

## 配管システムのレーザ計測とモデル化のための最適スキャナ位置推定

北海道大学 ○山西伸哉, 金井理, 伊達宏昭

### 要旨

近年, プラント設備の更新・変更頻度が高まっていることから, レーザ計測点群を用いた配管システムの as-built3D モデル化への期待が大きくなっている. 地上型レーザスキャナでの計測時には, 物体によるオクルージョン領域が発生するため, 配管システム全体を計測するには複数箇所からの計測が必要であるが, 現状では, 計測者が経験則によってスキャナ位置を決定しており, それらが配管システムを効率的に計測できる位置であるとは限らない. そのため本研究では, 配管システムを効率的にモデル化できる最適スキャナ位置を自動推定する手法を開発した.

### 1. はじめに

近年, プラント設備の更新頻度が高まっていることから, レーザ計測点群を用いた as-built3D モデル構築, 特にプラント設備の大部分を構成する配管システムに対する 3D モデル化の需要が高まっている. 図 1 のように, 地上型レーザスキャナを用いた計測時には, 物体に遮られて計測されない箇所であるオクルージョン領域が発生するため, 複数箇所から計測を行う必要があるが, 現状では, 計測者が経験則によってそのスキャナの設置位置を決定しており, それらが配管システムを効率的に計測できる位置であるという保証はない.

このような, 未知の対象を効率的に計測できるような計測位置を推定する問題は Next-Best-View(NBV)問題として知られており, ロボティクス等で研究されている[1-3]. しかし, 配管システムに対する計測に適用するには, 物体形状に関する事前知識が必要であること, 配管システムが存在しない部分の計測を優先してしまう可能性が高いこと, スキャナ位置をどこにでも設けることを前提としており, 条件が緩いこと, といった問題がある.

そこで本研究では, 配管システムを効率的にモデル化できる最適スキャナ位置を自動推定する手法の開発を目的とする. 本報では, プラント CAD データの擬似計測点群を用いた計算機シミュレーションにより, 既存 NBV 手法と比較することによって提案手法の有効性を検証した.

### 2. 最適スキャナ位置の推定

提案手法の概要を図 2 に示す. 最適スキャナ位置の推定は以下の手順で行われる.

#### 2.1 ボクセルを用いた空間の分類

##### 2.1.1 ボクセル空間の属性

計測環境全体含む  $x, y, z$  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. 各セルは, 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* のいずれかの属性を持つものとし, ボクセル生成時に全てのセルを *unknown* で初期化する.

##### 2.1.2 計測点群に基づくボクセル空間の分類

スキャナ位置  $P_{scan}$  を始点とし, 計測環境全体を包含する立方体の境界面にあたる全セルを終点とする各光線について, これが貫通するセルを  $P_{scan}$  側から DDA を用いて探索し, 計測点が存在しない場合, そのセルの状態を *free* に変更し, 計測点が存在する場合は *occupied* に変更する.

#### 2.2 スキャナ位置候補の推定

##### 2.2.1 床面上の点群の抽出

鉛直上向きに近い法線を持つ計測点を含むセルを床面セルとして抽出し, それらを Euclidian クラスタリングによりクラスタ化し, クラスタ番号を付与する.

