

室内温熱環境設計フィードバックのための CFD と AR の統合 - 緑化を対象にして -

○横井 一樹^{*1} 福田 知弘^{*2}
矢吹 信喜^{*3} Ali Motamedi^{*4}

キーワード：室内緑化 室内温熱環境 設計フィードバック Computational Fluid Dynamics (CFD)
Augmented Reality (AR)

1. はじめに

建築分野において、省エネルギーの推進や居住者の健康の配慮から温熱環境に関するリノベーションが注目されている。室内温熱環境は居住空間での快適性を満たすために重要であり、施主が設計の初期段階で間取りと耐震性能の次に重視している項目である。しかしながら、設計前の重要度が高いにも関わらず、施工後の満足度が低いというギャップのある項目となっている¹⁾。

この一因として、施主が十分に室内温熱設計に関する議論に参加できていないという問題がある。理由の一つに、建築の設計プロセスが主に Water-Fall (WF) モデルに従っている点が挙げられる。WF モデルは、時系列的に分割された工程を上流から下流へと手戻りすることなく進める開発手法である。WF モデルにおいて温熱設計は下流工程に分類されるため、施主は設計に介入しづらく、また大規模な設計変更が難しい。他方、新しい開発手法として Integrated Project Delivery (IPD) が近年注目されている。IPD は、設計の初期段階から施主や設計者といったステークホルダーが協調的に設計を議論することで、建築プロセスを最適化しようとする概念である。IPD の実現には Building Information Modeling (BIM) が必要不可欠になっている。BIM は、建築物の三次元モデルに属性情報を付与してデータを一元的に管理するため、あらゆるデータが BIM と連携していることが望ましい。しかしながら、建築物の温熱環境を解析する代表的なツールである Computational Fluid Dynamics (CFD) シミュレーションソフトは、解析結果の可視化に BIM の三次元モデルを活用していないなど、BIM との連携がなされていない。

また施主が温熱設計に十分に参加できていない、別の理由として、CFD の解析結果が理解しがたいという点が挙げられる。CFD は膨大な数値情報であり、専門性のない施主には結果を空間的に把握することは困難である。既往研究ではゲームエンジンを用いた Virtual Reality (VR) によってフォトリリスティックな CFD の可視化手法が提案されている²⁾。しかし、VR は空間すべてが Computer Graphics (CG) で構成されるため、現実空間とのつながりが無いという課題がある。一方で、現実空間に CG を重畳する技術である Augmented Reality (AR) を用いた CFD

の可視化は、現実空間とのつながりを保持しつつ、結果を提供することができる³⁾。また、AR は現実空間として既設建築物を利用するという点で、リノベーション検討の際に応用が期待される。

一方、室内温熱環境改善の手法の一つとして、居住空間に植物を配置する「室内緑化」が注目されている。植物は窓際配置をすることで気温を調整する効果や、植物の蒸散作用によって湿度を保つ効果がある⁴⁾。加えて、ストレスの緩和などの心理的效果や、空気浄化などの衛生面での効果もあり、緑化の導入が広まっている⁵⁾。

そこで本研究では、施主を含めたステークホルダーによる協調的な室内温熱設計の実現を目的に、BIM と CFD と AR の統合システムを開発した。また室内緑化を対象としたケーススタディーを実施して、室内温熱設計の検討を行った。

2. システム構成

2.1. 概要

提案するシステムでは、BIM と CFD と AR を統合する。システムは、以下の 5 つのステップで、「BIM モデルの作成」「メッシュ生成」「境界条件の設定」「CFD による解析」「AR による可視化」から構成される (図 1)。そして緑化範囲の変更などの設計変更によって解析・可視化結果が変更される。以下に各ステップの詳細を記述する。

まず、図面を基に Revit や ArchiCAD などの BIM ソフトウェアを用いてモデルを作成する。次に、作成された BIM モデルからボリュームメッシュを作成する。境界条件の設定では、壁の材質による熱流束の情報や、空調の風量や風向を設定する。次に、設定した境界条件を基に、定常状態の CFD 解析を行う。そして、その解析結果を現実の室内環境に AR で可視化する。

2.2. CFD による解析

CFD 解析は、非圧縮性のニュートン流体と仮定し、定常状態の熱流体解析を行う。CFD の基礎式には、非圧縮ニュートン流体の運動方程式、連続の式、熱の保存則を用いる。さらに、基礎式中の拡散項を決定するために、 κ - ϵ モデルに基づき、乱流エネルギーと乱流消散率の輸送方程式を基

礎式に加える。また、温度差により生じる浮力の影響を考慮するために、ブジネスク近似により密度の温度依存性を取り入れる。加えて、ASHRAE Fundamentals 2009 Handbook⁶⁾に基づいて、湿度の計算を考慮する。

