

# レーザー計測に基づく屋内空間 CFD 解析用直交格子の自動生成

北海道大学 ○石川哲朗, 金井理, 伊達宏昭

## 要旨

近年, 既存の屋内空間の空調改修などのため, CFD(数値流体力学)シミュレーションによる熱流体解析が普及している. CFD 解析には, 通常, 解析対象空間のソリッドモデルから生成する解析格子が必要である. 現状このモデルは, 図面や寸法計測から手動で作成する必要があり, 時間やコストを要する. そこで本研究では, 解析対象空間を地上型レーザー扫描仪で計測した計測点群からソリッドモデルを作ることなく, CFD 解析用の直交格子を直接自動で生成する手法を提案した.

## 1. はじめに

近年, 新規建築物の空調・換気・熱環境の設計評価において, CFD(数値流体力学)シミュレーションを用いた熱流体解析が普及してきている[1]. 一方, 既存の屋内空間を対象とした CFD による熱流体解析 (以下 CFD 解析) の必要性も, 空調改修などのために高まっている. CFD 解析では, 通常, 解析対象空間を表したソリッドモデルから, 解析に必要な解像度を有する解析格子を生成する必要がある. しかし, 現況の屋内空間を高解像度で表現したソリッドモデルを作ろうとすると, 図面や寸法計測をもとに膨大な時間やコストを要してしまう.

そこで本研究では, 屋内空間を地上型レーザー扫描仪で計測した高密度3次元計測点群から, ソリッドモデルを作ることなく, 所望の解像度の CFD 解析用直交格子を直接自動生成する手法の開発を目的とする. 類似研究として[2]があるが, 解析格子生成には, 計測点群から解析解像度にあったソリッドモデル生成を手動で行う必要があるという欠点をもつ. 一方, 本研究では, 計測点群に基づき, 八分木による空間占有状態分類, 物体境界面推定から, 指定解像度の CFD 解析用非等間隔直交格子を完全自動で生成できる. 本報では, 手法の詳細, および専結果を述べる.

## 2. レーザー計測に基づく屋内空間 CFD 解析用直交格子の自動生成手法

### 2.1. 格子生成のための要件

CFD 解析用直交格子の生成では, 以下の要件を満たすことが重要である.

- 1) 格子幅  $d$  を必要に応じて変更可能
- 2) 解析に不要な物体表面詳細部の無視や近似が可能
- 3) 物体表面付近にかけて格子幅が減少する非等間隔直交格子の生成が可能
- 4) 隣接格子幅比は一定範囲内(通常は2以下)
- 5) 境界条件を付加すべき格子(ルーバー等)部分の特定
- 6) 物体表面と空間を正しく区別し格子化

このうち本報では, 1) 3) 4) 6) を実現する非等間隔直交格子を, レーザ計測点群から自動生成する手法を実現した. ただし, 屋内空間の支配的な壁面方向と格子の直交軸方向は一致し, かつスキャン点群は格子幅に対して十分に高密度に計測, と仮定する. 尚, 本報では検証のため, 実際のスキャン点群でなく, モデルから生成した疑似的な計測シミュレーション点群を用いた.

### 2.2. ボクセル分割による空間占有状態の分類

提案する屋内空間 CFD 解析用直交格子の自動生成手法の流れを図1に示す. 以下にその詳細を述べる.

まず, スキャン点群を入力し, 点群を包含する八分木により空間を分割する. その八分木セルに対し, スキャナ位置から各計測点まで Ray Casting を行い, セルごとの空間占有状態を, 計測点の存在するセルを Occupied セル, スキャナ位置から計測点まで Ray が通過したセルを Free セル, として分類する.

### 2.3. 等間隔直交格子の生成

等間隔直交格子は, 解析の計算の安定性が高い. 本手法では, 全ての八分木セルの中心点を格子点として生成する.

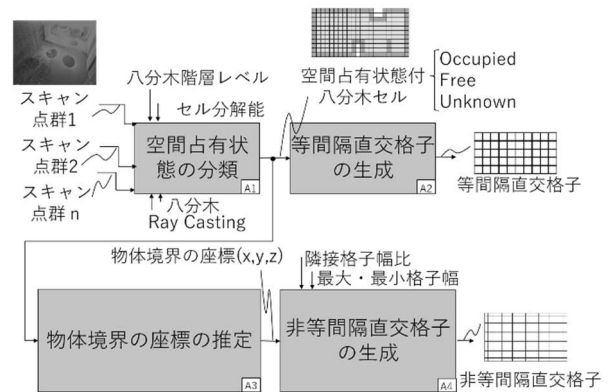


図1: 手法の概要

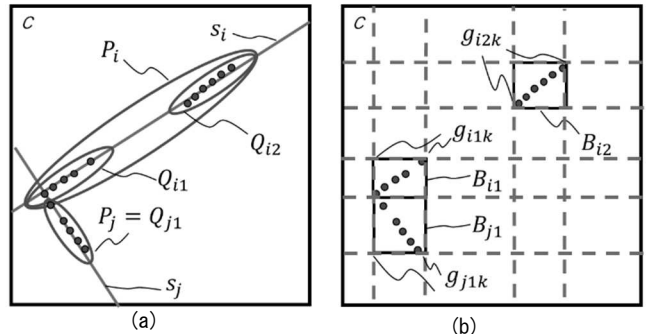


図2: 計測点と格子点の生成

### 2.4. 点群からの物体境界座標の推定

一方, 非等間隔直交格子は, 自動生成や格子細分化の容易性, 等間隔格子と比較し物体形状の再現性が高いため解析精度が高いなどの利点をもつため CFD 解析では, よく使われる. この格子生成のため, まず, 図2のように計測点群内での物体境界座標の推定を各 Occupied セルごとに以下の手順で行う.

