 上に投影し，その投影点における曲面の法線ベクトルを求め，点 $\mathbf{p}_i$ の近似的な法線ベクトル $\mathbf{n}_i$ とする．

2.6.2　直進パイプ上の点群の抽出

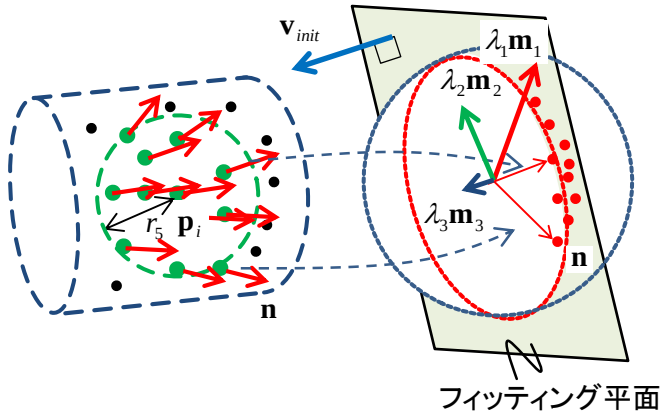
直進パイプ上に存在する点群の特徴量として，さらに法線ベクトルテンソルの固有値を求め，これを基準に配管系統上の点群を直進パイプ上の点群とそれ以外の点群に分類する．

初めに，配管系統上の点群内の各点 $\mathbf{p}_i$ の近傍点群 $N(\mathbf{p}_i, r_5)$ がもつ法線ベクトル集合から $\mathbf{p}_i$ 周辺の法線ベクトルテンソル T_i を式(2.4)により求める．

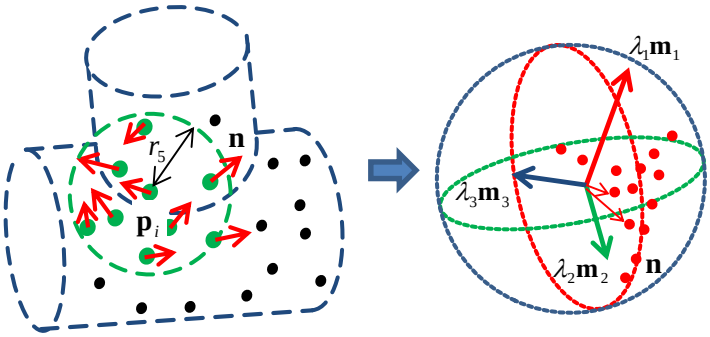
$$T_i = \frac{1}{\left|N(\mathbf{p}_i, r_5)\right|} \sum_{k=1}^{\left|N(\mathbf{p}_i, r_5)\right|} \mathbf{n}_k^T \cdot \mathbf{n}_k \tag{2.4}$$

次に，T_i に対する固有値解析を行い，固有値 $\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \hat{\lambda}_3 (\hat{\lambda}_1 \geq \hat{\lambda}_2 \geq \hat{\lambda}_3 \geq 0)$ と対応する単位固有ベクトル $\hat{\mathbf{e}}_1, \hat{\mathbf{e}}_2, \hat{\mathbf{e}}_3$ を得る．この固有値と固有ベクトルは図 2.14 に示すように，近傍点群 $N(\mathbf{p}_i, r_5)$ の法線ベクトル集合を単位球に投影して得られる法線ガウス球上の分布状況を示している．すなわち，近傍点群 $N(\mathbf{p}_i, r_5)$ がすべて直進パイプ上に存在する場合は，図 2.14(a)のように法線ベクトルがガウス球上で同一平面上に分布し，固有値 $\hat{\lambda}_3$ が $\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2$ と比べて非常に小さくなる．これに対して，$N(\mathbf{p}_i, r_5)$ がエルボやジャンクションといった接続要素，フランジやバルブといった直進パイプ以外の物体を含む場合は，図 2.14(b)のように法線ベクトルがガウス球上で 3 次元的に分布するため，前者の場合と比較して $\hat{\lambda}_3$ が大きくなる．

従って，法線ベクトルテンソルの最小固有値 $\hat{\lambda}_3$ に対して適切な閾値を設定し，二値化



(a) 直進パイプ上の点



(b) 直進パイプ以外の物体上の点

図 **2.14**　法線テンソルによる点群の分類

を行うことで直進パイプ上に存在する点群とそうでない点群との分離抽出が行える．この二値化の手法として，ユーザの指定が不要で，自動で閾値を決定可能な判別分析法[17]を用いた．以下に判別分析法による二値化手法をまとめる．

判別分析法による二値化

法線ベクトルテンソルの固有値強度ヒストグラムにおける固有値の分布を閾値 λ_t で 2 つのクラス(λ_t 以上と λ_t 未満)に分割したとき，2 つのクラスが最もよく分離するような閾値 λ_t は以下の手順で求められる．

まず，それぞれのクラスの点数，固有値の平均値，分散を以下のように表す．

1)　クラス 1

固有値 λ_3 の値が閾値 λ_t 以上の点，点数 ω_1，固有値 λ_3 の平均値 M_1，分散 σ_1^2

2)　クラス 2

固有値 λ_3 の値が閾値 λ_t 未満の点，点数 ω_2，固有値 λ_3 の平均値 M_2，分散 σ_2^2

ここで，全点の固有値 λ_3 の平均値 M_T をと置くと，クラス内分散 σ_W^2，クラス間分散 σ_B^2 は，それぞれ式(2.5), (2.6)で計算される．

$$\sigma_W^2 = \frac{\omega_1\sigma_1^2 + \omega_2\sigma_2^2}{\omega_1 + \omega_2} \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned}\sigma_B^2 &= \frac{\omega_1(M_1 - M_T)^2 + \omega_2(M_2 - M_T)^2}{\omega_1 + \omega_2} \\ &= \frac{\omega_1\omega_2(M_1 - M_2)^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2}\end{aligned} \tag{2.6}$$

全点の固有値 λ_3 の分散を σ_T^2 とすると式(2.7)が成り立つ.

$$\sigma_T^2 = \sigma_W^2 + \sigma_B^2 \tag{2.7}$$

ここで，2 つのクラスを分離するための尺度として，クラス間分散とクラス内分散の比を採用し，これを判別比とすると，判別比は式(2.8)で表せる.

$$\frac{\sigma_B^2}{\sigma_W^2} = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2 - \sigma_B^2} \tag{2.8}$$

ここで，全分散 σ_T^2 は閾値 λ_t に依存しない定数であるので，判別比を最大にするためにはクラス間分散 σ_B^2 を最大にすればよい．クラス間分散 σ_B^2 を最大にする λ_t の値が，2 つのクラスを最もよく分離する閾値となる.

配管系統上の点群にこの手法を適用した場合，クラス 2 に分類された点群が直進パイプ上に存在する点群となる.

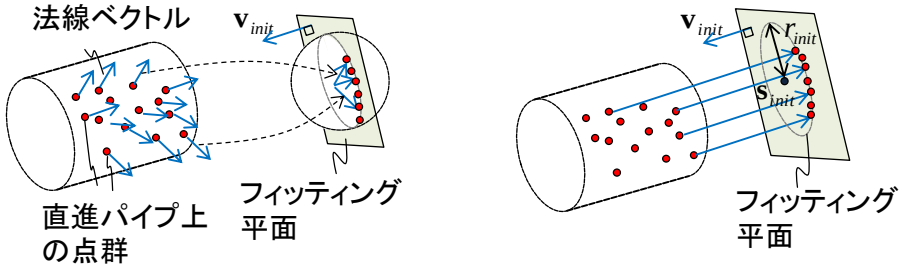
2.6.3　直進パイプ上の点群のグループ化

直進パイプ上に存在する点群を対象として，region-growingを用いて一本のパイプに対応する領域にグループ化する．region-growingは以下の手順で行われる.

1. 2.6.2節で直進パイプ上と判定された点群の中から，ランダムにシード点 $\mathbf{p}_s$ を選択する.
2. シード点 $\mathbf{p}_s$ の r_3 近傍点群 $N(\mathbf{p}_s, r_3)$ の中から直進パイプ上の点群を領域に逐次加える.
3. 領域に新しく加えられた点の各々を新たなシード点として，同様の近傍探索を探索範囲内に新しい直進パイプ上の点が存在しなくなるまで繰り返す.
4. 全ての直進パイプ上の点群が探索済みとなるまで，1から3の処理を繰り返す.

2.6.4　直進パイプの定義パラメータの推定

グループ化された直進パイプ上の点群に対して，以下の手順で円筒面をフィッティン



（a）初期軸ベクトル　　（b）初期半径と軸通過点

図 **2.15**　直進パイプの定義パラメータ初期値の推定

グし，各パイプの径と長さ，軸線の通過点と方向ベクトルを推定する．

初めに，各グループに分割された直進パイプ上の点群がもつ法線ベクトル集合から，法線ガウス球を作成する．そして図2.15(a)に示すように，法線ガウス球の原点を通過し，ガウス球上の法線ベクトルの終点群にフィッティングする平面をLMedS法により求め，このフィッティング平面自体の法線ベクトルを直進パイプの軸線の方向ベクトルの初期値 $\mathbf{v}_{init}$ とする．このとき，LMedS法の試行回数は100とした．次に，図2.15(b)に示すように，グループ内の点群をフィッティング平面に投影し，この投影点群にフィッティングする円を最小二乗法によって求める．この円の中心点を直進パイプの軸線の通過点の初期値 $\mathbf{s}_{init}$，円の半径を直進パイプの半径の初期値 r_{init} とする．

次に，$\mathbf{v}_{init}$，$\mathbf{s}_{init}$，r_{init} を初期値として，Levenverg-Marquadt 法による非線形最小二乗の円筒面フィッティング[18]を行い，グループ内の点群を用いた最小化問題を解くことで，直進パイプの半径と軸線の通過点，方向ベクトルを高精度に算出する．この手法では，円筒面モデルのパラメータは $(\alpha,\beta,\gamma,a,b,c,r)$ の 7 つの変数で表され，(α,β,γ) は円筒面の軸線の単位方向ベクトル，(a,b,c) は軸線上のある一点の位置ベクトル，r は円筒面の半径を示す．円筒面フィッティングの目的関数は以下の式(2.9),(2.10),(2.11)で表される．

$$\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}(f_i - r)^2 \rightarrow \min \tag{2.9}$$

$$f_i = \sqrt{m^2 + n^2 + o^2} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned} m &= \gamma(y_i - b) - \beta(z_i - c) \\ n &= \alpha(z_i - c) - \gamma(x_i - a) \\ o &= \beta(x_i - a) - \alpha(y_i - b) \end{aligned} \tag{2.11}$$

ここで，(x_i, y_i, z_i) はグループ内の点の座標値，N はその点数を表す．

そして，上式から得られた最適フィッティング円筒面の半径値 r，及びフィッティング円筒面と直進パイプ上の点群間の平均距離 $\bar{\varepsilon}$ をもとに，$(r < r_{\min}) \vee (r > r_{\max}) \vee (\bar{\varepsilon} > \varepsilon_\tau)$ を満たす直進パイプ上の点群のグループを，実際には直進パイプ上にはない点群が誤分類

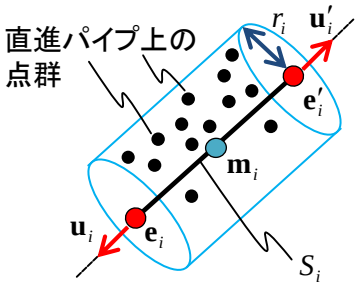
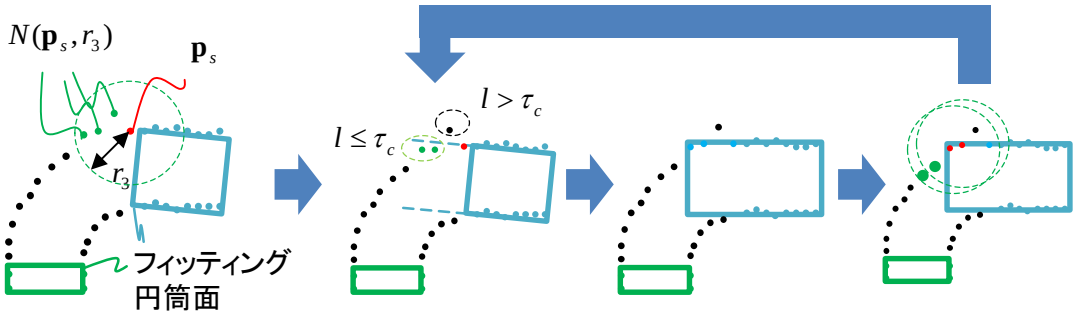


図 **2.16**　軸線分の生成



(a) 近傍点探索　　(b) 円筒面付近の点群抽出　　(c) 円筒面フィッティング　　(d) 近傍点探索

図 **2.17**　Region-growing を用いた円筒面フィッティング

された点群グループと判定し，除去する．ここで，$r_{\min}, r_{\max}$ は計測環境内に存在すると思われる配管の半径の最小値と最大値を基に決定された，ε_τ は計測ノイズのレベルを基に決定された閾値である．これらの閾値の適切な設定は2.8.3節で述べる．

その後，図 2.16 に示すように，残っている点群グループを対象として，グループ i 内の点群を最適フィッティング円筒面の軸線に投影し，軸線の通過点 $\mathbf{s}$ からの符号付き距離が最大となる投影点 $\mathbf{e}_i$ と最小となる投影点 $\mathbf{e}'_i$ を端点とする軸線分 S_i を作成することで，直進パイプの長さを推定する．

2.6.5　直進パイプの定義パラメータの高精度化

2.6.2節で行った法線テンソルの最小固有値 $\hat{\lambda}_3$ に対する判別分析法では，直進パイプ上の点とそれ以外の点の完全な分離は困難であるため，直進パイプ以外の点群と判定された点の中には，直進パイプ上の点であるにも関わらず直進パイプ以外の点として判定された点が含まれる．そこで，より高精度な直進パイプの半径と長さ，軸線の通過点と方向ベクトルを求めるため，これらの誤判定された点群を復活させ，直進パイプ点群のグループに改めて加えた後，円筒面のフィッティングを再度行う．

図 2.17(a)に示すように，初めに 2.6.4 節で既にフィッティングされている円筒面に最も近く，かつパイプ端面に最も近い直進パイプ以外の点をシード点 $\mathbf{p}_s$ として選択する．次に図 2.17(b)に示すように，シード点 $\mathbf{p}_s$ の r_3 近傍点群内から，円筒面からの距離 l が閾値

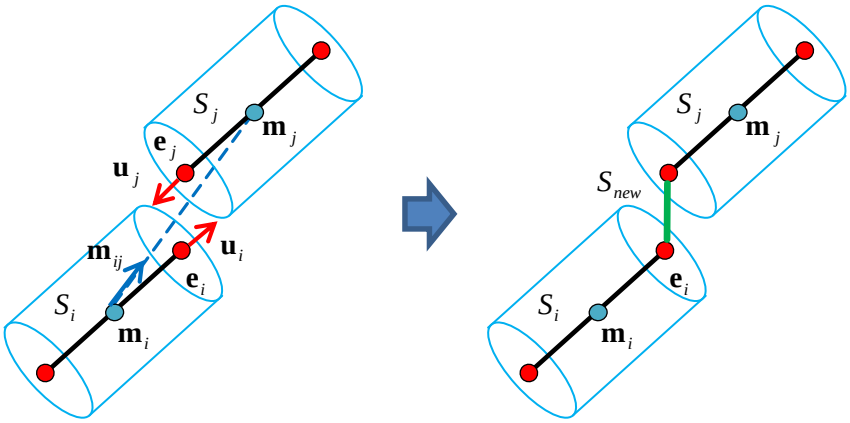


図 **2.18**　直進パイプ上のオクルージョン部分の認識

τ_c 以下の点のみを抽出して，グループ内の直進パイプ上の点群に加えた後，図 2.17(c)に示すように，2.6.4 節と同様の非線形最小二乗法による円筒面フィッティングを行う．さらに図 2.17(d)に示すように，新しく加えられた点の各々を新たなシード点として近傍探索を行い，同様の処理を円筒面にフィッティングする直進パイプ以外の点群が探索領域内に存在しなくなるまで繰り返すことで，直進パイプ点群のグループの領域を最大限まで拡大する．

2.7　接続関係の認識

次に，2.6節で作成した軸線分の方向や位置から，パイプのオクルージョン部分の補完やパイプ間の接続要素の認識を行う．

図2.16に示すように，各軸線分 S_i は，線分の端点 $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_i'$，線分の中点 $\mathbf{m}_i$，端点から軸線分の外側方向に向かう単位ベクトル $\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_i'$，フィッティング円筒面の半径値 r_i で定義される．この軸線分の集合 $\{S_i\}$ をもとに，パイプのオクルージョン部分の補完，ジャンクション部分の認識，エルボ部分の認識を以下の手順で行う．

2.7.1　直進パイプ上のオクルージョン部分の認識

オクルージョンにより，本来一本のパイプであるにもかかわらず複数のパイプ点群グループに分割されているグループ同士を補完するため，以下の処理を行う．

図 2.18 に示すように，初めに式(2.12)，(2.13)を満たす，ほぼ同一直線上に存在する軸線分のペア S_i, S_j を軸線分集合内の全要素から選択する．

$$\left|\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_j\right| > \tau_{inner} \tag{2.12}$$

$$\left|\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{m}_{ij}\right| > \tau_{inner} \tag{2.13}$$

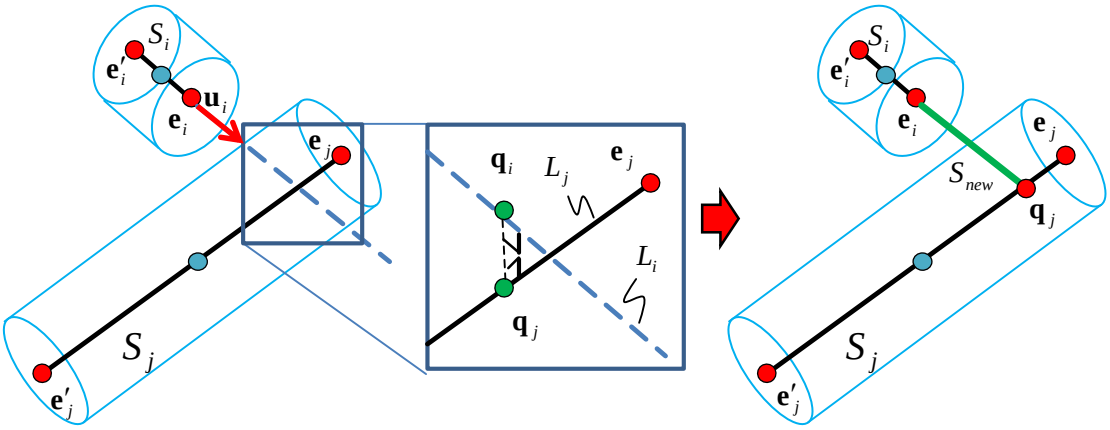


図 **2.19**　ジャンクション部分の認識

ここで，$\mathbf{m}_{ij}$ は，二つの軸線分の中点 $\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j$ を結ぶ直線の単位方向ベクトルである．なお，本論文では，τ_{inner} は実験的に0.98と設定した．

次に，これらの条件を満たす軸線分のペアの内，端点間の距離 $\|\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j\|$ が最も小さくなるペアに注目し，この距離が閾値 τ_l 以下であれば，端点 $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j$ の間に新しい軸線分 S_{new} を挿入する．また，S_{new} が持つ半径値は，接続対象となる線分 S_i, S_j の持つ半径値 r_i, r_j の平均値とする．

2.7.2　ジャンクション部分の認識

次に，T，Yジャンクション部分の認識を行う．図2.19に示すように，初めに，式(2.14),(2.15)を満たす軸線分のペア S_i, S_j を選択する．

$$\|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\| < \tau_{skew} \tag{2.14}$$

$$\|\mathbf{e}'_i - \mathbf{e}_i\| > \|\mathbf{q}_i - \mathbf{e}_i\| \tag{2.15}$$

ここで $\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j$ は，端点 $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}'_i$ 及び $\mathbf{e}_j, \mathbf{e}'_j$ を通過する直線 L_i, L_j とそれらの共通垂線との交点の位置ベクトルとする．また，τ_{skew} は L_i, L_j 間の距離に対する閾値である．

次に，これらの条件を満たす軸線分のペアの内，距離 $\|\mathbf{e}_i - \mathbf{q}_j\|$ が最小となるペアを選択し，この距離が閾値 τ_l 以下であれば，$\mathbf{e}_i, \mathbf{q}_j$ を結ぶ新しい軸線分 $S_{new,i}$ を挿入する．また，$S_{new,i}$ が持つ半径値は，半径 r_i と同じ値とする．

2.7.3　エルボ部分の認識

次に，エルボ部分の認識を行う．図2.20に示すように，初めに式(2.14)を満たす軸線分のペアを選択する．次に，これらの条件を満たす軸線分のペアの内，距離 $\|\mathbf{e}_i - \mathbf{q}_i\|$ と $\|\mathbf{e}_j - \mathbf{q}_j\|$ の和が最小となるペアを選択し，各々の距離がしきい値 τ_l 以下であれば，$\mathbf{e}_i, \mathbf{q}_i$ を結ぶ軸線分 $S_{new,i}$ と $\mathbf{e}_j, \mathbf{q}_i$ を結ぶ軸線分 $S_{new,j}$ を挿入する．$S_{new,i}$ が持つ半径値は半径 r_i と同

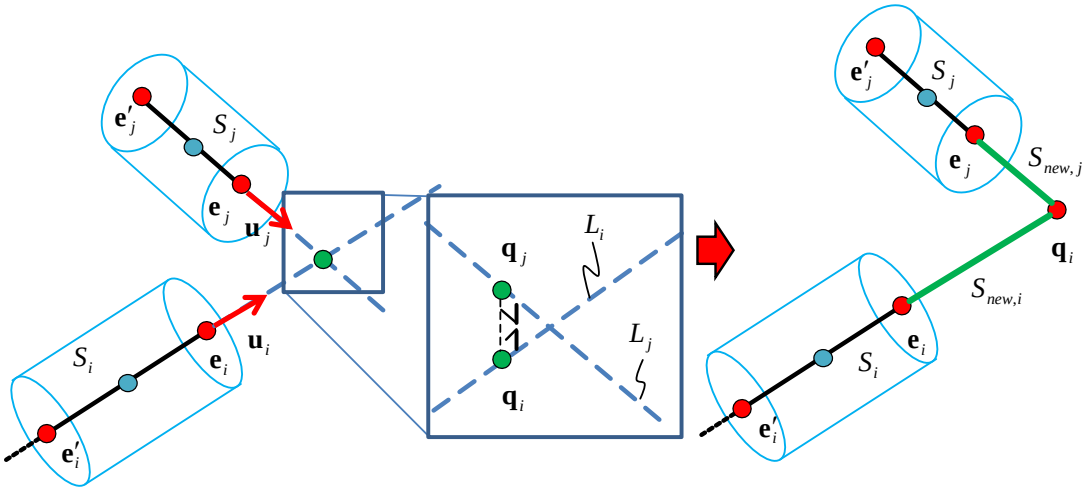
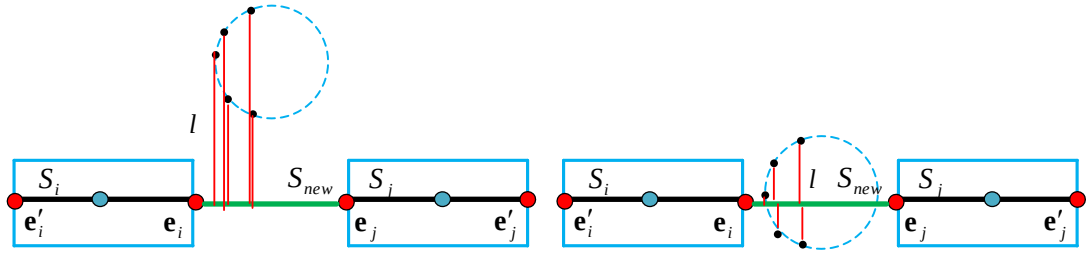


図 **2.20**　エルボ部分の認識



(a)　干渉なし　　(b)　干渉あり

図 **2.21**　補完軸線分の干渉判定

じ値とし，$S_{new,j}$ が持つ半径値は半径 r_j と同じ値とする．

2.7.4　干渉する補完軸線分の除去

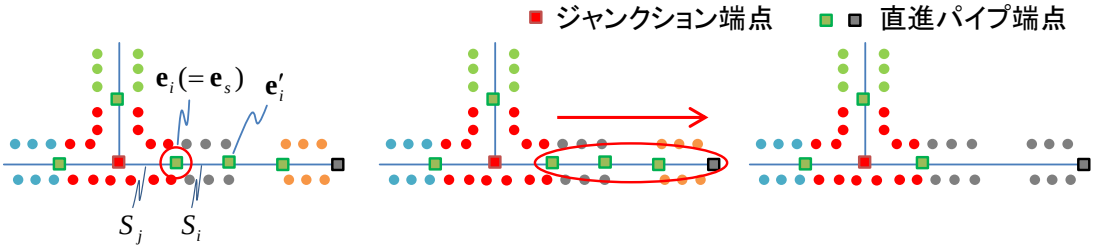
2.7.1節から2.7.3節で補完された軸線分に対応する配管が他の物体と干渉するかどうかを調べ，干渉する場合は不適当な補完軸線分と判定し，除去する．図2.21(a)に示すように，補完軸線分 S_{new} が正しく認識された配管であれば，付近の計測点群間の最小距離はパイプの径と比較して大きくなる．一方，図2.21(b)に示すように，補完軸線分 S_{new} と点群間の最短距離 l が非常に小さい場合，補完されたパイプが他の部品と干渉していると考えられる．そのため，$l < \tau_s$ を満たす場合は，この補完軸線分を除去する．なお，本論文では $\tau_s < 0.05 r_i$ と設定した．

2.7.5　配管系統の要素の分類

次に，各軸線分の両端点 $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}'_i$ を以下の基準にもとづいて分類する．

1)　直進パイプ端点

端点に2つの軸線分が接続しており，その軸ベクトル $\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j$ が $\left|\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_j\right| > \tau_{inner}$ を満たす．



(a) 出発点の選択　　(b) 同一配管の軸線の探索　　(c) 同一配管の軸線の統合

図 **2.22**　同一配管の軸線分の統合

2)　エルボ端点

端点に2つの軸線分が接続しており，その軸ベクトル $\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j$ が $|\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_j| \leq \tau_{inner}$ を満たす.

4)　Tジャンクション

端点に3つの軸線分が接続している

2.7.6　同一配管上の軸線分の統合

分類された軸線分端点をもとに，オクルージョンによって分割されていた複数の直進パイプ上の点群領域を統合することで，より精密なパイプ点群領域を得る.

初めに，図2.22(a)のように下記の条件①，②のいずれかを満たす端点 $\mathbf{e}_i$ を出発点 $\mathbf{e}_s$ として選択する. ①一本の軸線分 S_i のみが接続している端点である，②直進パイプ端点で，かつ，接続している軸線分 S_i の反対側の端点 $\mathbf{e}'_i$ がパイプ端点で，接続しているもう一つの軸線分 S_j の反対側の端点 $\mathbf{e}'_j$ がパイプ端点以外の端点である.

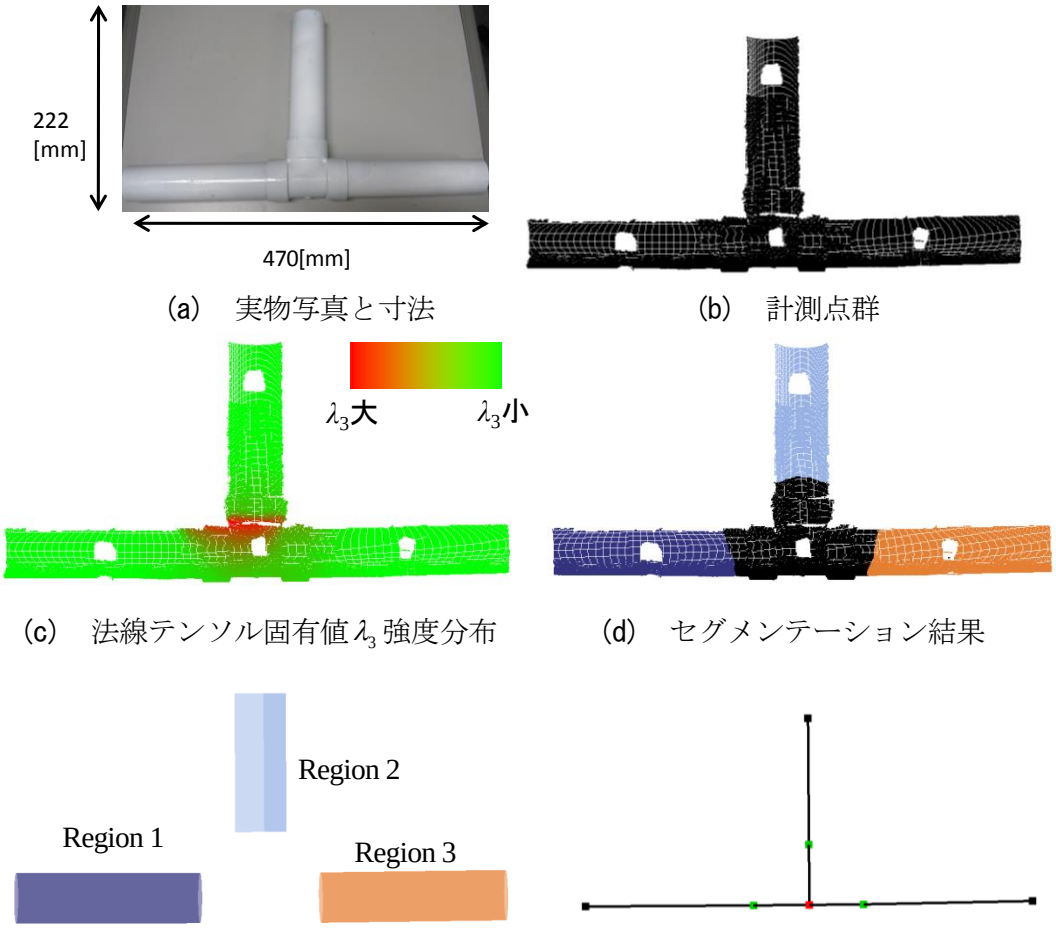
次に，図 2.22(b)のように出発点に接続している軸線分の反対側の端点が直進パイプ端点である場合，その軸線分に対応する直進パイプ上の点群を領域に加え，その端点に移動する．この処理を，移動先の端点が直進パイプ端点でなくなるまで繰り返すことで，一本のパイプに対応するパイプ点群領域を得る.

その後，図 2.22(c)のようにこの統合された長いパイプ点群領域に対して 2.6.4 節と同様の円筒面フィッティングを行うことで，高精度なパイプの径と長さ，軸線の通過点と方向ベクトルの認識が可能となる.

2.8　認識実験結果

2.8.1　PVC パイプのレーザ計測点群に対する検証

予備実験として，PVC製の直進パイプ，Tジャンクションとエルボを用いて作成したモデルに対して，非接触デジタイザVIVID 910を用いてレーザ計測を行い，本手法のP2のパイプ点群の認識と円筒面フィッティング処理，P3の接続要素の認識処理を行い，配管半径の認識精度との検証を行った．しきい値は $r_3 = 0.005$，$r_4 = 0.01$，$r_5 = 0.05$，$\tau_c = 0.001$，$\tau_l = 0.1$，$\tau_{skew} = 0.003$ (単位は全てm)とし，計算機はXeon E5520 2.27 GHz CPU



(a)　実物写真と寸法　　(b)　計測点群

(c)　法線テンソル固有値λ_3強度分布　　(d)　セグメンテーション結果

(e)　円筒面フィッティング結果　　(f)　軸線分認識結果

図 **2.23**　T ジャンクションの認識結果

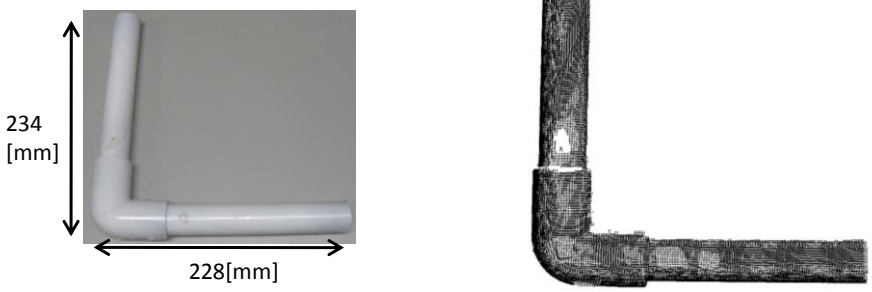
表 **2.1**　T ジャンクション内の直進パイプ半径の認識値と計測値

Region	Recognized radius [mm]	Radius of real product [mm]	Error [mm]
1	23.98	24.1	-0.12
2	24.57		+0.47
3	24.00		-0.10

を用いた．また，VIVID910の仕様は以下のとおりである．

- 測定方式:　三角測量光切断方式
- 画像入力対象設置範囲:　0.6～2.5m
- 測定入力対象設置範囲:　0.6～1.2m
- 確度:　X:±1.40mm，Y:±1.04mm，Z:±0.40mm,
- 精度:　32μm

これらの計測点群に対する配管の径と要素間の接続関係の認識結果を図2.23, 2.24に示



(a)　実物写真と寸法　　(b)　計測点群

(c)　法線テンソル固有値 λ_3 強度分布　　(d)　セグメンテーション結果

(e)　円筒面フィッティング結果　　(f)　軸線分認識結果

図 **2.24**　エルボの認識結果

表 **2.2**　エルボ内の直進パイプ半径の認識値と計測値

Region	Recognized radius [mm]	Radius of real product [mm]	Error [mm]
1	16.34	16.1	+0.24
2	16.68		+0.58

す．また，接続関係の認識結果について，赤がTジャンクション，青がエルボ，緑が直進パイプ，黒がいずれにも認識されなかった点を示す．

図 2.23(b)に示す点群は図 2.23(a)に示される外径半径 24.1[mm]のパイプと T ジャンクションを計測して得られた点群であり，点数は 40,634 点である．各ステップにおける認識結果を図 2.23(c)-(f)に示す．図 2.23(c)には，ステップ P22 の法線ベクトルテンソルの最小固有値 $\hat{\lambda}_3$ の強度分布を，図 2.23(d)には，ステップ P23 の直進パイプ上の点群の初期セグメンテーション結果を，図 2.23(e)には，ステップ P25 の円筒面フィッティング結果

を，図 2.23(f)には，配管系統の軸線分の接続関係の認識結果を表示した結果を示している．表 2.1 は，認識された各円筒面の半径と実際のパイプをノギスで計測した計測値との誤差を示している．計算時間は 41[sec]であった.

図 2.24(b)に示す点群は図 2.24(a)に示される外径半径 16.1[mm]のパイプとエルボを計測して得られた点群であり，頂点数は 27,668 点である．図 2.23 と同様に各ステップにおける認識結果を図 2.24(c)-(f)に示す．表 2.2 は，認識された各円筒面の半径と実際のパイプをノギスで計測した計測値との誤差を示している．計算時間は 26[sec]であった.

