

レーザ計測点群からの空調ダクト配管システムの自動認識に関する研究
 -矩形断面ダクトの認識-

北海道大学 ○鳴海 晶也, 金井 理, 伊達 宏昭, 新菱冷熱工業 脇坂 英佑

近年, 施設の設備更新の頻度増加に伴う, 空調配管システムの更新の効率化を目的としたレーザ計測点群からの3次元 as-built モデルの構築が期待されている. 特に, 空調配管システムの中でも主要な部材の一つであるため, 空調ダクト配管システムのモデル構築の需要が高い. そこで本研究ではマンハッタンワールド仮説と計測点の連続性を用いて, レーザ計測点群から矩形断面ダクトで構成された配管システムを全自動で認識する手法を開発したので報告する.

1. はじめに

近年, 生産施設や商業ビル等における空調設備の更新頻度が高まっており, これに伴い, 改修作業効率化のためレーザ計測点群を用いた設備の3次元 as-built モデル作成の需要も高まっている. 特に図1のようなダクト等で構成される空調配管システムは設備の主要部材であり, レーザ計測点群に基づいたモデル作成の要求が高い. そのため, ダクトの空調配管システムを対象とした効率的な as-built モデル構築の支援技術が必要とされている.

既に化学プラント等を対象としたレーザ計測点群からの配管システム認識には, いくつかの研究例が報告されているが[1,2,3], いずれも円形断面配管の認識のみに手法が特化している. また, 商用点群処理ソフトウェアにはダクト抽出機能を持つものもあるが[4], 対話的処理が一部必要があり, 自動認識には至っていない. 一方, 配管システムは直交3軸に沿って設置されていることが多いことから, Manhattan-World 仮説を利用し配管システムを効率的に認識できる可能性が[5]で示唆されている.

そこで本研究では, レーザ計測点群を入力とし, Manhattan-World 仮説を用い, 矩形断面ダクトで構成される空調配管システムの自動認識を行うアルゴリズムを開発したので報告する.

2. 矩形断面ダクト配管システムの自動認識アルゴリズム

提案手法の概要を図2に示す. 矩形断面ダクト配管システムの自動認識は以下の手順で行われる.

2.1 基本的な考え方

図1のように, 空調ダクト配管はその大部分が建物の天井面及び壁面にほぼ平行に設置されている. 従って本研究では, ダクトが Manhattan-World 仮説に従って存在していると仮定し, 点群内から支配的直交3軸を求め, 軸に直交する各断面上の点群形状解析からまず矩形断面ダクトの断面位置を認識し, 更にこれらを断面間で相互接続することでダクトの認識を行う.

2.2 支配的直交3軸の推定および背景点群除去 (A1)

まず入力点群の鉛直方向点分布ヒストグラムを作成し, 点数が最大となる区間を求め, その区間内の点群を床面候補として推定する. その後, 床面候補点群を region-growing により複数の平面領域に分割し, その中で最も点数の多い領域を床面領域点群として認識し, 除去する.

次に検出された床面領域点群に対する最小二乗フィット平面の法線ベクトルを求める. これを計測点群の支配的z軸として, ワールド座標系のz軸と一致するよう点群の座標変換を行う.

更に, 座標変換された点群の各点 p_i の法線ベクトルに n_i について, xy 平面に投影したベクトル n'_i を計算する. xy 平面に平行な基準ベクトル n'_r を1つ用意し, n'_r と n'_i のなす角 θ_i を求める. θ_i の分布ヒストグラム上で最大頻度を与える θ_i の区間の中央値を, 支配的x軸の方向と決定し, これをx軸に一致させる座標変換を行う.

床面除去点群に対し, 更に床面と同様にして壁面・天井面を検出・除去することで背景点群がほぼ除去された点群を得る.

2.3 断面点群の解析によるダクトの存在位置推定 (A2)

支配的x軸, y軸に垂直な一定間隔の分割面で点群を分割し, 分割した点群と法線ベクトルを分割面Sに投影し, S上の断面点群 P_s を取得する. その後, 以下の(1)~(3)の処理を各 P_s に対して行うことで, ダクト長手方向の辺上に存在する点の集合を得る.

