

(22) AR による三次元 FEM 解析結果の可視化

山口 麗華¹・上田 純広¹・山沢 哲也¹・大家 史¹

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

E-mail: yamaguchi-re@kajima.com

CIM (Construction Information Modeling) や三次元 FEM 解析の発展に伴い、土木分野においても三次元情報が増加・複雑化している。その中で生産性向上の観点から、設計・解析の情報を、現場や実験における計測結果と比較・分析するための簡単に誰でも使えるオールインワンな可視化手法が必要である。本研究では、仮想的に現実世界を拡張する AR (Augmented Reality) 技術を用いて、CIM モデルと三次元の解析結果を iPad で表示可能なアプリケーションの開発を行った。本稿では、CIM モデルと三次元解析結果を現地で AR 表示するために開発したアプリケーションの概要を紹介するとともに、地上および地下構造物 (二重鋼管グラウト接合部載荷実験および地盤凍結実験の試験体) への適用結果について報告する。

Key Words: augmented reality, construction information modeling, 3d FEM analysis, visualization toolkit

1. はじめに

近年の CIM (Construction Information Modeling) や三次元 FEM 解析の発展により、土木分野においても三次元情報が増加・複雑化している。現地一品生産の特徴を有する土木分野では、形状に留まらず設計情報や解析情報を現地で確認し、現場や実験で得られる計測結果と比較・分析することが、施工中の品質マネジメントや生産性の向上に繋がると考えられる。現状では紙ベースでの二次元的な確認が主流であるが、確認したい箇所を目視出来ない場合も多く、構造物との比較・検討や任意箇所の解析結果のタイムリーな確認が難しいといった課題がある。そのため、簡単に誰でも使えるオールインワンな可視化手法が求められている。

AR (Augmented Reality: 拡張現実感) 技術¹⁾は、カメラに映る現実世界に CG (Computer Graphics) などの情報を重畳することで、仮想的に現実世界を拡張する可視化技術である。CG で構成された仮想の世界に没入する VR (Virtual Reality: 仮想現実) と比較して、AR は表示させたいモデル以外の周辺環境をモデリングする必要が無く、またスマートフォンなどのモバイル端末で利用可能であることから、ゲーム分野を中心に幅広い分野で急速に普及が進んでいる。土木分野においても AR の活用により、実寸大で CIM モデルや三次元解析結果を現地で構造物に重ね合わせて検討を行うことが、施工中の品質マネジメントや生産性の向上に繋がると期待される。しかし、設計・解析の多様な情報を AR で扱う手法が確立されて

いないことから、現状では三次元モデル形状のみを用いた部分的な景観検討などの限定的な利用に留まっている。

そこで本研究では、AR 技術を用いて、CIM モデルと三次元解析結果を iPad で表示可能なアプリケーションの開発を行った。本稿では、CIM モデルと三次元解析結果を現地で AR 表示するために開発したアプリケーションの概要を紹介するとともに、全体が目視できる地上構造物の実験と直接目視できない地下構造物の実験を対象にその適用性検討結果を報告する。

2. 開発アプリケーション

(1) 概要

開発した AR アプリケーションでは、CIM モデルと三次元解析結果を可視化対象としている。AR が大きく発展したゲーム分野と比較すると、土木分野では、可視化対象のモデルが大規模で、非 GPS 環境における地下構造物を対象としたアプリの使用も想定される。また、各種解析プログラムから出力される三次元解析結果の形式は様々であり、一般的には直接 AR に適用することが出来ない。これら土木特有の課題に対応するため、大規模な可視化対象においても、移動しながら視点を変えて AR 表示が可能となるよう「ジャイロ・加速度センサを用いた iPad の位置・姿勢追従機能」、「解析結果を AR に適用出来るような三次元モデル化」、「GPS に依存しない自己位置合わせ機能」をアプリケーションに実装し