以上の認識結果から，いずれの場合も直進パイプ上の点群を正しく分類し，接続要素の存在も認識できていることがわかる.

また，直進パイプの半径のフィッティング誤差は最大で 0.6mm 程度であり，PVC 製パイプの規格においてパイプ外径の半径が 4.0～6.0mm 刻みであることから，直進パイプの半径の認識結果を用いて規格マッチングを行えば，正しい径の部材を選択可能であることを確認した.

2.8.2　大規模環境レーザ計測点群に対する検証

実際の大規模環境のレーザ計測点群からの配管系統の認識実験として，石油リグを地上型レーザ計測器(Cyra Technologies CYRAX2500)で計測した計測点群，及び熱源機械室を地上型レーザ計測器 (Leica HDS6000)で計測した計測点群の一部を入力として，本手法を実行し, パイプの認識精度, 及び接続要素の認識精度の検証を行った. 計測点数は, 石油リグが4,524,324点，熱源機械室が4,075,752点であった．石油リグの認識における閾値は， $r_1 = 0.2$， $r_2 = 0.02$， $r_3 = 0.02$， $r_4 = 0.03$， $r_5 = 0.2$， $\tau_p = 0.01$， $\tau_c = 0.005$， $\tau_l = 1.0$, $\tau_{skew} = 0.05$， $\bar{\varepsilon} = 0.01$， $r_{\max} = 0.1$， $r_{\min} = 0.04$(単位は全てm)，処理時間は熱源機械室の認識における閾値は， $r_1 = 0.2$， $r_2 = 0.2$， $r_3 = 0.02$， $r_4 = 0.03$， $r_5 = 0.2$， $\tau_p = 0.03$， $\tau_c = 0.005$, $\tau_l = 1.0$， $\tau_{skew} = 0.05$， $\bar{\varepsilon} = 0.02$， $r_{\max} = 0.3$， $r_{\min} = 0.03$ (単位は全てm)と設定した.

入力計測点群，平面除去後の点群，抽出された直進パイプ上の点群，最終的に認識されたパイプ点群とフィッティング円筒面及び接続関係について，石油リグの認識結果を図2.25, 2.26に，熱源機械室の認識結果を図2.27, 2.28に示す.

また，計測点群内の配管系統に含まれる直進パイプ，エルボ，ジャンクションと思われるものの数を目視で数え，提案アルゴリズムから認識されたものの数との比をとり，得られた認識率の結果を表 2.3,2.4 に示す．ただし，一本の直進パイプの計測点群が前方物体等のオクルージョンによって分割されている場合は，各直進パイプ間の距離が τ_l 以上のものは別々のパイプとして数えた．また，配管の長さが非常に短いものや点密度が非常に低いものは true class から除外する他，計測認識結果のパイプの半径値が設定した最大値と最小値の間にないものは，パイプ以外の円筒面物体(ケーブルやタンク等)を認識したものとして others のクラスに分類し, このパイプの認識率の計算からは除外した.

また，各ステップの処理時間を表 2.5,2.6 に示す.

これらの結果から，本手法でのパイプ部分の認識率は 85%程度であることが確認できる．関連研究と比較した場合，[11]では各要素の認識率として 97%，100%，86%を達成し，見かけ上本研究よりも高い認識率を達成しているが，[11]の入力は認識対象である直進パイプ, エルボ, ジャンクションのみで構成された配管系統のみの計測点群であり，また，本研究と比較して，配管系統の複雑度も低い．また，室内レーザ計測点群から円筒面を含む比較的単純な物体認識の既存研究[19,20]では，認識率は 75%～90%程度であり，これらの研究で使用している点群が，本研究で使用している点群よりも，高い点密度をもつものであることを考慮すると，本手法のパイプ認識率 85%は，低い点密度，計測ノイズが含まれた点群であるにも関わらず,十分な認識精度であると考えられる．

また，この例でパイプの認識が困難であった部分の主な理由は，2.6.2 節における判別分析法でパイプ点群候補の分離が完全に出来ていないことにある．すなわち，パイプの径が大きく, エルボ部分の点群がパイプ点群候補に誤分類され， 二本のパイプが一本のパイプとして認識されてしまった箇所や，長さが短いパイプが他のパイプと接続している部分で，パイプ上にある点群が全て非パイプ点群として分類されてしまった箇所があったためである．

また，表 2.3(b),2.4(b)に示すとおり，接続要素の認識率に関しては 40%から 50%の間であった．この原因として，接続要素に接続しているパイプが全て認識されていないと接続要素が認識できないことや，軸線分の補完の際に，接続可能な軸線分候補の中から条件を満たすペアを順次接続したことにより，不適当なパイプが先に接続されてしまった箇所が多いことが考えられる．

2.8.3　各閾値の設定基準と計測環境による影響

本認識で使用する近傍点探索半径と各閾値は，計測環境内にある最小パイプ径 R と点密度，計測ノイズレベルを基準に設定する．計測環境内にある最小パイプ径を基準に設定出可能なのは，点分布特徴量計算の探索半径 r_1，平面上の点抽出計算の探索半径 r_2，法線ベクトル計算の探索半径 r_4，法線ベクトルテンソル計算の探索半径 r_5，円筒面フィッティングの半径閾値 $r_{\max}, r_{\min}$ であり，本論文では， $r_1 = r_5 = 4.0R$, $r_2 = 4.0R$, $r_4 = 0.8R$, $r_{\max} = 2.0R$, $r_{\min} = 0.8R$, $r_4 = 0.8R$ と設定した．これらの設定では点密度と計測ノイズレベルを考慮しなくてよい.

また，点密度を基準に設定すべきものは，region-growing の探索半径 r_3 であり，探索範囲内に最低でも計測点が 1 点以上存在する距離とする.

さらに，計測ノイズを基準に設定すべきものは，平面フィッティングの誤差閾値 τ_p , 円筒面フィッティングの誤差閾値 $\bar{\varepsilon}$ であり，計測ノイズレベルの最大範囲とする.

また，接続要素認識の閾値 τ_{skew} は，円筒面のフィッティング精度を基準に実験的に設定しなければならないが，目安として， $\bar{\varepsilon}$ の 3～5 倍程度が良い結果を得られている.

2.8.4　計測点群の品質による認識結果の変化

さらに，計測点群の品質が本アルゴリズムの各処理段階に与える影響を調べた．初めに，半径 45mm，点密度 7122.6(点/m2)程度のパイプが存在する石油リグの計測点群の一部から，点を間引いて点密度を減少させたものと，一様分布乱数による擬似計測ノイズを加えたものに対して，背景点群の自動除去(P1)の処理を行った．その結果，元の 10%に点数を減少した場合でも除去すべき平面部の点群は元の点群と同様にほぼ正しく抽出された．しかし，最大±10mm 程度のノイズを加えた場合，閾値 τ_p による平面部の点群除去の際にパイプ部分の点群も除去されてしまう箇所が多く見受けられた．このことから，この処理はノイズに対してかなり敏感であると考えられる．

次に，半径 45mm の円筒面を組み合わせて作成した T ジャンクション表面に，石油リグの点密度と同程度の点群を発生させた擬似計測点群に対して，同様に点密度の変化とノイズの追加を行い，　$r_4 = 30.0\text{mm}, r_5 = 200.0\text{mm}$ としてパイプ点群の認識と円筒面フィッティング，接続関係の認識を行った結果を図 2.29，2.30 に示す．図より，近傍探索範囲内の点数が 6 点未満の場合や最大±15mm のノイズを加えた場合，正しくパイプや接続要素が認識できないことが確認できる．また，半径 45mm，円周に対する計測範囲 $2\pi, \pi, 1/2\pi$ の円筒面に対して，同様の点群処理を行ったのち，円筒面フィッティングを行った結果，少なくとも点群が円周の半分程度に分布していないと円筒面フィッティングの精度が非常に悪化することを確認した．

これらの結果から，点数が r_4 近傍探索範囲内に少なくとも 6 点以上あること，計測ノイズが最大でもパイプ半径の 30%程度であること，パイプ円周の半円程度が計測されていることが，本提案手法を適用可能な点群の品質であると推測できる．

2.9　まとめ

本章のまとめを以下に述べる．

- プラントの大規模環境レーザ計測点群から，配管系統上の点群を自動的に抽出し，構成要素である直進パイプ，エルボ，ジャンクションとそれらの接続関係を認識するアルゴリズムを開発した．提案するアルゴリズムは法線ベクトルテンソルの固有値解析，Region-Growing，円筒面フィッティング，円筒面の軸線分の位置関係に基づく接続要素の認識に基づいている．
- 実際の大規模プラントのレーザ計測点群に対して本手法を適用した結果，直進パイプ，エルボ，ジャンクションの認識率の最低値として 83%，40%，50%をそれぞれ達成した．

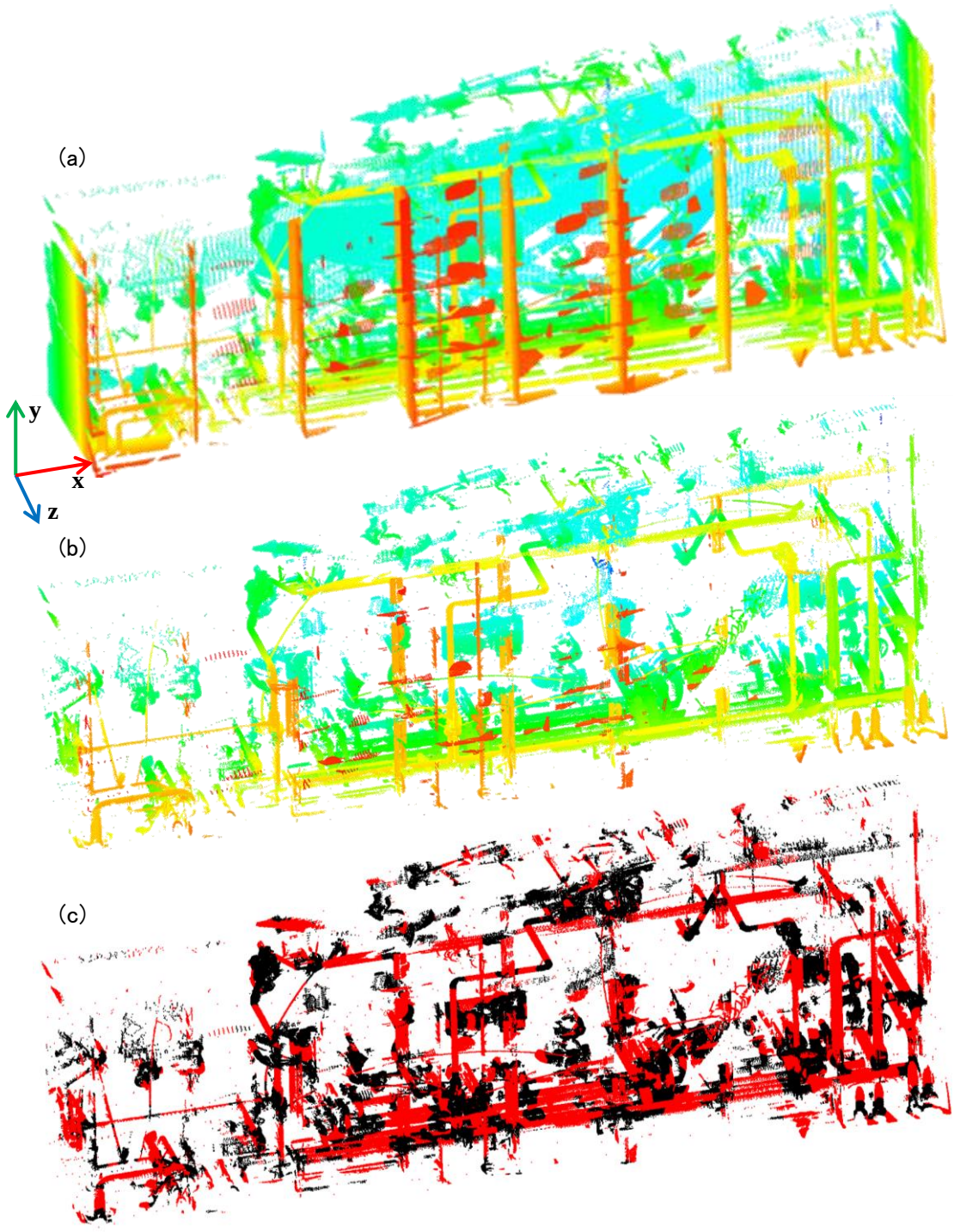
提案手法の問題点として以下が挙げられる．

- 判別分析法による直進パイプ上の点群の抽出では，配管の径や周囲の物体の影響を

受けるため，直進パイプ上の点群とそれ以外の物体上の点群をうまく分離できない場合がある．

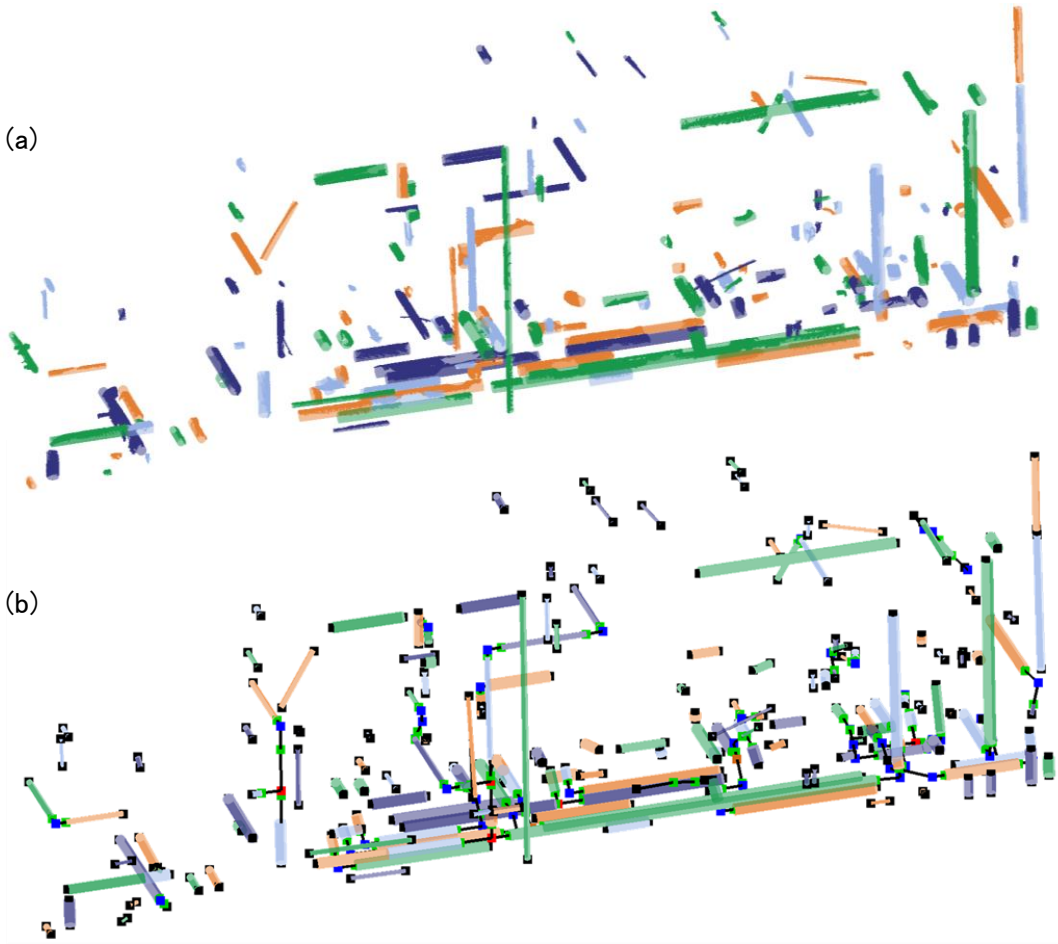
- 認識された直進パイプの軸線分の位置・姿勢のみを基に接続要素の認識を行っているため，接続している直進パイプが全て認識されていなければ，接続要素を認識できない．
- エルボ・ジャンクションの認識率が50%以下であり，認識率の大幅な改善が必要である．

これらの問題点に関しては，第3章で配管系統の自動認識アルゴリズムを新たに提案し，改善を図る．



(a) 全計測点群　(b) 背景点群除去後の点群　(c) 赤：直進パイプ上の点群

図 **2.25**　石油リグ内の配管系統上の点群の分類結果



(a)配管上の点群とフィッティング円筒面　(b)フィッティング円筒面と軸線分認識結果

図 **2.26**　石油リグ内の配管系統の認識結果

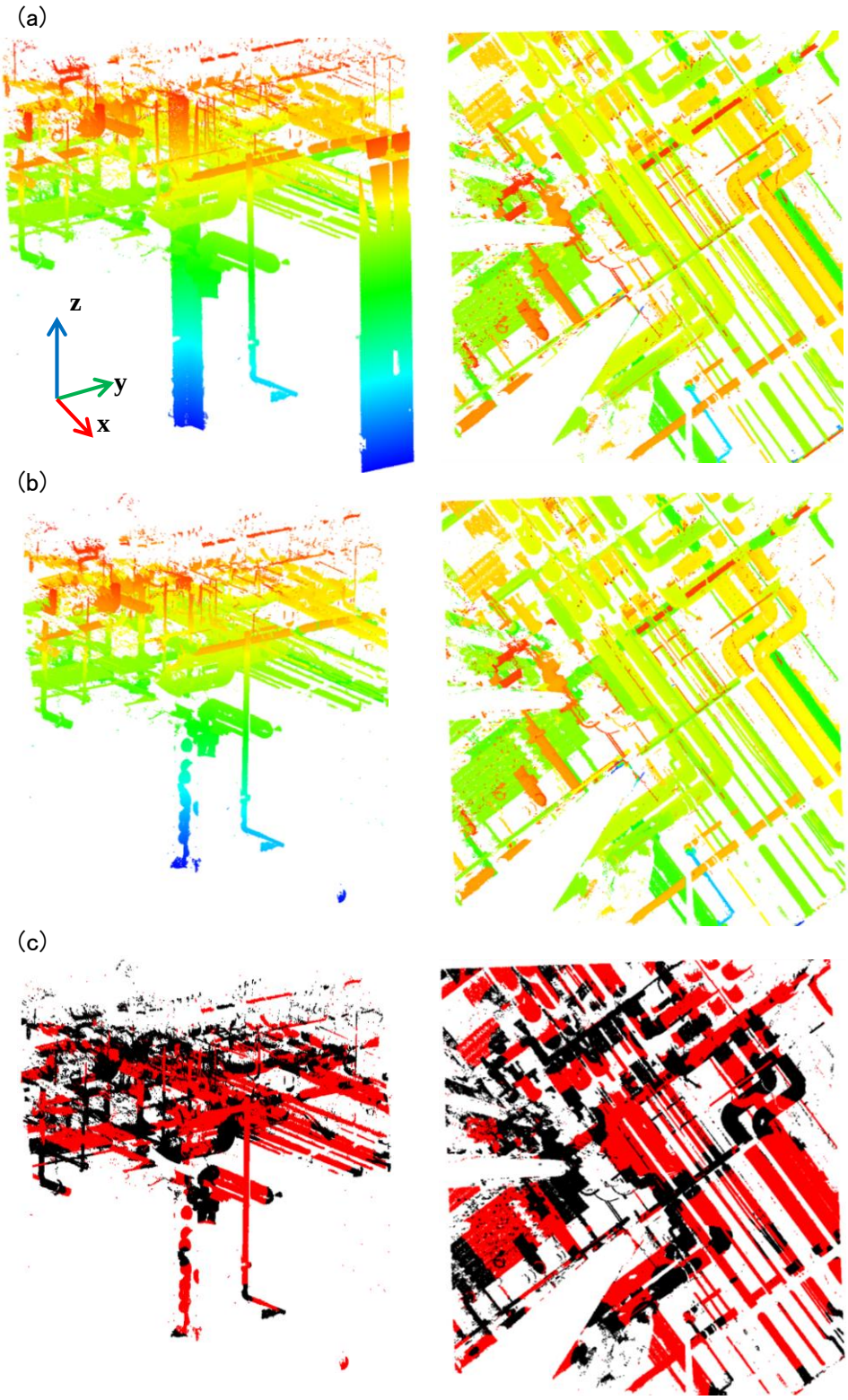
表 **2.3**　石油リグ内の配管系統の認識率

(a) 直進パイプ

		Result of automatic recognition				False recognition	
		Pipe	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Pipe	105	22	127	82.6	13.1	62.7
	Others	37	-	-	-	-	-
	Total	142	-	-	-	-	-

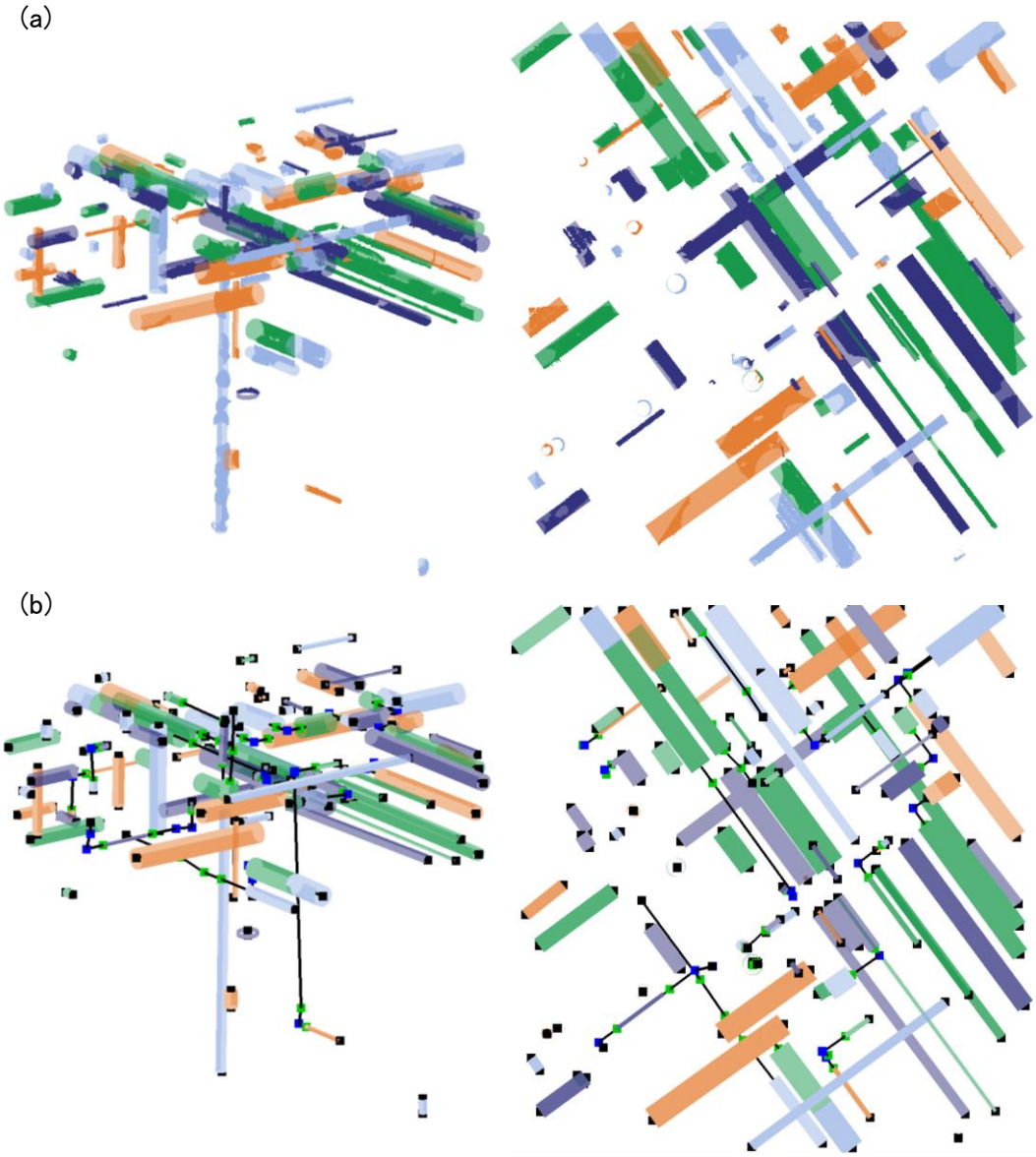
(b) 接続要素

		Result of automatic recognition					False recognition	
		Elbow	Junction	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Elbow	29	0	31	60	48.3	51.7	35.6
	Junction	7	7	0	14	50.0	50.0	36.3
	Others	9	4	-	-	-	-	-
	Total	45	11	-	84	-	-	-



(a) 全計測点群　(b) 背景点群除去後の点群　(c) 赤：直進パイプ上の点群

図 **2.27**　熱源機械室内の配管系統上の点群の分類結果



(a) 配管上の点群とフィッティング円筒面　(b) フィッティング円筒面と軸線分認識結果

図 **2.28**　熱源機械室内の配管系統の認識結果

表 **2.4**　熱源機械室内の配管系統の認識率

(a) 直進パイプ

		Result of automatic recognition				False recognition	
		Pipe	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Pipe	34	7	41	82.9	17.1	42.3
	Other	25	-	-	-	-	-
	Total	59	-	-	-	-	-

(b) 接続要素

		Result of automatic recognition					False recognition	
		Elbow	Junction	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Elbow	6	0	9	15	40.0	60.0	60.0
	Junction	0	0	0	0	-	-	-
	Others	9	0	-	-	-	-	-
	Total	15	0	-	15	-	-	-

表 **2.5** 石油リグ内の配管系統の認識処理時間

		処理時間 [sec]
背景点群の除去		7074
直進パイプ群の認識	法線ベクトルの推定	622
	直進パイプ上の点群抽出	2565
	直進パイプ上の点群のグループ化	405
	直進パイプの定義パラメータの推定	21
接続関係の認識		125
合計		10843

表 **2.6** 熱源機械室内の配管系統の認識処理時間

		処理時間 [sec]
背景点群の除去		6526
直進パイプ群の認識	法線ベクトルの推定	4819
	直進パイプ上の点群抽出	13189
	直進パイプ上の点群のグループ化	376
	直進パイプの定義パラメータの推定	72
接続関係の認識		485
合計		25494

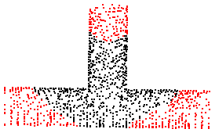
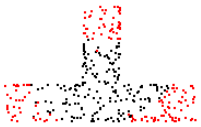
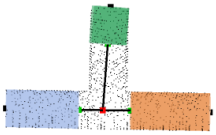
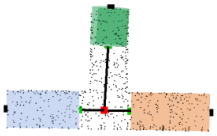
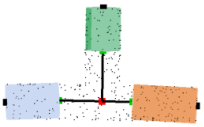
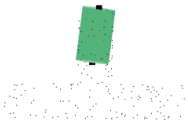
	$N(i,r_3)$ の平均点数			
	21.7	11.3	6.0	3.4
直進パイプ上の点群				
最終認識結果				

図 **2.29**　点密度に対する認識結果の変化

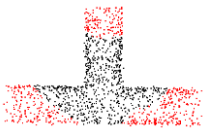
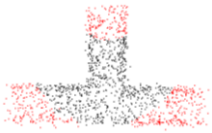
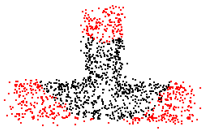
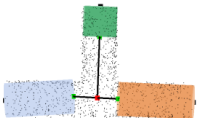
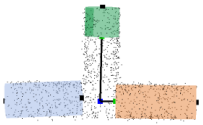
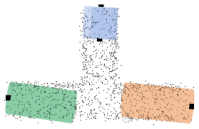
	ノイズ最大値		
	±0.10 m	±0.15 m	±0.20 m
直進パイプ上の点群			
最終認識結果			

図 **2.30**　ノイズに対する認識結果の変化

第3章　大規模レーザ計測点群からの配管系統の自動認識アルゴリズムの高速・高精度化

3.1　前章での提案手法の課題と解決方法

2 章で提案した大規模レーザ計測点群からの配管系統の自動認識アルゴリズムの課題は，以下の 3 点にまとめられる．

1)　共分散行列の固有値解析の計算時間の高速化

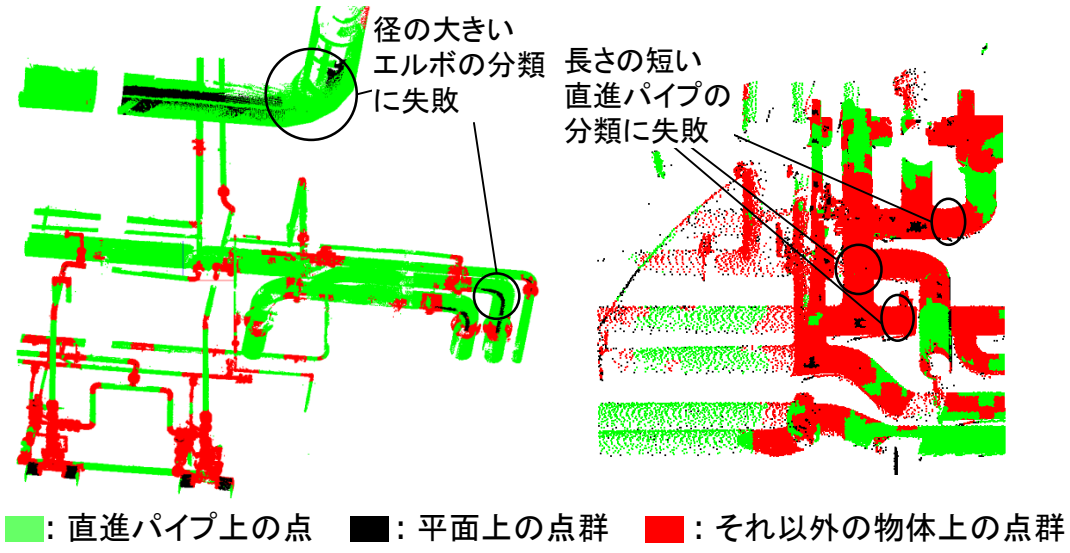
前提案手法では，背景点群の除去における局所点分布特徴量の算出と直進パイプ群の認識における点群の初期法線ベクトルの推定，法線ベクトルテンソルの算出に共分散行列の固有値解析を用いている．しかし，2.8.2 節で述べたように，約 450 万点の点群に対する処理時間はそれぞれ 7074sec，622[sec]，2565[sec]となっており，点数に対して処理時間が非常に大きい．大規模なプラントのレーザ計測では計測点群数が 1 億を超える場合もあるため，これらの処理の高速化が必要である．

2)　法線テンソルによる直進パイプ上の点群の誤分類の防止

法線テンソルを用いた直進パイプ上の点群の分類において，直進パイプとそれ以外物体上の点を分離できる適切な閾値は，法線テンソル計算時の局所近傍探索半径や配管の半径，エルボの曲がり径によって変化する．しかし前提案手法では，判別分析法によって求めた閾値を全ての点群に対して適用していたため，図 3.1(a)に示すように計測環境内に曲がり径が大きいエルボや半径が大きい配管を含む場合，全ての直進パイプと接続要素を適切に分離することが難しい．また，ジャンクションやエルボの他，フランジやバルブ，支持材といった物体付近にある直進パイプ上の点も非直進パイプ上の点として分類されるため，図 3.1(b)に示すようにこれらの物体が密集している領域も，直進パイプ上の点を正しく分類することが難しい．

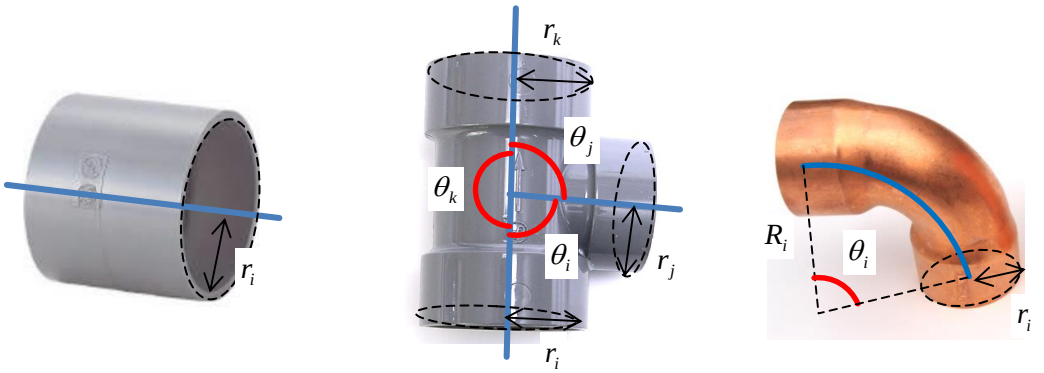
3)　軸線分の補完による接続要素の認識率向上

接続要素の認識のプロセスにおいて，ジャンクションやエルボといった接続要素を認識するためには，それに接続している直進パイプを全て認識している必要がある．しかし，2)の問題点によって認識されていない直進パイプが多数存在する場合，それらに接



(a) 径の大きさが著しく異なる配管がある場合　(b)　物体が密集している場合

図 **3.1**　法線テンソルを用いた直進パイプ上の点分類の失敗例



(a) 直進パイプ　　(b) ジャンクション　　(c) エルボ

図 **3.2**　認識対象の配管要素と定義パラメータ

続している接続要素を認識することができない.

