

# 施工現場における 地下埋設構造物のMR可視化システム

中央大学 藤 飛  
中央大学 檜山 和男  
九州先端科学技術研究所 吉永 崇  
五洋建設株式会社 琴浦 毅  
五洋建設株式会社 石田 仁  
中央大学 池田 直旺

## 1. はじめに

近年、AR・MR可視化技術は、建設分野における様々な分野・用途に対して適用が試みられている。中でも、地上から構造物を直接確認することができない地下構造物・埋設物の可視化は施工や維持管理等における諸作業を安全かつ効率的に行う上で有効であるといえる。

筆者らは、既往の研究において空間の3次元形状の認識と自己位置の推定を同時に行うSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術を搭載したスマートフォンを用いた地下構造物・埋設物のAR可視化システムの構築を行ってきた<sup>?)?)</sup>。しかしスマートフォンによるAR可視化は、画面が小さく、また可視化を行う際に手が塞がってしまう、という使用上の問題点がある。

一方、近年同じくSLAM技術を有する装着型MRデバイスとして、Microsoft社の光学シースルーヘッドマウントディスプレイ HoloLens が注目されている。HoloLensは頭部に装着するタイプのデバイスであり、利用者自身の視界の上にCGのみが重畳されるため描画の遅延等による違和感が少なく、また両手が自由となるため建設現場での安全性にも優れるという利点が挙げられている<sup>?)</sup>。

そこで本報告では、装着型のMRデバイスに着目して重畳の精度を向上させる手法および有効な可視化に関する提案を行い、地下埋設構造物等の施工・維持管理等における支援システムとしての有用性を検討する。具体的には、屋内の事例として設計図面上へのCADモデルMR可視化、屋外の事例として建設現場における地下構造物・埋設物のMR可視化にそれぞれ適用した。

## 2. 開発環境

本研究では、HoloToolkit-Unity-2017.4.17f1ライブラリを用いたMR可視化システムの構築を行う。開発環境はUnity 2017.4.17f1(64-bit)を使用し、プログラミング言語はC#を用いた。

HoloToolkitは、Microsoft社が公開しているHoloLensをUnityで扱いやすくするためのライブラリ的なものである。アセット(.unitypackage)パッケージとして、そしてUnity Package Managerを通して利用が可能となり、UnityでのクロスプラットフォームMRアプリ開発を加速するために使用される<sup>?)</sup>。

HoloLensとは、Microsoft社が開発しているヘッドマウントディスプレイ(HMD)方式の拡張現実ウェアラブルコンピュータである。また、HoloLensの仕様を図-1に示



HoloLensの仕様

OS	Windows 10
プロセッサ	Intel Atom 32bit Microsoft Holographic Processing Unit(HPU 1.0)
内蔵センサーとカメラ	深度センサー 環境光センサー RGBカメラ 2MP photo/HD ビデオカメラ 環境認識用のカメラ 慣性計測ユニット(IMU) など
ストレージ	64GB
メモリー	2GB
重量	579g

図-1 HoloLens

している。HoloLensは本体に環境認識用のカメラ、深度センサー、慣性計測ユニット(IMU)など複数のセンサーを搭載されている。センサーによる測定値を総合的に判断し、各種センサーを組み合わせることで、周辺環境を高精度かつリアルタイムに検出すると同時にトラッキングを実現している。また、ハンドジェスチャーや音声認識にも対応しており、視線移動によりカーソルを動かす事ができ、ハンドジェスチャーでマウスのクリック操作に近い事ができる。また音声でも基本メニューを指示することが可能となる。これにより、ハンズフリーでの操作が可能になる<sup>?)?)</sup>。

また、画像認識技術にはVuforia SDKのImage Targets機能を用いて構築を行った。Vuforiaとは、PTC社が提供するAR・MRアプリケーションを作成するためのライブラリであり、平面マーカーだけでなく、立体マーカーや3Dモデル、クラウドでの認識なども可能である<sup>?)</sup>。

## 3. 本システムの概要

本研究で構築したHoloLensを用いたMR可視化システムのフローチャートを図-2に示す。また本システムではプリプロセスとメインプロセスに分かれている。各工程について以下に示す。

