

レーザ計測点群からの規則性を考慮した屋内環境モデリング

北海道大学 ○高橋 勇斗, 伊達 宏昭, 金井 理

要 旨

本研究は、レーザ計測点群からの平行・直交関係などの規則性を考慮した屋内環境の自動 3D モデリング手法の開発を目的とする。本手法は、まず RANSAC によって天井面と床面を抽出し、天井面の輪郭から、壁面を天井面に投影したときの像である壁面境界線を推定する。そして、推定した壁面境界線に対してグラフを用いた規則化ならびに位置修正を行い、壁面境界線を部屋の高さ分だけ掃引することで屋内環境モデルを生成する。

1. はじめに

近年、レーザ計測により取得された点群から生成された、建物や設備の 3D モデルが、プラント、土木建築分野などで幅広く利用されている。また、建物や屋内環境のような人工構造物は、平行や直交などの規則性を有する場合が多く、計測点群からの建物のモデリングにおいて、規則性を考慮することには多くの利点がある。例えば、計測点群からの規則性の認識は、シーンの理解（共平面性や躯体構造の推測）を可能にし[1]、また規則性を考慮して生成されたモデルは、シーンの可視化や、家具配置計画、改装計画のための図面生成に有用である。また、規則性を用いることによりモデリング処理の単純化や安定性向上も可能となる[2]。

計測データからの規則性を考慮した自動モデリング手法は数多く提案されているが、計測時の遮蔽による計測抜けに弱い[3]、計算コストが高い[1]などの課題がある。本研究では、屋内環境を対象とし、遮蔽による計測抜け（特に壁面、床面）の影響を受けにくく、かつ計算コストの低い規則性を考慮した自動モデリング手法を提案する。

2. 提案する屋内環境モデリング手法

2.1. 手法概要

本手法はレーザ計測時における家具などの遮蔽による計測抜けが大きい壁面を、遮蔽が生じにくい天井面の輪郭から推定する。そして、床面と天井面が平行かつ壁面はそれらに直交するという制約を用いて、推定した天井面上の壁面境界線を床方向に掃引することで屋内環境 3D モデルを生成する。さらに壁面間の平行・直交の規則性と計測点群への忠実さのバランスを取ったモデル生成を実現する。

本手法の概要を図 1 に示す。まず、入力点群から天井面と床面に該当する平行な平面对ならびに各平面に属する点集合（天井面点群、床面点群）を得る（図 1A1）。次に、天井面点群の輪郭から壁面境界プリミティブを生成する（図 1A2）。壁面境界プリミティブ b_i は直線 l_i とそれに属する点集合 P_i で構成される。そして、壁面境界プリミティブ集合に対して平行・直交化と位置修正、ならびに単純化を行い、壁面境界線集合を推定する（図 1A3）。ここで壁面境界線は、壁平面を天井面へ投影したときの像である。最後に、壁面境界線集合を部屋の高さ分だけ掃引することで屋内環境モデルを生成する（図 1A4）。

2.2. 天井面と床面の抽出と平行化

まず、RANSAC[4]によって入力点群から平面集合を抽出し、その中から十分な数の点を含み、かつ z 軸（鉛直方向）にほぼ平行な法線ベクトルを持つ水平面集合を得る。水平面集合のうち、最大の高さのものを初期天井平面 p_{ini}^c 、最低の高さのものを初期床平面 p_{ini}^f として抽出し、 p_{ini}^c および p_{ini}^f から一定距離内の点集合をそれぞれ天井面点群 P^c 、床面点群 P^f とする。

その後、 p_{ini}^c と p_{ini}^f を平行化し、天井平面 p^c と床平面 p^f を得る。平行化において、出力の p^c と p^f は、対応する点群 P^c 、 P^f のそれぞれの重心を通り、それらの共通の法線は、 p^c と p^c および p^f と p^f との自乗距離の総和が最小となるように定める。