本研究では，これらの問題を解決するため,

1) グリッドセルを用いた法線ベクトル推定の高速化の他，法線ベクトルに基づく region-growing を用いることで, 共分散行列と法線テンソルを用いずに背景点群の除去を高速に行う.
2) 法線ベクトルに基づく region-growing によるセグメンテーション結果に対して，直線フィッティングによる点群の再セグメンテーションと，類似した主成分方向を持つ点群グループの統合により，配管系統内に含まれる大多数の配管を認識する..
3) 配管系統の軸線追跡法と軸線への円弧・線分フィッティングを用いた高精度な接続

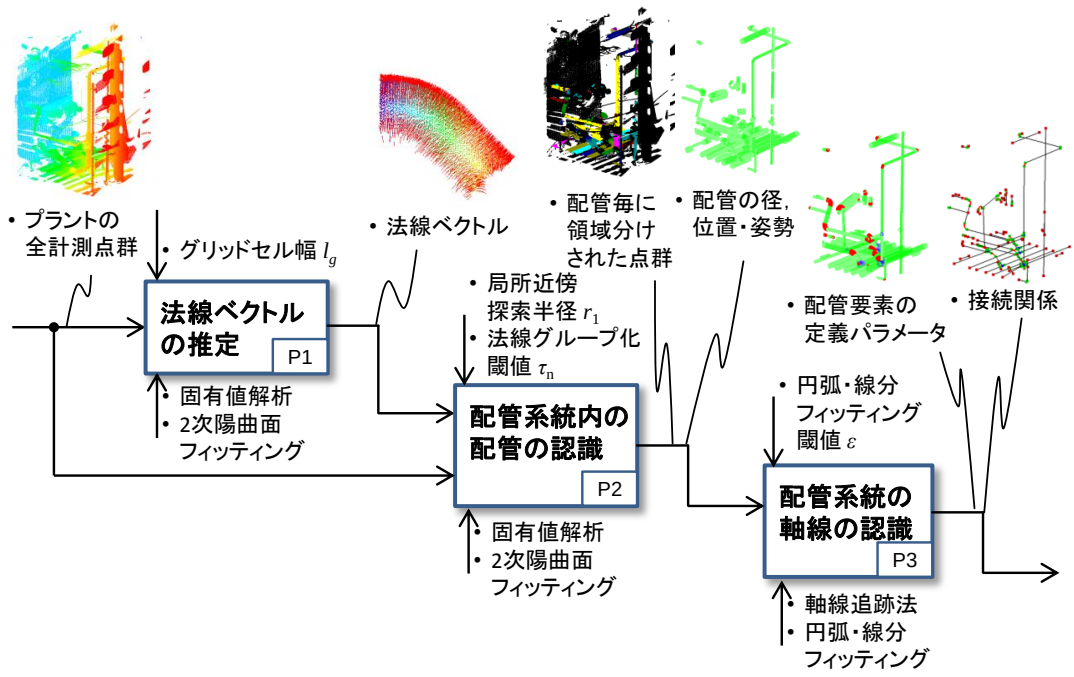


図 **3.3**　配管系統の認識手法概要

要素の認識を行う．

また，本研究で認識可能な配管要素のクラスとその定義パラメータを図 3.2 に示す．

3.2　提案手法の概要

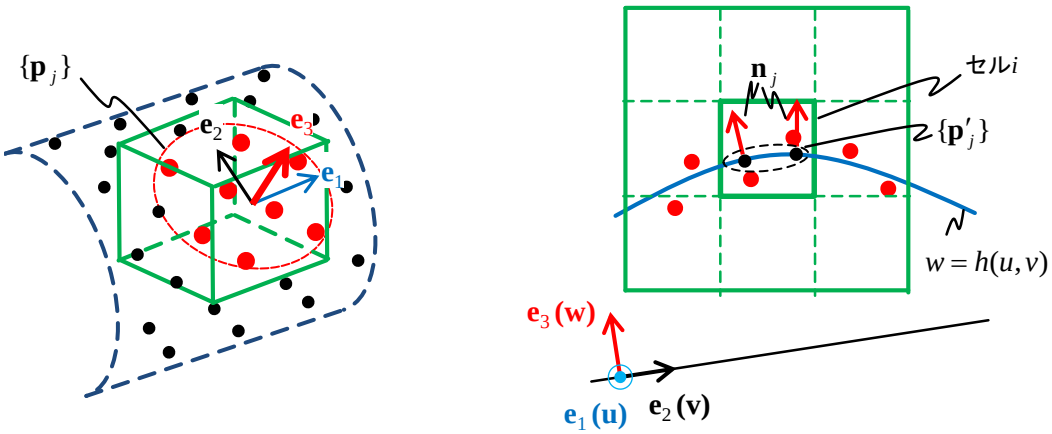
3.1節で述べた課題を解決する配管系統認識の改良手法の概要を図3.3に示す. 本手法は主に3ステップで構成される．

Step.1)　法線ベクトルの推定

配管系統の他に床面，壁面，H 型鋼等を含むプラント全体のレーザ計測点群を入力とする．初めに，法線ベクトルの計算を高速化するため，計測点群全体に対してグリッドセルを設置する．各セル内部に存在する点群に対して，分散共分散行列の固有値解析[13]と二次陽曲面フィッティング[14]を 1 回だけ行い，フィッティング曲面に対応する点群の法線ベクトルを効率的に求める．

Step.2)　配管系統内の配管の認識

まず，全計測点群に対して，類似した法線ベクトルをもつ点群を region-growing によってグループ化する．その後，グループ内の点群の分布する幅を基準に，その全グループを配管系統上の点群かそれ以外の構造物上の点群に分類し，配管系統上の点群のみを抽出する．その後，配管系統上にあるグループ点群の各々に対して，分散共分散行列の固有値解析を行い，類似した主成分方向ベクトルをもつグループを統合することで，一つ



(a) 共分散行列の固有値解析　　(b) 2 次陽曲面フィッティング

図 **3.4**　法線ベクトルの推定

の配管に対応したグループ点群を改めて得る．最後に，各グループに含まれる点群に対して円筒面をフィッティングする．

Step.3)　接続関係の認識

Step2 でフィッティングされた円筒面と配管系統上の計測点群を用いて，配管の断面上の点群の探索を繰り返し，各断面上の点群から配管の軸線上に分布する点列を得る．次に，この点列に対して，連続した円弧と線分をフィッティングすることで配管系統の軸線の初期値を得る．その後，軸線間の位置関係から，同一直線や同一平面上にある線分間を補完することで，最終的な配管系統の軸線を得る．また，軸線の接続関係から直進パイプ，エルボ，ジャンクションの分類を行う．

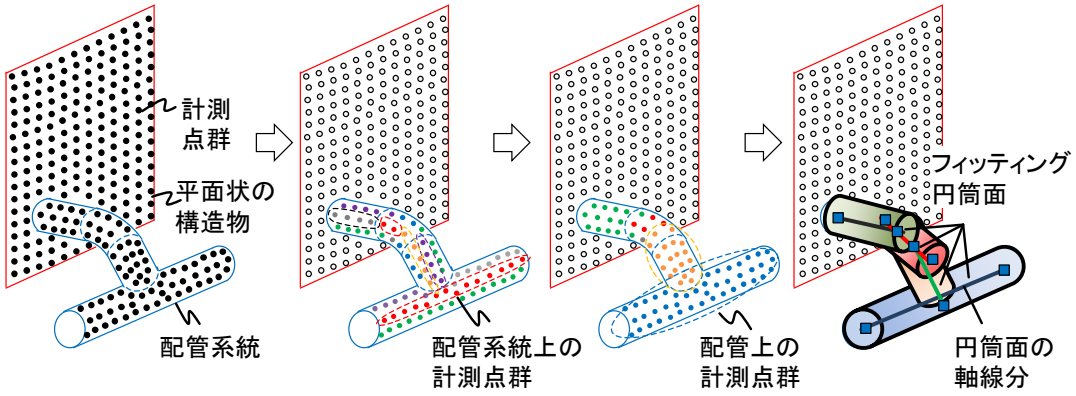
3.3　法線ベクトルの推定

点群の法線ベクトルの計算を効率化するため，まず，レーザ計測点群全体にワールド座標系のxyz軸に平行な幅 l_g をもつグリッドセルを規則的に配置する．ここで，l_g が配管の径と比較して大きく設定されると，分散共分散行列による法線ベクトルの初期値が正しく求まらないため，本論文では l_g を計測環境内に存在すると思われる配管の最小径 $r_{\min}$ を基準として，$l_g = r_{\min}/3.0$ と設定した．

次に，各セル i に対して，式(3.1)の分散共分散行列 M_i を求める．

$$M_i = \frac{1}{|\{\mathbf{p}_j\}|}\sum_{j=1}^{|\{\mathbf{p}_j\}|}(\mathbf{p}_j - \mathbf{b}_i)^T(\mathbf{p}_j - \mathbf{b}_i) \qquad (3.1)$$

ここで，$\{\mathbf{p}_j\}$ はセル i とセル i の一近傍にある26個のセル内部に存在する点の集合，$\mathbf{b}_i$ は



(a) 計測点群　(b) 配管系統上の点群の抽出　(c) 配管上の点群の統合　(d) 円筒面フィッティング

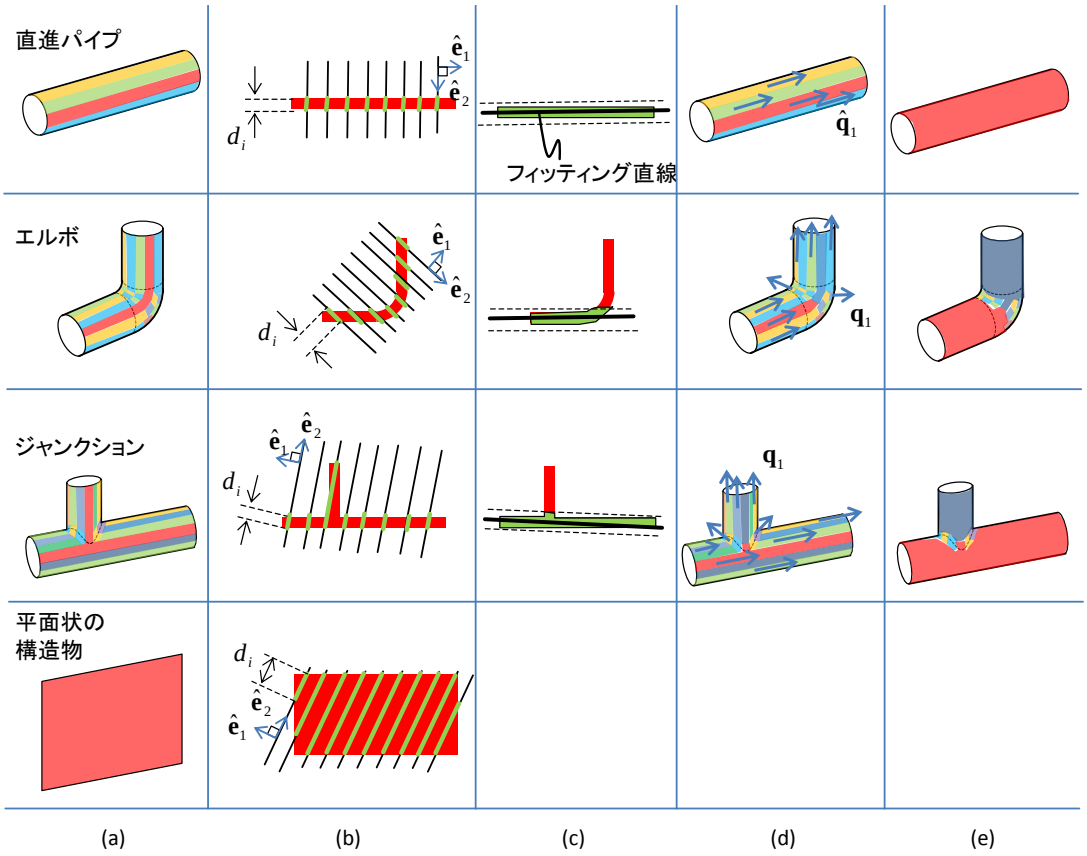
図 **3.5**　配管系統内の配管の認識

$\{\mathbf{p}_j\}$ の平均位置ベクトルである．

次に図 3.4(a) に示すように，M_i に対して固有値解析を行い，固有値 $\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3(\lambda_1\geq\lambda_2\geq\lambda_3\geq 0)$ と対応する単位固有ベクトル $\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2,\mathbf{e}_3$ を得る．このとき，セルの幅 l_g が配管の径に対して十分小さければ，$\{\mathbf{p}_j\}$ はほぼ一つの平面上に分布するため，固有ベクトル $\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2$ は平面上にある主方向ベクトルを示し，固有ベクトル $\mathbf{e}_3$ は平面の法線ベクトルの近似値をとる．そのため，$\mathbf{e}_3$ を全ての $\{\mathbf{p}_j\}$ の初期法線ベクトル $\mathbf{n}_i'$ とする．その後，局所座標系 $u-v-w$ を設定し，この座標系における $\{\mathbf{p}_j\}$ の座標値 $(u_k,v_k,w_k)(k\in\{\mathbf{p}_j\})$ を求める．このとき，座標系原点を $\mathbf{b}_i$，u,v,w 軸を $\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2,\mathbf{e}_3(=\mathbf{n}_i')$ と平行となるように設定する．その後，図 3.4(b)に示すように，これらの点群に対して式(2.3)と同様の二次陽曲面 $S:w=h(u,v)$ をフィッティングした後，セル i に含まれる点群のみを $\mathbf{n}_i'$ 方向に移動して曲面 S 上に投影した点 $\{\mathbf{p}_j'\}$ を考える．これらの投影点における曲面の法線ベクトルを求め，対応する点群の法線ベクトル $\mathbf{n}_j$ とする．

3.4　配管系統内の配管の認識

プラントの計測点群から配管系統に含まれる配管を認識する．処理の概要を図 3.5 に示す．初めに図 3.5(b)のように，計測点群全体から法線ベクトルに基づく region-growing を用いて配管系統上の点群を抽出する．次に，region-growing によってセグメンテーションされたグループ点群は配管の軸線に沿った領域を持つため，図 3.5(c)のように同一の軸方向をもつグループ点群を統合することで，各配管上に存在するグループ点群を新たに得る．その後，図 3.5(d)のように各グループの点群に対して円筒面をフィッティングすることで，配管の半径，軸方向，軸位置を得る．



(a) 類似した法線ベクトルを持つ点群のグループ化 (b) 領域内の点群の幅推定による点群の分類 (c) 直線フィッティングによる点群のセグメンテーション (d) グループ点群の分布方向の算出 (e) 同一配管上の点群の統合

図 **3.6**　配管上の点群の認識

3.4.1　配管系統上の点群の抽出

全計測点群から配管系統上の点群のみを抽出するため，法線ベクトルに基づくregion-growingを行う．本処理は以下の2ステップで構成される．

1)　類似した法線ベクトルを持つ点群のグループ化

初めに，全計測点群中からランダムにシード点 $\mathbf{p}_s$ を選択し，$\mathbf{p}_s$ から距離 r_3 以内にある近傍点群集合 $N(\mathbf{p}_s, r_3)$ の中から式(3.2)を満たす点群 $\mathbf{p}_i$ を抽出し，領域に加えていく．

$$\left|\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{n}_i\right| > \tau_n \qquad (3.2)$$

本研究では閾値 $\tau_n = 0.97$ と設定した．その後，新しく抽出された点群を新たなシード点とした近傍探索を行い，同様の条件を満たす点群を逐次領域に加えていく．この処理を，シード点の近傍内に条件を満たす点群が存在しなくなるまで繰り返すことで，類似した

法線ベクトルをもつ点群をグループ化する．以上の処理を全計測点群がグループ化されるまで繰り返す．このとき，region-growing のシード点$\mathbf{p}_s$が直進パイプ上に存在する場合は，図 3.6(a)に示すように，その領域の点群は配管の軸線の方向ベクトルに沿った小さい幅を持つ帯状の形状となる．また，$\mathbf{p}_s$がエルボやジャンクション上に存在する場合は，領域の点群は小さい幅を持つ真っ直ぐな帯と円形の帯を組み合わせた形状となる．それに対して，$\mathbf{p}_s$が床面や壁面といった平面構造物上に存在する場合は，平面上の全ての点群が一つの領域となるため，この領域は非常に大きい幅を持つ．

2)　領域内の点群の幅推定による点群の分類

グループ化された点群の幅を推定し，その幅に閾値を設定することで，直進パイプやジャンクション，エルボといった配管表面上にある点群の領域とそれ以外の構造物表面上にある点群の領域の分類を行う．初めに，各領域に含まれる点群$\{\mathbf{p}_n\}$に対して分散共分散行列を求め，固有値解析を行い固有値$\hat{\lambda}_1,\hat{\lambda}_2,\hat{\lambda}_3(\hat{\lambda}_1 \geq \hat{\lambda}_2 \geq \hat{\lambda}_3 \geq 0)$と対応する単位固有ベクトル$\hat{\mathbf{e}}_1,\hat{\mathbf{e}}_2,\hat{\mathbf{e}}_3$を得る．次に，図 3.6(b)に示すように，$\hat{\mathbf{e}}_1$を法線ベクトルとする分割平面を一定の間隔で生成し，$\{\mathbf{p}_n\}$に含まれる各々の点を最も距離が近い分割平面に投影する．そして分割平面において，平面に投影された点群を，$\hat{\mathbf{e}}_2$と並行且つ平面上にある直線に再投影し，投影点間の最大幅dを求める．各直線で求められた幅の集合から中央値$\hat{d}$を求め，これを領域の幅とする．

このとき，幅$\hat{d}$が$\hat{d} < \tau_w$を満たす領域を配管系統上の点群の領域とする．これに対して，$\hat{d}$が$\hat{d} \geq \tau_w$を満たす領域は平面構造物上の点群の領域として，この領域を全計測点群から除外する．なお，本研究では，計測環境内に存在する最大径$r_{\max}$を持つ配管を認識できるように閾値$\tau_w = 2.0 \cdot r_{\max} \sin(\cos^{-1}(\tau_n))$と設定する．

3.4.2　同一配管上の点群のグループ化

抽出された配管系統上の計測点群から，各々の配管上に存在する点群のセグメンテーションを行う．本処理は以下の2ステップで構成される．

1)　直線フィッティングによる点群のセグメンテーション

3.4.1節で得られた点群の領域について，図3.6(a)に示すように，直進パイプ上の点群の領域では，得られた単位固有ベクトル$\hat{\mathbf{e}}_1$がその直進パイプの軸方向ベクトルとほぼ一致するのに対して，ジャンクションやエルボ上の点群の領域では，$\hat{\mathbf{e}}_1$が配管の軸方向ベクトル方向と一致しない．そのため，$\hat{\mathbf{e}}_1$が配管の軸方向ベクトル方向と一致するように，点群のセグメンテーションを行う．図3.6(c)に示すように，領域内の全点群に対してRANSACによる直線フィッティングを行い，直線からの距離が閾値τ_d以内の点群のみを選択し，その領域の点群として残す．それ以外の点群については，3.4.1節のregion-growing処理を改めて行う．これにより，配管の軸方向ベクトルに沿った点群領域を改めて得る．

本研究ではRANSACの試行回数を50，$\tau_d = \hat{d}/2.0$ として設定した．

2)　同一配管上の点群の統合

制約付きregion-growingを用いることで，得られた領域の点群から同一の配管上に存在する点群に統合する．図3.6(d)に示すように，初めに各領域内の点群に対して分散共分散行列の算出を行い，固有値分解によって固有値と対応する固有ベクトルを得る．そして，得られた最大固有値に対応する固有ベクトル $\hat{\mathbf{q}}_1$ を領域内の点群に付与する．次に，配管系統上の点群からシード点 $\mathbf{p}_s$ をランダムに選択し，$\mathbf{p}_s$ から距離 r_3 以内にある近傍点群集合 $N(\mathbf{p}_s, r_3)$ の中から式(3.3)を満たす点群 $\mathbf{p}_i$ を抽出し，領域に加えていく．

$$\left|\hat{\mathbf{q}}_{1,s} \cdot \hat{\mathbf{q}}_{1,i}\right| > \tau_q \tag{3.3}$$

なお，本研究では閾値 $\tau_q = 0.95$ と設定した．その後，新しく抽出された点群を新たなシード点とした近傍探索を行い，同様の条件を満たす点群を逐次領域に加えていく．この処理をシード点の近傍内に条件を満たす点群が存在しなくなるまで繰り返すことで，図 3.6(e)に示すように同一配管上に存在する点群をグループ化する．

3.4.3　配管の定義パラメータの推定

グループ化された配管上の点群に対して，円筒面をフィッティングし，配管の径，軸線の通過点と方向ベクトルを推定する．

初めに図2.14(a)に示したように，グループ内の配管上の点群がもつ法線ベクトル集合から，法線ガウス球を作成する．ガウス球の原点を通過し，法線ガウス球にフィッティングする平面をRANSAC法により求め，フィッティング平面の法線ベクトルを配管の軸線の方向ベクトルの初期値 $\mathbf{v}_{init}$ とする．このときRANSACの試行回数を50，法線ベクトルとの内積に対する外れ値の閾値を0.01として設定した．

次に，グループ内の点群をフィッティング平面に投影し，この投影点群にフィッティングする円を最小二乗法によって求める．この円の中心点を配管の軸線の通過点の初期値 $\mathbf{s}_{init}$，円の半径を配管の半径の初期値 r_{init} とする．

その後，$\mathbf{v}_{init}, \mathbf{s}_{init}, r_{init}$ を初期値として，2.6.4節と同様にLevenverg-Marquadt法による非線形最小二乗の円筒面フィッティングを行い，グループ内の点群を用いた最小化問題を解くことで，配管の半径と軸線の通過点，方向ベクトルを高精度に算出する．

また，上式から得られた最適フィッティング円筒面の半径値 r をもとに，$(r < r_{\min}) \vee (r > r_{\max})$ を満たす配管上の点群の領域を，直進パイプ以外の点群が誤分類された領域と判定し，除去する．ここで，$r_{\min}, r_{\max}$ は計測環境内に存在すると思われる配管の半径の最小値と最大値を基準として設定した値である．

さらに，配管上に存在する点群について，点群が存在する範囲の角度が狭いと，異常

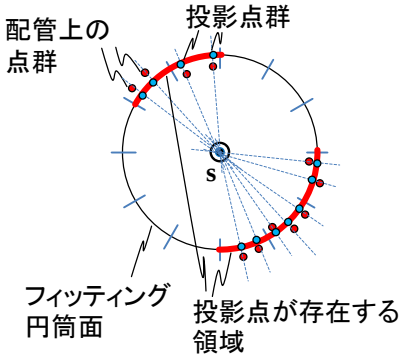
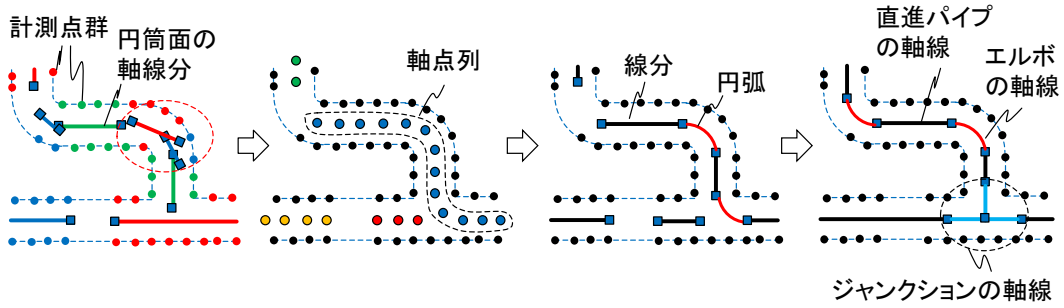


図 **3.7**　配管上の点群の被覆角度



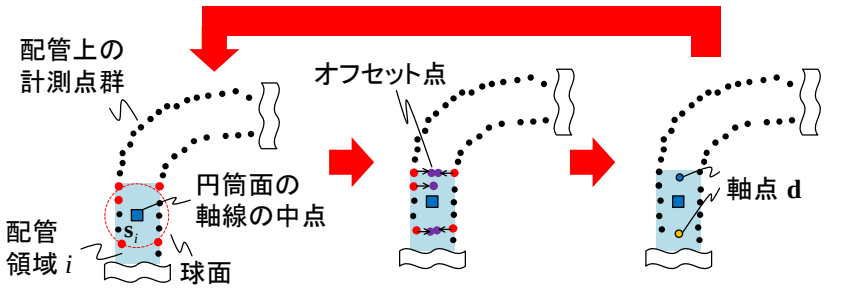
(a) 円筒面フィッティング　(b) 軸点列の生成　(c) 円弧・線分のフィッティング　(d) 軸線分の補完

図 **3.8**　配管系統の軸線の認識

な半径値をもつ円筒面がフィッティングされる可能性がある．そのため，フィッティング円筒面に対する点群が存在する範囲の角度に閾値を設定することで，そのフィッティングの信頼性が低いと思われる円筒面を除去する．このため，図3.7に示すように，まず円筒面を一定の角度θで分割した領域を考え，点群を対応する分割領域に投影する．そして，投影点が存在する領域数mが$m\theta > \tau_{\theta,\min}$を満たさない場合は，その点群の領域を除去する．なお，本研究では，$\theta = \pi/36$，$\tau_{\theta,\min} = \pi/2$と設定した

3.5　配管系統の軸線の認識

3.4節で認識された配管の軸線と配管上の点群を用いて配管系統の軸線を認識する．処理の概要を図3.8に示す．3.4節の処理の結果，図3.8(a)に示すようにエルボ上の点群は複数の領域に分割され，複数の円筒面が交差するようにしてフィッティングされている．そのため，これらの円筒面の軸線を用いてエルボの真の軸線を推定することは難しい．エルボの軸線を正しく認識するため，図3.8(b)に示すように，配管の領域に含まれる点群と配管の径，軸線の通過点を用いて，エルボの軸線の追跡を行う．次に，図3.8(c)に示すように，認識された軸点列に対して連続した円弧・線分をフィッティングする．その後，



(a) 配管断面上の点群抽出　　(b) オフセット点群の生成　　(c) 軸点列の生成

図 **3.9**　軸線追跡法

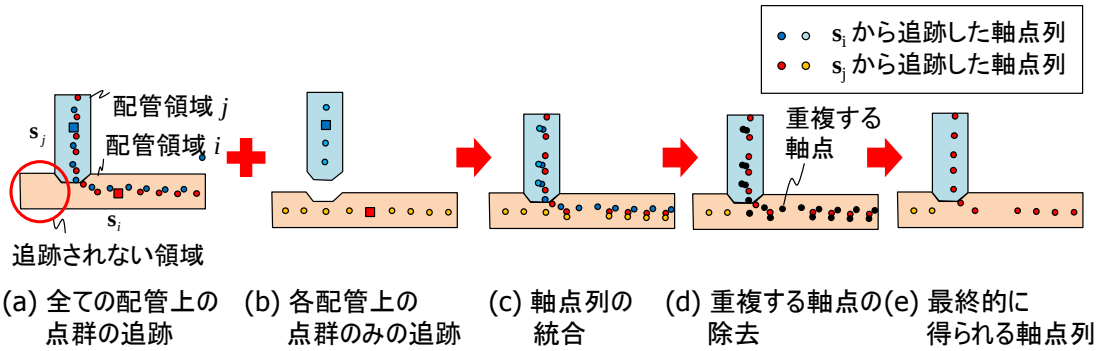


図3.8(d)に示すように, オクルージョン部分に存在する配管の軸線を認識された軸線分の位置関係から推定することで，最終的な直進パイプ，エルボ，ジャンクションの軸線とそれぞれの要素間の接続関係を得る.

3.5.1　軸点列の生成

初めに図3.9(a)に示すように，各配管の領域について，初めに配管断面上の点群を探索するため，軸線分 S_i の中点 $\mathbf{s}_i$ に球面を設置する．ここで，球面の半径はフィッティングした円筒面半径の1.2倍に設定した．そして，球面付近に存在する配管系統上の点群 $\{\mathbf{p}_k\}$ を選択し，図3.9(b)に示すオフセット点群 $\{\mathbf{p}'_k\}$ を式(3.4)から得る.

$$\mathbf{p}'_k = \mathbf{p}_k - r_i \mathbf{n}_k \tag{3.4}$$

ここで r_i は配管の半径値である．そして図3.9(c)に示すように，このオフセット点群 $\{\mathbf{p}'_k\}$ の重心点の位置ベクトルを配管の軸線上にある軸点 $\mathbf{d}$ として定義する.

その後，球面上に配管系統上の点群が存在しなくなるまで，新しく得られた $\mathbf{d}$ を中心とする球面の設置と球面上の点群の選択，オフセット点の生成を繰り返すことで，配管の軸線の追跡を行い，配管の軸線上にある軸点列 $[\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \cdots, \mathbf{d}_n]$ を得る.

しかしこの手法は，図3.10(a)に示すように，ジャンクション部分に軸点 $\mathbf{d}$ が到達した

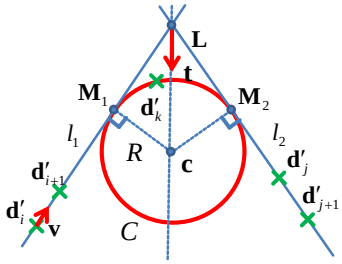


図 **3.11**　円弧・線分フィッティング

場合に，接続している残りの二つの配管の内，片方のみしか追跡することが出来ないため，最終的に軸線を追跡されない配管が生じる可能性がある．これらの配管の軸線ももれなく認識するため，図3.10(b)に示すように，各配管の領域に含まれる点群のみを用いた軸線の追跡を改めて行う．その結果，図3.10(c)に示すように，同一の配管に複数の軸点列が重複して認識されるため，これらの重複した点列を除去するため，図3.10(d)に示すように，各軸点の距離 r_i 近傍に異なるステップで得られた軸点が存在する場合はこれを除去する．以上の処理の結果，図3.10(e)に示すような，最終的に配管の全領域に対応する軸点列の集合が得られる．

3.5.2　初期軸線分の推定

次に，3.5.1節で得られた軸点列 $[\mathbf{d}_1,\mathbf{d}_2,\cdots,\mathbf{d}_n]$ に対して，[21]の手法による各軸点からの距離誤差が ε 以内，かつ連続した円弧・線分の列のフィッティングを行うことで配管系統の初期軸線分を求める．この手法の擬似コードをアルゴリズム3.1に示す．

初めに，三点 $\mathbf{d}_i,\mathbf{d}_{i+1},\mathbf{d}_{j+1}(i+1<j)$ を通過する平面を定義し，部分点列 $[\mathbf{d}_i,\cdots,\mathbf{d}_{j+1}]$ をこの平面へ投影することで，投影部分点列 $[\mathbf{d}'_i,\cdots,\mathbf{d}'_{j+1}]$ を得る．このとき，各投影点 $\mathbf{d}'_k \in \{\mathbf{d}'_{i+1},\ldots,\mathbf{d}'_j\}$ に対して，ε'_k を式(3.5)から求める．

$$\varepsilon'_k = \sqrt{\varepsilon^2 - \left\|\mathbf{d}_k - \mathbf{d}'_k\right\|} \tag{3.5}$$

ここで，ε'_k は投影点 $\mathbf{d}'_k$ とフィッティング曲線間の許容可能な最大誤差を示す．そして，図 3.11 に示すように，直線 $l_1 = \overline{\mathbf{d}'_i\mathbf{d}'_{i+1}}, l_2 = \overline{\mathbf{d}'_j\mathbf{d}'_{j+1}}$, とその交点 $\mathbf{L}$ を求める．そして，各投影点 $\mathbf{d}'_k \in \{\mathbf{d}'_{i+1},\ldots,\mathbf{d}'_j\}$ に対して，l_1, l_2 と $\mathbf{d}'_k$ に接し，中心 $\mathbf{c}$，半径 R をもつ円 C を以下のようにして求める．

円 C と直線 l_1 の接点を $\mathbf{M}_1$ とすると，$\mathbf{M}_1$ は式(3.6)を満たす．

$$R = \left\|\mathbf{c} - \mathbf{d}'_k\right\| = \left\|\mathbf{c} - \mathbf{M}_1\right\| \tag{3.6}$$

ここで，$\mathbf{c}$ は円 C の中心点，R は円 C の半径である．このとき，l_1 の方向ベクトルを $\mathbf{v}$，l_1, l_2 の二等分線を $\mathbf{t}$ とおくと，$\mathbf{c}$ と $\mathbf{M}_1$ を式(3.7),(3.8)で表すことができ，式(3.7),(3.8)を用

アルゴリズム **3.1** 円弧・線分フィッティング

Require: A sequence of axis points $[\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \cdots, \mathbf{d}_n]$ and a tolerance value ε
Ensure: Line-arc segments $[l'_1, a'_1, l'_2, a'_2, \cdots, l'_{m-1}, a'_{m-1}, l'_m]$ approximating $[\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \cdots, \mathbf{d}_n]$ with distance at most ε to each axis point $\mathbf{d}_i$

$i = 1$; $count = 1$
while $i < (n-1)$ **do**
  for all $j > i$ **do**
    let Q be the plane spanned by $\mathbf{d}_i, \mathbf{d}_{i+1}, \mathbf{d}_{j+1}$
    for all $\mathbf{d}_k \in \{\mathbf{d}_i, \mathbf{d}_{i+1}, \cdots, \mathbf{d}_{j+1}\}$ **do**
      let $\mathbf{d}'_k$ be the point $\mathbf{d}_k$ projected onto Q
      $\varepsilon'_k = \sqrt{\varepsilon^2 - \|\mathbf{d}'_k - \mathbf{d}_k\|^2}$
    end for
    $l_1 = \mathbf{d}'_i\mathbf{d}'_{i+1}$; $l_2 = \mathbf{d}'_j\mathbf{d}'_{j+1}$; $\mathbf{L} = l_1 \cap l_2$
    for all $\mathbf{d}'_k \in \{\mathbf{d}'_{i+1}, \mathbf{d}'_{i+2}, \cdots, \mathbf{d}'_j\}$ **do**
      solve LLP problem to: $l_1, l_2, \mathbf{d}'_k$
      if there are solutions **then**
        let $\mathbf{c}$ be the circle center farthest from $\mathbf{L}$ and $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$ be projection of the circle onto l_1 and l_2
        for all $\mathbf{d}'_l \in \{\mathbf{d}'_{i+1}, \mathbf{d}'_{i+2}, \cdots, \mathbf{d}'_j\}$ **do**
          let s'_l be smallest distance between $\mathbf{d}'_l$ and segments $\overline{\mathbf{d}'_i\mathbf{M}_1}, \overline{\mathbf{M}_1\mathbf{d}'_{j+1}}, \overline{\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2}$
          if all $\mathbf{d}'_l \in \{\mathbf{d}'_{i+1}, \mathbf{d}'_{i+2}, \cdots, \mathbf{d}'_j\}$ satisfy $s'_l \le \varepsilon'_l$ **then**
            $l'_{count} = \overline{\mathbf{d}'_i\mathbf{M}_1}, a'_{count} = \overline{\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2}$
            $j_{save} = j$
            $\mathbf{d}_{save} = \mathbf{M}_2$
          end if
        end for
      end if
    end for
  end for
  if $j_{save} = n-1$ **then**
    $l'_{count+1} = \overline{\mathbf{M}_2\mathbf{d}'_n}$
  else
    $i = j_{save}$
    $\mathbf{d}_i = \mathbf{d}_{save}$
    $count = count + 1$
  end if
end while

いて，式(3.6)を式(3.9)に書き換えることができる.

$$\mathbf{c} = \mathbf{L} + \lambda\mathbf{t} \tag{3.7}$$

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{d}'_i + ((\mathbf{c} - \mathbf{d}'_i) \cdot \mathbf{v})\mathbf{v} \tag{3.8}$$

$$\|\lambda(\mathbf{t} - (\mathbf{t} \cdot \mathbf{v})\mathbf{v}) + (\mathbf{L} - \mathbf{d}'_i - ((\mathbf{L} - \mathbf{d}'_i) \cdot \mathbf{v})\mathbf{v})\| = \|\lambda\mathbf{t} + \mathbf{L} - \mathbf{M}_1\| \tag{3.9}$$

