HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	3次元画像データを直接用いた流れシミュレーション
Author(s)	中道, 信人; CHO, Younghwa; 大島, 伸行
Description	第52回可視化情報シンポジウム. 2024年7月19日（金）, 20日（土）, 21日（日）. 沖縄産業支援センター
Issue Date	2024-07
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/93764
Type	conference paper
File Information	VSJ2024_nakamichi_20240702.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

3 次元画像データを直接用いた流れシミュレーション

中道　信人○ (北海道大学)，CHO　Younghwa(北海道大学)，大島　伸行(北海道大学)

Fluid Simulation directly Driven by 3D image data

Nobuto NAKAMICHI, Younghwa CHO and Nobuyuki OSHIMA

ABSTRACT

This study explores a new approach to computational fluid dynamics (CFD) by directly utilizing 3D image data. We focus on processing point cloud data obtained via smartphone photogrammetry applications to simulate fluid flows around complex geometries. The core methodology involves the Immersed Boundary Method (IBM) combined with a level-set approach to define solid boundaries continuously within the computational domain. Our findings demonstrate the efficacy of this technique using a copper statue model, reconstructed from image data, to conduct flow simulations. Additionally, we present a case study of indoor airflow analysis, showcasing a robust simulation is possible even when the surface model is not closed. The results underline the feasibility of leveraging consumer-grade devices for accurate CFD analysis, offering an accessible and cost-effective solution for diverse fields.

Keywords: Fluid simulation, Graphical-data processing, Level-set approach, Immersed Boundary Method, 3D image data

1．序　論

近年，画像データから直接駆動される数値流体力学 (CFD：Computational Fluid Dynamics) が注目されている．実問題で取り扱われる画像データの種類は様々であり，例えば，スカラー値で与えられる医療画像 CT[13] やレーザースキャンなどにより得られる点群データ [4] などがある．本稿では，これらをまとめて「画像データ」と呼ぶ．これらの画像データを対象とする CFD 解析では，デジタルで与えられた物体形状 (固体境界) を数値計算でどのように扱うかが課題として挙げられる．これと同時に，複雑な界面の補足手法として，階層格子を適用した埋め込み境界法 (IBM：Immersed Boundary Method)[3), 8), 11)] の研究が盛んに行われている．

このような背景から，界面を判別するための手法であるレベルセット法 [7] を基礎として固体境界を空間に連続的に分布する関数として定義する手法が大島 [9), 10)] により提案された．すなわち，固体境界が埋め込まれたナビエ・ストークス (IB-NS：Immersed boundary Navier-Stokes) 方程式である．IB-NS 方程式を応用した著者らの従来研究 [5] では，畳み込みフィルタ処理を用いて画像の輝度値から直接壁面条件を定義する手法の構築と，2 次元 RGB 画像および 3 次元二値化ボクセルデータへの適用が行われた．3 次元二値化ボクセルデータは，工場の産業用機械を対象として，地上型レーザースキャナー (TLS：Terrestrial Laser Scanner) から得られる点群データ [14] を再構築したものである．

このようなレーザースキャン技術による形状補足手法が確立されている一方で，点群データはフォトグラメトリ技術 [15] によりスマートフォンなどを用いても取得可能である．そこで本稿では，スマートフォンの画像測量アプリケーションである Scaniverse[12] を用いて取得した点群データを解析対象として，3 次元流れシミュレーションへの適用を試みた．

2．計算モデル

2.1　基礎方程式

本研究で用いた基礎方程式は大島 [9), 10)] により定式化された IB-NS 方程式である．IB-NS 方程式は質量保存則と運動量保存則からなる．

質量保存則：

$$\frac{\partial \rho\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \rho\varepsilon\mathbf{v} = 0 \tag{1}$$