2.3. 壁面境界プリミティブの生成

壁面境界プリミティブの生成手法の概要を図 2 に示す。まず、天井面点群 P^c を天井平面 p^c に投影した点群 $P^{c'}$ に対して 2 次元のグリッドを生成し、点を含むセルの値を 0、含

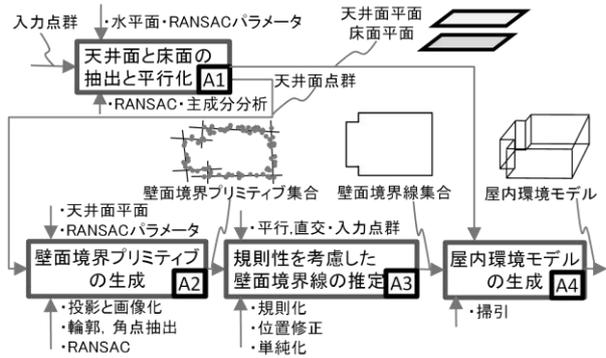


図 1 提案手法概要

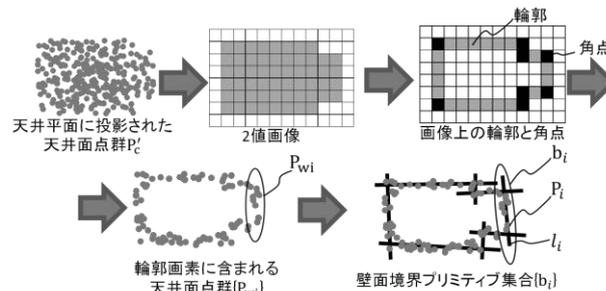


図 2 壁面境界プリミティブ生成手法の概要

まないセルの値を 1 とした 2 値画像を生成する。次に、生成した画像の輪郭を抽出し、DouglasPeucker 法[5]を用いて輪郭の角点を得る。最後に、隣り合う角点間の輪郭画素に含まれる点集合 P_{wi} から、各壁面境界プリミティブ $b_i = \langle l_i, P_i \rangle$ を生成する。ここで、 l_i は RANSAC[4]によって P_{wi} にフィットした直線であり、 P_i は l_i からの距離が閾値以下である P_{wi} 内の点集合である。

2.4. 規則性を考慮した壁面境界線の推定

2.4.1. 壁面境界プリミティブ集合に対する平行・直交化

壁面境界プリミティブ集合に対する平行・直交化は、以下の 3 つの手順で構成される。

グラフを用いた規則関係の抽出[3]

壁面境界プリミティブの全ペア $B_{ij} = \{(b_i, b_j)\}$ を、それらの直線 l_i, l_j が成す狭角 θ_{ij} が $\pi/4$ 以下であれば平行関係に、 $\pi/4$ より大きければ直交関係に分類する。その後、各ペア (b_i, b_j) に対して、関係の分類結果に応じた信頼スコア s_{ij} を式(1)で求める。

$$s_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{4}{\pi} \theta_{ij} & (b_i, b_j) \text{ が平行関係} \\ \frac{4}{\pi} \theta_{ij} - 1 & (b_i, b_j) \text{ が直交関係} \end{cases} \quad (1)$$

次に、プリミティブ間の関係を抽出するためのグラフを構築する。グラフのノードは各プリミティブ b_i またはプリミティブの集合であり、エッジはペア (b_i, b_j) の各プリミティブを含むノード間に生成され、関係（平行/直交）を持つ。グラフ構築の流れを図 3 に示す。グラフの構築は、信頼スコア s_{ij} の高い順にペアをグラフに追加することで行う。

もし、追加するプリミティブを含むノードが既にグラフに含まれていれば、新たなノードは生成せずにエッジのみを生成する。また、対応するノード間のエッジが既にグラフに含まれていれば、そのエッジは生成しない。もし、平行関係を持つエッジがグラフに生成された場合は、そのエッジでつながれたノード対をコラプスして併合する。以上の手順で、 s_{ij} が一定値以上のペアを全てグラフに追加する。最終的に得られたグラフにおける各連結成分は、それぞれ平行、直交の関係を持つプリミティブ集合に対応する。