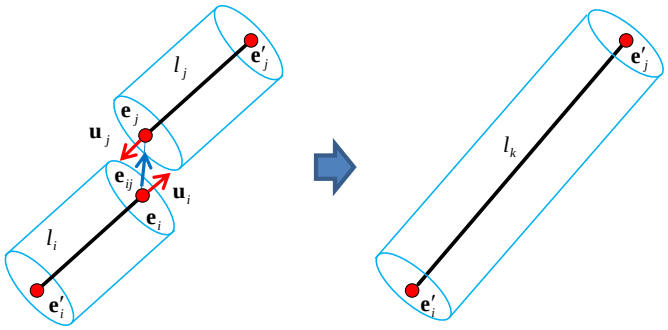


図 **3.12** 直進パイプ部分の軸線分の補完

さらに，式(3.10)を用いることで，式(3.9)を式(3.11)に書き換える．

$$\begin{aligned}\mathbf{w} &= \mathbf{t} - (\mathbf{t}\cdot\mathbf{v})\mathbf{v}\\ \mathbf{y} &= \mathbf{L} - \mathbf{d}'_i - \{(\mathbf{L} - \mathbf{d}'_i)\cdot\mathbf{v}\}\mathbf{v}\\ \mathbf{z} &= \mathbf{L} - \mathbf{M}\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$(\|\mathbf{w}\|^2 - \|\mathbf{t}\|^2)\lambda^2 + 2\{(\mathbf{w}\cdot\mathbf{y}) - (\mathbf{t}\cdot\mathbf{z})\}\lambda + (\|\mathbf{y}\|^2 - \|\mathbf{z}\|^2) = 0 \tag{3.11}$$

このλに関する二次方程式の解の内，絶対値が大きいものが，求める円Cとなり，線分$l' = \overline{\mathbf{d}'_i\mathbf{M}_1}$と円弧$a' = \overline{\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2}$が得られる．

最後の軸点$\mathbf{d}_n$にまだ線分がフィッティングされていない場合には，円Cと直線l_2の接点である$\mathbf{M}_2$を新しい軸点として加え，残った軸点列$[\mathbf{M}_2, \mathbf{d}'_{j+1}, \ldots, \mathbf{d}'_n]$に新しい線分と円弧をフィッティングする．

3.5.3　軸線分の補完と除去

3.5.2節で認識された軸線分は図3.8に示すように，1)オクルージョン領域にある配管の軸線を認識できない．2)ジャンクション部分の軸線がエルボと誤認識される可能性がある．といった問題がある．そのため，以下の手順により，軸線間の位置関係から軸線間の接続関係を推定し，軸線を補完することで最終的な配管系統の軸線を得る．

3.5.3.1　直進パイプ部分の軸線分の補完

図3.12に示すように，初めに，各軸線分$l_i = \overline{\mathbf{e}_i\mathbf{e}'_i}$について，式(3.12),(3.13)を満たす軸線分$l_j = \overline{\mathbf{e}_j\mathbf{e}'_j}$を全て選択する．

$$\left|\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_j\right| > \tau_{inner} \tag{3.12}$$

$$\left|\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{e}_{ij}\right| > \tau_{inner} \tag{3.13}$$

ここで，$\mathbf{e}, \mathbf{e}'$は軸線分の端点，$\mathbf{u}$は軸線分の方向ベクトル，$\mathbf{e}_{ij}$は二つの端点$\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j$を結ぶ

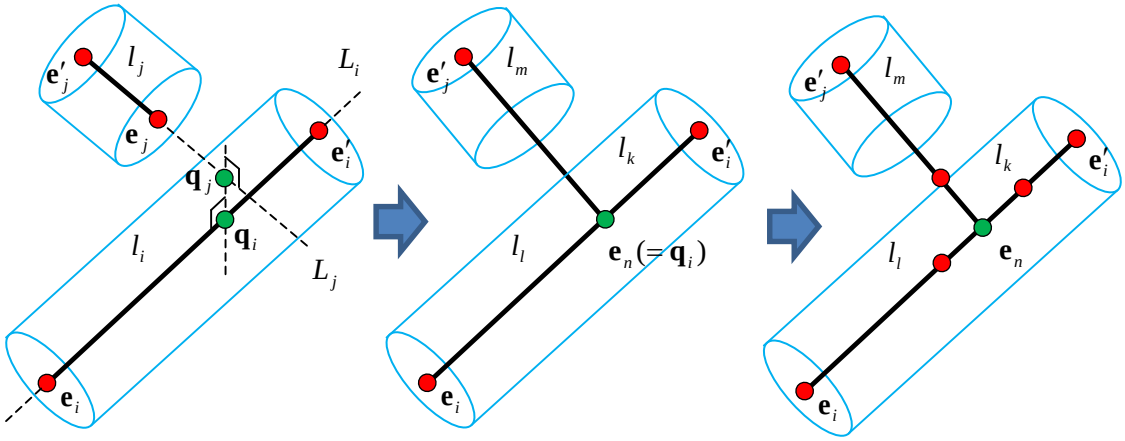


図 **3.13**　ジャンクション部分の軸線分の補完

直線の単位方向ベクトルであり，本研究では $\tau_{inner}=0.98$ と設定した．

次に，選択した軸線分集合 $\{l_j\}$ の内，距離 $\|\mathbf{e}_i-\mathbf{e}_j\|$ が最小となる軸線分が $\|\mathbf{e}_i-\mathbf{e}_j\|<\tau_l$ を満たす場合は，二つの軸線分 l_i,l_j を新しい軸線分 $l_k=\overline{\mathbf{e}'_i\mathbf{e}'_j}$ に置き換える．

さらに，$\mathbf{e}_i$ もしくは $\mathbf{e}_j$ に円弧が接続している場合は，ジャンクション部分がエルボと誤認識されていると考え，この円弧を除去し，二つの軸線分 l_i,l_j を新しい軸線分 $l_k=\overline{\mathbf{e}'_i\mathbf{e}'_j}$ に置き換える．

3.5.3.2　ジャンクション部分の軸線分の補完

図3.13に示すように，初めに，各軸線分 $l_i=\overline{\mathbf{e}_i\mathbf{e}'_i}$ について，式(3.14),(3.15)を満たす軸線分 $l_j=\overline{\mathbf{e}_j\mathbf{e}'_j}$ を全て選択する．

$$\|\mathbf{q}_i-\mathbf{q}_j\|<\tau_{skew} \tag{3.14}$$

$$\|\mathbf{e}'_i-\mathbf{e}_i\|>\|\mathbf{q}_i-\mathbf{e}_i\| \tag{3.15}$$

ここで $\mathbf{q}_i,\mathbf{q}_j$ は，端点 $\mathbf{e}_i,\mathbf{e}'_i$ を通過する直線 L_i と，端点 $\mathbf{e}_j,\mathbf{e}'_j$ を通過する直線 L_j の共通垂直線の交点の位置ベクトル，τ_{skew} は L_i,L_j 間のねじれ距離に対する閾値である．なお，本研究では $\tau_{skew}=0.5\max(r_i,r_j)$ と設定した．

次に，選択した軸線分集合 $\{l_j\}$ の内，距離 $\|\mathbf{e}_j-\mathbf{q}_i\|$ が最小となる軸線分が $\|\mathbf{e}_j-\mathbf{q}_i\|<\tau_l$ を満たす場合は，新しい端点 $\mathbf{e}_n$ を $\mathbf{q}_i$ の位置に設置し，二つの軸線分 l_i,l_j を新しい軸線分 $l_k=\overline{\mathbf{e}_n\mathbf{e}'_i}$，$l_l=\overline{\mathbf{e}_n\mathbf{e}_i}$，$l_m=\overline{\mathbf{e}_n\mathbf{e}'_j}$ に置き換える．

その後，軸線分 l_k,l_l,l_m の各々に対して，$\mathbf{e}_n$ から距離 $1.1r_i$ に新しい端点を設置し，さらに軸線分を二つに分割する．そして，新しく分割した軸線分の内，端点 $\mathbf{e}_n$ に接続している軸線分をジャンクションに対応するセグメントとして定義する．

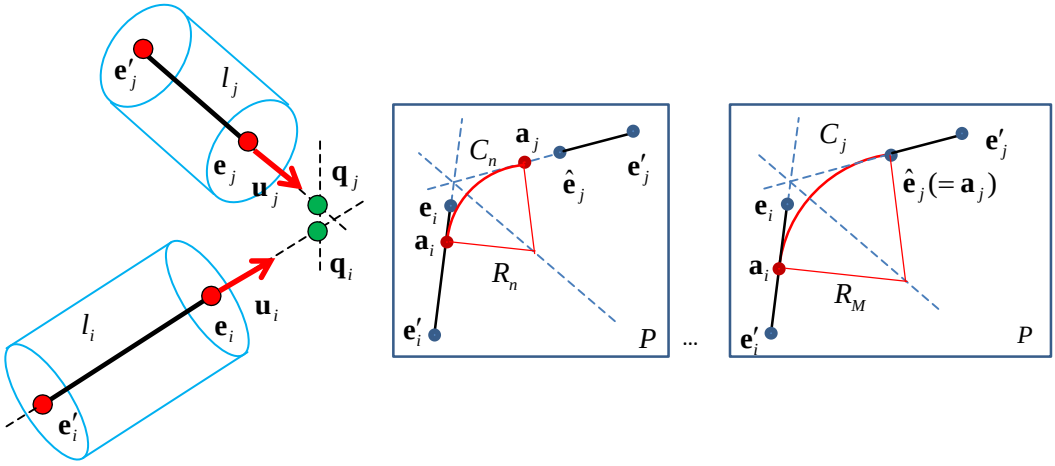


図 **3.14**　エルボ部分の軸線分の補完

3.5.3.3　エルボ部分の軸線分の補完

図3.14に示すように，各軸線分 $l_i = \overline{\mathbf{e}_i\mathbf{e}'_i}$ について，式(3.14)を満たし，距離 $\|\mathbf{e}_i - \mathbf{q}_i\|$ と $\|\mathbf{e}_j - \mathbf{q}_j\|$ がそれぞれ $\|\mathbf{e}_i - \mathbf{q}_i\| < \tau_l, \|\mathbf{e}_j - \mathbf{q}_j\| < \tau_l$ を満たす軸線分 $l_j = \overline{\mathbf{e}_j\mathbf{e}'_j}$ を全て選択する．選択した軸線分集合 $\{l_j\}$ の内，$\|\mathbf{e}_i - \mathbf{q}_i\|$ と $\|\mathbf{e}_j - \mathbf{q}_j\|$ の和が最小となる軸線分 l_j に対して，以下の処理を行う．

初めに，$\mathbf{e}_i, \mathbf{e}'_i, \mathbf{e}'_j$ を通過する平面に $\mathbf{e}_j$ を投影し，点 $\hat{\mathbf{e}}_j$ を得る．そして，$\mathbf{e}_i, \mathbf{e}'_i$ を通過する直線 L_i と $\hat{\mathbf{e}}_j, \mathbf{e}'_j$ を通過する直線 L_j を考え，$L_i, L_j, \mathbf{e}'$ に接する円 C_i と $L_i, L_j, \hat{\mathbf{e}}_j$ に接する円 C_j を求める．C_i の半径 R_i と C_j の半径 R_j を比較し，より大きい径を最大半径値 R_M とする．

次に，2 直線 L_i, L_j に接する円の径を 0 から R_M まで段階的に変化させ，各ステップにおいて軸線分・円弧 $l_{n,i} = \overline{\mathbf{a}_i\mathbf{e}'_i}, a_n = \overline{\mathbf{a}_i\mathbf{a}_j}, l_{n,j} = \overline{\mathbf{a}_j\mathbf{e}'_j}$ を得る．そして，これらの軸線分・円弧を軸線とする円筒面と部分トーラス面を考え，付近に存在する配管系統上の計測点群と面間の距離誤差を求め，最終的に最も小さい誤差を持つ軸線分・円弧の組み合わせを選択する．

3.5.3.4　孤立した軸線分の除去

配管系統の軸線を認識した後，支持材やH型鋼の一部といった物体上の点群が未だに配管として誤認識されている．こうした誤認識結果を除去するため，軸線分間の接続関係に基づき，ある軸線分が他の全ての軸線分と接続しておらず，軸線分の長さが閾値 τ_{iso} 未満の場合は，その軸線分を除去する．

3.6　認識実験結果

3.6.1　大規模レーザ計測点群に対する検証

実際の大規模環境のレーザ計測点群からの配管系統の認識実験として，石油リグを地上型レーザ計測器(Cyra Technologies CYRAX2500)で計測した計測点群，及び化学プラントを地上型レーザ計測器で計測した計測点群の一部を入力として，本手法を実行し，直進パイプと接続要素の認識精度の検証を行った．また，計算機はXeon E5520 2.27GHzを用いた．

石油リグのレーザ計測点群を図3.15(a)に示す．石油リグの計測点群は4,524,324点であった．石油リグの認識における閾値はr_{max} = 0.20, r_{min} = 0.03, r_1 = 0.05, τ_l = 0.30, τ_{iso} = 0.30(単位は全てm)と設定した．他の閾値は3.3節，3.4節，3.5節で述べた基準に従って設定した．

認識された直進パイプ，エルボ，ジャンクションを図3.15(b)に示す．緑色の円筒面が直進パイプ，赤色の部分トーラス面がエルボ，青色の円筒面がジャンクションを表す．また，計測点群全体から配管系統と思われる点群を手動で抽出した点群を図3.16 (a)，認識された配管系統の軸線を図3.16(b)に示す．図から，石油リグに含まれるほぼ全ての配管を正しく認識できていることが確認できる．

次に，配管系統の各要素の認識精度を表3.1，認識処理に要した時間を表3.3に示す．真クラスは計測点群から目測で確認できた配管系統の要素とした．認識の結果，直進パイプの認識率は90%，エルボの認識率は92%，ジャンクションの認識率は87%となった．2章で述べた配管系統の認識アルゴリズムによる石油リグの認識結果である表2.3,2.5と比較して，全要素に対して認識率を大きく改善し，また，処理時間を高速化できていることが確認できる．この改善の理由は，配管系統内の配管の認識のステップにおいて，配管系統に含まれる配管上の点群をほぼ全て抽出できたため，大多数の配管を認識できていることが考えられる．また，処理時間は約20.5分であり，その内，配管系統内の配管の認識のステップにおける処理時間が19.5分を占めている．

次に，化学プラントのレーザ計測点群を図3.17(a)に示す．化学プラントの計測点群は98,624,221点であった. 化学プラントの認識における閾値はr_{max} = 1.25, r_{min} = 0.05, r_1 = 0.03, τ_l = 0.70, τ_{iso} = 0.30(単位は全てm)と設定した．また，他の閾値は3.3節，3.4節，3.5節で述べた基準に従って設定した．

認識された直進パイプ，エルボ，ジャンクションを図 3.17(b)，配管系統上の点群を手動で抽出した点群を図 3.18(a)，認識された配管系統の軸線を図 3.18(b)に示す．また，配管系統の各要素の認識精度を表 3.2，認識処理に要した時間を表 3.4 に示す．真クラスは計測点群から手動で作成した CAD モデルに含まれる配管系統の要素とした．認識の結果, 直進パイプの認識率は 86%, エルボの認識率は 88%, ジャンクションの認識率は 71%となった．また，処理時間は約 9.4 時間であり，その内，配管系統内の配管の認識のス

テップにおける処理時間が 9.0 時間を占めている．

これらの実験結果から，直進パイプ，エルボ，ジャンクションの認識率の最低値として86%，88%，71%をそれぞれ達成し，前手法の各要素の認識率の最低値82%，40%，50%と比較して，接続要素の認識率を大幅に改善できていることが確認できる．Leeら[11]の研究の認識率97%，100%，86%と比較しても，入力データが配管系統上の点群のみで，本研究と比較して，配管系統の複雑度も低いことを考慮すると，本手法の直進パイプ，エルボ，ジャンクションの認識率は十分な精度であると考えられる．

しかし，計測環境内に存在する配管の半径の範囲が非常に広い場合，配管として誤認識される配管以外の物体の数が増加すると考えられる．これらの誤認識された物体は，3.5.3節で述べた軸線分の補完の際に，他の正しく認識された直進パイプ，エルボ，ジャンクションと接続してしまい，認識率が低下する可能性がある．石油リグと化学プラントにおける配管系統の認識率の違いは，上記の理由によるものと思われる．

また，二つの計測点群の認識結果において，直進パイプ，エルボ，ジャンクションの過検出率が非常に高くなっている．これは，H 型鋼や配管の支持部材といった配管以外の物体の形状の一部が円筒面と似ていることが原因である．これら二つの問題点については，物体の断面形状を解析することで改善できると考えられる．この問題解決に関しては，今後の課題としたい．

3.6.2　各閾値の設定基準と認識結果に与える影響

本章での配管系統の認識処理には，主に $r_{\max}, r_{\min}, r_1, \tau_l, \tau_{iso}$ の5つの閾値を用いている．これらの閾値の推奨値は，論理的に設定できるものとトライアンドエラーで設定するものに分けられる．以下に，これらの閾値の設定基準を述べる．

- $r_{\max}, r_{\min}$ は認識された配管の半径の最大値と最小値に対する閾値である． $r_{\max}$ は計測環境内に存在する配管の最大半径より少し大きい値を， $r_{\min}$ は計測環境内に存在する配管の最小半径より少し小さい値を設定する必要がある．本論文では， $r_{\max}$ は配管半径の最大値の1.1倍の値， $r_{\min}$ は配管半径の最小値の0.9倍の値とした．配管の最大・最小半径は配管系統の計測点群を目視で確認することによって推定することができる．
- r_1 はregion-growingに用いられる局所近傍探索半径である． r_1 は最低でも近傍領域内に1点以上の近傍点を含むように設定する必要がある．本研究では，計測環境内に存在する配管系統上の計測点群の点密度が最も低い領域で，近傍領域内の近傍点の数が10点程度となるように r_1 を設定すると妥当な結果が得られることが判っている．
- τ_l は補完する軸線分のペアの端点間の距離に対する閾値である． τ_l の最適値は配管系統に含まれる直進パイプやエルボ，ジャンクションの位置関係やレーザ計測点群のオクルージョン領域によって変化するため，下記の設定歩法を基準に設定する．
- τ_{iso} は除去する孤立した軸線分の最小長さに対する閾値である． τ_{iso} の最適値は配管

系統に含まれる直進パイプの長さによって変化するため，下記の設定歩法を基準に設定する．

τ_l と τ_{iso} の変化が認識結果に与える影響を調べるため，石油リグの計測点群の一部(点数:440,033)に対して，τ_l と τ_{iso} をそれぞれ変化させた場合の認識結果の違いを図3.19，及び3.20に示す．閾値は $r_{\max}=0.20, r_{\min}=0.05, r_1=0.03$ [m]とし，τ_l と τ_{iso} はそれぞれ0.10, 0.30, 1.50[m]と変化させた．直進パイプ，エルボ，ジャンクションの認識率をそれぞれ表3.5,3.6に示す．

図3.19と表3.5から，τ_l を配管の半径より小さい値($\tau_l=0.10$ [m])を設定した場合，3.5.3.1節で述べた軸線補完処理において，エルボとして誤認識されたジャンクションの軸線分を補完することが出来ないため，ほとんどのジャンクションがエルボと誤認識される．こうした状況を避けるため，τ_l は最低でも接続する配管の半径の3-4倍程度に設定することが望ましい．一方，τ_l が非常に大きい($\tau_l=1.50$ [m])場合，いくつかの不適切な軸線分のペアが接続してしまっている．　τ_l の最適値は配管系統の構造やレーザ計測点群のオクルージョン領域によって決まるため，τ_l の最大値に対して閾値を設定することは難しい．以上から，τ_l の決定方法として，最小値を配管半径の3倍，最大値を配管半径の10倍として等間隔に τ_l を変化させたときに認識結果が最も良いものを選択した．

一方，図3.20と表3.6から，τ_{iso} に非常に小さい値($\tau_{iso}=0.10$ [m])を設定した場合は，配管以外の物体を除去できていない．反対に，τ_{iso} に非常に大きい値($\tau_{iso}=1.50$ [m])を設定した場合は，配管以外の物体をほぼ除去できたが，いくつかの認識済みの直進パイプも除去されてしまっている．　τ_{iso} の最適値は配管系統に含まれる直進パイプの長さによって決まるため，先験的に τ_{iso} の最適値を見つけることは難しい．以上から，τ_{iso} の決定方法として，初めに $\tau_{iso}=0$ として認識を行った結果から配管として誤認識された物体の長さを基準に決定した．

3.7　まとめ

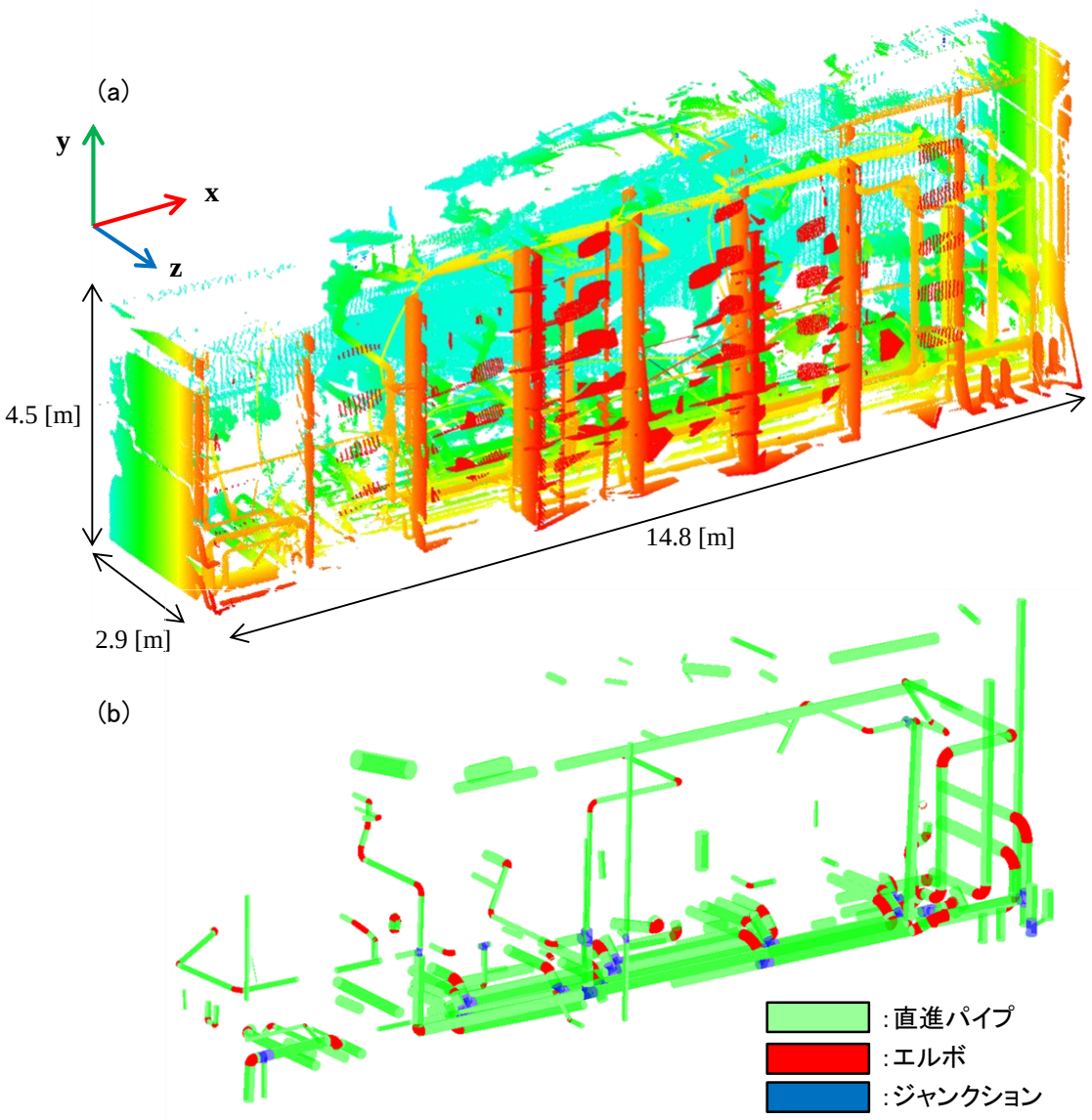
本章のまとめを以下に述べる．

- 2 章で提案した配管系統の自動認識アルゴリズムの処理速度と認識精度の改善を図るため，法線ベクトルに基づく region-growing による配管の認識と軸線追跡法による配管系統の軸線の認識を用いた，新たな配管系統の自動認識アルゴリズムを提案した．
- 実際の大規模プラントのレーザ計測点群に対して本手法を適用し，認識結果を検証した結果, 直進パイプ, エルボ, ジャンクションの認識率の最低値として 86%, 88%, 71%をそれぞれ達成し，前手法の各要素の認識率の最低値 82%，40%，50%と比較して，接続要素の認識率を大幅に改善できていることを確認した．
- 実際の大規模プラントのレーザ計測点群に対して本手法を適用した結果，約 450 万

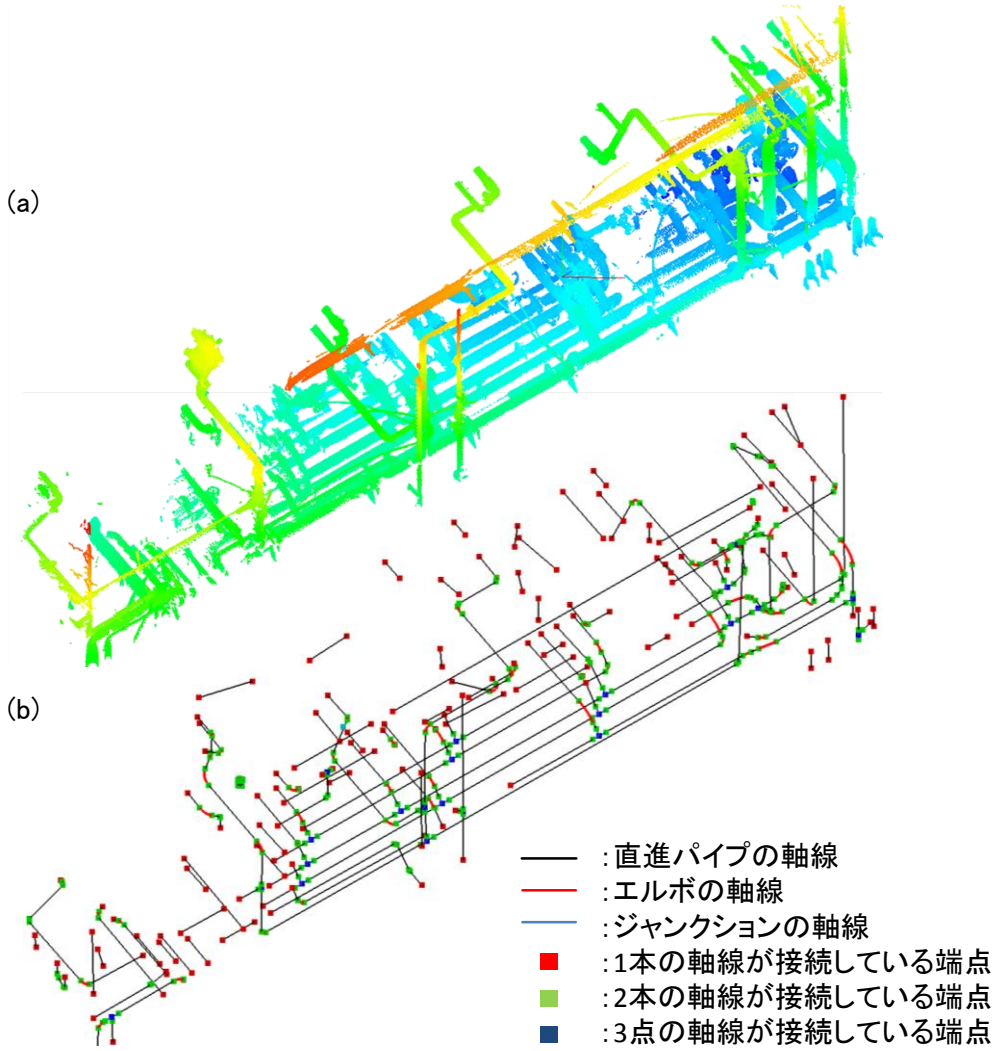
点の計測点群に対して 10 分程度で認識が可能であり，前手法での処理時間である 3.0 時間と比較して，処理時間を大幅に短縮できていることを確認した．また，約 1 億点の計測点群に対して約 9.4 時間で配管系統を自動認識可能であることを確認した．

また，提案手法の問題点として以下が挙げられる．

- 断面形状が円筒面と似ている物体も配管として認識してしまうため，過検出率が高い．また，配管の軸線に基づく配管要素の補完において，これらの誤認識された配管が他の配管要素と接続してしまう可能性がある．この問題点については，配管として認識された点群の断面形状を解析することで今後改善できると考えられる．



(a) 計測点群(点数:4, 524, 324)　(b) 認識された 3D モデル
図 **3.15** 石油リグの計測点群と配管系統の認識結果



(a) 配管系統上の計測点群　(b) 配管系統の軸線分

図 **3.16** 石油リグの配管系統上の計測点群と配管系統の認識結果

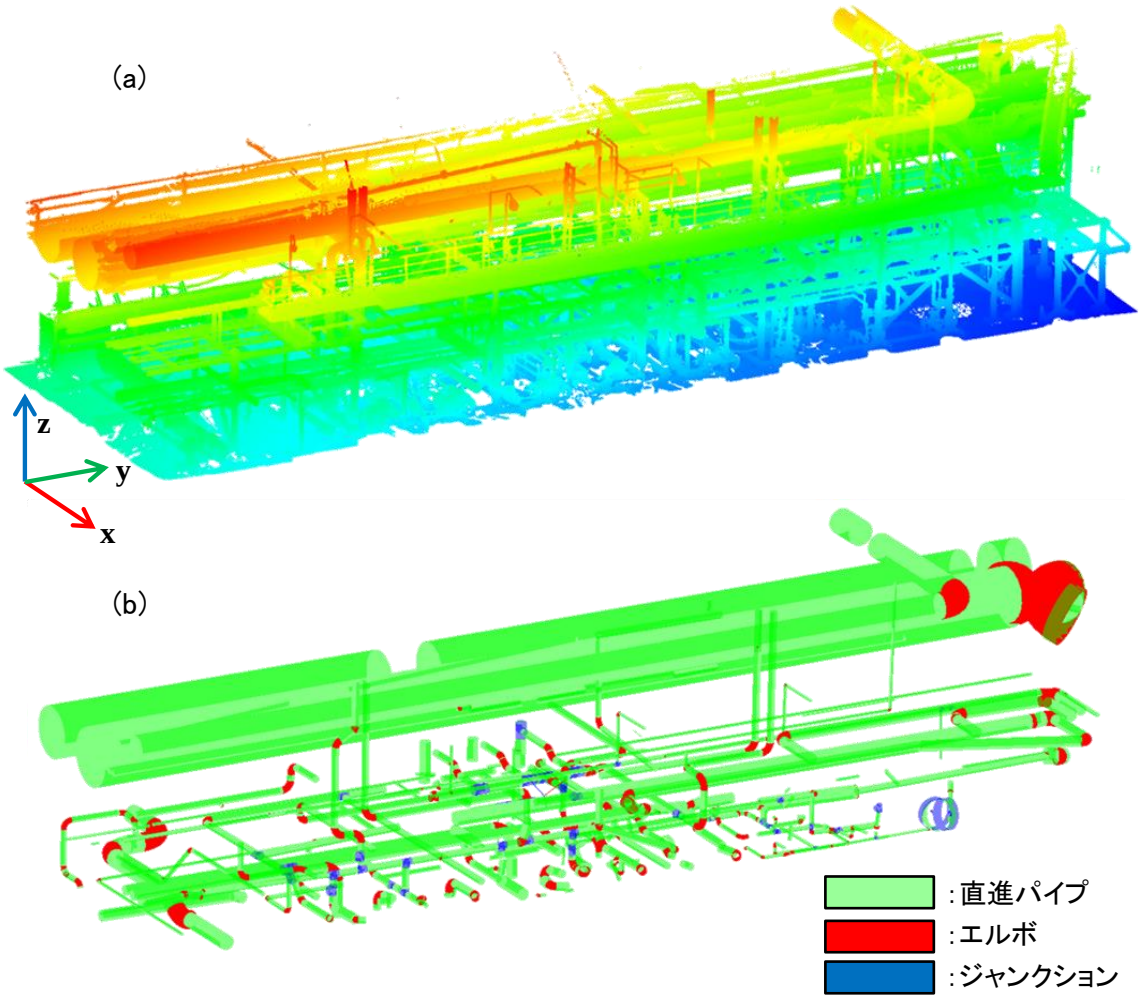
表 **3.1** 石油リグ内の配管系統の認識率

(a) 直進パイプ

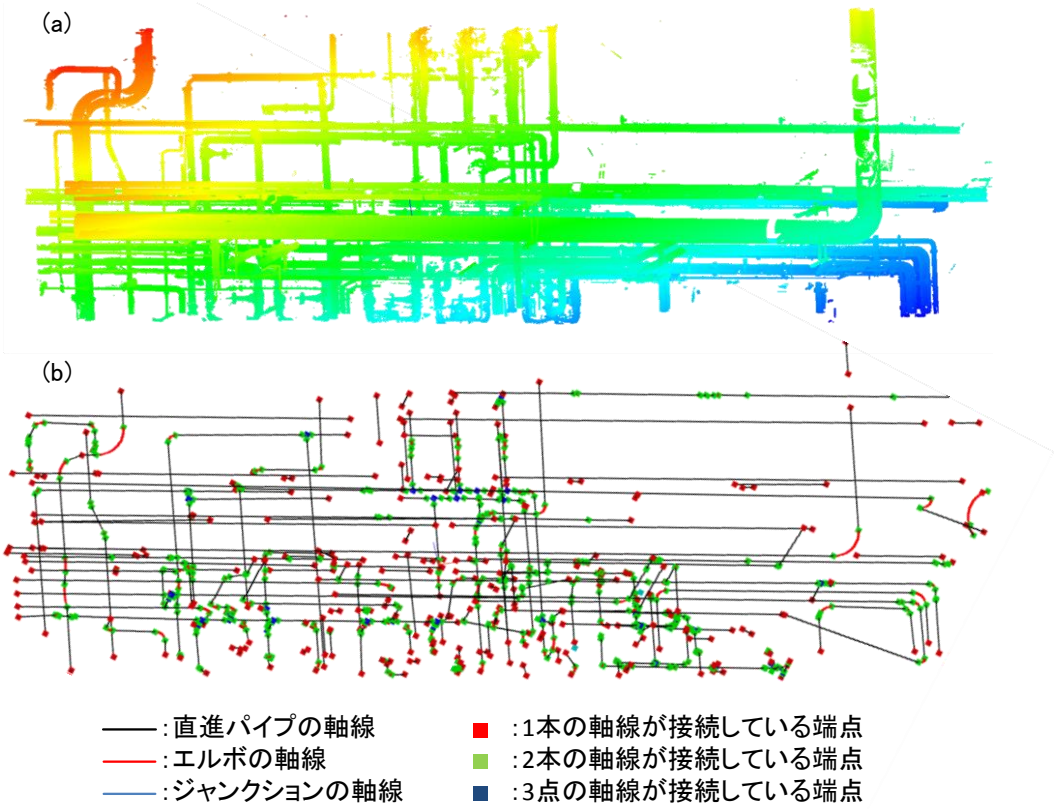
		Result of automatic recognition				False recognition	
		Pipe	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Pipe	130	13	143	90.9	9.1	37.1
	Other	77	-	-	-	-	-
	Total	207	-	-	-	-	-