運動量保存則：

$$\frac{\partial \rho\varepsilon\mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho\varepsilon\mathbf{v}\mathbf{v} = -\varepsilon\nabla p + \nabla \cdot \varepsilon\mathbf{T} + \varepsilon\mathbf{f}$$

$$\text{where} \quad \mathbf{T} = \mu(\nabla\mathbf{v} + \nabla\mathbf{v}^{\mathrm{t}}) + \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I} \tag{2}$$

ρ，μ，λ はそれぞれ流体の密度，粘性係数，第 2 粘性係数である．また，ε は多孔質流れにおける多孔率 (porosity) を模しており，$\varepsilon \to 0$ で固体，$\varepsilon \to 1$ で流体を表現する無次元パラメータである．多孔質流れにおいては，“**v**”が流体の実質速度 (substantial velocity)，”ε**v**”が流体占有率

を考慮した見かけの平均速度 (superficial velocity) を意味する．

ここで，パラメータ ε は空間全域に連続的に定義され，$\varepsilon = 0.5$ が界面を表すという意味で ε はレベルセット関数である．式 (1)，(2) が固体境界を粗視化した近傍解を表すには，例えばレベルセット関数の再初期化法 [7] に基づけば，符号付き距離関数 ξ に単調な増加関数である sigmoid 関数が定義される．

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\tanh\left(\frac{\xi}{\Delta}\right) + \frac{1}{2} \tag{3}$$

式 (2) 右辺付加項 $\varepsilon\mathbf{f}$ は流体と固体との粘性による抗力を表し，壁面 slip 条件ならば $\varepsilon\mathbf{f} = 0$，壁面 nonslip 条件ならば

$$\varepsilon\mathbf{f} = \mu|\nabla\varepsilon|^2\mathbf{v} \tag{4}$$

と定式化される．ここで，ε を式 (3)で定義するとき，壁面 nonslip 条件 (式 (4)) は下式となる．

$$\varepsilon\mathbf{f} = -\alpha\mu\left[\frac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{\Delta}\right]^2\mathbf{v} \tag{5}$$

ただし，α は比例係数であり，一次元解析により $\alpha = 32$ である．

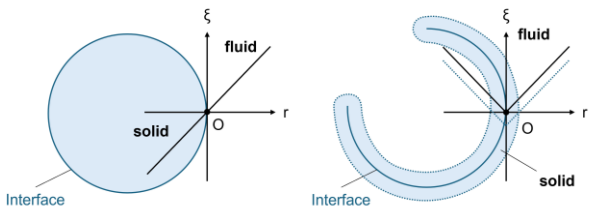
2.2 開いた境界

前節で定義した多孔率 (式 (3)) は，符号付き距離関数を直接用いているため，開いた境界，すなわち固体内部と外部が定義できない解析モデルに対しては適用できない．そこで，図 1 に示すように，開いた境界に対しては絶対値で距離関数をとり，シフト演算により界面を”膨らませる”ことで薄い固体領域を仮想的に再現する．以上に則って式 (3) を修正すると下式となる．

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\tanh\left(\frac{|\xi| - d_s}{\Delta}\right) + \frac{1}{2} \tag{6}$$

ここで，d_s は固体領域厚さであり，境界厚さ (Δ) 程度の大きさが望まれる．

このように定義したとき，流体と固体との粘性による抗力をゼロとする壁面 slip 条件 ($\varepsilon\mathbf{f} = 0$) を課した解は，界面をシフトさせた影響を受けない．したがって，開いた境界を用いた壁面 slip 解が計算可能となる．



(a) Closed interface　　(b) Open interface

Fig. 1 Comparison of Interface Types: Closed (a) and Open (b) in Shape Data

2.3 数値計算手法

本研究では，非圧縮性流体 ($D\rho/Dt = 0$) を仮定して，圧力分離型ソルバーである Marker-and-Cell (MAC) 法を用いた．MAC 法は，定常流れも非定常流れも時間進行法 (Time marching method) で求められ，圧力場を陰的に，速度場を陽的に交互に解く．圧力ソルバーには Red-Black Successive Over-Relaxation (SOR) 法を用い，内部反復回数は 100 回で固定した．