2.3. AR による可視化

本システムでは、緑化範囲に応じて気温、風量、風向、湿度を、AR を用いて可視化する。緑化は、室内壁面緑化を想定する。気温、風量、風向は、空間の XYZ 方向にそれぞれ切断した断面に表現する。風向に関しては空間全体で流線表示も行う。湿度は、状態方程式に基づいた体積一定の計算により一様な値が計算されるため、結果は数値データとして表示する。

また、施主らがより理解しやすい指標とするため、CFD 解析された気温と湿度に基づいて、インフルエンザウイルスの生存率⁷⁾を算出してヒートマップとして表示する。加えて、景観検討も考慮して壁面に配置された植物を、AR 上に表示する。

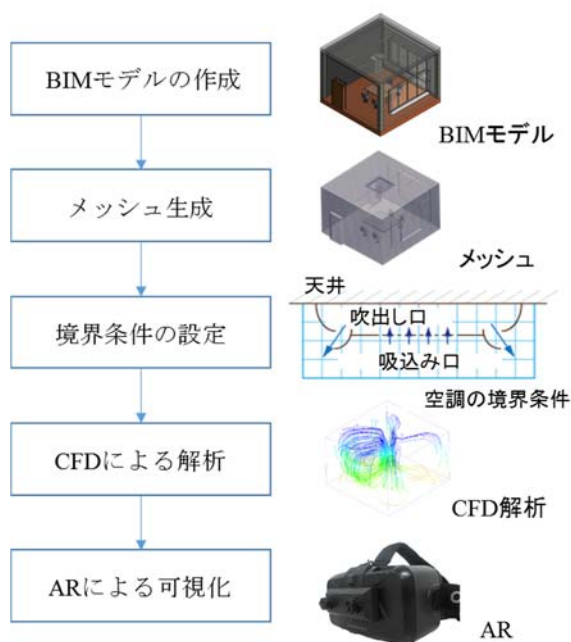


図 1 システム構成

3. 実験

3.1. プロトタイプシステムの構築

CFD 解析には、OpenFOAM Version2.4 を DEXCS for 2015 を用いて使用した。DEXCS は、Computer Aided Engineering (CAE) のオープンソースソフトウェアを統合したオールインワンシステムである。OpenFOAM は、General Public License (GPL) の下で配布されているため、ソルバーや境界条件、また出力結果を追加・変更することが可能である。建物モデルは、BIM ソフトウェアの Autodesk Revit Architecture 2016 を使って作成した。作

成されたモデルは Revit で IFC ファイルとして出力した後、SketchUp 2016 で STL フォーマットに変換して OpenFOAM に入力した。入力したモデルは、CFD 解析を行うためにメッシュを生成した。メッシュは、blockMesh ソフトを用いてモデルを囲む直方体をベースとしたメッシュを作成した。OpenFOAM で CFD 解析を行った後は、VTK ファイルとして出力し、ゲームエンジンである Unity (Version.5.3.2.f1) に入力した。

3.2. 実験機材

実験は、大阪大学吹田キャンパス M3 棟 403 号室で実施した（図 2）。部屋の大きさは、奥行き 6.5m×間口 4.3m×天井高 2.7m である。AR のための幾何マーカーは、サイズが 0.75m 四方で部屋の中央付近、高さ 0.8m の机の上に設置した（図 3）。また、部屋の入口付近には椅子を用意した。Head Mounted Display (HMD) は、ビデオシースルー型の Oculus Rift Development Kit 2 に AR 用 OVRvision Pro を装備した（図 4）。気温や風向モデルの切り替えなどのシステム操作には、ゲームパッドとして Logicool f710 を使用した。ユーザーは視線をマーカーと水平の状態を着席して AR を視認する。HMD は通常のディスプレイやタブレット端末と比較して広視野角（H:100°, V:98°）であり、特に上下の拡がり確保できている。