(b) 接続要素

		Result of automatic recognition					False recognition	
		Elbow	Junction	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Elbow	65	0	5	70	92.8	7.2	21.4
	Junction	1	20	2	23	87.0	13.0	13.0
	Others	16	3	-	-	-	-	-
	Total	84	23	-	-	-	-	-



(a) 計測点群(点数:98, 624, 221)　(b) 認識された 3D モデル
図 **3.17** 化学プラントの計測点群と配管系統の認識結果



(a) 配管系統上の計測点群　(b) 配管系統の軸線分

図 **3.18** 化学プラントの配管系統上の計測点群と配管系統の認識結果

表 **3.2** 化学プラント内の配管系統の認識率

(a) 直進パイプ

		Result of automatic recognition				False recognition	
		Pipe	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Pipe	159	24	183	86.9	13.1	62.7
	Other	267	-	-	-	-	-
	Total	426	-	-	-	-	-

(b) 接続要素

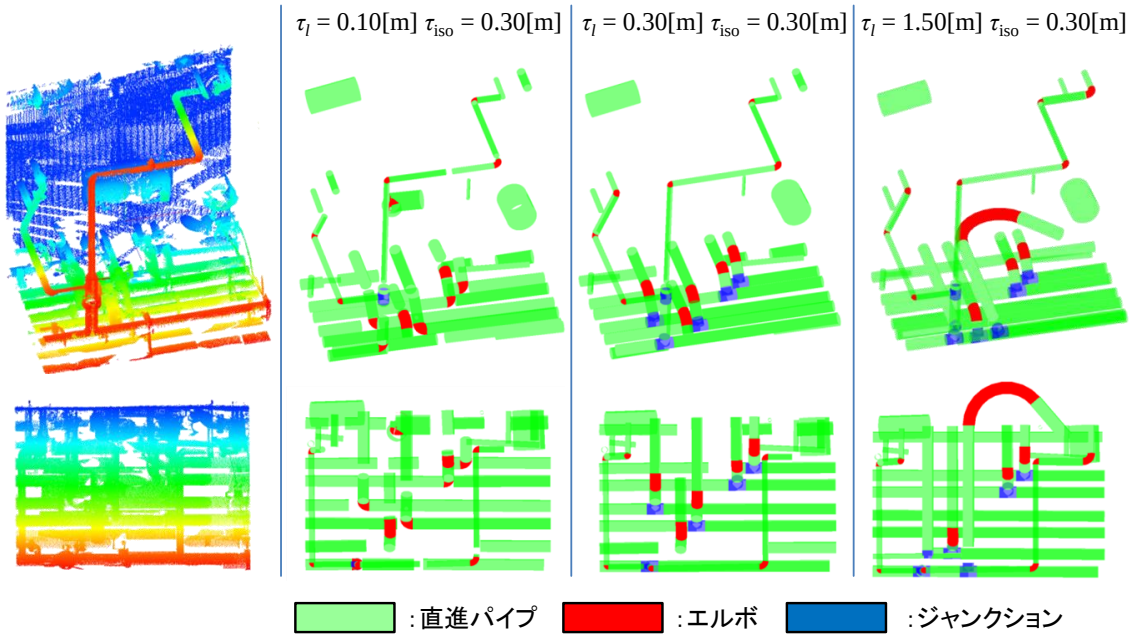
		Result of automatic recognition					False recognition	
		Elbow	Junction	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Elbow	80	0	10	90	88.9	11.1	62.4
	Junction	5	20	3	28	71.4	28.6	51.2
	Others	126	21	-	-	-	-	-
	Total	211	41	-	-	-	-	-

表 **3.3** 石油リグ内の配管系統の認識処理時間

		処理時間 [sec]
法線ベクトルの推定		31
配管系統内の配管の認識	直進パイプ上の点群抽出	837
	直進パイプ上の点群のグループ化	320
	直進パイプの定義パラメータの推定	14
配管系統の軸線の認識		6
合計		1235

表 **3.4** 化学プラント内の配管系統の認識処理時間

		処理時間 [sec]
法線ベクトルの推定		639
配管系統内の配管の認識	直進パイプ上の点群抽出	20051
	直進パイプ上の点群のグループ化	7952
	直進パイプの定義パラメータの推定	4332
配管系統の軸線の認識		5
合計		33822



(a) 計測点群
(点数:440, 033)

(b) 認識された 3D モデル

図 **3.19** τ_l に対する配管系統の認識結果の変化

表 **3.5** τ_l に対する配管系統の配管系統の認識率の変化

(a) 直進パイプ

τ_l = 0.10[m] τ_{iso} = 0.30[m]

		Result of automatic recognition				False recognition	
		Pipe	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Pipe	24	10	34	70.6	29.5	56.4
	Other	10	-	-	-	-	-
	Total	34	-	-	-	-	-

τ_l = 0.30[m] τ_{iso} = 0.30[m]

		Result of automatic recognition				False recognition	
		Pipe	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Pipe	32	2	34	94.1	5.9	28.9
	Other	13	-	-	-	-	-
	Total	45	-	-	-	-	-

τ_l = 1.50[m] τ_{iso} = 0.30[m]

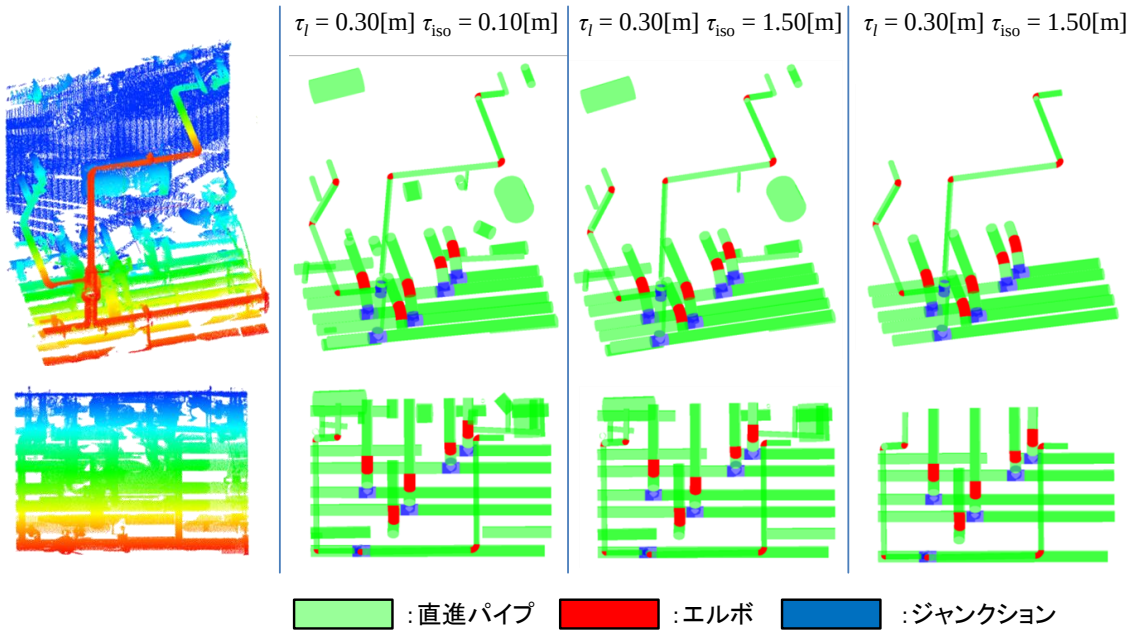
		Result of automatic recognition				False recognition	
		Pipe	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Pipe	23	11	34	67.6	32.4	45.2
	Other	19	-	-	-	-	-
	Total	42	-	-	-	-	-

(b) 接続要素

		Result of automatic recognition					False recognition	
		Elbow	Junction	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Elbow	7	0	5	12	58.3	41.7	50.0
	Junction	5	1	1	7	14.3	84.7	0.0
	Others	2	0	-	-	-	-	-
	Total	14	1	-	-	-	-	-

		Result of automatic recognition					False recognition	
		Elbow	Junction	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Elbow	11	0	1	12	91.7	8.3	0.0
	Junction	0	6	1	7	85.7	14.3	0.0
	Others	0	0	-	-	-	-	-
	Total	11	6	-	-	-	-	-

		Result of automatic recognition					False recognition	
		Elbow	Junction	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Elbow	10	0	2	12	83.3	16.7	9.1
	Junction	0	5	2	7	71.4	28.6	28.6
	Others	1	2	-	-	-	-	-
	Total	11	7	-	-	-	-	-



(a) 計測点群
(点数:440, 033)

(b) 認識された 3D モデル

図 **3.20** τ_{iso} に対する配管系統の認識結果の変化

表 **3.6** τ_{iso} に対する配管系統の認識率の変化

(a) 直進パイプ

τ_l = 0.30[m] τ_{iso} = 0.10[m]

		Result of automatic recognition				False recognition	
		Pipe	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Pipe	32	2	34	94.1	5.9	37.6
	Other	19	-	-	-	-	-
	Total	51	-	-	-	-	-

τ_l = 0.30[m] τ_{iso} = 0.30[m]

		Result of automatic recognition				False recognition	
		Pipe	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Pipe	32	2	34	94.1	5.9	28.9
	Other	13	-	-	-	-	-
	Total	45	-	-	-	-	-

τ_l = 0.30[m] τ_{iso} = 1.50[m]

		Result of automatic recognition				False recognition	
		Pipe	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Pipe	28	6	34	82.3	17.7	0.0
	Other	0	-	-	-	-	-
	Total	28	-	-	-	-	-

(b) 接続要素

		Result of automatic recognition					False recognition	
		Elbow	Junction	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Elbow	11	0	1	12	91.7	8.3	0.0
	Junction	0	6	1	7	85.7	14.3	0.0
	Others	0	0	-	-	-	-	-
	Total	11	6	-	-	-	-	-

		Result of automatic recognition					False recognition	
		Elbow	Junction	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Elbow	11	0	1	12	91.7	8.3	0.0
	Junction	0	6	1	7	85.7	14.3	0.0
	Others	0	0	-	-	-	-	-
	Total	11	6	-	-	-	-	-

		Result of automatic recognition					False recognition	
		Elbow	Junction	Not recognized	Total	Recognition rate [%]	False negative [%]	False positive [%]
True class	Elbow	11	0	1	12	91.7	8.3	9.1
	Junction	0	6	1	7	85.7	14.3	0.0
	Others	0	0	-	-	-	-	-
	Total	11	0	-	-	-	-	-

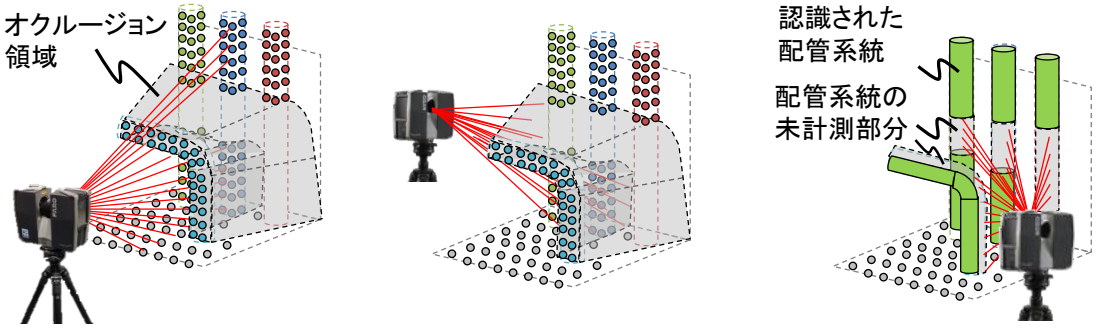
第4章　配管系統上の未計測領域最小化のための最適スキャナ配置

4.1　研究背景

図 4.1(a)に示すように，プラント内部の配管系統をレーザスキャナで計測する際，スキャナと配管系統の間に物体が存在すると，スキャナから見てその物体の影となる空間には計測点群が発生しないオクルージョン領域が生じる．レーザ計測点群を用いて配管系統を認識する場合，オクルージョン領域内には計測点群が存在しないため，配管系統を認識することができない．こうしたオクルージョン領域を解消し，計測領域内の配管系統の計測点群を網羅的に得るためには，オクルージョン領域を計測可能な位置にスキャナを再設置し，計測を再び行う必要がある．しかし，実際の計測では，スキャナ位置は操作者の経験則に基づいて決定することが多く，この配置が効率的にオクルージョン領域を解消するとは限らないため，最適な計測位置を計算機支援で推定することが期待されている．

配管系統の未計測部分を最小化するスキャナ配置の自動推定アルゴリズムの必要条件として以下が挙げられる．

1. 地上型レーザスキャナの使用
2. 計測対象の環境に関する事前知識が無い状態から開始すること
3. スキャナを実際に設置可能な領域を推定し，その領域内からスキャナ位置を決定す



(a) 初期スキャナ位置　(b) オクルージョン領域を最小化するスキャナ位置　(c) 配管系統の未計測部分を最小化するスキャナ位置

図 4.1　レーザ計測時のオクルージョン領域

ること

4. 配管系統が存在する可能性が高く，その認識やモデル化に効果的な領域を出来る限り多く計測可能なスキャナ位置の推定
5. 後に各スキャナ位置から得られた計測点群をレジストレーションするため，各計測点群間に重複する領域が存在すること

本章では，以上の条件の内，1-4 を満たすスキャナ配置の自動推定アルゴリズムを提案する．

4.2 関連研究

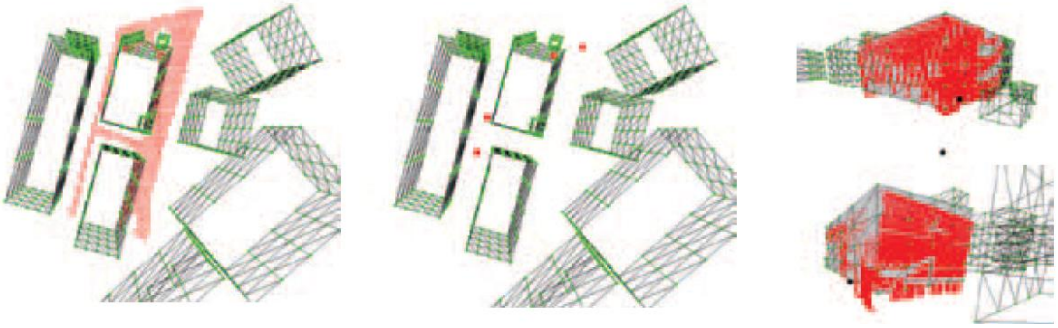
未知の空間をスキャナや距離センサを用いて，計測位置を変えながら複数回の計測でいかに効率よく計測するかという問題は，Next-Best-View(NBV)問題として主にロボティクスの分野で研究が進められている．

Dan ら[22]は図 4.2 に示すように，ビルのような直方体の形状をした屋外の建物を地上型レーザスキャナを用いて計測する際に，建物のメッシュモデルとスキャナ位置の候補点集合を入力とした混合型整数計画問題の最適化問題として解くことで，最低の計測回数で各メッシュモデル上の計測点密度の総和が最大となるようなスキャナ位置の集合を導出している．しかし，この手法では，スキャナ位置の候補点と計測対象のメッシュモデルが入力として必要となる．

一方，図 4.3,4.4 に示すように，Potthast ら[23]や Dornhege ら[24]はロボット搭載型の距離センサを用いた volumetric な手法を提案している．これらの手法は計測対象空間をボクセル化し，各セルを未計測である *unknown*，計測済みで計測点が存在しない *free*，計測済みで計測点が存在する *occupied* のいずれかに分類する．その後，最も多くの *unknown* セルを計測可能なスキャナ位置と姿勢を求め，次のスキャナ位置と姿勢として決定する．

この中で Potthast ら[23]は，計測対象となる *unknown* セルとスキャナ位置を結ぶ光線が貫通するセルの状態から目標の *unknown* セルにレーザが到達する期待値を求めることで，次の計測位置を推定している．しかし，この手法では，スキャナ位置の候補を事前に与えた計測対象周辺の数点に限定しているため，単純に実際の配管系統の計測に適用するには，プラント内でスキャナ設置可能な位置を推定する必要がある．

Dornhege ら[24]の手法では，ロボットに積んだ 6 自由度のレンジスキャナから得た計測点群を対象としている．*unknown* セルを計測可能な光線の通り道となる領域として，境界付近にある *unknown* セルを *frontier* セルとして設定する．計測対象となる *unknown* セルのクラスタを楕円体で近似し，楕円体上の 6 点と *frontier* セルを通過する光線のみを用いてそのクラスタの可観測性の期待値を評価することで，*unknown* セル全てに対して可観測性を評価した場合と比較して，処理時間を大幅に短縮している．しかし，配管系統内部の *unknown* 空間のクラスタは円筒体が複数接続した形状をしているため，単純な



(a) メッシュモデルとスキャナ位置候補 (b) 決定したスキャナ位置 (c) 計測点群

図 4.2　Dan ら[22]の手法による処理例

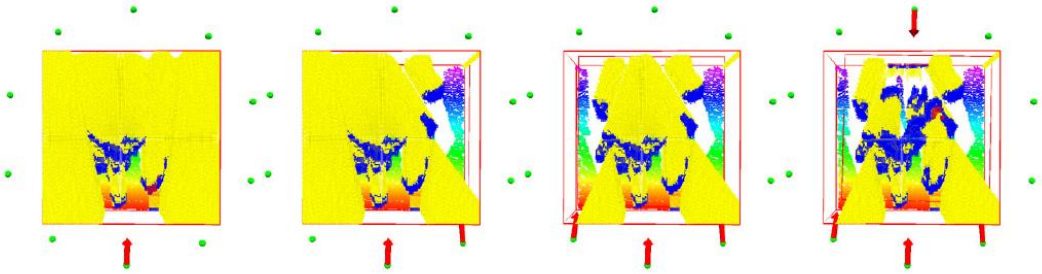
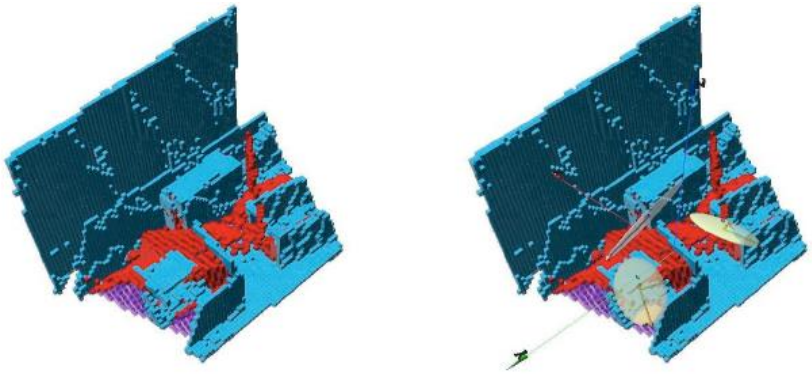


図 4.3　Potthast ら[23]の手法による処理例



(a)frontier セル(赤)と unknown セル(紫)　(b)近似楕円体

図 4.4　Dornhege ら[24]の手法による処理例

楕円体のフィッティングは適していない．また，スキャナを設置可能な領域を推定していない．

また，これらの volumetric な手法は図 4.1(b)に示すように，計測環境内の *unknown* 空間の最小化を目的としているため，配管系統に適用した場合，図 4.1(c)に示すように，配管系統上の未計測部分を効率的に計測するとは限らない．

以上から，地上型レーザスキャナから計測した点群を入力として，スキャナを設置可能な位置を推定し，かつ配管系統の未計測部分を最小化するスキャナ配置を推定する研究は行われていないのが現状である．

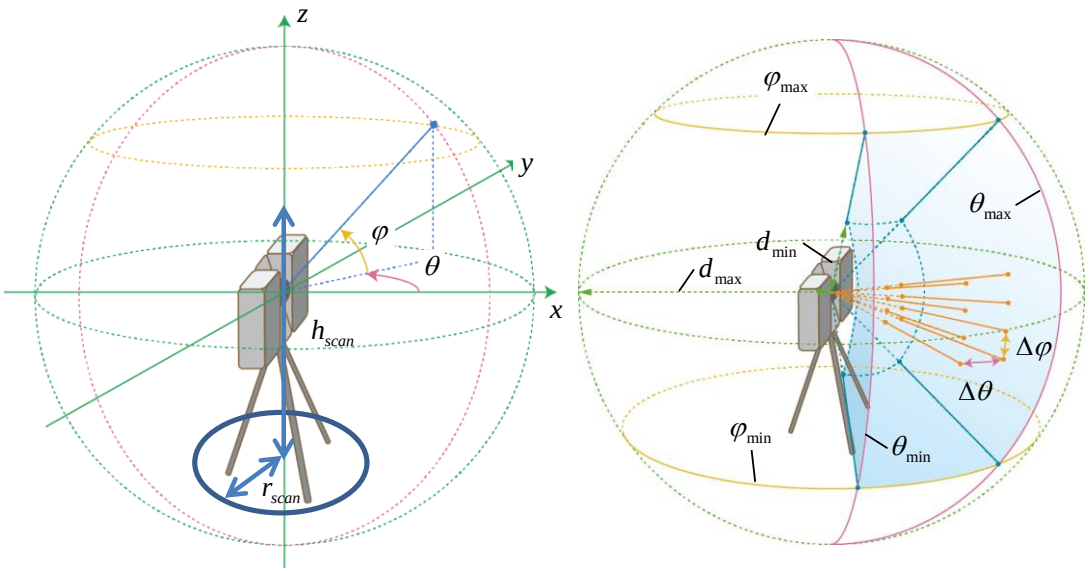


図 **4.5**　スキャナパラメータ

4.3　本章の目的

以上から，本章では，配管系統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系統の未計測部分を最小化するスキャナ配置を，スキャン毎に得られる計測点群から認識した配管系統のモデルを基に，自動推定する手法の開発を目的とする．配管系統の自動認識手法には第 3 章で提案した手法を用いる．ただし本章では，その基礎研究として，実際のレーザ計測ではなく，プラントのメッシュデータから作成したモデル点群を入力として，シミュレーション上で本手法の有効性を検証する．

4.4　スキャナパラメータ

本アルゴリズムでは図 4.5 に示すように，以下のスキャナ固有のパラメータを入力として使用する．

θ,φ はスキャナを原点とする球座標系におけるx軸の正方向からの角度とz軸の正方向からの角度，$\theta_{min},\theta_{max}$ と $\varphi_{min},\varphi_{max}$ は θ,φ の最大角度と最小角度，$\Delta\theta,\Delta\varphi$ は各レーザ間の水平方向，垂直方向の角度間隔，d_{min},d_{max} はスキャナからの計測可能な最小距離と最大距離，r_{scan} はスキャナ設置時の占有領域の半径，h_{scan} はスキャナ設置時の床面からのスキャナの高さを表す．

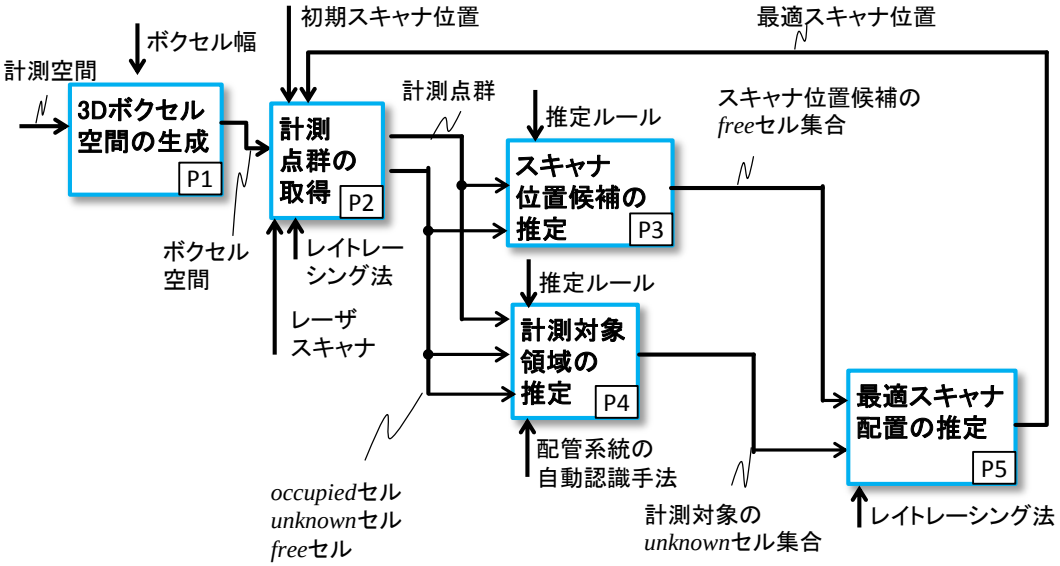


図 **4.6**　最適スキャナ配置の推定手法の概要

4.5　最適スキャナ配置の推定手法

4.5.1　提案手法概要

本研究で提案する最適スキャナ配置の推定手法の概要を図4.6に示す.

Step.1)　3Dボクセル空間の生成

計測対象空間全体を含むx,y,z軸に平行な立方体を考え，一定の幅l_gで分割したボクセル空間を生成する．各セル空間は，未計測の*unknown*セル，計測済みで計測点が存在しない*free*セル，計測済みで計測点が存在する*occupied*セルのいずれかの状態をもつ．生成された全てのセルは*unknown*セルとして初期化する．

Step.2)　計測点群の取得

指定した初期スキャナ位置からレーザ計測を行い，計測点群を得る．ただし本研究ではレーザ計測のシミュレーションにより擬似計測点群を生成する．この処理は以下の手順で行う．プラントのCADモデル上に生成したモデル点群に対し，スキャナ位置を始点とする光線を水平方向，垂直方向に一定の角度間隔で生成する．そして，光線毎に貫通するセル集合をレイトレーシング法によって抽出し，得られたセル集合の中からスキャナから最も近いモデル点群を含むセルを選択し，内部に含まれる点群の内，最も光線に近い点を擬似計測点として抽出する．同時に，モデル点群を含むセルを*occupied*セル，スキャナ位置とモデル点群を含むセルの間にある全ての*unknown*セルを*free*セルに変更

する．以上の処理をスキャン時の全レーザ光線に対して繰り返し，抽出された点群を擬似計測点群とする

Step.3)　スキャナ位置候補の推定

次回のレーザ計測時のスキャナ位置の候補を推定する．初めに，計測点群の各点に対して3.3節の手法で法線ベクトルを推定した後，地面に垂直な法線ベクトルを持つ点群を床面上の点群として抽出し，ユークリディアンクラスタリングを用いてグループ化する．その後，床面上の点群を含む*occupied*セルの内，1)付近にスキャナを設置するのに十分な面積を持つ床面が存在する，2)スキャナの周囲の空間内に他物体が存在しない，の2つの条件を満たすセルをスキャナが設置可能な床面上のセルとして抽出し，そのセルから一定の高さにある*free*セルを次回のレーザ計測時のスキャナ位置候補として抽出する．

Step.4)　計測対象領域の推定

Step2で得られた擬似計測点群を入力として，3章で述べた配管系統の認識を行う．ただし，オクルージョン領域にある配管の軸線の補完は行わない．その後，認識された配管系統の3Dモデルと擬似計測点群を用いて，全*unknown*セルの内，未計測の配管表面が存在すると思われる*unknown*セル集合を計測対象のセルとして抽出する．また，認識された配管上の点分布状態と配管からの距離に基づき，抽出した*unknown*セルに計測を行う優先度を示すスコアを付与する．

Step.5)　最適スキャナ配置の推定

Step3で得られた各スキャナ位置候補のセルにおいて，その位置からStep4で求められた計測対象のセルまでの直線上にあるセルをレイトレーシング法によって探索し，レーザが到達可能な可観測確率を光線が通過するセルの状態を基に求める．そして計測対象のセルに付与されたスコアと可観測確率の積を期待値としてスキャナ位置候補のセルに加算していく．最終的に全スキャナ位置候補のセルの内，加算されたスコアが最も高いセルの重心点を，次のレーザ計測時のスキャナ位置として決定する．

以下にこれらの処理の詳細を述べる．

4.5.2　3D ボクセル空間の生成

モデル点群を含む x,y,z 軸に平行なバウンディングボックスを考え，一定の幅 l_g で分割したボクセル空間を考える．l_g は 3.3 節の法線ベクトルの推定で用いたグリッドセルの幅と等しくなるように設定する．各セル空間は，未計測の空間である *unknown* セル，計測済みで計測点が存在しない *free* セル，計測済みで計測点が存在する *occupied* セルのい

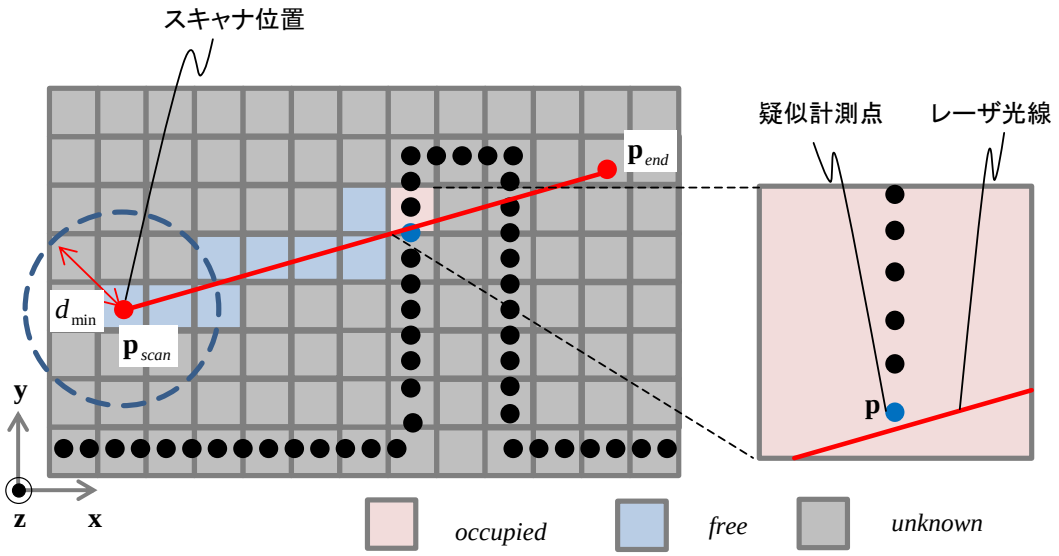


図 **4.7**　擬似計測点群の生成

ずれかの状態をもつ．生成時には全てのセルは *unknown* セルとして初期化する．

4.5.3　計測点群の取得

初期スキャナ位置から地上型レーザスキャナによる計測を行い，計測点群を得る．ただし本研究では，プラントのメッシュモデルをメッシュ品質改善手法[25]によって分割した頂点群を入力モデル点群として抽出し，この点群に対して，任意の位置からレーザ計測を行った際に得られるであろう擬似計測点群 P を求める．

図 4.5 に示すように，レーザは任意のスキャナ位置 $\mathbf{p}_{scan}$ から水平方向，垂直方向に一定の間隔で照射される．このとき，レーザの単位方向ベクトル $\mathbf{v}_{scan}$ とするとレーザが到達する限界位置は $\mathbf{p}_{end} = \mathbf{p}_{scan} + d_{\max} \cdot \mathbf{v}_{scan}$ で与えられる．次に図 4.7 に示すように，$\mathbf{p}_{scan}$ と $\mathbf{p}_{end}$ を結ぶ線分が貫通するセル集合をレイトレーシング法によって選択し，$\mathbf{p}_{scan}$ から近い距離にあるセルから順番に，セル内部にモデル点群が存在するかどうかを判定する．セル内部に点群が存在しない場合は，そのセルを *free* セルとする．一方，セル内部に点群が存在する場合は線分からの距離が最も近いセル内部のモデル点を探索し，そのレーザが計測した擬似計測点 $\mathbf{p}$ とする．このとき，$\mathbf{p}$ と $\mathbf{p}_{scan}$ 間の距離が $d_{\min}$ 以上で $\mathbf{p}$ が P に含まれていなければ，$\mathbf{p}$ を P に加える．また，セルを *occupied* セルとして，以降の判定を終了する．

上記の処理を各スキャンのレーザ光線を表した線分について行うことで擬似計測点群 P を得る．

4.5.4　スキャナ位置候補の推定

得られた擬似計測点群から地面に水平な点群を床面上の点群として抽出し，床面上に

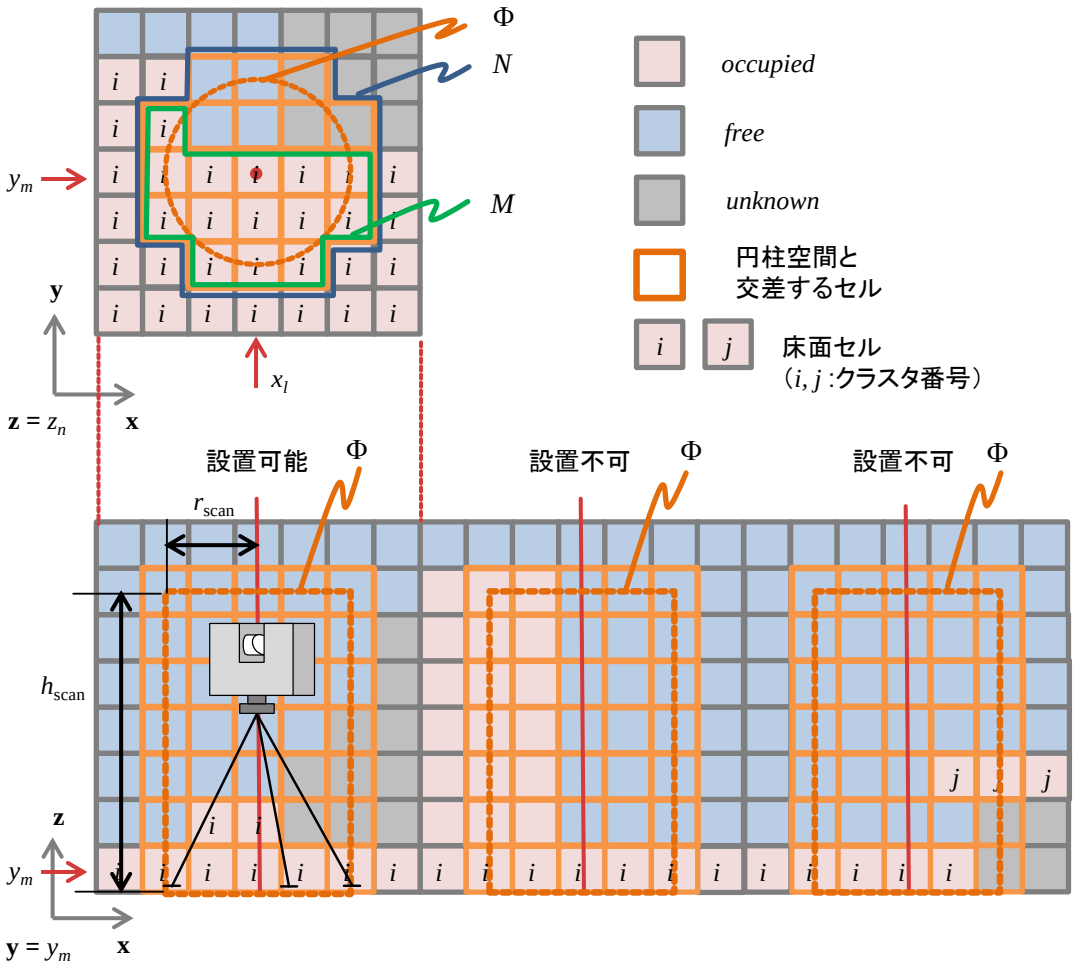


図 **4.8**　スキャナを設置可能な床面セルの選択

スキャナが設置可能な空間があるかどうかを調べることで，次の計測においてスキャナを設置可能な位置候補を抽出する．本処理は以下の2ステップで構成される．

1)　床面上の点群の抽出

初めに，3.3節と同様の手法を用いて点群の法線ベクトルを求める．そして，床面の法線ベクトルとしてz軸方向の単位ベクトル(0,0,1)と各計測点の法線ベクトルの内積を取り，その値が閾値 τ_{floor} 以上となる点を床面上に分布する点 $\mathbf{p}_{floor}$ として抽出する．本研究では $\tau_{floor} = 0.97$ 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通りである．