離散化は，コロケート等間隔直交格子を用いて，空間に二次精度中心差分，時間に一次精度陽的 Euler 法を適用し，物理条件の制約として計算安定を満たす条件 ($CFL < 1$，格子 $Pe < 2$) にて時間発展計算を実施した．

また，多孔率 (式 (3)，(6)) の計算では，ゼロ除算を防ぐために，解に影響を与えない十分小さな値として $\varepsilon_{\min} = 10^{-6}$ を導入した修正式

$$\varepsilon = \frac{1-\varepsilon_{\min}}{2}\tanh\left(\frac{\xi}{\Delta}\right) + \frac{1+\varepsilon_{\min}}{2}\ , \tag{7}$$

$$\varepsilon = \frac{1-\varepsilon_{\min}}{2}\tanh\left(\frac{|\xi| - d_s}{\Delta}\right) + \frac{1+\varepsilon_{\min}}{2} \tag{8}$$

を用いた．なお，本研究で使用した IB-NS ソルバーのソースコードは公開されているため，関心の方にはご利用いただきたい [6]．

3．画像を用いた流れシミュレーションの実装

3.1 閉じた境界を用いた外部流れシミュレーション

本研究では，3 次元画像から表面モデルを生成するための簡易的なスキャンアプリケーションとして Scaniverse[12] を用いた．また，iPhone Pro 14 をセンサデバイスとして活用した．計算対象は，図 2 (a) に示す銅像 (Auguste Rodin, Stanford University Museum of Art) を用いた．Scaniverse を用いたスキャン (図 2 (a)) 後，STL 形式への出力を行った．この STL ファイルについて，Blender[1] にて頂点数の削減および閉局面化を行い，修正された表面データ (図 2 (b)) を得た．得られた表面データについて，符号付き距離関数を計算し，式 (7)より多孔率分布を算出した．ただし，計算では $\Delta/dx = 1.5$ となるように設定した．

計算格子数は $88dx \times 185dy \times 255dz$ ($dx = dy = dz$) であり，計算条件は，計算領域外周に迎角 0°の一様速度流入 (左)，一様圧力流出 (右) および周期条件 (上下左右) を，境界領域には壁面 nonslip モデル (式 (5)) を課した．物体領域は多孔率分布で定義されているので，付加的な条件は必要としない．また，物理条件は，物体高さを代表長としたとき $Re = 128$ 程度となるように設定し，時間刻み $\Delta t = 1.0\times10^{-3}$ s として 2.3 節で述べた数値計算手法にて 10000 step の時間発展計算を実行した．

以上の計算結果を図 3 に示す．図 3 では，固体の代表界面として，$\varepsilon = 0.5$ の等値面上に圧力分布を示したものと，流線分布を可視化している．

(a)Colored point cloud data

(b)Processed surface data

Fig. 2 Image data acquired using Scaniverse (a) and processed surface data (b)

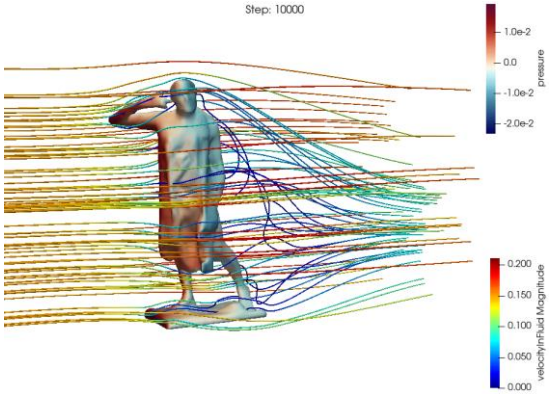


Fig. 3 Visualization results of external flow streamlines and surface pressure distribution around the bronze statue