(1) 断面点群上で組合せ Hough 変換に基づく長方形の頂点推定手法[6]を用い, 図3(a)に示すような矩形の直角部分に位置す

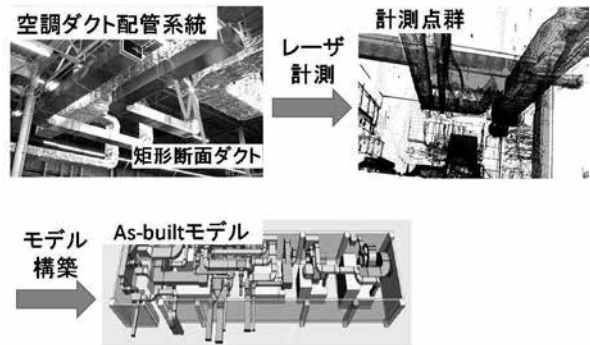


図1 空調設備配管システムの as-built モデル構築の流れ

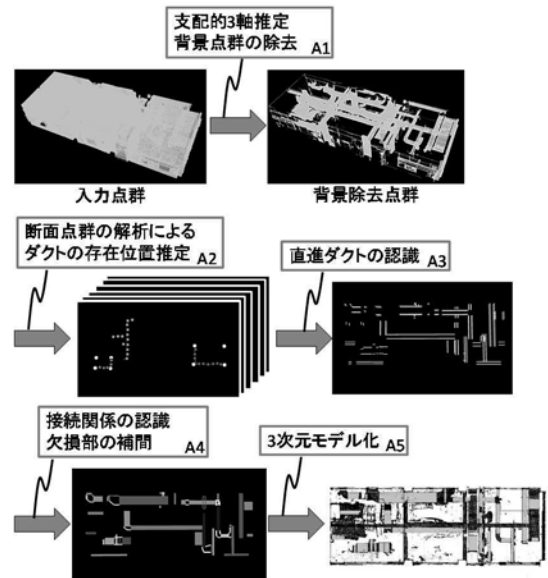


図2 提案手法概要

- る点 p_{vi} を推定する.
- (2) 断面点群 P_s と直角部に位置する点集合 $P_v = \{p_{vi}\}$ の和集合からなる点群 P_{sv} に対し, 図3(b)のように, ユークリディアンクラスタリングで点群をグループ化する. グループ化された各点群 C_i のうち, 角点 p_{vi} を含む点群に対し, 図3(c)に示す2次元軸平行バウンディングボックス B_i をフィットさせる.
 - (3) B_i と C_i について, 図3(d)のように B_i が矩形断面ダクトの断面として適切かどうか, B_i の重心付近に存在する点の数 N_{inner} と, B_i の縦横比 A_i を用いて式(1)に基づき判定する.

$$N_{inner} \leq N_{th} \quad (N_{th} : \text{点数閾値}) \quad (1)$$

$$A_{th1} \leq A_i \leq A_{th2} \quad (A_{th1}, A_{th2} : \text{縦横比閾値})$$

式(1)を満たす B_i を矩形断面ダクトの断面として適切と判定し, 図3(e)のようにボックスの4頂点 $p_{tr}, p_{br}, p_{bl}, p_{tl}$ を矩形断面ダクトの断面の4頂点として記録する.

2.4 直進ダクトの認識 (A3)

2.4.1 ダクト長手方向辺上の線分認識

2.3節で得られたダクト断面頂点集合について, 各点の推定に用

いられた部分点群 C_i の、 B_i の周長に対する点密度が最も高い矩形4頂点のうち任意の1点を、シード点 p_{seed} として選択する。そして p_{seed} から出発しダクト長手方向に存在する他の断面上で p_{seed} とほぼ同一位置に存在するダクト断面頂点を網羅的に探索する。得られた長手方向に分布する点群を、更にユークリディアンクラスタリングでグループ化する。グループ化された各点群について、各々端点 p_s, p_e を決定し、ダクト長手方向の辺上の線分 $l_{p_s p_e}$ を取得することで、図4(a)に示すようなダクト長手方向に存在する線分集合が得られる。