(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，チェックが必要な点のクエリ Q を構築する．

(3)　P_{floor} に含まれるすべての点 $\mathbf{p}_{floor,i}$ に対して次の処理を行う．

- $\mathbf{p}_{floor,i}$ をクエリ Q に加える．
- Q に含まれる各点 $\mathbf{p}_{floor,i}$ に対して次の処理を行う．
  - $\mathbf{p}_{floor,i}$ を中心とする半径 r の球面内に存在する $\mathbf{p}_{floor,i}$ の近傍点集合 $P^k_{floor,i}$ を探索
  - すべての点 $\mathbf{p}^k_{floor,i} \in P^k_{floor,i}$ について，処理済みでなければ $\mathbf{p}^k_{floor,i}$ を Q に加え，処理済みであれば $\mathbf{p}^k_{floor,i}$ を Q に加えない．
- Q に含まれる全ての点が処理されたら，Q をクラスタリスト C に加え，Q を空にする．

(4) P_{floor} に含まれるすべての点 $\mathbf{p}_{floor,i}$ が処理され，点クラスタリスト C に含まれているなら，アルゴリズムを終了する．

また，クラスタ化された点群を含むセルを床面セルとし，クラスタの番号を付与する．

2)　設置可能なスキャナ位置の探索

図 4.8 に示すように，抽出された各床面セルに対して，その上方にスキャナ設置領域として, 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する半径 r_{scan} , 高さ h_{scan} の円柱体 Φ を考える. 円柱体 Φ の内部に含まれるセル集合 V_{scan} が以下の条件を満たす場合は，その床面セルがスキャナを設置可能な床面領域であるとみなす．

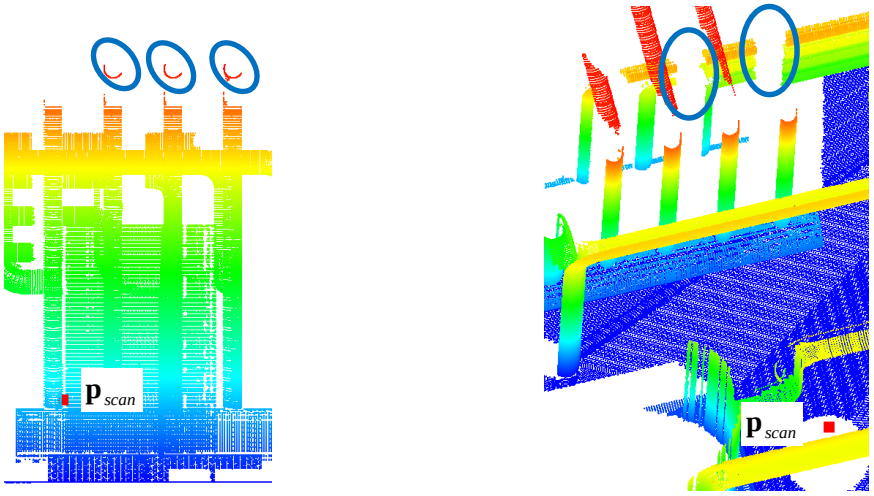
1. スキャナが設置不可能となる障害物が存在しない．すなわち，V_{scan} が*free*セル，*unknown*セル，もしくは床面セルに付与されたクラスタ番号と同じクラスタ番号を持つ*occupied*セルのいずれかのみを含むこと．
2. スキャナを設置するのに十分な床面の面積がある．すなわち，V_{scan} に含まれるセルについて，同じx,yインデックスを持つセルをz方向に探索したとき，1つ以上の床面ボクセルを含むセル数M，あるzインデックスにおいて円柱体内部に含まれるセル数Nに対して，$\tau_{place} \geq M/N$ を満たすこと．なお，本研究では $\tau_{place} = 0.5$ と設定した．

スキャナを設置可能な床面セルを求めた後，これらのセルからの高さが h_{scan} となる*free*セルをスキャナ位置候補セル $V_{candidate}$ として選択する．

4.5.5　計測対象領域の推定

擬似計測点群 P を入力として，3章で述べた配管系統内の配管の認識と軸点列の生成，初期軸線分の推定を行った後，ジャンクション部分の軸線の補完を行い，配管系統を認識する．

その後，認識された配管系統の3Dモデルと配管系統上の計測点群，ボクセル空間を用いて，配管系統上にあると思われる*unknown*セルを抽出する．そして，各*unknown*セルに対して計測の優先度を示すスコアを決定し，セルに付与する．この処理の詳細をいかに述べる．



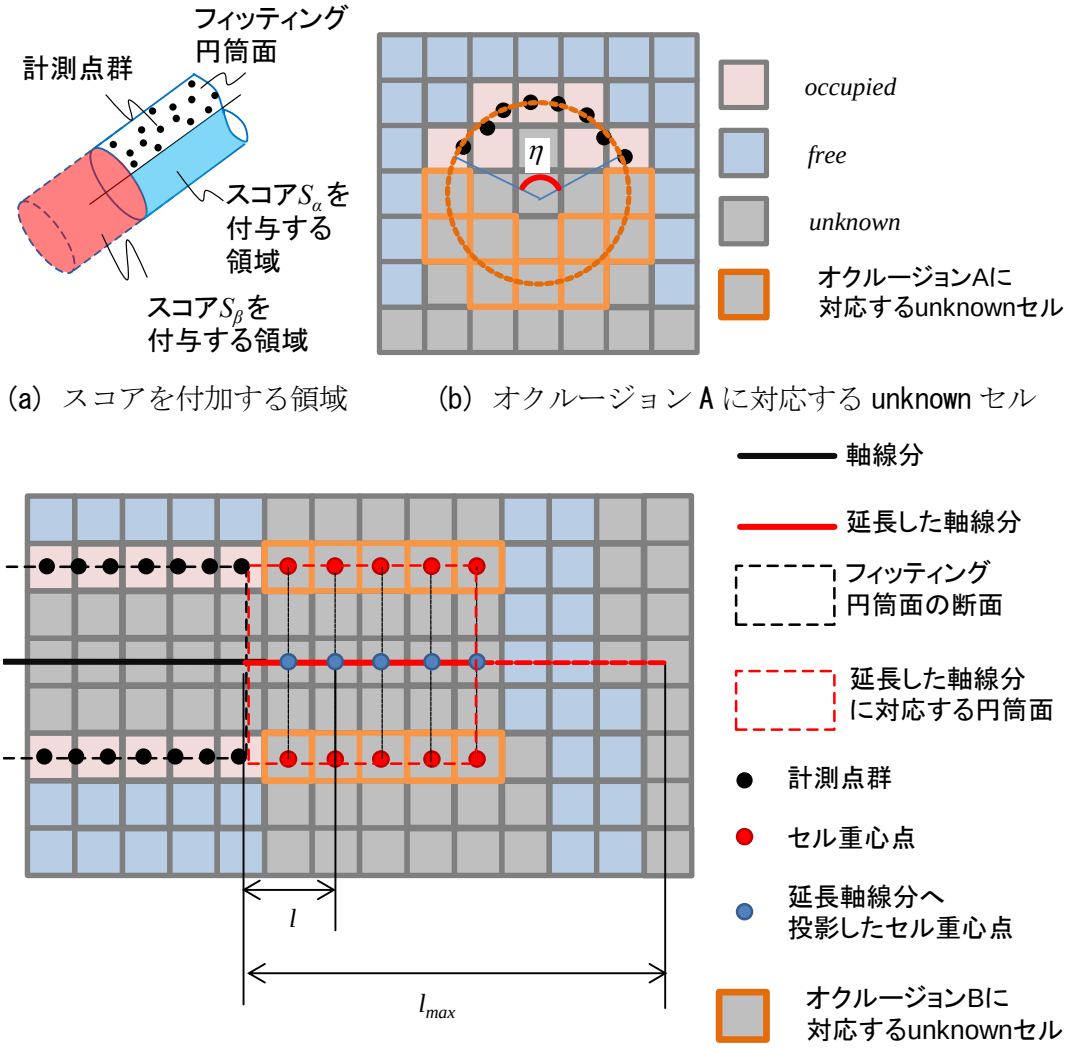
(a) 配管断面の一部がオクルージョン　　(b) 配管断面の全体がオクルージョン

図 **4.9**　配管系統上に現れるオクルージョンの種類

プラント計測時に配管系統上に生じるオクルージョンは，大きく2種類に分類される．一つは図4.9(a)に示すように，配管の円柱形状の一部のみが計測され，スキャナから見て裏側の円柱部分がオクルージョン領域となっているもの(オクルージョンA)．もう一つが図4.9(b)に示すように，スキャナと配管の間に他物体が存在し，配管の円柱形状全体がオクルージョン領域となっているもの(オクルージョンB)である．これらのオクルージョンが配管系統の認識に与える影響を考えた上で，それぞれの種類のオクルージョンに対して，内部に存在すると思われる配管表面を含む*unknown*セルを抽出し，計測の優先度を示すスコアを求める．図4.10(a)にそれぞれのスコアを付与する領域を示す．，

オクルージョンAについて，図4.10(b)に示すように，フィッティング円筒面と干渉する*unknown*セルをオクルージョンAに対応する*unknown*セルとする．

オクルージョンAの優先度スコアの決定方法は以下のように考える．3.4.3節の手法で求めた配管の断面形状に対する点群の被覆角度ηが小さいと，直進パイプ上の計測点群にフィッティングされた円筒面や軸線追跡法によって得られたエルボの軸線に対応するトーラス面の半径や軸線の精度が低くなる．一方，ηが一定値以上であれば，安定した円筒面フィッティングと軸線追跡が可能である．そのため，安定したフィッティングが可能な最低限の点群の被覆角度$\tau_{\theta,\max}$と比較して，点群の被覆角度ηが小さい場合は，より信頼性の高い円筒面フィッティングと軸線追跡を行うため，改めてオクルージョン領域の計測を行い，配管の未計測部である裏側を計測することとする．一方，$\tau_{\theta,\max}$よりηが大きい場合は，配管の認識結果を信頼し，それ以上のオクルージョン領域の計測は不要と判断する．以上から，オクルージョンAの優先度スコアS_αを以下の式(4.1)から決定し，対応する*unknown*セルにS_αを付与する．



(a) スコアを付加する領域　　(b) オクルージョン A に対応する unknown セル

(b) オクルージョン B に対応する unknown セル

図 **4.10**　配管系統上のオクルージョンに対応する unknown セル

$$S_\alpha = \begin{cases} \alpha(\tau_{\theta,\max} - \eta)/(\tau_{\theta,\max} - \tau_{\theta,\min}) & (\tau_{\theta,\min} \le \eta < \tau_{\theta,\max}) \\ 0 & (\tau_{\theta,\max} \le \eta \le 2\pi) \end{cases} \qquad (4.1)$$

ここで$\tau_{\theta,\min}$は3.4.3節で用いた円筒面フィッティングが可能な最低限の被覆角度，α はオクルージョンAの認識の優先度に対する係数である．

次に，オクルージョンBに対応する*unknown*セルの決定方法を述べる．配管系統に含まれる配管は必ず壁面や床面，もしくはその他の配管要素と接続していると仮定すると，認識された配管が他の配管要素と接続していない場合は，オクルージョン領域によってその配管が分断されていると考えられる．そのため，図4.10(c)に示すように最大距離$l_{\max}$延長した配管の軸線を考え，その軸線に対応する円筒面表面を含む*unknown*セルをオク

ルージョンBに対応する*unknown*セルとする．ただし，延長した軸線が*unknown*や*free*セルを貫通する場合は，これらのセルを貫通しないように延長する距離を短縮する．

オクルージョンBのスコアの決定方法として，既に認識されている配管からの距離が近いほど，実際に配管が存在する可能性が高いと考えられる．そのため，*unknown*セルの重心点を軸線分に投影した投影点と軸線分の端点間の距離 l に基づき，オクルージョンBのスコアを S_β 以下の式(4.2)から決定し，対応する*unknown*セルに S_β を付与する．

$$S_\beta = \begin{cases} \beta(l_{\max} - l)/l_{\max} & (0 \le l < l_{\max}) \\ 0 & (l_{\max} \le l) \end{cases} \tag{4.2}$$

ここで β はオクルージョンBの認識の優先度に対する係数である．

そして，スコアが付与された全ての*unknown*セルを配管系統上にある計測対象のセル集合 $V_{objective}$ として抽出する．また，$V_{objective}$ の各セルに対して，スコア S_α とスコア S_β を比較し，最終的なスコア S を $S = \max(S_\alpha, S_\beta)$ として付与する．

4.5.6　最適スキャナ位置の決定

4.5.4節で得られたスキャナ位置候補のセル集合 $V_{candidate}$ の各セル $v_c \in V_{candidate}$ について，その重心点 $\mathbf{p}_c$ から計測対象のセル集合 $V_{objective}$ の各セル $v_o \in V_{objective}$ の重心点 $\mathbf{p}_o$ へ向かう線分 $r_o = \overline{\mathbf{p}_o\mathbf{p}_c}$ を考え，r_o が貫通するセル集合 $V_{r_o} = \{v_{r,m}\}$ をレイトレーシング法によって探索する．このとき，レーザが $\mathbf{p}_c$ から $\mathbf{p}_o$ まで到達する可観測確率 $f(\mathbf{p}_o \mid r_o)$ を以下の式(4.3)により決定する．この計算方法はPotthastらの手法[23]と同様の考え方を用いた

$$f(\mathbf{p}_o \mid r_o) = \prod_{m \in V_{r_o}} p(v_{r,m}) \tag{4.3}$$

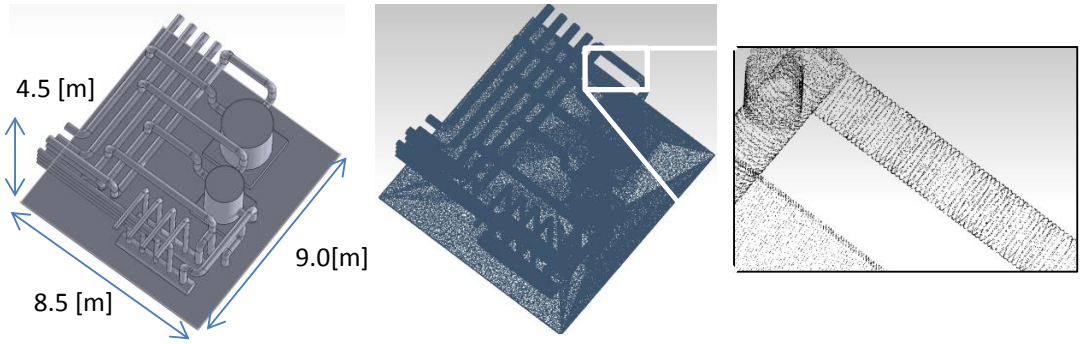
このとき，$p(v_{r,m})$ はセル $v_{r,m}$ をレーザが通過する確率であり，セルの状態に応じて式(4.4)から与える．

$$p(v_{r,m}) = \begin{cases} 1.0 & (\text{セルが} free) \\ 0.0 & (\text{セルが} occupied) \\ 1-q & (\text{セルが} unknown) \end{cases} \tag{4.4}$$

q は計測環境内に存在する*occupied*ボクセルの割合に依存する変数である．

最後に，可観測確率 $f(\mathbf{p}_o \mid r_o)$ と計測対象のセルのスコア S_o から，このスキャナ位置候補のセル v_c から計測可能な全ての計測対象のセル $n \in V_{objective}$ に関する可観測確率の期待値 $E[v_c]$ を以下の式(4.5)から求める．

$$E[v_c] = \sum_{n \in V_{objective}} f(\mathbf{p}_{o,n} \mid r_{o,n}) \cdot S_{o,n} \tag{4.5}$$



(a) プラント CAD モデル　　(b) 分割後のメッシュ頂点

図 **4.11**　入力モデル点群

以上の処理を全てのスキャナ位置候補セル v_c に対して行い，最終的に最も高い期待値 $E[\hat{v}_c]$ を持つスキャナ位置候補セルの重心点 $\hat{v}_c$ を次の計測のための最適スキャナ位置として決定する．

4.6　実験と結果

4.6.1　入力メッシュモデルとパラメータ設定

図4.11(a)に市販のCADモデリングソフトであるSolidworksで作成したプラントのCADデータと寸法を示す. 配管系統内の配管の半径は0.10[m]と0.15[m]である. また, 図4.11(b)に生成したモデル点群データを示す．全点数は4,906,157点である．

配管系統の認識におけるパラメータは$r_{\max}$ = 0.20[m], $r_{\min}$ = 0.08[m], l_g = 0.05[m], r_1 = 0.03[m], τ_1 = 0.70[m]と設定し，他の閾値は3.3節,3.4節,3.5節で述べた基準に従って設定した．また，スキャナ固有のパラメータは，FARO® LASER SCANNER FOCUS^{3D}のスキャナを参考に，$\theta_{\min}=0[\mathrm{deg}]$，$\theta_{\max}=360[\mathrm{deg}]$，と $\varphi_{\min}=-60[\mathrm{deg}]$，$\varphi_{\max}=90[\mathrm{deg}]$，$\Delta\theta=0.05[\mathrm{deg}]$，$\Delta\varphi=0.05[\mathrm{deg}]$，$d_{\min}=0.6[m]$，$d_{\max}=10.0[m]$，$r_{scan}=0.5[m]$，$h_{scan}=1.0[m]$ と設定した．

4.6.2　Potthast らの手法による計測結果と配管認識結果

本手法との比較のため，4.6.1節のモデル点群を入力として，Potthastらの手法[23]を実行し，スキャナ位置の決定と計測された擬似計測点群からの配管系統の認識精度の検証を行った．

Potthastの手法では，最適スキャナ位置の決定の処理において，全ての*unknown*セルを計測対象のセル集合$V_{objective}$とし，全ての計測対象のセルのスコア S_o を1.0とする．また，式(4.3)における可観測確率の計算において $p(v_{r,m})$ を式(4.6)のように設定する．

$$p(v_{r,m}) = \begin{cases} 1.0 & (\text{セル} v_m \text{が} free) \\ 0.0 & (\text{セル} v_m \text{が} occupied) \\ p_0 & (\text{セル} v_m \text{が} unknown \text{で計測点群が距離} d_{boundary} \text{以内にある}) \\ 1-q & (\text{それ以外}) \end{cases} \tag{4.6}$$

ここで $d_{boundary} = 0.1[m]$，$p_0 = 0.4$，$q = 0.01$ と設定した．他の閾値は4.5.4節で述べた基準に従って設定した．

また，計算の高速化のため，4.5.4節で求めたスキャナ位置候補セル全体からx,yz軸方向にそれぞれ5つにつき1つの間隔で選択したセルに対してのみ，最適スキャナ位置の決定の処理を行った．

各スキャンにおける計測点群とスキャナ位置を図4.12，認識された配管系統の3Dモデルを図4.13，配管系統の軸線を図4.14，スキャナ位置候補のセルに加算された期待値を図4.15に示す．また，各スキャンにおける擬似計測点，計測対象のセル，スキャナ位置候補のセル，*unknown*セル，*free*セル，*occupied*セルの数をカウントしたものを表4.1(a)，各プロセスにおける処理時間を表4.1(b)，配管系統に含まれる配管要素の認識率を表4.1(c)に示す．

図4.15から，Potthastらの手法では計測可能な*unknown*領域を出来る限り大きくするために物体から最も離れた場所にスキャナを置く傾向が見られる．しかし，計測された物体付近の*unknown*セルの可観測確率 p_o が低く設定されているため，物体が密集している箇所にある計測対象領域の期待値が低くなってしまった結果，それらを計測できる場所ではなく，既にスキャナを設置済みの場所の近くにスキャナを再設置してしまっているケースが見られた．

また，表4.1(a),(b)から最適スキャナ位置の決定の際に，ボクセル内の全ての*unknown*セルに対して期待値を求めており，計算量が非常に膨大となったため処理時間が非常に大きくなってしまっている．そのため，プラント計測現場での実時間利用は困難であると考えられる．

4.6.3　本提案手法による計測結果と配管認識結果

同様に，4.6.1節のモデル点群を入力として，本提案手法を実行し，スキャナ位置の決定と計測された擬似計測点群からの配管系統の認識精度の検証を行った．

各種パラメータは，$\tau_{\theta,\max} = 180[\text{deg}]$, $l_{\max} = 1.0\,[\text{m}]$，$\alpha = 1.0$, $\beta = 1.0$, $q = 0.01$ として設定した．他の閾値は4.5.4節で述べた基準に従って設定した．

また4.6.2節と同様に，計算の高速化のため，4.5.4節で求めたスキャナ位置候補セル全体からx,yz軸方向にそれぞれ5つにつき1つの間隔で選択したセルに対してのみ，最適ス

キャナ位置の決定の処理を行った．各スキャンにおける計測点群とスキャナ位置を図4.16，認識された配管系統の3Dモデルを図4.17，配管系統の軸線を図4.18，計測対象のセルのスコアを図4.19，スキャナ位置候補のセルの期待値を図4.20に示す．また，各スキャンにおける擬似計測点，計測対象のセル，スキャナ位置候補のセル，*unknown*セル，*free*セル，*occupied*セルの数をカウントしたものを表4.2(a)，各プロセスにおける処理時間を表4.2(b)，配管系統に含まれる配管要素の認識率を表4.2(c)に示す．

また，Potthastらの手法と本手法の実行結果から*unknown*セル数と各配管要素の認識率を比較したグラフを図4.21に示す．図4.21からPotthastらの手法と比較して，*unknown*空間の最小化を目的とせず，配管系等が存在する可能性が高い空間の最小化を目的としているため，*unknown*セル数の減少は遅い．しかし，少ない計測回数で配管要素の認識率が100%となるような計測点群を得ていることから，本スキャナ配置のほうが配管系統の認識に効率的な計測点群を得られていることが確認できる．

また，表4.1(b)と表4.2(b)から最適スキャナ位置の決定の際に配管表面上のセルのみを期待値計算の対象とすることで，処理時間を大幅に短縮できていることが確認できる．各スキャンにおける処理時間の内，擬似計測点群の生成を除いた処理時間は最大で約4分程度であり，この処理時間であれば，プラント計測現場での実時間利用が可能であると考えられる．

4.7　まとめ

本章のまとめを以下に述べる．

- 3章で述べた計測点群からの配管系統の自動認識手法と既存のNBV問題解法[23]を組み合わせることで，配管系統上と思われる領域を推定し，この領域のみをできるだけ多く計測可能な次スキャナ位置を逐次的に推定する手法を開発した．
- プラントのCADデータから作成したモデル点群を入力としたシミュレーションを行い，本アルゴリズムの有効性を評価した．実験結果から，既存手法[23]と比較して，配管系統の認識にとってより有効なスキャナ配置を著しく短時間で推定可能であることを確認した．

また，提案手法の問題点として以下が挙げられる．

- 実際のプラントの計測点群に対して適用していないため，実際のプラントを計測したデータに対する検証が必要である．
- 実際のプラントの計測点群に対して適用する場合，それぞれの計測で得られた点群をレジストレーションする必要が有るため，ある程度の計測領域の重複を考慮したスキャナ位置の導出手法が必要である．
- スキャナ位置の推定結果は配管系統の認識結果に依存するため，初期スキャナ位置

によっては次のスキャナ位置の推定結果が効率的ではない可能性がある．この問題点は，スキャン回数が少ない間は配管の有無に関わらず，未計測空間をできるだけ多く計測可能なスキャナ位置を推定することで改善できると考えられる．

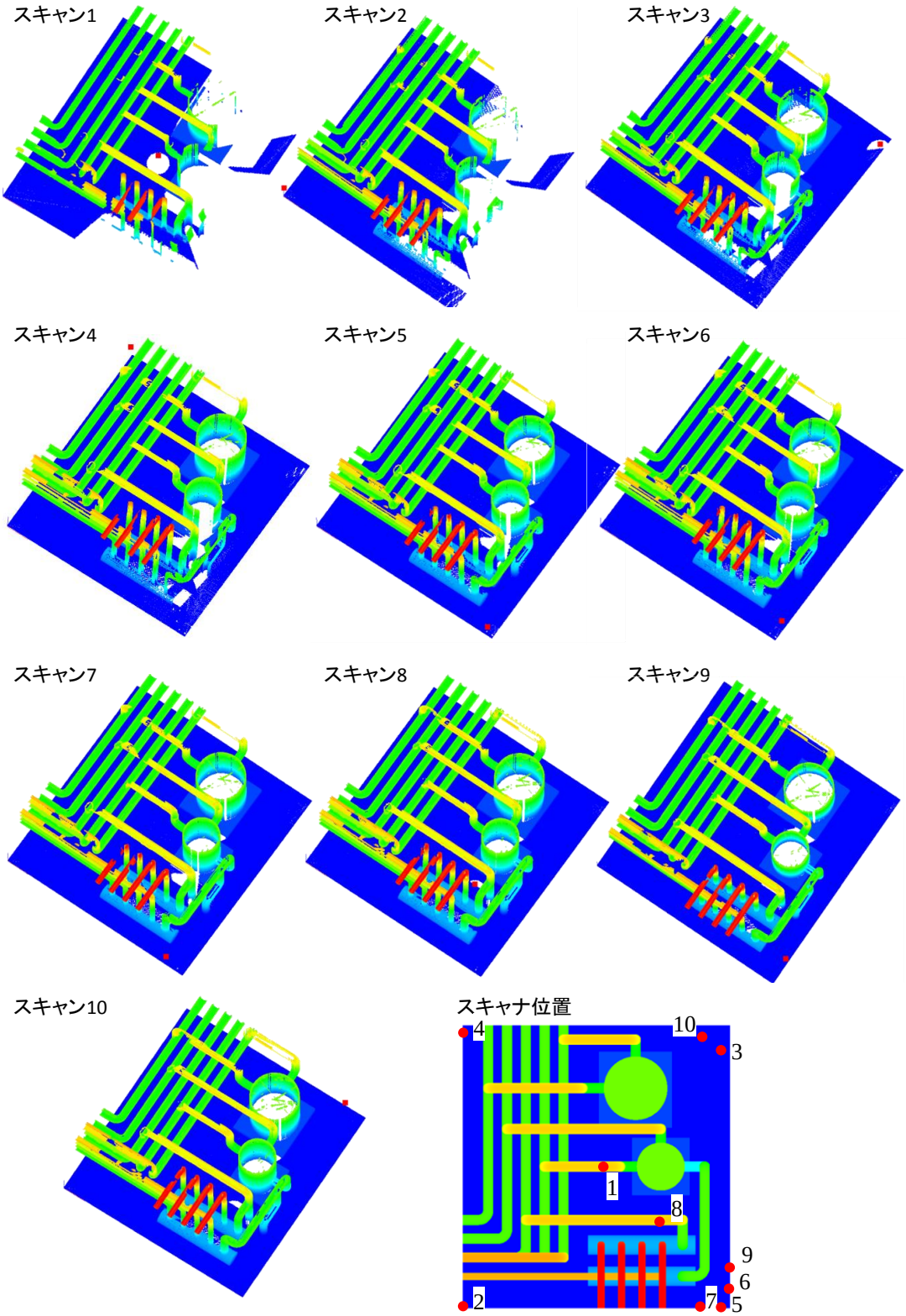


図 **4.12**　取得した擬似計測点群とスキャナ位置(Potthast らの手法)

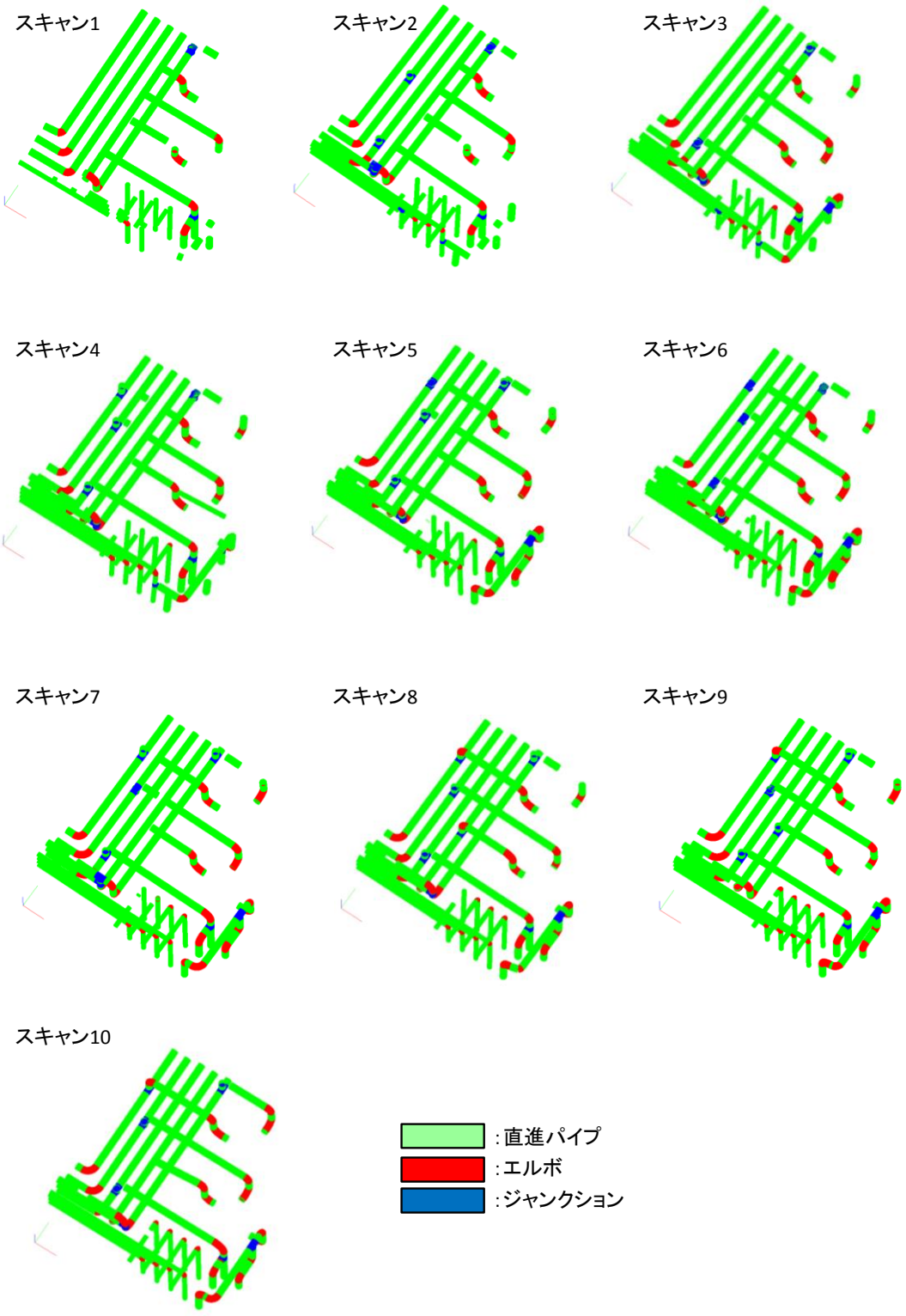


図 **4.13**　擬似計測点群から認識された配管系統(Potthast らの手法)

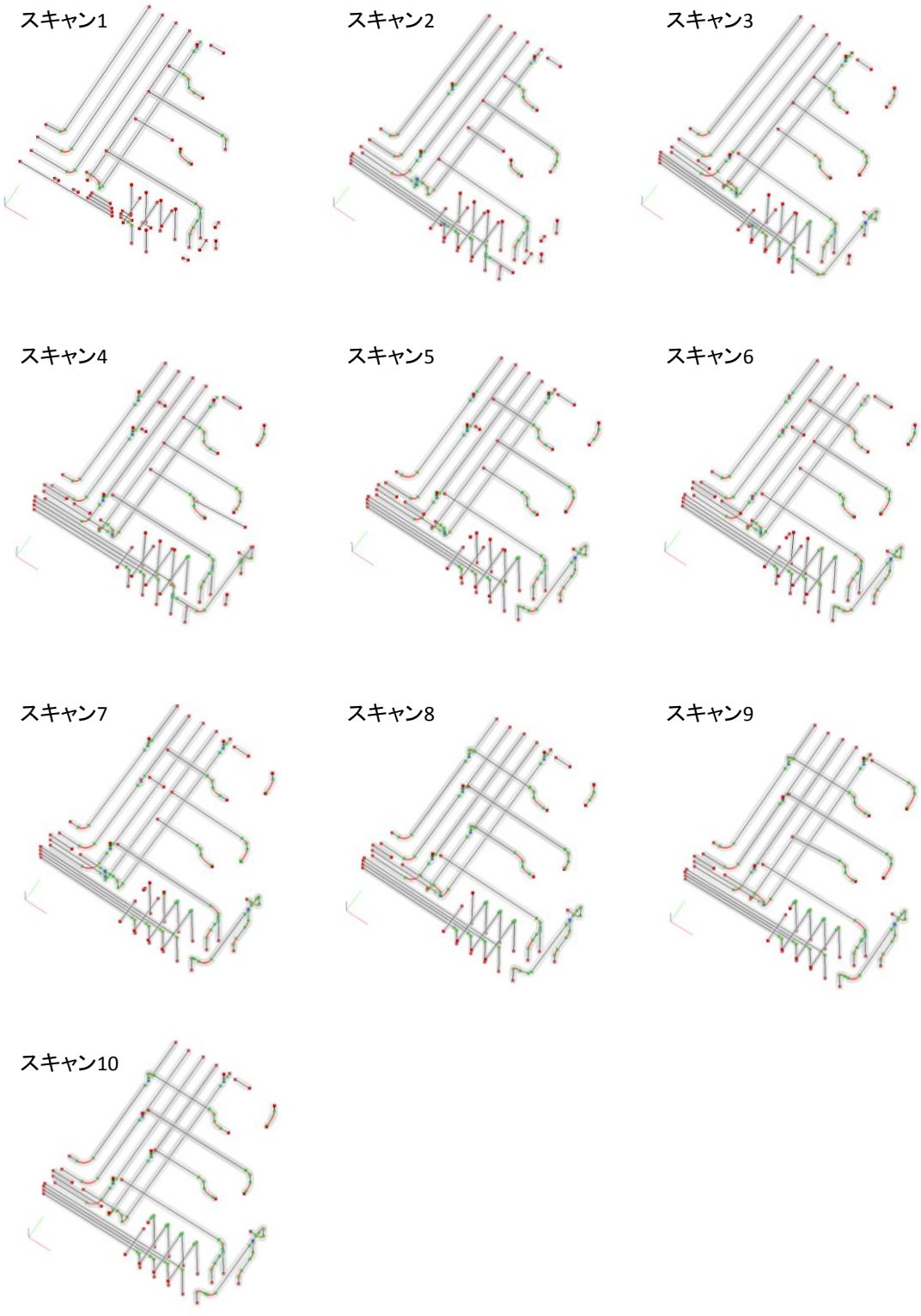


図 **4.14**　配管系統の軸線(Potthast らの手法)