- (1) 八分木各 Occupied セル  $c$  に含まれる全計測点に対し, 平面 RANSAC を用いて, フィットする平面素  $s_i \in S_c$  を推定する. (図2(a))
- (2) 各小平面素  $s_i$  に対するインライア点群  $P_i$  に対し, Euclidian クラスタリングを行い,  $P_i$  をさらに部分点群  $Q_{i1}, Q_{i2}, \dots$  に分割する. (図2(a))
- (3) 部分点群  $Q_{ij}$  をその最小二乗面へ投影し, ドロネー三角形分割を行い, 凸多角形の面積  $A_{ij}$  を求める.
- (4)  $A_{ij}$  が閾値以上の場合, 計測点を含む Axis-Aligned-Bounding-Box  $B_{ij}$  を生成し,  $B_{ij}$  の8頂点を格子生成のための物体境界座標を与える格子点  $g_{ijk} = (x_i, y_i, z_i)$  とする ( $k = 1 \sim 8$ ). この  $(x_i, y_i, z_i)$  の各成分値を境界数列  $X_L, Y_L, Z_L$  の要素に各々加える. (図2(b))

## 2.5. 非等間隔直交格子の生成

2.4 節で推定した物体境界の境界数列 $X_L, Y_L, Z_L$ と空間占有状態をもとに、隣接格子幅比 最小格子幅 $d_{min}$ 、最大格子幅 $d_{max}$ を指定パラメータとして、非等間隔直交格子の格子点の各軸座標値を持つ格子数列 $U_L, V_L, W_L$ を以下の手順で定める。この時、格子幅 $d_n = u_n - u_{n-1}$ は物体から離れるほど公比 $r (> 1)$ で等比数列的に増加させるように計算する。したがって境界数列内の座標 $x_l \in X_L$ から  $n$ 個離れた格子点座標 $u_n$ は図 3 のように以下の式(1)~(4)で計算される。

$$d_n = d_{min} \cdot r^{n-1} \quad (1)$$

i)  $d_n < d_{max}$ の場合

$$u_n = x_l + \frac{d_{min}(r^n - 1)}{r - 1} \quad (2)$$

ii)  $d_n \geq d_{max}$ の場合

$$u_n = x_l + u_n^* + d_{max}(n - n^*) \quad (3)$$

$$n^* = \left\lceil \log_r \frac{d_{max}}{d_{min}} + 1 \right\rceil \quad (4)$$

その後、格子間隔 $|u_n - u_{n-1}|$ が $d_{min}$ 以下の場合、複数の格子点を 1 つの格子点に統合する。その格子点位置は統合格子点の平均値とする。

更に生成された格子点 $p(u_i, v_j, w_k)$ ( $u_i \in U_L, v_j \in V_L, w_k \in W_L$ )に対する物体属性を $(u_i \in X_L) \wedge (v_j \in Y_L) \wedge (w_k \in Z_L)$ の場合は「物体境界」、それ以外は「空間」として割り当てる。

## 3. 自動生成格子および CFD 解析結果

### 3.1. 非等間隔直交格子の自動生成結果

図 4 に示す会議室の屋内空間モデル(STL 形式)に対し Blensor[3]を用いてレーザースキャンシミュレーションを行い 1 スキャン当たり 54 万点の模擬計測点群を生成した。空間は、幅 17.5m、奥行 5.8m、高さ 2.6m である。レーザースキャナは図 4 の 8 か所に設置した。格子生成のパラメータは、 $r = 2, d_{min} = 0.025m, d_{max} = 0.1m$ とした。

この点群から提案手法で自動生成した非等間隔直交格子を図 5 に示す。この各軸方向格子点数は幅方向 559 点、奥行方向 203 点、高さ方向 98 点であった。尚、自動生成格子の x,y,z 各軸方向の最大・最小格子幅は x 軸方向 0.131, 0.025m, y 軸方向 0.1, 0.025m, z 軸方向 0.1, 0.025m であった。格子生成の処理時間は 2 分 10 秒であった。