##### 2.2.2 スキャナ設置可能な領域の推定

図 3 のように, 抽出された床面セルの上方にスキャナ設置空間として設定した円柱空間に含まれるセル集合  $V_{scan}$  を考え, 抽

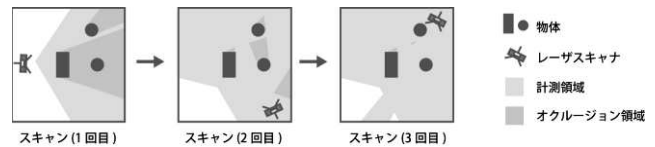


図 1 スキャン毎のオクルージョン領域の変化

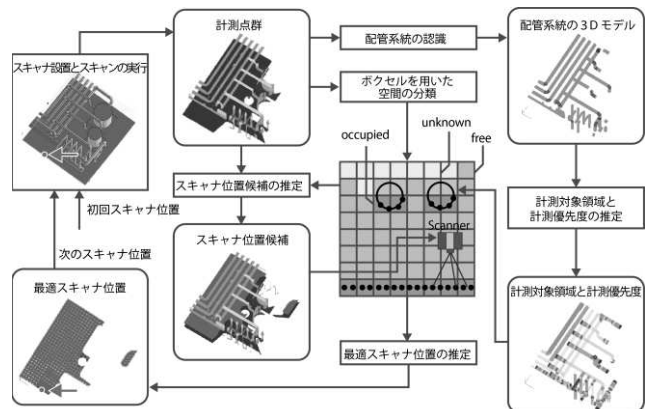


図 2 提案手法の概要

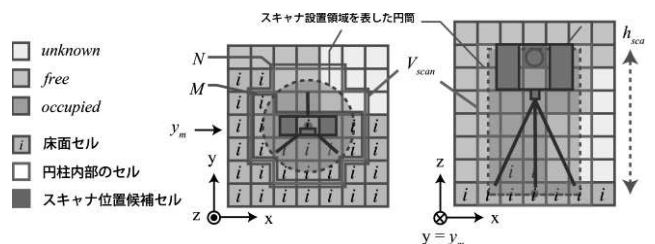


図 3 スキャナ位置候補の推定

出された床面セルの内, 以下の条件(1),(2)を同時に満たすセルをスキャナ設置可能な床面セルとして抽出する. (1)スキャナを設置するのに十分な面積を持つ床面がある. すなわち,  $V_{scan}$  を  $z$  方向に投影したとき, 投影後のセルの全面積  $N$  と投影後の床面セルの全面積  $M$  が式(1)を満たすこと.

$$M/N > \tau_{floor} \quad (1)$$

ここで  $\tau_{floor}$  は閾値であり, 本研究では  $\tau_{floor}=0.5$  とした. (2)空間内に配管等の障害物が存在しない. すなわち,  $V_{scan}$  が対象の床面セルと同一クラスターの床面セルを除いて, *occupied* セルを含まないこと. このようにスキャナ設置可能な床面セルを抽出した後, これらのセルから高さ  $h_{scan}$  となる *free* セル集合を, スキャナ位置候補セル集合  $V_{cand}$  として決定する.

#### 2.3 配管システムの認識

配管システムの自動認識手法[4]を用いて, 計測点群から直進パイ

ブ、エルボ、ジャンクション等の配管システムの3Dモデルを認識する。

## 2.4 計測対象領域と計測優先度の推定

得られた配管システムの3次元モデルを基に、これに隣接し配管システムが存在する可能性の高い領域を計測対象セル集合  $V_{obj}$  として抽出し、それらに次の計測の優先度を示すスコアを付与する。

図4のように、オクルージョンの影響により、計測された配管システムには、配管の断面の一部が計測済みである箇所(図4左)と、配管の断面全体が未計測である箇所(図4右)がある。

配管の断面の一部が計測済みである場合は、認識された円筒面に交差するボクセルを計測対象セルとし、点群の被覆角度  $\eta$  が小さい場合には、安定したフィッティングのために、式(2)により、残りの円筒部分の計測が必要であるということを示すスコア  $S_\alpha$  を付与する。

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

ここで、 $\tau_{\theta, \min}$  は円筒面フィッティングに必要な最低限の被覆角度、 $\tau_{\theta, \max}$  は安定した円筒面フィッティングが可能な最低限の被覆角度である。

また、配管の断面全体が未計測である場合は、既に認識された配管の軸線を延長した円筒面を考え、式(3)により、配管端面からの距離  $l$  が小さいほど、配管が存在する可能性が高いため計測が必要であることを示すスコア  $S_\beta$  を付与する。

$$S_\beta = \begin{cases} (l_{\max} - l) / l_{\max} & (0 \leq l < l_{\max}) \\ 0 & (l_{\max} \leq l) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $l_{\max}$  は認識された配管の軸線の最大延長距離である。

そして、計測対象セルの各々について、最終的な計測対象セルのスコアを  $S = \max(S_\alpha, S_\beta)$  として決定する。

## 2.5. 最適スキャナ位置の推定

スキャナ位置候補の各セル  $v_c \in V_{cand}$  について、その重心点から計測対象の各セル  $v_o \in V_{obj}$  の重心点を結ぶ線分  $r$  を考え、 $r$  と交差するセル集合  $V_r$  から、文献[1]の手法と同様に、 $v_c$  からの  $v_o$  の可能観測確率  $f(v_o | r)$  を式(4)より求める。

$$f(v_o | r) = \prod_{v_r \in V_r} p(v_r) \quad (4)$$

ここで、 $p(v_r)$  は、セル  $v_r$  をスキャナの光線が通過できる推定確率であり、式(5)により与えられる。

$$p(v_r) = \begin{cases} 1.0 & (\text{セル } v_r \text{ が free}) \\ 0.0 & (\text{セル } v_r \text{ が occupied}) \\ 1 - q & (\text{セル } v_r \text{ が unknown}) \end{cases} \quad (5)$$