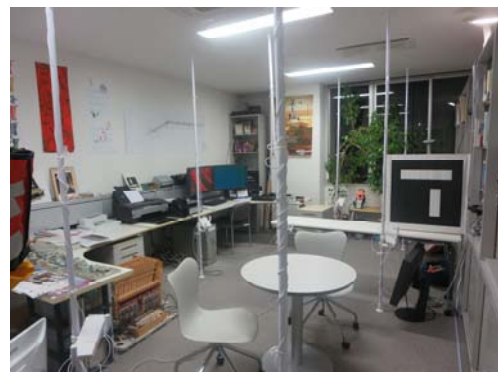


図 2 M3 棟 403 号室（実写）

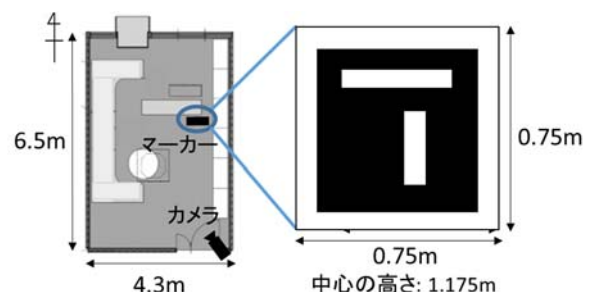


図 3 幾何マーカーのサイズと位置



図 4 HMD とゲームパッド

また、CFD 解析を行うための 403 号室の空調の境界条件は表 1 の通り設定した。また、温度に関して西側壁面の境界条件は熱流束 5.5W/m^2 、温度 300K に設定し、外部温度は日本の夏を想定して 300K とした。

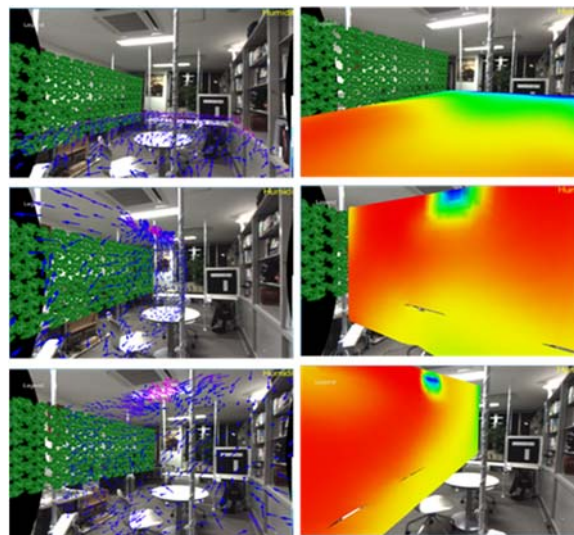
表 1 空調の境界条件

	各吹出し口	吹込み口
温度 (K)	293	勾配 0
風向の角度 (°)	30.67	270
圧力 ($\text{kg/m}\cdot\text{s}^2$)	勾配 0	101325
風速 (m/s)	1.52	1.5
乱流エネルギー (%)	10	10
乱流消失率 (m^2/s^3)	1	1
渦動粘性係数 (m^2/s)	0	勾配 0

3.3. 結果

開発したシステムにより、403 号室の西側の壁面全体をコウライシバで緑化することを想定して、室内温熱環境を解析・可視化した結果を図 5 に示す。

温熱環境を表現する CG モデルは、風向きを矢印記号、気温をヒートマップにより表現した。風向きを表す矢印記号は、風の速度に応じて色付けされており、速い場合を赤、遅い場合を青とした。空調付近では気温、速度ともに赤色を示すことから、気温が高く、風の速度が速いことがわかる。湿度は、数値データを画面右上に表示した。また、気温と湿度を基に算出したインフルエンザウィルスの生存率を表すヒートマップを表示した（図 6）。結果より、室内のウイルス生存率が 0% から 4% の間であることがわかる。