### 3.2. 自動生成格子と手動生成格子との比較

一方、図 4 のモデルから空調設備の CFD 解析専門家が作成した解析格子を図 6 に示す。手動生成格子の各軸方向の格子点数は、幅方向 352 点、奥行方向 185 点、高さ方向 56 点であった。図 5, 6 の両格子を比較すると、手動生成格子では、物体境界付近の隣接格子幅比条件を満たさない部分が多数見られたが、自動生成格子では条件が完全に満たされている。また、物体境界面付近での格子幅は、自動生成格子では境界面に向かって徐々に減少しているが、手動生成格子では一定幅となっている部分が見られた。

### 3.3. 自動生成格子を用いた CFD シミュレーション

最後に、生成した非等間隔直交格子を用いて CFD ソフト(STREAM)による空調の流速解析を行った。この時、図中左側を流入口とし、右側を流出口とした。結果を図 7 に示す。解析時間は 1000 サイクル(30 サイクル/sec)で 5h32min を要した。

流速ピークは流入口付近に現れた。また家具等により流路が細くなった部分では他よりも早い流速が見られた。

以上より提案手法で自動生成された非等間隔直交格子が CFD 解析に利用可能であることが確認できた。

## 4. まとめおよび今後の課題

レーザースキャン点群から、ソリッドモデルを作ることなく、CFD 解析用の直交格子を直接自動生成する手法を提案し、格子幅に関する要件を満たす非等間隔直交格子の生成を行い、その直交格子が CFD 解析に利用可能であることを確認した。

今後の課題としては、2.1 節で示した要件 2)5)の実現があげられる。

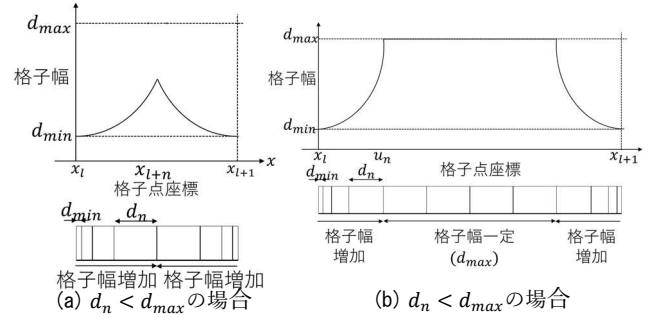


図 3 : 非等間隔直交格子の格子点

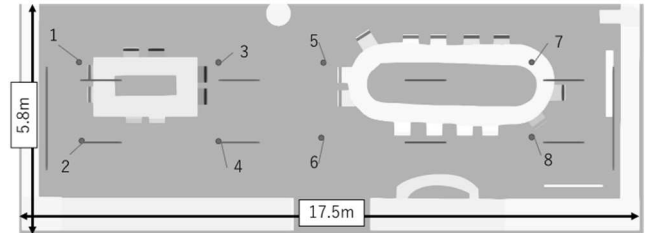


図 4 : 屋内空間モデル(番号はスキャナ位置)

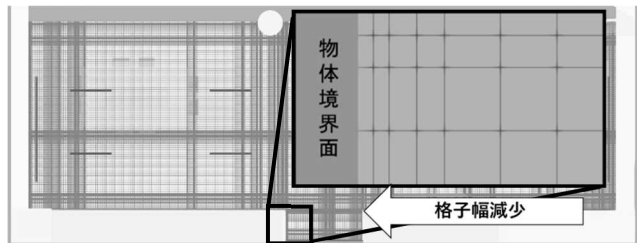


図 5 : 自動生成された非等間隔直交格子

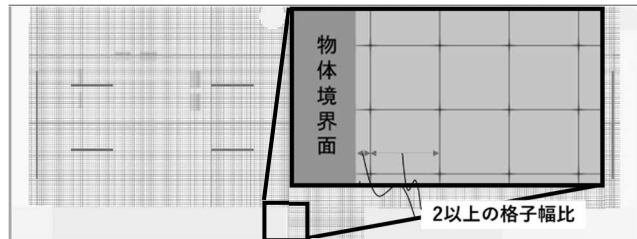


図 6 : 手動生成非等間隔直交格子

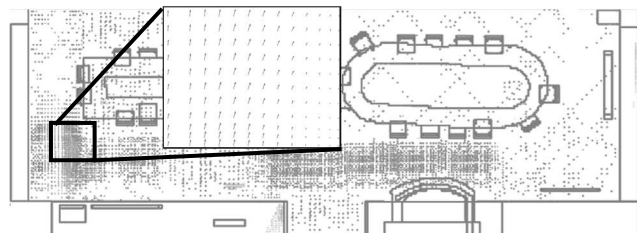


図 7 : 自動生成された格子を用いた CFD 流速解析

## 謝辞

屋内空間モデルと手動生成格子は新菱冷熱(株)様よりご提供いただいた。記して感謝する。

## 参考文献

- [1] 村上和夫: “はじめての環境・設備設計シミュレーション: CFD ガイドブック”, オーム社, (2017).
- [2] K.Maragkogiannis, et al.: “Combining terrestrial laser scanning and computational fluid dynamics for the study of the urban thermal environment”, Sustainable Cities and Society, 13, pp.207-219, (2014).
- [3] blender.org - home of the blender project - free and open 3d creation software, <https://www.blender.org/>