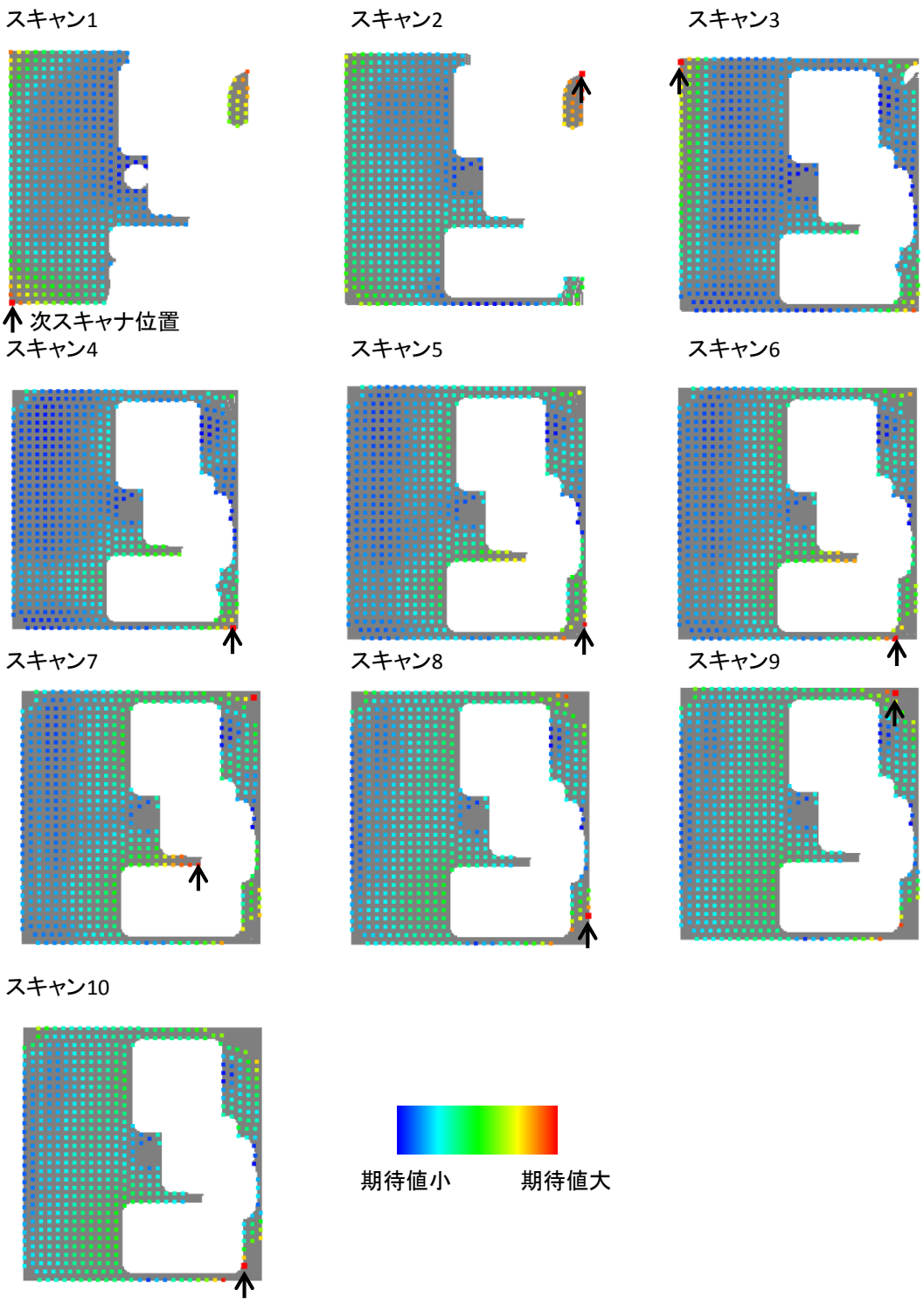


図 **4.15**　最適スキャナ配置決定時の期待値(Potthast らの手法)

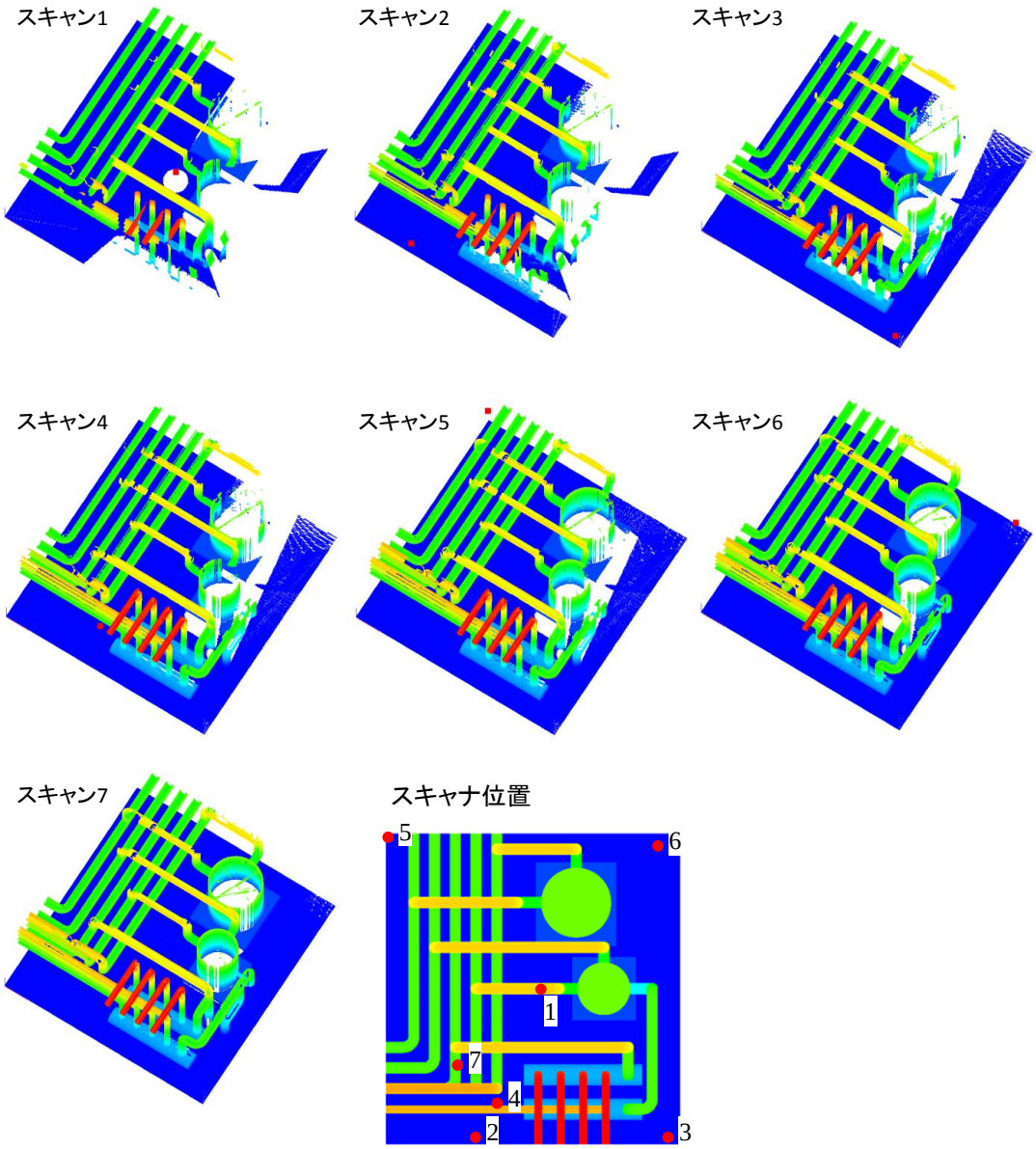


図 **4.16**　取得した擬似計測点群とスキャナ位置(本提案手法)

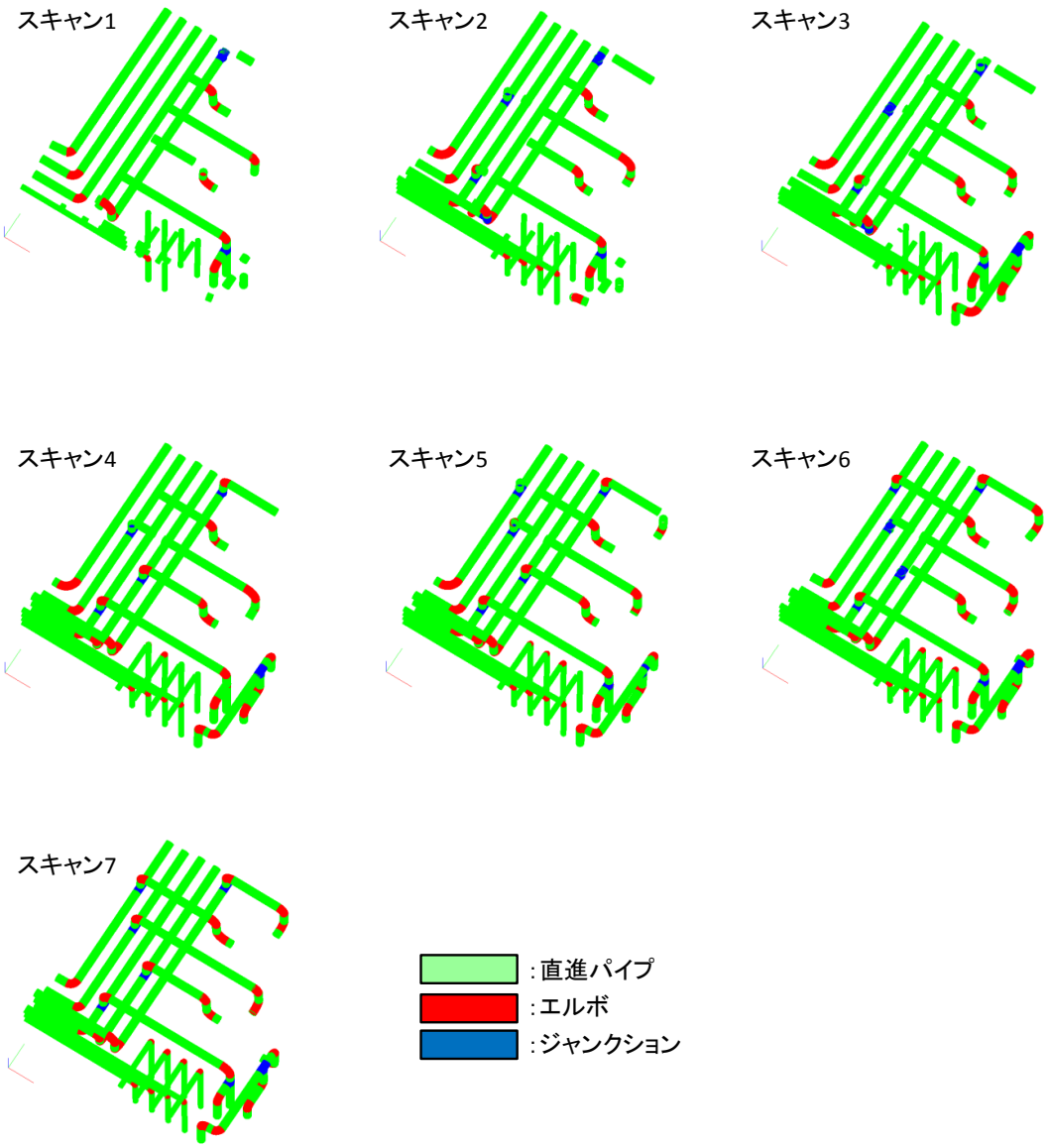


図 **4.17**　擬似計測点群から認識された配管系統(本提案手法)

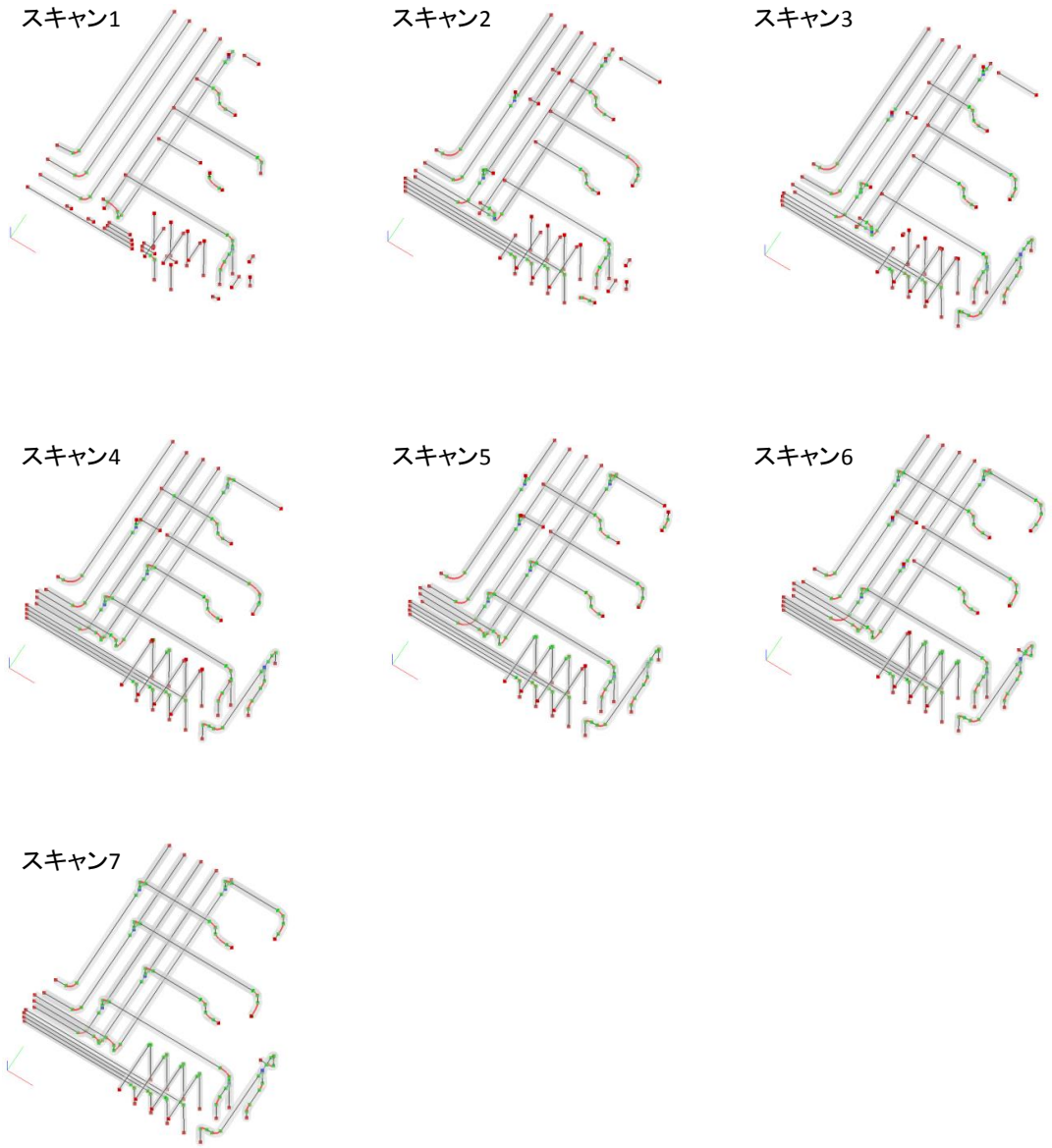


図 **4.18**　配管系統の軸線（本提案手法）

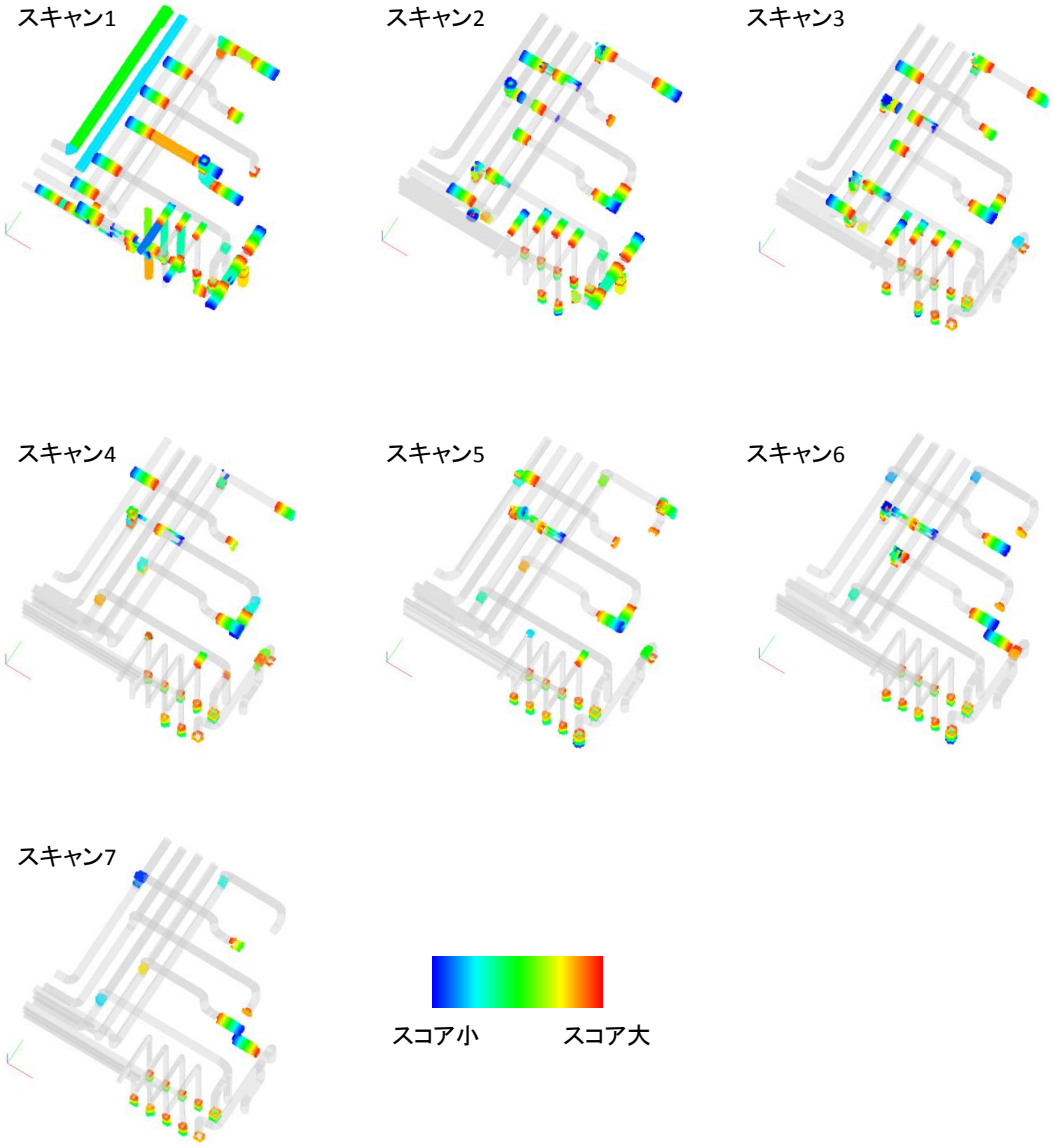


図 **4.19**　計測対象セルのスコア(本提案手法)

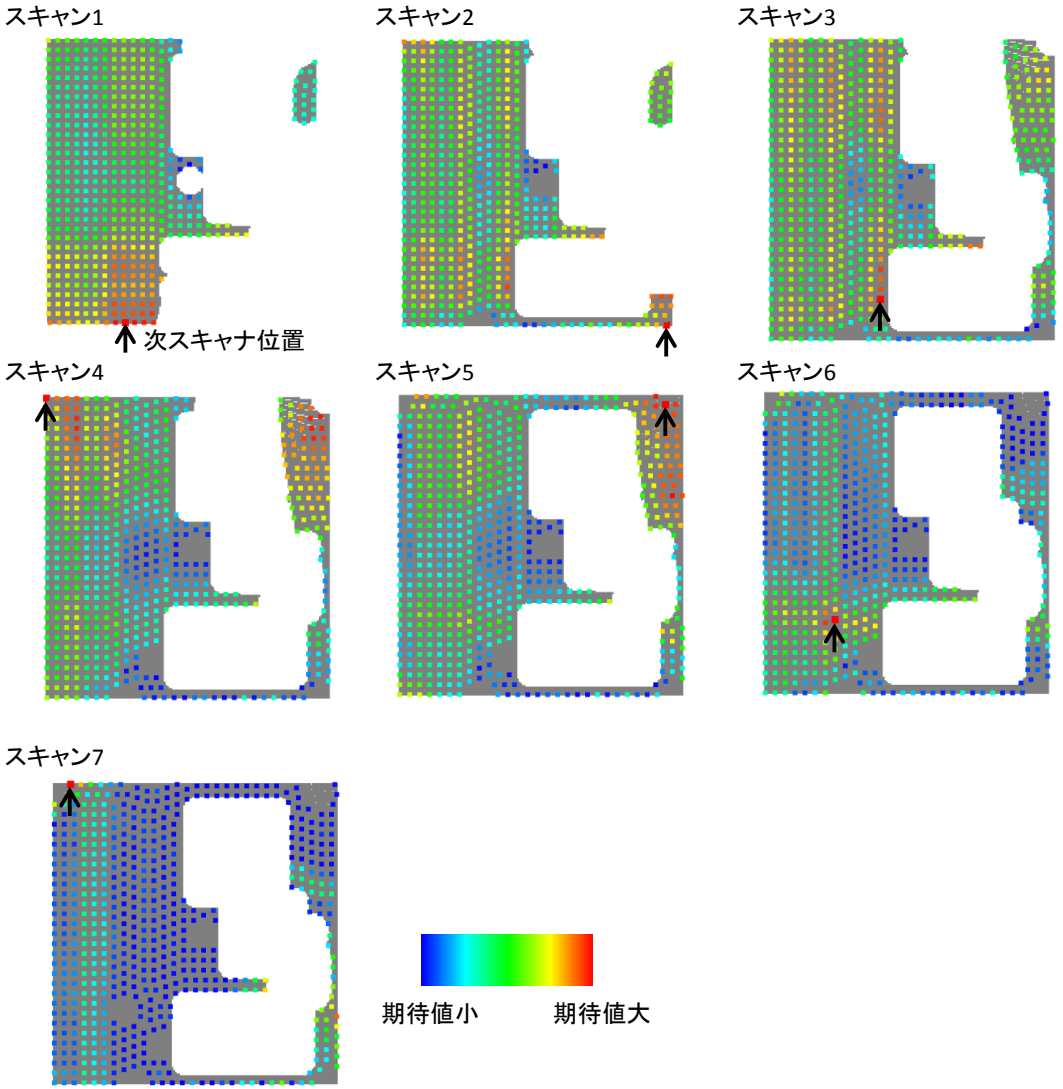


図 **4.20**　最適スキャナ配置決定時の期待値（本提案手法）

表 **4.1**　Potthast らの手法による処理時間

(a) 計測点数と各セル数

scan	Number of $V_{candidate}$	Number of P	Number of unknown cells	Number of free cells	Number of occupied cells
1	15305 (456)	1430979	1379496	1487558	42340
2	16250 (478)	1835696	1034121	1817230	58043
3	18811 (554)	2145580	589314	2247873	72207
4	18897 (550)	2356764	477538	2355877	75979
5	18884 (547)	2686844	443358	2385802	80234
6	18887 (543)	2760017	427607	2400730	81057
7	18888 (540)	2815276	418245	2409483	81666
8	18888 (536)	3010377	325790	2498746	84858
9	18889 (534)	3035539	319118	2504793	85483
10	18889 (530)	3045968	311544	2512051	85799

(b) 処理時間 [sec]

scan	擬似計測点群の生成 $_e$	スキャナ位置候補の推定	配管系統の認識	計測対象領域の推定	最適スキャナ配置の推定	合計
1	723.8	14.6	82.5	0.4	12147.3	12968.4
2	670.6	16.8	105.8	0.4	9465.6	10259.2
3	674.6	29.4	110.8	0.3	5704.3	6519.5
4	667.8	30.1	126.0	0.4	4530.9	5355.2
5	674.9	37.9	148.5	0.3	4148.8	5010.5
6	679.5	39.2	155.9	0.3	3952.4	4827.3
7	676.8	40.2	162.5	0.4	3843.3	4723.1
8	708.6	43.9	170.2	0.3	2911.2	3834.3
9	682.6	44.1	172.2	0.4	2846.9	3746.2
10	678.3	44.6	173.8	0.3	2753.2	3650.3

(c) 配管系統の認識率

scan	直進パイプ	エルボ	ジャンクション
1	40.6%	33.3%	14.3%
2	59.4%	44.4%	57.1%
3	65.6%	61.1%	57.1%
4	75.0%	61.1%	71.4%
5	78.1%	72.2%	85.7%
6	78.1%	75.0%	85.7%
7	78.1%	75.0%	85.7%
8	92.2%	83.3%	100.0%
9	95.3%	86.1%	100.0%
10	90.6%	86.1%	85.7%

表 **4.2**　本提案手法による処理時間

(a) 計測点数と各セル数

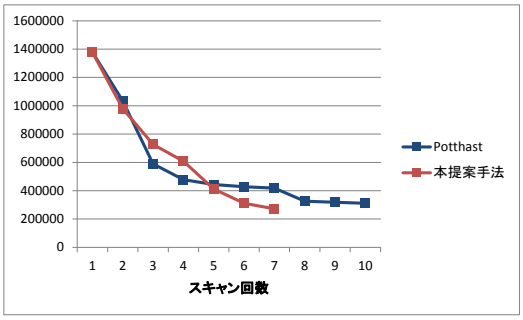
scan	Number of $V_{objective}$	Number of $V_{candidate}$	Number of scanned points	Number of unknown cells	Number of free cells	Number of occupied cells
1	19028	15305 (456)	1430979	1379496	1487558	42340
2	9715	16230 (474)	1925351	978779	1874211	56404
3	7439	18243 (533)	2273158	726750	2117337	65307
4	5137	18312 (529)	2511568	608361	2230283	70750
5	5141	18886 (541)	2780891	412689	2417510	79195
6	4777	18881 (537)	2975127	311749	2512424	85221
7	3285	18892 (534)	3185989	272070	2549141	88183

(b) 処理時間 [sec]

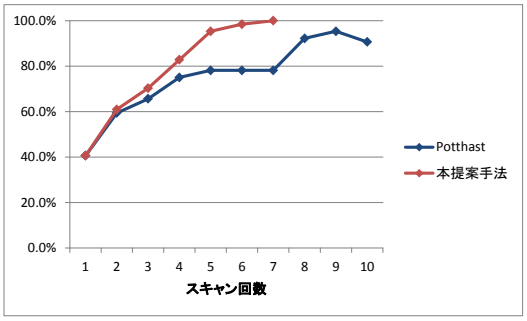
scan	擬似計測点群の生成 $_e$	スキャナ位置候補の推定	配管系統の認識	計測対象領域の推定	最適スキャナ配置の推定	合計
1	723.0	14.3	81.0	0.4	155.8	974.3
2	693.7	17.9	115.7	0.5	86.1	913.9
3	668.9	25.8	136.0	0.5	69.3	900.6
4	710.9	26.8	150.8	0.7	46.9	936.2
5	667.8	28.7	163.9	0.6	48.9	909.8
6	677.1	38.9	169.7	0.6	43.6	930.0
7	713.8	39.5	187.4	0.7	29.7	971.1

(c) 配管系統の認識率

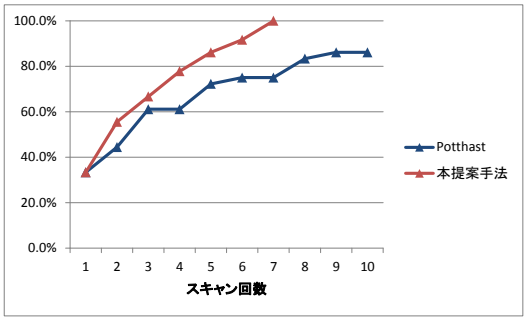
scan	直進パイプ	エルボ	ジャンクション
1	40.6%	33.3%	14.3%
2	60.9%	55.6%	42.9%
3	70.3%	66.7%	57.1%
4	82.8%	77.8%	71.4%
5	95.3%	86.1%	100.0%
6	98.4%	91.7%	100.0%
7	100.0%	100.0%	100.0%



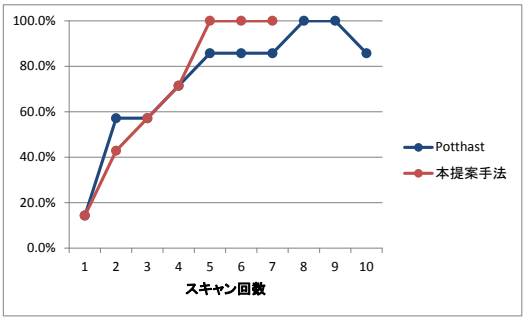
(a) unknown セル数



(b) 直進パイプ認識率



(c) エルボ認識率



(d) ジャンクション認識率

図 **4.21**　本提案手法と Potthast らの手法の比較結果

第5章　　結論と今後の課題

5.1　結論

本論文では，プラント設備全体の大規模なレーザ計測点群からの配管系統の高速・高精度な自動認識アルゴリズム，及び配管系統上のオクルージョン領域最小化のための最適スキャナ配置の自動推定アルゴリズムを提案した．また，実際のプラントのレーザ計測点群と計算シミュレーションに対して適用し，提案アルゴリズムの有効性の検証を行った．以下に各章の結論をまとめる．

(1) 第 2 章では，計測点群の局所点分布特徴量と平面フィッティング，region-growing を用いた配管系統上の点群抽出，法線テンソルの固有値解析結果を用いた直進パイプ上の点群抽出, 更に, 認識された直進パイプの軸線間の位置関係に基づくエルボ, ジャンクションの認識を全自動で行うアルゴリズムを提案した．実プラントの計測点群に対して提案アルゴリズムを適用した結果，直進パイプは約 82%の認識率を達成した．一方，エルボ，ジャンクションはそれぞれ 40%, 50%に留まった．また，約 450 万点の点群に対して 3 時間程の認識時間を要することから，認識精度と計算効率の改善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認識精度と計算効率を改善するため，直進パイプ，エルボ，ジャンクションの認識を全自動で行うアルゴリズムを提案した．この手法は，グリッドセルを用いた法線ベクトル推定，法線ベクトルに基づく region-growing を用いた配管上の点群の抽出，および配管断面の追跡と連続した円弧・直線フィッティング，軸線間の位置関係に基づく軸線補完による配管系統の軸線の推定を用いた．最後に，前章と同一の実プラント計測点群に対する認識結果から，直進パイプ，ジャンクション，エルボの認識率の最低値をそれぞれ 86%，88%，71%に改善できた．また，認識時間については，約 450 万点の点群に対して 20 分程度と大幅に改善出来た．さらに，約 1 億点の大規模化学プラント計測点群から約 9 時間程度で配管系統を自動認識可能なことを実証した．

(3) 第 4 章では，配管系統上のオクルージョン領域最小化のための最適スキャナ配置の自動推定アルゴリズムを提案した．この手法は，初期スキャナ位置での計測点群が存在する空間をボクセル分割し，計測点とスキャナの位置関係，および 3 章で述べた手法による配管系統の認識結果から，配管系統上のオクルージョン領域空間とス

キャナを設置可能な位置空間を推定する．その後，レイトレーシングを用いて，配管系統上のみのオクルージョン領域の可観測確率が最も高いボクセル位置を推定し，これを次の最適スキャナ位置として決定する手法を新たに提案した．また，プラント CAD データの擬似計測点群に対する計算機シミュレーション結果から，類似する Next-Best-View 問題の既存研究[23]と比較して，配管系統の認識にとってより有効なスキャナ配置を推定可能であることと，最適配置の発見に要する時間を大幅に短縮可能であることを示した．

以上の結論より，本論文で提案した配管認識手法が大規模環境レーザ計測点群に基づく配管系統の as-built モデルの効率的な構築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は数多くの課題が残されている．これらを以下に述べる．

(1) 配管系統の自動認識手法については，配管系統内の配管の認識において，配管以外で形状が円筒面と類似している物体を配管として誤認識してしまう．また，配管系統の軸線間の位置関係に基づく配管系統の軸線の補完において，誤認識された物体の軸線が他の配管の軸線と補完されてしまうといった問題がある．この問題点に対して，配管として認識された点群の断面形状を解析することで改善する必要がある．
(2) 配管系統上のオクルージョン領域最小化のための最適スキャナ配置の自動推定手法については，プラント CAD データに対する検証のみを行っているため，実プラントの計測点群に対する検証が必要である．また，各スキャン点群をレジストレーション可能なように，計測領域が重複することを制約条件としたスキャナ配置の決定を行う必要がある．さらに，スキャナ位置の推定結果は配管系統の認識結果に依存するため，初期スキャナ位置によっては次のスキャナ位置の推定結果が効率的ではない可能性がある．この問題点に対して，スキャン回数が少ない間は配管の有無に関わらず，未計測空間をできるだけ多く計測可能なスキャナ位置を推定することで改善する必要がある．

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 博士後期課程において行った研究をまとめたものである. 論文執筆にあたり, 多くの方々からのご指導, ご協力を頂いたことをこの場を借りて深く感謝致します.

北海道大学情報科学研究科 金井理教授には，研究室配属以来，研究に関するご指導，ご鞭撻を頂きました．進路に悩んでいた時に博士進学に関するご助言を頂いたこと，進学後の学会参加や海外留学など多くの機会を与えて頂いたことで，様々な得難い経験をすることが出来ました．ここに深く感謝の意を表します.

本論文審査にあたり，北海道大学情報科学研究科 小野里雅彦教授，金子俊一教授，山下裕教授にはご検討，ご助言，ご指導を賜り，心より御礼申し上げます.

北海道大学情報科学研究科 伊達宏昭准教授には, 折に触れて研究内容について様々なご助言，ご指摘を頂きました．細部にわたるご指導に心より感謝致します.

国立ソウル大学校 金泰完教授には，留学の際，自身の研究内容だけでなく，慣れない海外での生活の面においても多大なご助力を頂きました. ここに深く感謝申し上げます.

システム情報設計学研究室の高橋緑秘書には，出張旅費などの事務手続きで多大なサポートをして頂きました．ここに感謝の意を表します.

また, 研究室メンバの後輩の皆様には, 研究室生活において大変お世話になりました.

最後に，レーザ計測点群データを提供して頂いた(株)ライカジオシステムズ，新菱冷熱工業(株)，産機エンジニアリング(株)様に深く感謝致します.