2.4.2 直進ダクトの認識

図4(a)のように、任意の辺上線分 l 中の任意点 p_i から同じダクト長手方向の他の辺上に存在する3線分に投票処理を行う。次に、 l からの投票数が最多となっている他の3辺上の線分 l', l'', l''' を求め、図4(b)のように4線分(l, l', l'', l''')を同一ダクトを構成している線分集合 L として認識する。そして L 内の各線分について、図4(c)に示すように断面に3本以上の線分が表れるダクト長手方向の位置に各端点を再配置することで、端面が長方形となるよう整形した直方体 v を作成する。その後、空間的に共通領域を持つ v の和集合を取り、得られた直方体を直進ダクト D として認識する。

2.5 直進ダクト間の接続関係の認識・欠損部の補間(A4)

まず、任意の2つのダクト D_1, D_2 端面の重心点 c_1, c_2 について、図5(a)に示すように2点間のManhattan距離 d_m を求める。

次に、 d_m とManhattan距離閾値 d_{th1} が $d_m \leq d_{th1}$ となる場合、 D_1, D_2 が接続すると判定し、図5(b)のように d_m の各軸方向成分 d_x, d_y, d_z から接続関係の種類(エルボ・S字カーブ等)を識別する。

また D_1, D_2 が延長線上の位置にある、すなわち D_1, D_2 が同一方向で d_m が $d_m \leq d_{th2}$ ($d_{th1} < d_{th2}$, d_{th2} : Manhattan距離閾値)かつ $d_\alpha \cong 0, d_\beta \cong 0$ (α, β : ダクトの進行方向と異なる2成分)となり、かつ D_1, D_2 の間に補間するに妥当なだけの計測点が存在する場合、図5(c)のように D_1, D_2 間を直進ダクトの欠損部と認識し、 D_1, D_2 の間を補間したダクト D_{12} を生成し、 D_1, D_2 と置き換える。

以上の処理を全ての直進ダクトの組み合わせについて行うことで、直進ダクト間の接続要素からなる矩形断面ダクト配管系統の認識データが得られる。

3. 認識実験結果

図6に示す天井板を撤去したビル内部のレーザ計測点群をダウンサンプリングした点群(点数:2,836,148)を入力とし、提案手法を用いて矩形断面ダクト配管系統の認識を行った。背景点群を除去した点群データを図7に、ダクトの最終認識結果を図8に示す。

各直進ダクトに関して、入力点群から目視により直進ダクトを判別し、その位置、長さを求め、これらを真ダクトと定義する。真ダクトと本アルゴリズムで認識した直進ダクト(認識ダクト)を比較し、真ダクトと認識ダクトの共通部分を認識成功部、真ダクトのみが存在する部分を認識不足部、認識ダクトのみが存在する部分を過認識部と定義し、それぞれの全長を求めることで認識結果を評価した。認識成功部、過認識部、認識不足部各々の全長を表1に、適合率(認識ダクトのうち、真ダクト部に含まれる長さの割合)、再現率(真ダクトのうち、認識ダクト部に含まれる長さの割合)、及びF値(適合率と再現率の調和平均)を表2に示す。計測点群中の真の直進ダクトのうち約76%を正しく認識できた。認識不足は、ダクト4面中の1面にしか計測点が存在しない箇所までに発生しており、今後の対策が必要である。一方、認識ダクトのうち、真ダクトである割合は約56%にとどまった。これは図8のように天井部付近の梁や床面付近にある柱状建材が誤認識されていることが原因である。また認識した直進ダクト同士の接続部において点群形状に合致して適切な接続関係を認識できた割合は、83%であった。処理時間は約4.5分/280万点であった。

参考文献

[1]松岡諒ほか:「大規模点群からの生産設備の形状再構成(第1報)」, 精密工学会誌, 80(6), pp.604-608 (2014)
 [2]K.Kawashima et al.: "As-built modeling of piping system from terrestrial laser-scanned point clouds using normal-based region growing", Journal of Computational Design and Engineering, 1(1), pp.13-26 (2014)
 [3]R.Qiu et al.: "Pipe-Run Extraction and Reconstruction from Point Clouds", LNCS, 8691, pp.17-30 (2014)
 [4]EdgeWise MEP, ClearEdge 3D. <http://www.clearedge3d.com/products/edgewise-mep/>
 [5] T.Mizoguchi et al.: "Manhattan-World Assumption for As-Built Modeling Industrial Plant", Key Engineering Materials, Emerging Technology in Precision Engineering XIV, pp.350-355. (2012)
 [6]齊藤文彦ほか: "組合せ Hough 変換による画像内長方形物体検出", 精密工学会誌論文集, 71(1), pp.94-98, (2005)