3.2 開いた境界を用いた内部流れシミュレーション

本節では，著者ら研究室内を対象として，開いた表面データに対する計算例を紹介する．室内のように内部から画像データを取得する場合，前節のように閉じた表面データを生成することが難しい．そこで，得られた表面データを閉じずに，2.2 節で述べた手法を用いて，内部気流計算を試みた．

まず，計算対象となる室内の 3 次元画像から得られた色付き点群を図 4 に示す．前処理として，Scaniverse から PLY 形式への出力を行い，CloudCompare[2] を用いて不必要な点群のトリミングおよび STL 出力を行った．その後，図 5 に示すように，流入出境界条件を ε の値で制御するため，Blender[1] にて周囲に開口部（赤・青領域）を設けたオブジェクトを追加し，計算用の表面データを作成した．得られた表面データについて，距離関数を計算し，式 (8) より多孔率分布を算出した．ただし，$d_s = 3.0$, $\Delta/dx = 1.5$ と設定した．

計算格子数は $305dx \times 511dy \times 115dz$ ($dx = dy = dz$)であり，計算条件は，図 5 に示すように天井部（青領域，(i) - (iii) ）から迎角 0°の一様速度流入，ドア部(赤領域)に一様圧力流出，それ以外の領域を速度 0 m/s の壁条件とし，境界領域には slip モデル ($\varepsilon \mathbf{f} = 0$) を課した．物体領域は多孔率分布で定義されているので，付加的な条件は必要としない．また，物理条件は，高さを代表長としたとき $Re = 170$ 程度となるように設定し，時間刻み $\Delta t = 5.0 \times 10^{-4}$ s として 2.3 節で述べた数値計算手法にて 5000 step の時間発展計算を実行した．

以上の計算結果を図 6 に示す．図 6 では，固体の代表界面として $\varepsilon = 0.2$ の等値面と流入口からの流線を可視化している．図 6 より，流入口から流出口に向かった流れ場が確認できる．

Fig. 4 Indoor image data (colored point cloud) of acquired using Scaniverse

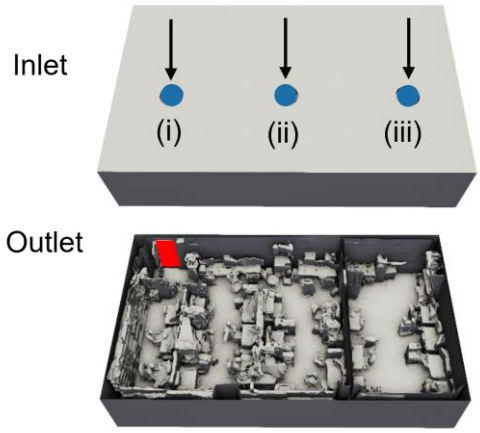


Fig. 5 Processed surface data showing inlet (blue)/outlet (red) condition locations

4. 結論

以上，固体境界が埋め込まれたナビエ・ストークス方程式を用いて，3 次元画像データから得られる点群を用いた流体シミュレーションの実装例が示された．本研究が提案する画像データを活用した流体シミュレーション手法は以下をもたらす．

- 複雑形状に対しても簡易な前処理のみで流れシミュレーションが可能となる．

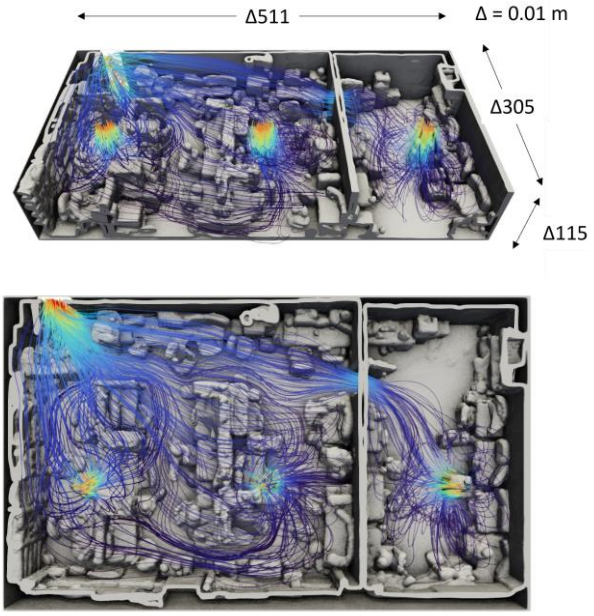


Fig. 6 Visualization results of streamlines and representative interfaces (ε = 0.2) for indoor airflow analysis