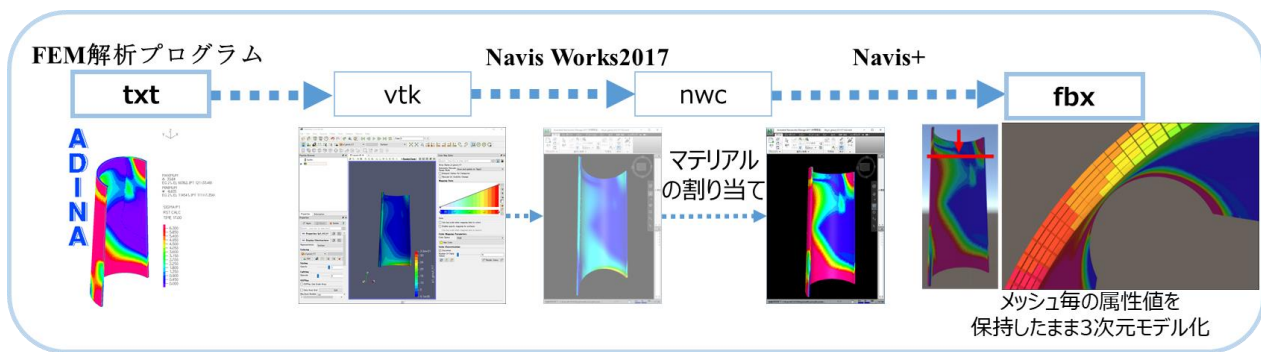


図-1 三次元解析結果変換フロー

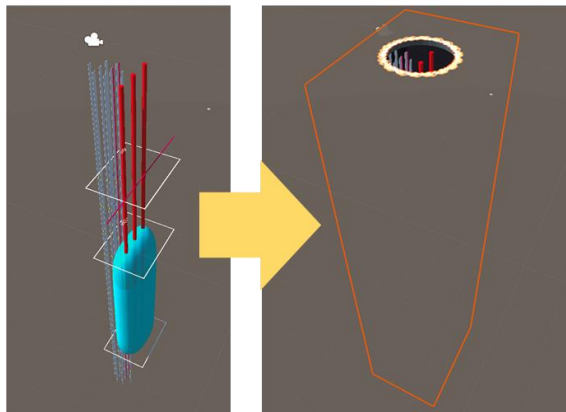


図-2 地下表現の実装

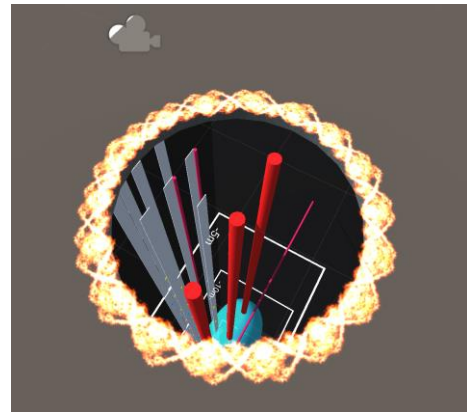


図-3 覗きこみ地下の様子を確認

た．自己位置合わせ機能は、カメラに映る自然特徴量を用いた水平面認識手法およびマーカーを用いた相対的な位置合わせ手法を実装した．

開発は、三次元ゲームエンジンである Unity (Unity Technologies 社) を用いて行い、iPad の位置・姿勢追従、モデルの位置合わせの機能については、モバイル端末 AR 開発用の SDK (Software Development Kit) である Vuforia (PTC 社) と AR 開発用フレームワークである ARKit (Apple 社) をベースに構築した．

(2) 三次元解析結果と CIM モデルの変換

三次元解析メッシュの形状と属性値を保持したまま、開発環境の Unity で扱える三次元モデルとするために、FBX 形式に変換する必要がある．しかし、解析プログラムから、解析結果を直接 FBX 形式に書き出すことは不可能であるため、表形式のテキストで出力した結果を、三次元モデルの汎用可視化フォーマットである VTK (Visualization Toolkit) 形式に一度変換した後に、FBX 形式で出力した．

また、VTK は三次元形状と解析結果の情報のみを保持するため、コンターが複数の色情報を持つ場合には、Navisworks (Autodesk 社) を使用して、アドオンソフトである Navis+ (CTC 社) により、モデルにコンターの色情報を再度割り当てた (図-1) ．

構造物についても、設計図面から Revit (Autodesk 社)

および Civil 3D (Autodesk 社) により CIM モデル化し、FBX 形式で出力した．

(3) AR による地下表現

地下構造物を対象とした AR を検討する際、カメラで周辺環境の三次元空間情報を取得し、表示させたいモデルとの位置関係を把握した上で、手前にある物体が背後にある物体を隠すというオクルージョンを正確に反映したリアルタイムレンダリングを行うのが理想的である．もしオクルージョン処理をしなければ、モデルが周辺環境に重なる形でレンダリングされ、地面から浮いているような錯覚を起こしてしまう．