(a) 風向と風量 (b) 気温
図 5 AR による温熱環境の表現

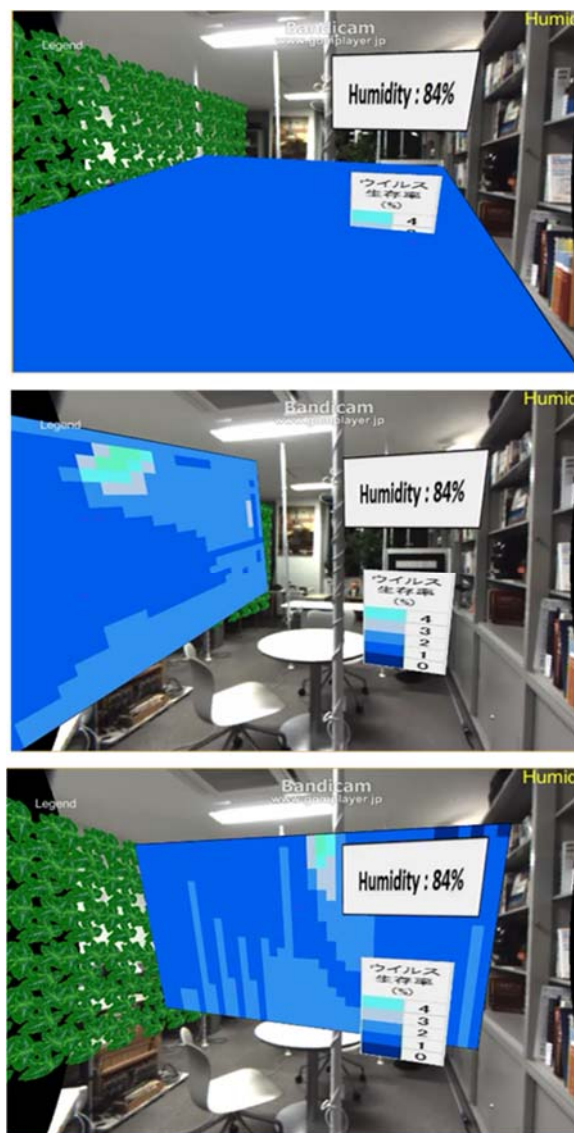


図 6 インフルエンザウイルス生存率表示

一方、AR 表示した CG モデルの位置合わせには課題が残った。CG モデルは天井や壁と完全に一致しているわけではなく位置合わせにズレが生じた。位置合わせの検証として、10 枚の写真から CG モデルの窓と実際の窓の位置の差を計測した結果、水平方向で 22.02 pixel、垂直方向で 9.37 pixel の誤差が生じた。理由としてカメラがマーカを正しく認識できなかったことが推察される。HMD を装着したユーザーが室内を見回した際に、HMD のカメラがマーカの視認範囲から出た場合、その後再びマーカを認識する際にトラッキングの問題が生じたと考えられる。また、実験ではカメラによるマーカ認識を向上させるために棚の上に照明を設置しているが、照明がない場合は AR 表示がされなかったことから、室内の光条件も影響すると考えられる。

その他にも、ゲームパッドによるシステムオペレーションに関して、操作に不慣れなユーザーが、HMD を装着しているために手元が視認できず操作を間違えるといった課題が残った。

4. 結論と今後の展望

本研究では、施主を含めたステークホルダーによる協調的な室内温熱設計を実現するために、BIM、CFD、AR を統合した室内温熱環境設計支援システムを開発した。本システムでは、室内緑化の範囲に応じて室内空間の気温・風量・風向・湿度を計算して、解析結果を空間内に可視化した。

本システムは、温熱環境把握のための CFD 解析に、IPD の実現に必要な不可欠な BIM モデルを用いることで協調的な設計プロセスの実現に貢献した。また、AR を用いた CFD 解析結果の可視化は、ユーザーに通常は不可視である温熱環境に対する直観的な理解を促進できることを確認した。ビデオスルー型の HMD の利用により没入感のある AR を実現した。VR の代わりに AR を用いたことで全ての CG モデルを高い詳細度で作成する必要がなくなり、システム開発にかかる時間的コストを削減できた。そして、リノベーションとしての室内緑化を対象としたケーススタディーによって、植物モデルの重量による意匠設計としての景観検討に加え、温熱環境モデルの重量による温熱設計検討ができることを示した。

今後の展望としては、ユーザーが室内を見渡せるようにマーカレス AR の利用を検討する。また、緑化効果を総合的に評価できるように、CFD 解析に日射モデルを加えた計算を検討する。さらには、空気浄化や防音などの効果も示すことが期待される。また、オペレーション問題の解決として Leap Motion などのハンドトラッキングによるシステム操作を検討する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP26-04368, (公財) 能村膜構造技術振興財団の助成を受けた。

[参考文献]

- 1) 前真之：(2014), エコハウスのウソ・ホント, p.17, <http://www.city.yokohama.lg.jp/kenchiku/shidou/kankyo/casbee/todokede/shiryo/kankyo-seminar2014-1.pdf>, 2016.10.04 閲覧
- 2) Hosokawa, M., Fukuda, T., Yabuki, N., Michikawa, T. and Motamedi, A. (2016). Integrating CFD and VR for indoor thermal design feedback, Conference: The Association for Computer-Aided Architecture Design Research in Asia, 663-672.
- 3) Yokoi, K., Fukuda, T., Yabuki, N., and Motamedi, A. (2016). Integrating CFD and AR for indoor thermal design feedback. Proceedings of the 11th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia, A-4-4, 111-114.
- 4) 仁科弘重, 川西高司：(1999), 観葉植物が室内の温熱環境および温熱快適性に及ぼす影響, 生物環境調節 37, no. 1.
- 5) 仁科弘重, 松本博, 宮崎良文, 飯島健太郎, 伊藤孝巳：(2015), これからの室内緑化・マニユアル・壁面緑化を中心として-, 78-110.
- 6) American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2009). ASHRAE Handbook - Fundamentals (I-P Edition), 1-1008.
- 7) Harper, G. J. (1961). Airborne Micro-Organisms: Survival Tests with Four Viruses. The Journal of Hygiene 59, no. 4, 479-486.

-
- *1 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 博士前期課程 2 年
 - *2 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 准教授 博士(工学)
 - *3 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 教授 Ph.D.
 - *4 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 JSPS 外国人特別研究員 Ph.D.