規則性を考慮した壁面境界プリミティブのフィッティング [3]

単位方向ベクトルが $d_o = (a, b)$ および $d_p = (b, -a)$ の2つの直交する直線を、直交関係にあるプリミティブ集合およびそれらに平行関係にあるプリミティブ集合にフィッティングする。フィット直線方向ベクトルは、グラフの各連結成分内のプリミティブを用いて、式(2)により求める。

$$\min_{a,b} \left(\sum_{j \in P_o} (-bx_j + ay_j)^2 + \sum_{j \in P_p} (ax_j + by_j)^2 \right) \quad (2)$$

ここで、 $a^2 + b^2 = 1$ 、 P_o はある1つのノード内のプリミティブ集合に含まれる点集合であり、 P_p はそのノードの隣接ノード内のプリミティブ集合に含まれる点集合である。また (x_j, y_j) は、点 j が属するプリミティブの点集合 P_i の重心を原点とした場合の、点 j の天井平面上の座標値である。最後に、各プリミティブの直線 l_i を、 P_i の重心を通り、対応する単位方向ベクトルを持つ直線とする。

壁面境界線の推定

あるプリミティブの直線 l_i と、それに隣り合う直線 l_{i-1}, l_{i+1} との交点 c_i, c_{i+1} を求める。そして壁面境界線 w_i を、 l_i 上の c_i, c_{i+1} 間の直線分とする。

2.4.2. 壁面境界線の位置修正と単純化

天井のレーザ計測点群は、ブラインドやカーテン、廻縁などの影響により、実際の壁面境界線よりも若干内側までしか存在しない場合がある(図4(a))。そのため、室内の全計測点群を天井平面に投影し、その投影点群を用いて、これまでに推定した w_i の位置を、壁面境界線の可能性が高いより妥当な位置へ修正する(図4(b))。本手法における壁面境界線 w_i の妥当な位置とは、計測点群を投影した点群が w_i 上に一様に存在し、部屋の中心から最も遠方の位置である。

本手法では、現在の w_i 上に一様に点が分布する場合は l_i を室外方向に移動し、そうでない場合は室内方向に移動する処理を繰り返す。この移動量を、移動方向が変わるたびに減少させ、正確な壁面境界線の位置を求める。 w_i に対する点の1様分布の評価には、図5に示す、 k 個の直列セルからなり、 l_i に平行な辺を持つグリッド g を用いる。点を含まないセルが一定数以上連続しない場合には、点が1様分布であると判定する。

また、長さが非常に短い壁面境界線は、信頼性ならびに重要性が低いと仮定し、本研究ではそれらを削除し壁面境界線を単純化する手法を提案する。長さが閾値以下の壁面境界線集合を削除の候補とし、最も短い壁面境界線 w_s から順に以下の処理を適用する。図6(a)のように、 w_s に隣接する壁面境界線 w_{s-1}, w_{s+1} が平行でなければ、それらの乗る直線の交点 c_{new} に、 w_s の端点 c_s, c_{s+1} を併合する。図6(b)のように、 w_{s-1}, w_{s+1} が平行であり、それらの距離が閾値未満であれば w_s, w_{s-1}, w_{s+1} を1つの壁面境界線 w_{new} に併合する。 w_{new} の方向ベクトルは w_{s-1} と同様とし、その位置は、 w_{s-1}, w_{s+1} の点集合の重心を通るものとする。

2.5. 屋内環境 3D モデルの生成

壁面境界線を天井面から床面に部屋の高さ分だけ掃引し屋内環境 3D モデルを生成する。部屋の高さは、天井平面と床平面の平面間距離である。

3. 屋内環境の 3D 自動モデリング結果

図7に大学内のある研究室のモデリング結果を示す。レーザ計測は FARO FOCUS 3D S120 を用いて行った。図7(a)(b)より、生成されたモデルが部屋の構造を概ね正しく表現していることが分かる。また、生成されたグラフから、室内の平行・直交関係が正しく抽出されていることを確認した。図7(c)に壁面境界線の位置修正の効果を示す。天井面の輪郭から推定された壁面境界線が、全計測点群を用いることでより妥当な位置へと移動している。また、図7(d)