・ 穴の開いた表面データなどにも適用でき，表現の自由度が高まる．

今後は，より実用的な条件での解析のため，ソルバー処理にて計算速度の向上を目的とした並列化処理，収束性の向上を目的とした階層型格子の導入を試みたい．

謝　　辞

本研究は北海道大学 工学教員研究センター f3 プロジェクトの支援を得て行われた．記して謝意を表す．

参 考 文 献

1) Blender, < https://www.blender.org/ >, (accessed on 19 June 2024)
2) CloudCompare, < https://www.cloudcompare.org/ >, (accessed on 19 June 2024)
3) Ishida, T., Takahashi, S. and Nakahashi, K.: Efficient and Robust Cartesian Mesh Generation for Building-Cube Method, Journal of Computational Science and Technology, Vol.2, No.4 (2008) pp. 435-446.
4) Maragkogiannis, K., Kolokotsa, D., Maravelakis, E. and Konstantaras, A.: Combining terrestrial laser scanning and computational fluid dynamics for the study of the urban thermal environment, Sustainable Cities and Society, Vol. 13 (2014) pp. 207-216.
5) Nakamichi, N., Cho, Y. and Oshima, N.: Image-data-driven Simulation of Fluid Dynamics: Proposal and Evaluation, (Submitted to Mechanical Engineering Journal), (2024a)
6) Nakamichi, N., Cho, Y. and Oshima, N., PixelFlow, < https://github.com/nobu-n2002/PixelFlow >, (accessed on 17 April 2024b).
7) Olsson, E. and Kreiss, G.: A conservative level set method for two phase flow, Journal of Computational Physics, Vol. 210 (2005) pp. 225-246.
8) Onishi, K. and Tsubokura, M.: Topology-free immersed boundary method for incompressible turbulence flows: An aerodynamic simulation for “dirty” CAD geometry, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 378 (2021) p. 113734.
9) Oshima, N.: A Novel approach for wall-boundary immersed flow simulation: proposal of modified Navier-Stokes equation, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 18, No. 4 (2023) p.23-00192.
10) Oshima, N.: A Novel approach for wall-boundary immersed flow simulation (part 2: modeling of wall shear stress), Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 19, No. 3 (2024) p.24-00062.
11) Roma, A.M., Peskin, C.S. and Berger, M.J.: An adaptive version of the immersed boundary method, Journal of Computational Physics, Vol.153, No.2 (1999) pp. 509-534
12) Scaniverse, < https://scaniverse.com/ >, (accessed on 18 June 2024)
13) Takeda, R., Sato, F., Yokoyama, H., Sasaki, K., Oshima, N., Kuroda, A., Takashima, H., Li, C., Honda, S. and Kamiya, H.: Investigations into the Potential of Using Open Source CFD to Analyze the Differences in Hemodynamic Parameters for Aortic Dissections (Healthy versus Stanford Type A and B), Annals of Vascular Surgery, Vol. 79 (2022) pp. 310-323.
14) Wakisaka, E., Kanai, S. and Date, H., Model-based Next-best-view Planning of Terrestrial Laser Scanner for HVAC Facility Renovation, Computer-Aided Design and Applications, Vol. 15, No. 3 (2018) pp. 353-366
15) Watson, J., Mac Aodha, O., Prisacariu, V., Brostow, G. and Firman, M.: The temporal opportunist: Self-supervised multi-frame monocular depth, In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, (2021) pp. 1164-1174