参考文献

[1] 増田宏，画像インターフェースを用いた大規模点群からのソリッドモデリングシステム，精密工学会誌，76(771)，pp.2748-2752, (2010).

[2] 松沼千央，増田宏, 画像特徴量を用いた大規模点群からの円柱面と矩形面の検出, 日本機械学会論文集(C 編)，76(772)，pp.540-545, (2010).

[3] Rabbani T, 3d Industrial Reconstruction by Fitting CSG Models to a Combination of Images and Pointclouds, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(B3), pp.7-12, (2004).

[4] Aurelien B, Chaine R, Marc R, Thibault G, Akkouche S. Reconstruction of Consistent 3D CAD Models from Point Cloud Data Using A Priori CAD Models: Proc. of ISPRS Workshop Laser Scanning 2011, Submission-26, (2011).

[5] Johnson A, Hoffman R, Osborn J, Hebert M. A system for semi-automatic modeling of complex environments: Proc. of IEEE International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, pp.213-220, (1997).

[6] Mizoguchi T, Kuma T, Kobayashi Y, Shirai K. Manhattan-World Assumption for As-Built Modeling Industrial Plant: Key Engineering Materials, Emerging Technology in Precision Engineering XIV, pp.350-355, (2012)..

[7] Vosselman. G, Gorte. B.G.H, Sithole. G, Rabbani. T, Recognising Structure in Laser Scanner Point Clouds, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 46, pp.33-38, (2004).

[8] El-Halawany. S, Lichti. D, Detection of road poles from mobile terrestrial laser scanner point cloud, Proc. of 2011 International Workshop on Multi-Platform/MultiSensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM), pp.1-6, (2011).

[9] Belton. D, Lichti. D, Classification and Segmentation of Terrestrial Laser Scanner Point Clouds Using Local Variance Information, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(5), pp. 44-49, (2006).

[10] Rabbani. T, Heuvel. F, Vosselman. G, Segmentation of point clouds using smoothness constraint, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, pp. 248-253, (2006).

[11] Lee. J, Kim. C, Son. H, Kim. C, Skeleton-Based 3D Reconstruction of As-Built Pipelines

from Laser-Scanned Data, Proceedings of the 2012 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering, pp.245-252, (2012).

[12] G. Medioni, C. Tang, M. Lee, Tensor Voting, Theory and Applications, Proc. 12eme Congres Francophone AFRIF-AFIA de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, (2000).

[13] Mitra, N.J., Nguyen, A., Estimating surface normals in noisy point cloud data. In: Proceedings of The 19th ACM Symposium on Computational Geometry (SCG), pp. 322–328 (2003).

[14] Vieira, M., Shimada, K., 2005, Estimating surface normals in noisy point cloud data,"Computer-Aided Geometric Design, 22(8), pp.771-792, (2005).

[15] Q. Zhou, U. Neumann, Fast and Extensible Building Modeling from Airborne LiDAR Data, Proc of the 16th ACM SIGSPATIAL International Conference on Adcances in Geographic Information Systems, pp.7:1-7:8, (2008).

[16] R. A.Maronna, R. D.Martin, V. J. Yohai: Robust Statistics: Theory and Methods, U.K., Wiley, 126, (2006).

[17] W. Klecka: Discriminant analysis, SAGE, Sage university papers series, (1980).

[18] C.M.Shakarji, Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol.103(6), pp. 633-641, (1998).

[19] Rusu RB, Martin ZC, Beetz M. Learning informative Point Classes for the Acquisition of Object Model Maps, Proc. of International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. pp.643-650, (2008).

[20] Biegelbauer G, Vincze M. Efficient 3D Object Detection by Fitting Superquadrics to Range Image Data for Robot's Object Manipulation: Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1086-1091, (2007).

[21] Bauer U, Polthier K, Generating parametric models of tubes from laser scans: Computer-Aided Design. 41(10), pp.719-729, (2009).

[22] Dan H, Yasumuro Y, Ishigaki T, Nishigata T, Imura M, Practical Scan Planning for Shape Measurement of Outdoor Constructions: Proc. of International Conference on Civil and Building Engineering Inforatics 2013, pp.65-68. (2013).

[23] Potthast C, Sukhatme. G. S, A probabilistic framework for next best view estimation in a cluttered environment, Journal of Visual Communication and Image Representation, 25(1), pp.148-164. (2014).

[24] Dornhege C, Kleiner A, A frontier-void-based approach for autonomous exploration in 3D, Advanced Robotics, 27(6), pp.459-468. (2013).

[25] 伊達宏昭，金井理，岸浪建史，西垣一朗，土肥高幸，細分化と簡略化に基づく三

角形メッシュの品質改善，精密工学会誌，71(2), pp.223-227, (2005).

[26] Zhouwang Y, Moving parabolic approximation of point clouds, Computer-Aided Design vol.39(12), pp.1091-1112, (2007).

付録

A　法線ベクトル推定精度のシミュレーションによる評価

ここでは，計測点群からの法線ベクトル推定に関する手法の詳細と各手法の法線ベクトル推定精度の比較データを記載する．本論文では以下の法線ベクトル推定手法について比較した．

1. 主成分分析(Principle Component Analysis)

各計測点$\mathbf{p}_j$に対して，距離r以内にある近傍点群$\{\mathbf{p}_j\}$を探索し，式(A.1)の分散共分散行列を求める．

$$M_i = \frac{1}{\left|\{\mathbf{p}_j\}\right|}\sum_{j=1}^{\left|\{\mathbf{p}_j\}\right|}(\mathbf{p}_j - \mathbf{b}_i)^T(\mathbf{p}_j - \mathbf{b}_i) \qquad \text{(A.1)}$$

ここで，$\mathbf{b}_i$は$\{\mathbf{p}_j\}$の平均位置ベクトルである．次にM_iに対して固有値解析を行い，固有値$\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0)$と対応する単位固有ベクトル$\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2,\mathbf{e}_3$を得る．このとき，$\{\mathbf{p}_j\}$がほぼ一つの平面上に分布する場合は，固有ベクトル$\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2$は平面上にある主方向ベクトルを示し，固有ベクトル$\mathbf{e}_3$は平面の法線ベクトルの近似値をとるため，$\mathbf{e}_3$を$\mathbf{p}_j$の法線ベクトルとする．

2. 2次陽曲面フィッティング(Polynomial Surface Fitting)

各計測点$\mathbf{p}_j$に対して主成分分析を用いて主方向ベクトル$\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2,\mathbf{e}_3$を求めた後，$\mathbf{p}_i$を原点，$\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2,\mathbf{e}_3$を$u,v,w$軸とする局所座標系$u-v-w$を定義する．次に，$\mathbf{p}_j$から距離$r$以内にある近傍点群$\{\mathbf{p}_j\}$に対して，局所座標系における座標値$(u_k,v_k,w_k)(k \in \{\mathbf{p}_j\})$を求め，この点群にフィッティングする2次陽曲面$S: w = h(u,v)$を式(A.2)より求める．

$$w = h(u,v) = a_0u^2 + a_1v^2 + a_2uv + a_3u + a_4v + a_5 \qquad \text{(A.2)}$$

最終的に，点$\mathbf{p}_j$を曲面S上に投影し，その投影点における曲面の法線ベクトルを点$\mathbf{p}_j$の近似的な法線ベクトルとする．

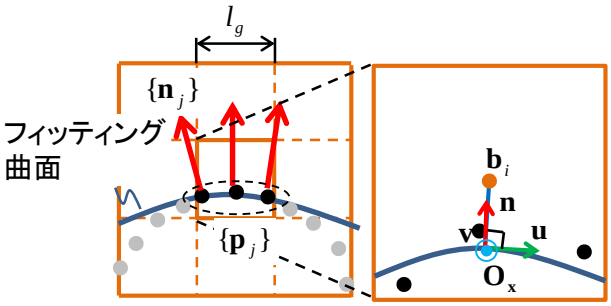


図 A.1　グリッド内の点群に対する移動放物面近似による法線ベクトル推定

3. グリッド内点群に対する2次陽曲面フィッティング(Polynomial Surface Fitting(Grid))

計測点群全体にxyz軸に平行な幅l_gをもつグリッドセルを設置し，各セルiについて，セルiの1近傍内のグリッド内部の点群$\{\mathbf{p}_j\}$に対して上記の2次陽曲面フィッティングを行う．

点群$\{\mathbf{p}_j\}$に対して主成分分析を行い，得られた主方向ベクトル$\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2,\mathbf{e}_3$から，$\{\mathbf{p}_j\}$の重心点を原点，$\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2,\mathbf{e}_3$を$u,v,w$軸とする局所座標系$u-v-w$を定義する．次に，この座標系における$\{\mathbf{p}_j\}$の座標値を求め，この点群にフィッティングする 2 次陽曲面Sを式A.2から求める．

その後，セルiに含まれる点群のみを$\mathbf{e}_3$方向に移動して曲面S上に投影した点$\{\mathbf{p}'_j\}$を考える．これらの投影点における曲面の法線ベクトルを求め，対応する点群の法線ベクトルとする．

4. グリッド内の点群に対する移動放物面近似(Moving Parabolic Approximation)[26]

計測点群全体にxyz軸に平行な幅l_gをもつグリッドセルを設置し，各セルiについて，セルiの1近傍内のグリッド内部の点群$\{\mathbf{p}_j\}$に対して移動放物面近似による曲面フィッティングを行う．図A.1に示すように，グリッドの重心点を$\mathbf{X}$，点群に局所フィットする2次曲面S上にある$\mathbf{X}$の垂線の足を$\mathbf{o}_x$，$\mathbf{o}_x$における曲面Sの法線ベクトルを$\mathbf{n}$，$\mathbf{n}$に互いに直交するベクトルを$\mathbf{u}(\mathbf{n}),\mathbf{v}(\mathbf{n})$とし，局所座標系$\mathbf{O}_\mathbf{X}-\mathbf{u}-\mathbf{v}-\mathbf{n}$を考える.ここで$\mathbf{q}_j=\mathbf{P}_j-\mathbf{X}$，$\mathbf{O}_\mathbf{X}=\mathbf{X}+\zeta\mathbf{n}$とおくと，点群にフィットする2次曲面式$1/2(au^2+2buv+cv^2)=0$は，式(A.3)の制約付最適化問題の解として与えられる．

$$\min f(\mathbf{n},\zeta,a,b,c)=\sum_{j=1}^{n}\Bigg[\mathbf{q}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{n}-\zeta-\frac{1}{2}(a(\mathbf{q}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{u}(\mathbf{n}))^2$$

$$+2b(\mathbf{q}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{u}(\mathbf{n})\mathbf{q}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{v}(\mathbf{n}))+c(\mathbf{q}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{v}(\mathbf{n}))^2)\Bigg]^2 e^{-\frac{\|\mathbf{q}_j-\zeta\mathbf{n}\|^2}{\rho^2}}$$

$$\text{s.t.} \qquad +2b(\mathbf{q}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{u}(\mathbf{n})\mathbf{q}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{v}(\mathbf{n}))+c(\mathbf{q}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{v}(\mathbf{n}))^2)\Big]^2 e^{-\frac{\|\mathbf{q}_j-\zeta\mathbf{n}\|^2}{\rho^2}} \qquad \text{(A.3)}$$

この最適化問題をNewton-Raphson法により解いた後，グリッド内の点群を得られた曲面に投影し，その投影点における曲面の法線ベクトルを点の法線ベクトルとする．

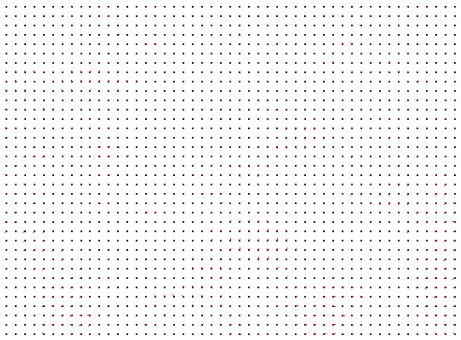
上記の法線ベクトルの推定手法の精度を検証するため，幅150.0×150.0[mm]の平面上に500×500の点を規則的に生成した平面モデルと，半径50.0[mm]，高さ150.0[mm]の円筒面上に円周回りに720点，高さ方向に500点を規則的に生成した円筒面モデルを作成し，各点に対して面の法線方向にσ = 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50[mm]のガルシアンノイズを追加したモデルに対して, それぞれ上記の手法を適用した. また, 近傍探索半径r = 3.50[mm], グリッド幅l_g = 2.50[mm]と設定した.

法線の誤差評価方法として，法線の角度誤差εを式(A.4)より評価する．

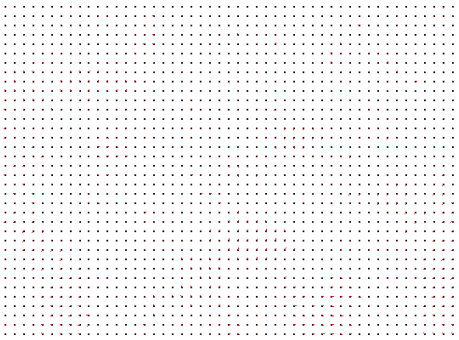
$$\varepsilon = \arccos(|\mathbf{n}\cdot\mathbf{n}'|) \qquad \text{(A.4)}$$

ここでεはノイズを加える前の点における面の法線ベクトル，$\mathbf{n}$はノイズを加える前の点における面の法線ベクトル，$\mathbf{n}'$は計算して得られた法線ベクトルである．

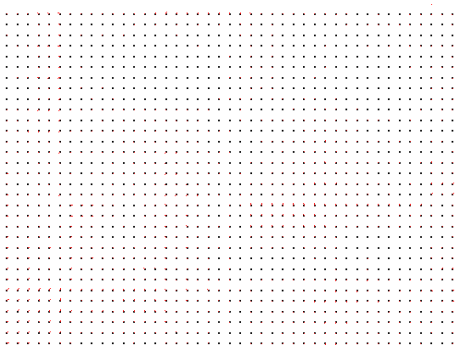
平面モデルに対して求めた法線ベクトルを平面の法線ベクトル方向から見たものを図A.2，円筒面モデルに対して求めた法線ベクトルを円筒面の軸方向から見たものを図A.3に示す．また，平面モデルの法線ベクトルの角度誤差ヒストグラムを図A.4，円筒面モデルの法線ベクトルの角度誤差ヒストグラムを図A.5に示す. それぞれののモデルの法線ベクトルの平均誤差を図A.6に示す．また，処理時間の比較結果を表A.1に示す．図A.2と図A.4から，Moving Parabolic Approximationでは式(A.3)の最適化問題の解が収束せず，真の法線ベクトルと著しく異なる法線が推定される場合が確認できる．また図A.4, A.5,A.6から，グリッド内点群を用いた2次陽曲面フィッティングが，他手法と比較して，最も高精度かつ高速に法線ベクトルを推定可能であることが確認できる．



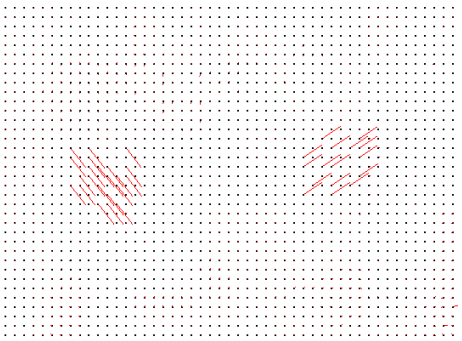
(a) Principle Component Analysis



(b) Polynomial Surface Fitting

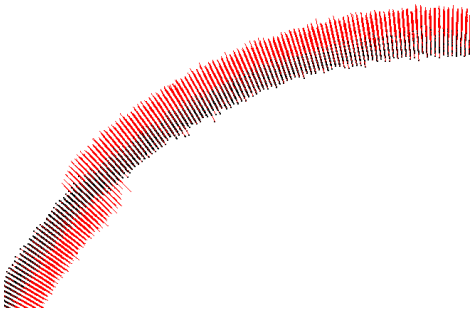


(c) Principle Component Analysis(grid)

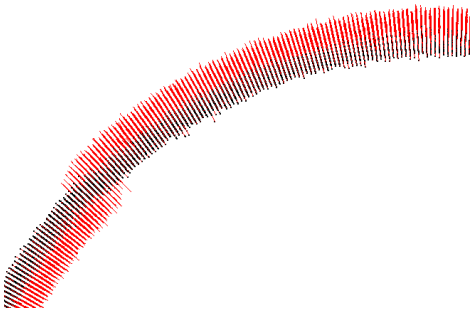


(d) Moving Parabolic Apporoximation

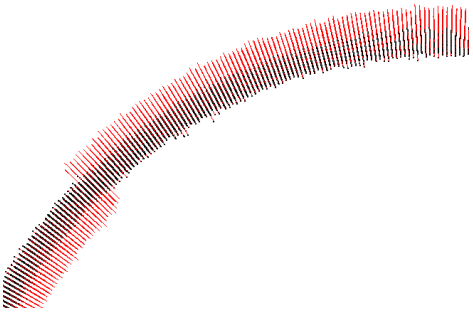
図 A.2　平面モデル($\sigma = 0.50$)の法線ベクトル推定結果



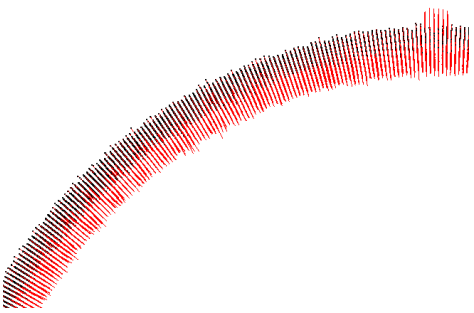
(a) Principle Component Analysis



(b) Polynomial Surface Fitting

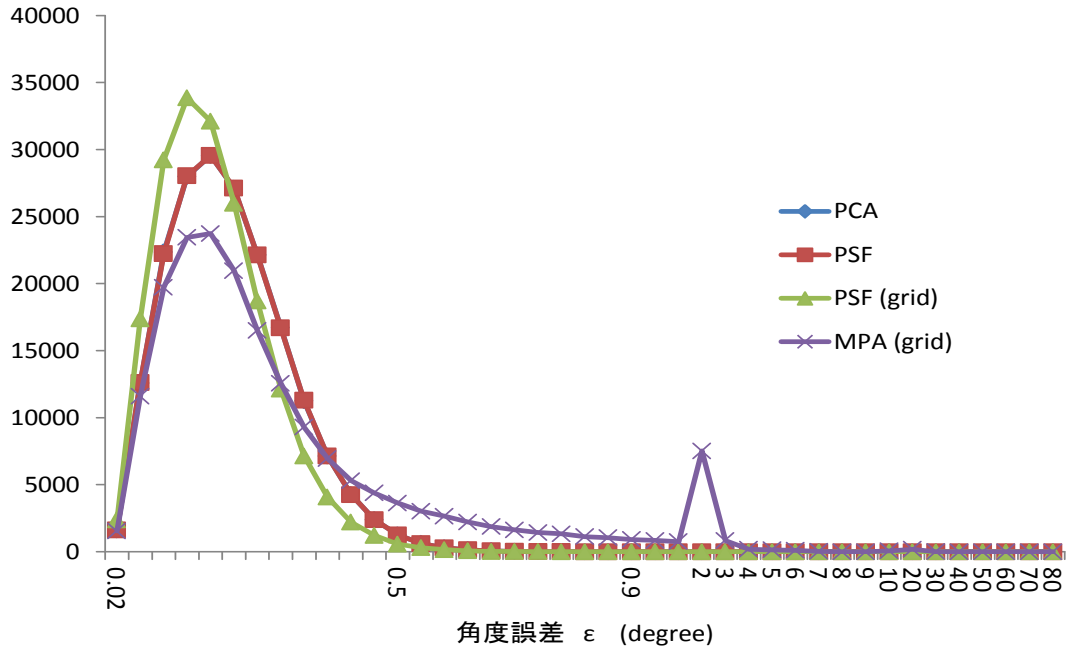


(c) Principle Component Analysis(grid)

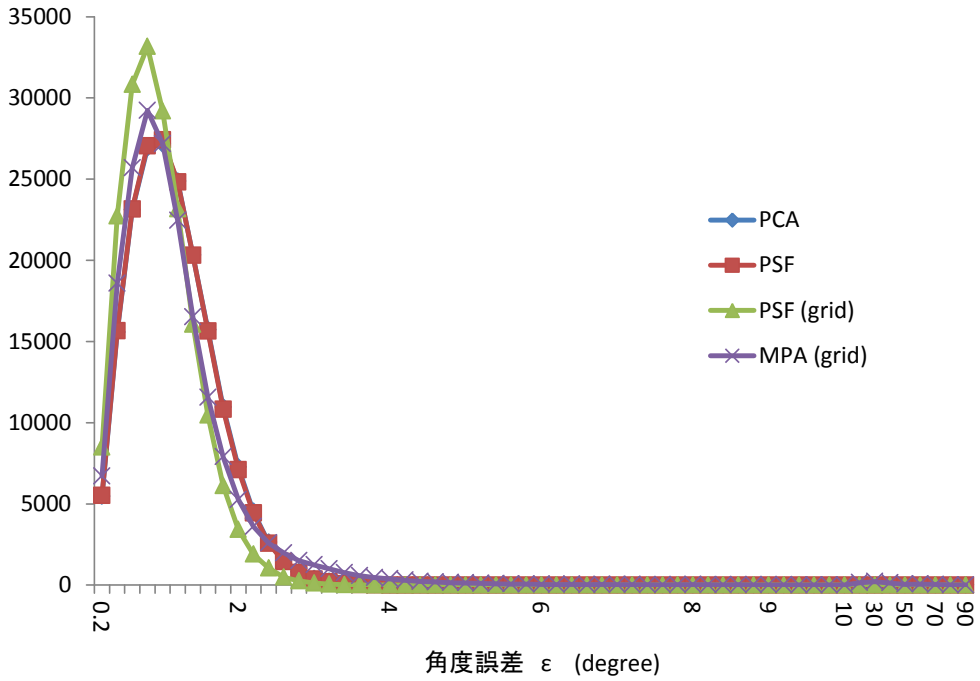


(d) Moving Parabolic Apporoximation

図 A.3　円筒面モデル($\sigma = 0.50$)の法線ベクトル推定結果

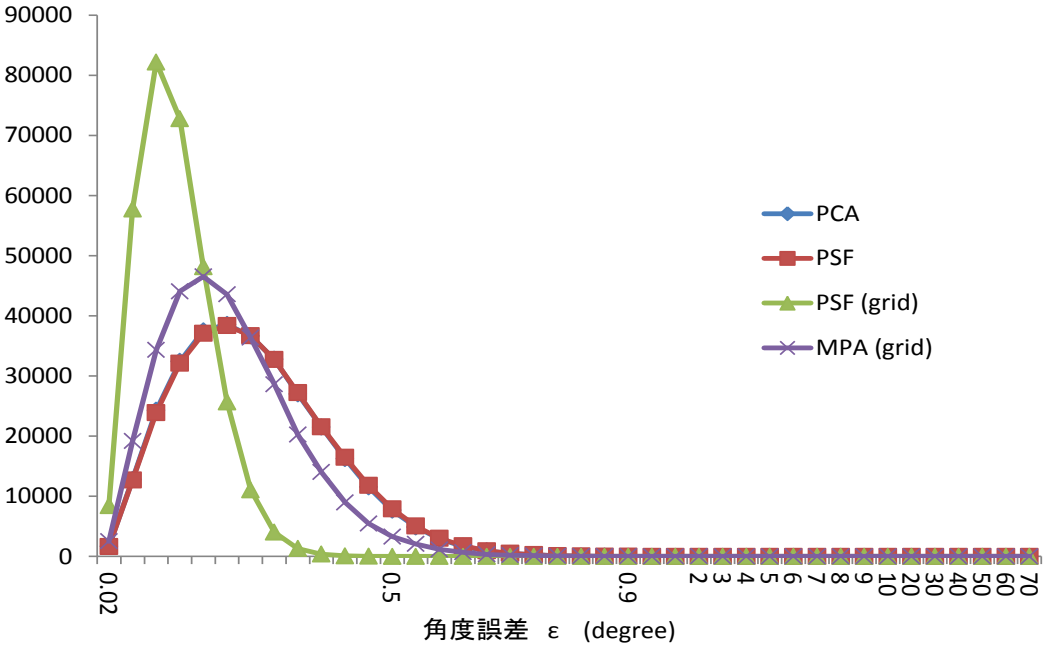


(a) 平面モデル($\sigma = 0.10$)

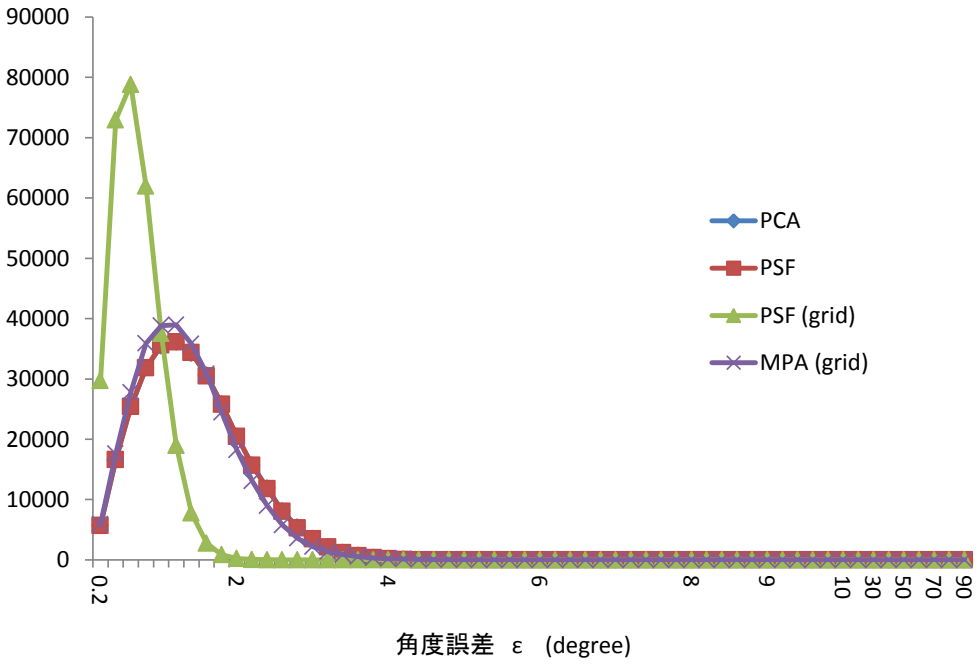


(b) 平面モデル($\sigma = 0.50$)

図 A.4 平面モデルに対する法線誤差ヒストグラム

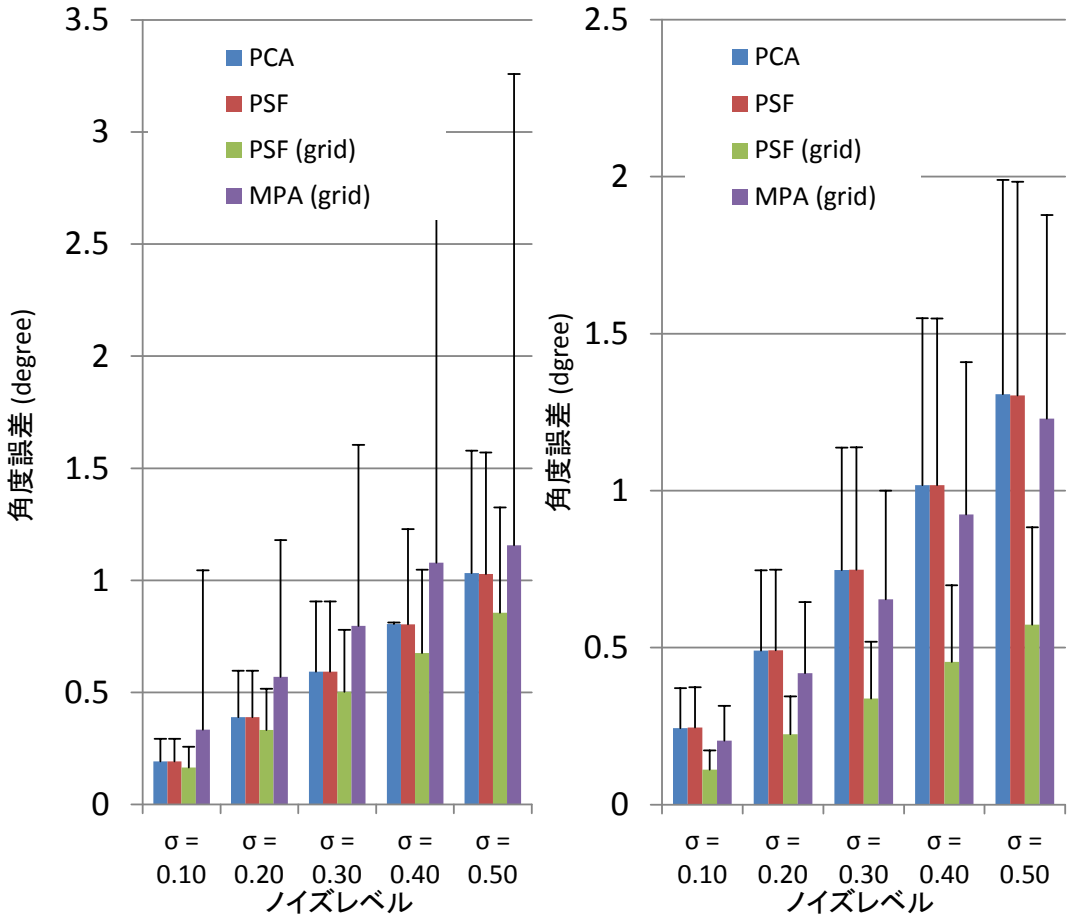


(a) 円筒面モデル($\sigma = 0.10$)



(b) 円筒面モデル($\sigma = 0.50$)

図 A.5 円筒面モデルに対する法線誤差ヒストグラム



(a) 平面モデル　　(b) 円筒面モデル

図 A.6 平均法線誤差

表 A.1 法線ベクトルの推定処理時間の比較結果（単位は全て[sec]）

(a) 平面モデル

ノイズレベル	PCA	PSF	PSF (grid)	MPA (grid)
σ = 0.10	19.1	69.5	2.5	27.8
σ = 0.20	18.7	71.9	2.6	23.1
σ = 0.30	19.4	68.9	2.7	21.0
σ = 0.40	18.6	67.5	4.9	42.0
σ = 0.50	18.6	67.8	4.9	36.5

(b) 円筒面モデル

ノイズレベル	PCA	PSF	PSF (grid)	MPA (grid)
σ = 0.10	22.0	75.3	5.4	9.7
σ = 0.20	21.0	71.2	5.5	9.8
σ = 0.30	21.1	74.4	6.4	10.9
σ = 0.40	21.4	73.7	7.1	12.1
σ = 0.50	23.2	74.2	7.9	13.3

B 研究業績目録

1. 論文(学位論文関係)

I. 査読付き学会等

(1) 川島千明, 金井理, 伊達宏昭, 「大規模環境レーザ計測点群からの配管系統の自動認識」, 精密工学会誌, 78巻, 8号, pp.722-729, 2012年.

(2) Kazuaki Kawashima, Satoshi Kanai, and Hiroaki Date: “As-built modeling of piping system from terrestrial laser scanned point clouds using normal-based region-growing”, Journal of Computational Design and Engineering, Vol.1, No.1, pp.13-26, (2014).

II. 査読付国際会議プロシーディング

(1) Kawashima Kazuaki, Kanai Satoshi, Date Hiroaki: “Automatic Recognition of A Piping System from Large‐scale Terrestrial Laser Scan Data”, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXVIII-5/W12, pp.283-288, (2011).

(2) Kazuaki Kawashima, Satoshi Kanai, Hiroaki Date: “Automatic Recognition of A Piping System from Laser Scanned Points by Eigenvalue Analysis”, Key Engineering Materials (Proc. of 2012 Int. Conf. on Precision Engineering, Awaji, Japan, Nov.8-10th), vol.523-524, pp.932-938, (2012).

(3) Kazuaki Kawashima, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, Tae-wan Kim: “Automatic Recognition and Modeling of Piping System from Large-scale Terrestrial Laser Scanned Point Cloud”, Proc. of 2012 Asian Conf. on Design and Digital Engineering, Niseko, Japan, Dec.6-8th, Paper No. 100022, (2012).

(4) Kazuaki Kawashima, Satoshi Kanai, Hiroaki Date: “As-built modeling of piping system from terrestrial laser scanned point clouds using normal-based region-growing”, Proc. of 2013 Asian Conf. on Design and Digital Engineering, Seoul, Korea, Aug.12-14th, pp.552-562, (2013).

(5) Kazuaki Kawashima, Satoshi Kanai and Hiroaki Date: “Automatic recognition of piping system from laser scanned point clouds using normal-based region growing”, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., II-5/W2, pp.121-126, (2013).

2. 論文(その他)

なし

3. 講演(学位論文関係)

(1) 川島千明, 金井理, 伊達宏昭, 「大規模レーザ計測点群からの線状構造物の自動認識抽出の性能評価(第 1 報)-計測点群内からの配管部の自動抽出と接続関係の認識-」, 2011 年度精密工学会秋季大会講演会, 金沢, 2011 年 9 月.

(2) 川島千明, 金井理, 伊達宏昭, 「大規模レーザ計測点群からの配管系統の自動認識 (第 2 報)-パイプ及び接続要素認識の高精度化-」, 2012 年度精密工学会春季大会講演会, 東京, 2012 年 3 月

(3) 川島千明, 金井理, 伊達宏昭, 金泰完, 「大規模環境レーザ計測点群からのパイプ及び接続要素の自動認識」, 2012年度精密工学会北海道支部学術講演会, 室蘭, 2012年9月.

(4) 川島千明, 金井理, 伊達宏昭, 金泰完, 「大規模レーザ計測点群からの配管系統の自動認識(第3報)-パイプ及び接続要素の定義パラメータ抽出-」, 2012年度精密工学会秋季大会講演会, 小倉, 2012年9月.

(5) 川島千明, 金井理, 伊達宏昭, 「大規模レーザ計測点群からの配管系統の自動認識(第4報)-断面点群形状解析による接続要素認識の高精度化-」, 2013年度精密工学会春季大会講演会, 東京, 2013年3月.

(6) 川島千明, 金井理, 伊達宏昭, 「法線ベクトルに基づくRegion-growingによる大規模環境レーザ計測点群からの配管系統の自動認識」, 2013年度精密工学会北海道支部学術講演会, 北見, 2013年8月.

(7) 川島千明, 金井理, 伊達宏昭, 「大規模レーザ計測点群からの配管系統の自動認識(第5報)-法線ベクトルに基づくRegion-growing による認識の高精度化-」, 2013年度精密工学会秋季大会講演会, 吹田, 2013年9月

4. 特許

なし

5. 受賞歴

(1) 公益社団法人 精密工学会 2012 年度精密工学会論文賞
川島千明, 金井理, 伊達宏昭,「大規模環境レーザ計測点群からの配管系統の自動認識」, 精密工学会誌, Vol.78, No.8, (2012), pp.722-729.