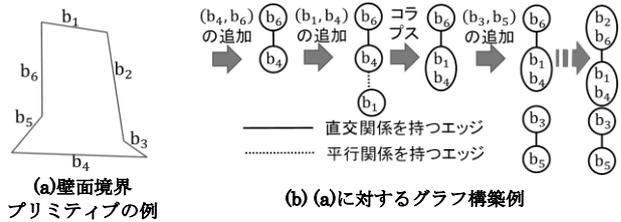


図3 グラフを用いた規則関係の抽出

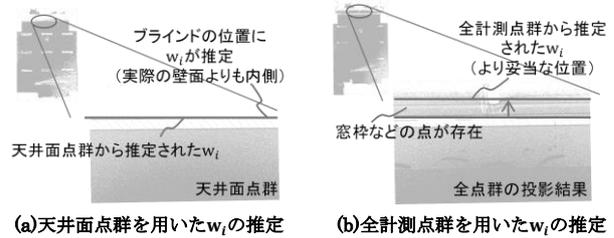


図4 壁面境界線 w_i のより妥当な位置

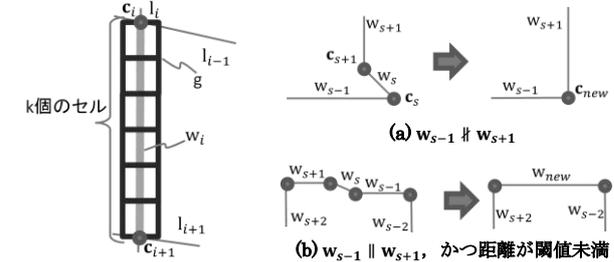


図5 グリッド g の定義

図6 単純化

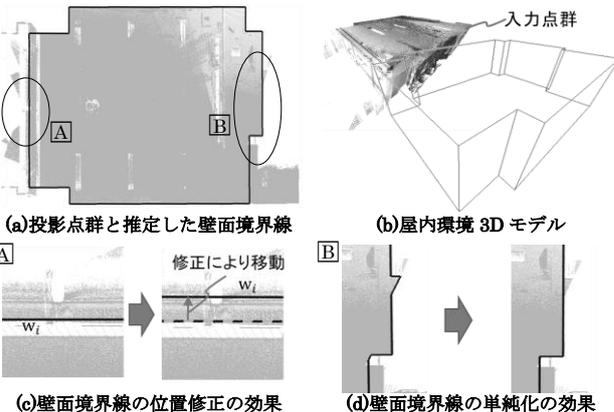


図7 屋内環境モデリング結果

に単純化の効果を示す。長さの短い壁面境界線が削除され、遮蔽により生じた微細形状が除去された。

4. おわりに

本報では、レーザ計測点群からの規則性を考慮した屋内環境自動モデリング手法を提案した。提案手法により部屋の基本的な構造の自動モデル化が可能なることを確認した。今後の課題は、考慮する規則性の種類の増加、窓等の壁面内の詳細な構造のモデル化手法の確立である。

参考文献

- [1] Monszpart 他, RAPTER:Rebuilding Man-made Scenes with Regular Arrangements of Planes, Proc. ACM SIGGRAPH, pp.1-12 (2015)
- [2] Heo 他, Semi-automated approach to indoor mapping for 3D as-built building information modeling, Computers, Environment and Urban Systems, 51, pp.34-46 (2015)
- [3] Li 他, GlobFit:Consistently Fitting Primitives by Discovering Global Relations, ACM TOG, 30(4), Article No.52 (2011)
- [4] Fischler 他, Random sample consensus:a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of the ACM, 24(6), pp.381-395 (1981)
- [5] Douglas 他, Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, The international Journal for Geographic Information and Geovisualization, 10(2), pp.112-122 (1973)