$q$  は計測環境内に存在する *occupied* セルの割合に依存する変数であり、本研究では  $q=0.01$  に設定した。最後に、計測対象セル  $v_o$  の可観測確率と計測優先度スコア  $S$  を用いて、 $v_c$  における  $V_{obj}$  全体に対する計測優先度スコアの期待値  $E[v_c]$  を式(6)により求める。

$$E[v_c] = \sum_{v_o \in V_{obj}} f(v_o | r) \cdot S(v_o) \quad (6)$$

以上の処理を  $V_{cand}$  全体に対して行い、最大の期待値を持つセルの重心点を次の最適スキャナ位置として決定する。

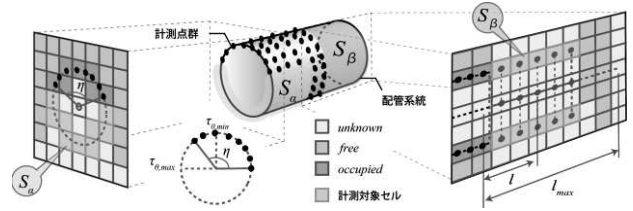


図4 計測対象領域と計測優先度の推定

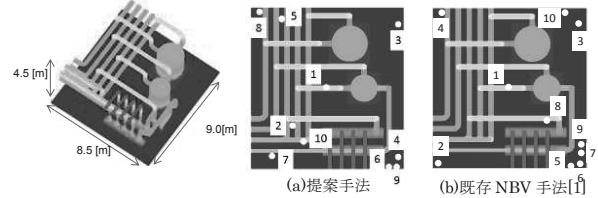


図5 モデル点群 図6 最適スキャナ位置推定結果

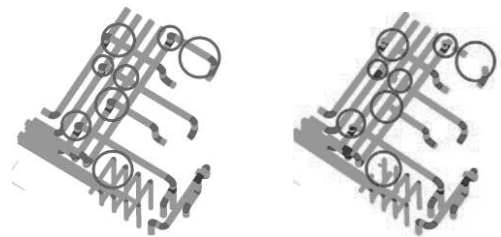
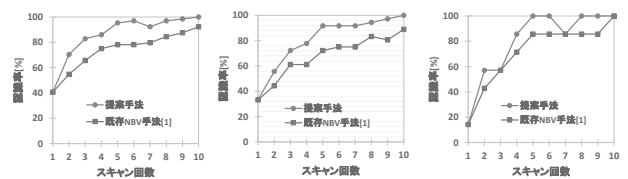


図7 配管システム認識結果(10 スキャン後)

(左: 提案手法, 右: 既存 NBV の手法[1])



(a)直進パイプ (b)エルボ (c)ジャンクション

図8 各スキャンにおける配管要素の認識率

## 3. シミュレーション結果

図5に示すプラントのCADデータから生成したモデル点群(点数: 4,906,157)を入力として、提案手法と既存 NBV 手法[1]を実行し、結果の比較を行った。ただし、既存 NBV 手法ではボクセル空間の分類に PCL[5]の光線追跡法を用いた。各々の手法により推定されたスキャナ位置と順序を図6、その位置に従って計測された点群から認識された配管システムを図7に示す。また、各スキャンにおける配管要素の認識率を図8に示す。図8より、提案手法では、関連研究に比べ、全ての配管要素をより早いスキャン回数で100%認識できることが確認でき、配管システムの認識に有効な最適スキャナ位置を推定できる可能性が示された。なお、提案手法による1回の最適スキャナ位置推定時間は通常のPCで最小216s、最大274s、平均257sであった。

## 参考文献

- [1] Potthast C, Sukhatme. G. S, "A probabilistic framework for next best view estimation in a cluttered environment", Journal of Visual Communication and Image Representation, Vol.25, No.1, pp.148-164. (2014).
- [2] 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 Informatics 2013, pp.65-68. (2013).
- [3] Dornhege C, and Kleiner A, "A frontier-void-based approach for autonomous exploration in 3D," Advanced Robotics, Vol.27, No.6, pp.459-468. (2013).
- [4] Kazuaki Kawashima, Satoshi Kanai and Hiroaki Date: "As-build 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).
- [5] "PCL", <http://pointclouds.org/>, (2014/8/1)