しかしその処理は複雑で、モバイル端末への実装は現状では難しい²⁾．そこで、視点が変わった場合も簡易にオクルージョン処理ができるように、予めモデルとの前後関係を指定した透明な面でモデルの周辺を覆うことで、地上に開けた穴を覗き込むようにして地下構造物を確認するような、視覚的にリアリティを持たせた地下表現手法³⁾を試みた (図-2, 3) ．

(4) ユーザーインターフェースの構築

三次元解析結果を検討する際、時系列変化を確認することが求められる．また、AR で表示させた地下構造物にユーザーが実際に近づいてその詳細を確認することは難しい．そのため、iPad 画面上にボタンやスライドバー



図-4 構造実験場での AR 適用の様子



図-5 試験体への AR 重畳
(CIMモデル・解析結果)

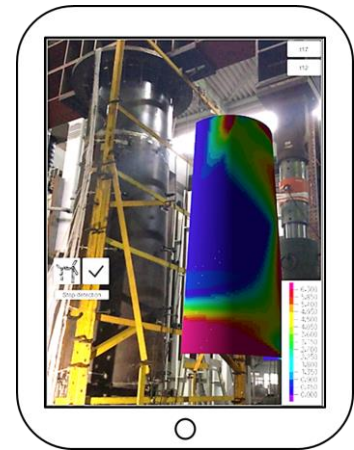


図-6 試験体と並べて AR 表示

を設置し、以下の機能を実装した。

- ・ボタンによる三次元解析結果の切り替え
- ・ボタンによるCIMモデルの表示非表示の切り替え
- ・スライドバーによる三次元解析結果の時系列変化確認
- ・スライドバーによる地下構造物の引き上げ

これにより、現地でAR表示・構造物への重畳を行いながら、現地の状況に合わせたインタラクティブでタイムリーな検討が可能となった。

3. 実験への AR 適用

開発した AR アプリケーションを、地上で目視できる二重鋼管グラウト接合部載荷実験と地下で直接目視できない地盤凍結実験を対象として CIM モデル・三次元解析結果を試験体に重畳させ、実際の実験状況との比較・検討を行った。それぞれについて実験概要と AR 適用の結果を述べる。

(1) 二重鋼管グラウト接合部載荷実験

a) 実験概要

本実験は、洋上風力発電タワーにおける二重鋼管接合部の設計・解析手法の妥当性を確認するための構造実験であり、JFEテクノロジー株式会社（千葉市）で実施した。三次元解析は、ADINAにより材料・境界非線形解析を実施し、主応力分布の結果を出力した。

現地では、iPadでARアプリケーションを起動し、iPadに付属するカメラを地面にかざすように動かすことで床平面を認識させた後に、CIMモデル・三次元解析結果をAR表示した。

b) AR 適用結果

実験場は室内のため、屋外と比較して暗い環境であったが、床平面の認識は可能であり、ARによるCIMモデル・三次元解析結果の表示ができた（図-4）。また、iPad画面の操作によりモデルを動かすことで試験体に重畳させたり（図-5）、試験体に並べて表示させたり（図-6）することで、実際に外観からは確認できない接合部に充填されているグラウトのひび割れが生じやすい箇所を確認しながら、載荷実験を行うことができた。

なお、一度試験体へ AR 重畳を行ってから iPad の位置・姿勢を変化させると、試験体と AR 重畳させたモデルがずれる不具合が生じることがあり、自己位置合わせ機能の改良が必要であることがわかった。

(2) 地盤凍結実験

a) 実験概要

本実験は、地盤凍結工法における凍結膨張の予測制御技術の向上に向けた実証実験であり、弊社機械部機械技術センター（神奈川県小田原市）で実施した。凍結深度は地下10～20mで、凍結管の周辺に測温管などの計器をそれぞれ深さ2m毎に配置した。自社開発コードGEOSSETにより凍結潜熱を考慮した三次元熱伝導解析を実施し、0℃等値面の三次元形状を出力した。

また予めUnity内でモデルとの相対位置関係、向きおよび大きさを定めたマーカーを現地の地表面に設置し、位置合わせを行った（図-7）。

現地では、iPadでARアプリケーションを起動し、iPadに付属するカメラでマーカーを読み取ることで、地中の実際の場所に凍結管、ステップ毎の事前解析結果（0℃等値面・測温管位置での温度）および各種計器の三次元モデルをAR表示した。