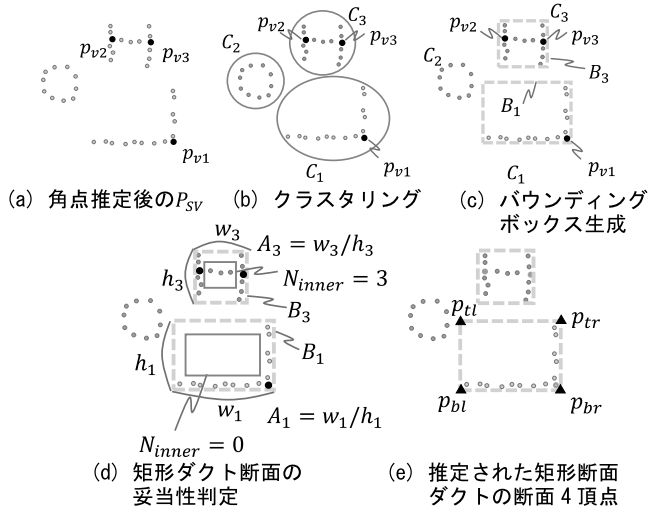


図3 ダクト断面4頂点の推定

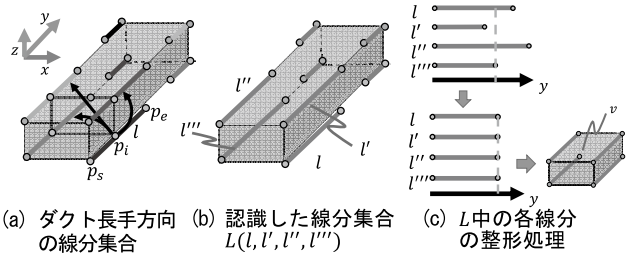


図4 直進ダクトの認識

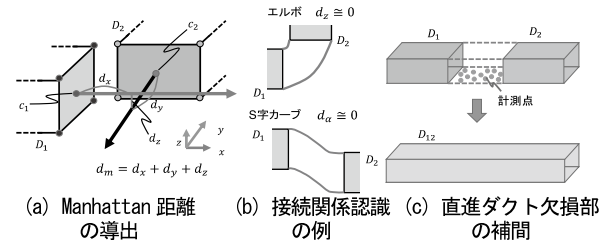


図5 直進ダクト間の接続関係認識・欠損部補間

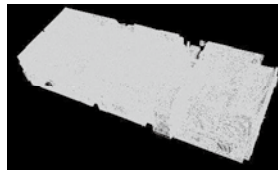


図6 入力点群(点数:2,836,148)

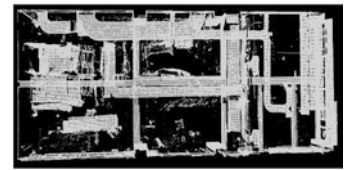


図7 背景除去点群(点数:1,144,460)

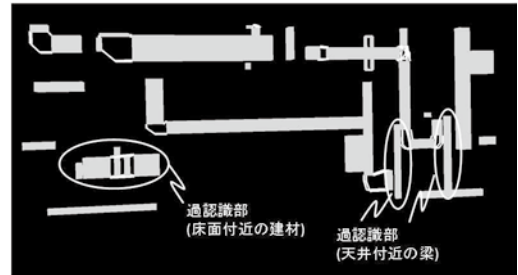


図8 矩形断面ダクト配管系統認識結果

表1 直進ダクトの認識結果[m]

	認識ダクト部	認識不足部	真ダクト全長
真ダクト部	40.45 (認識成功部)	12.86	53.30
過認識部	31.72		
認識ダクト全長	72.16		

表2 直進ダクトの認識率

再現率	75.9%
適合率	56.0%
F値	0.64