図-7 地盤凍結実験場ARマーカー設置位置

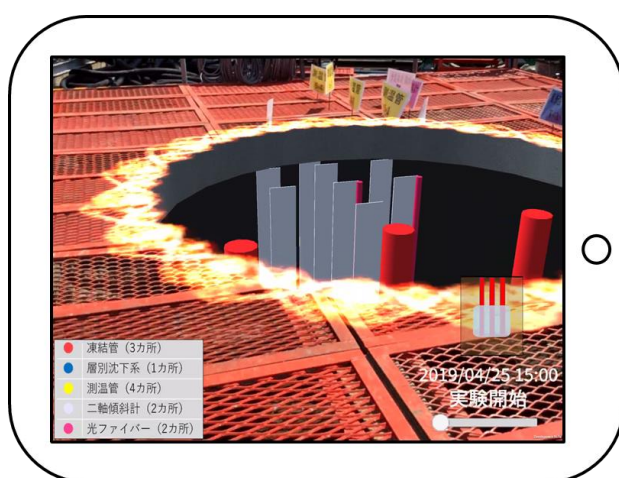


図-8 地盤凍結実験場でのAR適用の様子（地下表現）

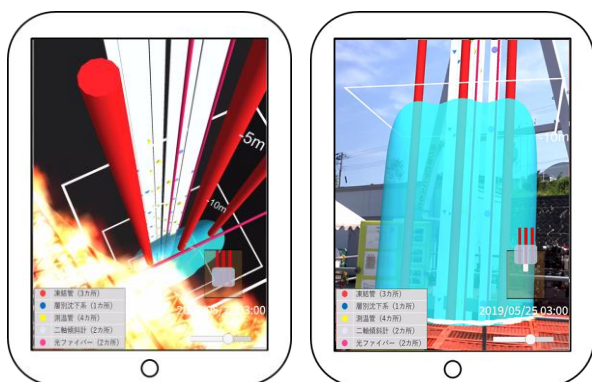


図-9 視点変化させ凍土厚をARにより確認
(左) 地下の覗き込み
(右) スライドバーによる引き上げ

b) AR 適用結果

実験場は屋外で十分に明るく、iPad カメラでマーカーを読み取った後、AR による凍結管、ステップ毎の事前解析結果（0℃等値面・測温管位置での温度）および各種計器の三次元モデルを、地中の実際の場所に表示する

ことが可能であった。また、2.(3)で記述した地下表現方法を事前に AR アプリケーションに組み込み、実際に地面に穴が開いているようなオクルージョンを視覚的に違和感なく表現することができた（図-8）。そして、iPad 画面の操作で適宜三次元解析結果を切り替えることで、経時的に凍土厚が変化する様子を、実験場内を移動しながら、様々な方向から視点を変えて確認することができた。また、モデルを地上に引き上げることで、解析結果の留意箇所を詳細に確認することができた（図-9）。

4. まとめ

本研究では、生産性向上の観点から、設計情報や解析情報を現地で視覚的に確認する手法として、iPad 上で CIM モデルと三次元解析結果を AR 表示可能なアプリケーションを開発した。そして、その有用性を確認するために、屋内および屋外実験場において AR 適用検証を実施し、CIM モデル・三次元解析結果の現地での AR 表示と試験体への重畳が可能であることを確認した。また、予め地下表現をアプリケーションに組み込むことで、地下構造物についても、浮いているような違和感なしに、モバイル端末による AR 表示が可能であることを確認した。その一方で、現場状況に合わせた自己位置合わせ手法や、事前のオクルージョン処理など、現地の状況に合わせた見せ方の検討が必要である。

今後の取り組みとして、日々変化する現場や実験の状況と解析結果との比較・検討を可能とするために、AR による計測結果のリアルタイムな可視化に取り組む予定である。

謝辞：本研究の実証にあたり JFE テクノリサーチ(株)石井氏、房前氏、軽部氏、山口氏、ケミカルグラウト株式会社相馬氏をはじめとする各位にご協力頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 矢吹信喜：土木建設分野における VR/AR の活用に関する研究と実務への適用，計測と制御，55(6)，pp.483-488，2016.
- 2) 平沢岳人：建築分野の複合現実感，精密工学会誌，83(6)，pp.509-513，2017.
- 3) Li, W., Han, Y., Liu, Y., Zhu, C., Ren, Y., Wang, Y. and Chen, G.: Real-time location-based rendering of urban underground pipelines, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(1), 32, 2018.