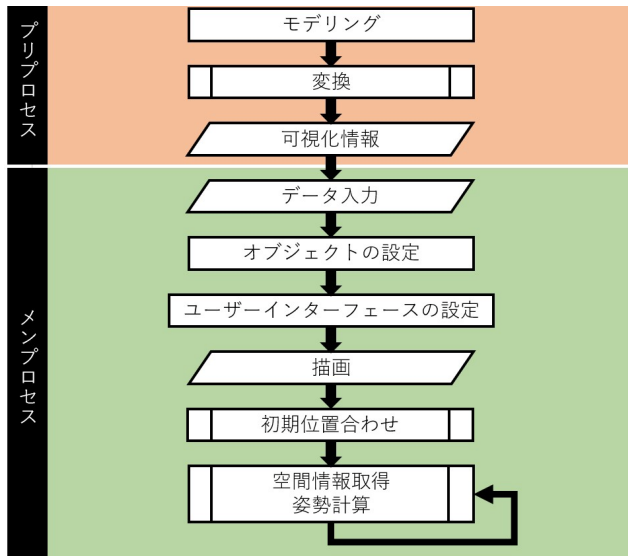


図-2 本システムのフローチャート

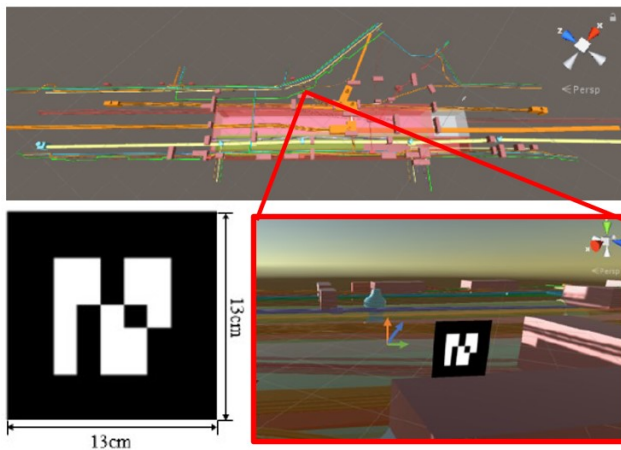


図-3 埋設構造物モデル

### 3.1 データ入力

可視化情報であるCG映像は、図-3に示すように、地下構造物・埋設物のAutoCADデータ3Dモデルである。3Dモデルを統合開発環境のUnityに読み込ませることで描画が可能となる。

マーカー画像として図-3に示すように、0.13m × 0.13mのQR Code画像を使用する。こちらの画像をVuforiaのTarget Managerを通してマーカー画像に変換し、これをダウンロードする。なお、VuforiaのTarget Managerとは、オンライン上でターゲットとするマーカー画像データを生成し、それを管理するものである。また、VuforiaのTarget Managerの機能として、マーカー画像中の特徴点を認識する機能がある。マーカー画像の特徴点を元に、MR可視化表示の際のトラッキングが行われる<sup>2)</sup>。

### 3.2 オブジェクトの設定

図-3は入力した可視化情報をUnityに導入した様子である。HoloLensでは本体に搭載されている環境認識カメラによって現実世界の形状を把握し自分の位置を推定している。それによってUnityなどで現実空間に配置した

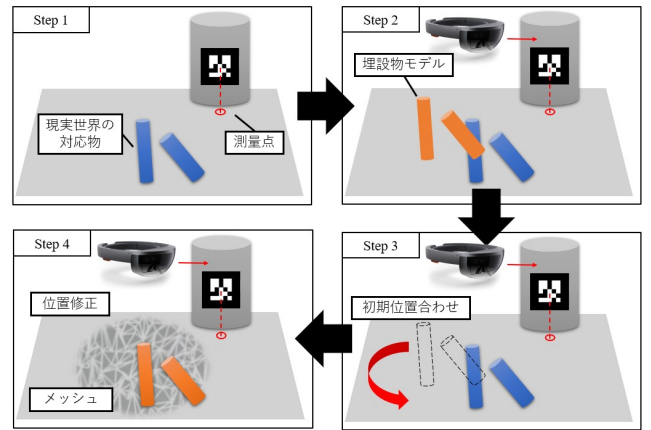


図-4 描画及び位置合わせ

オブジェクトはHoloLensが移動しても設置した場所にとどまることができる。しかしUnityを利用している場合にはアプリケーション起動時のHoloLensの位置を原点(0,0,0)とするため、HoloLensを別々の位置で起動しただけで位置が合わなくなってしまうという問題点があった。つまりMR可視化の際には、CG映像を現実空間に重ね合わせるため、MR可視化実行前にCG映像の描画位置を決定する必要がある。

本システムでは、CG映像の初期位置合わせ方法として、マーカー画像を用いて行う手法を用いた。Vuforia画像認識によるマーカーベースの位置合わせ方法ではHoloLensに環境認識カメラやジェスチャー認識カメラのほかにカラー映像を取得するカメラが搭載されており、このカラーカメラはUnityからでもアクセスでき、画像処理を行わせることもできる。画像処理によりマーカー認識を利用することで、固定されたマーカーを見るだけでオブジェクトを設置することができる。Unityでマーカー画像に対し、本システムを利用したい地点の座標値(x,y,z)を持たせる。画像処理Vuforiaライブラリを利用することで指定されたマーカーを認識し、そこからマーカーの位置、角度を求め位置とすることで位置合わせが行える。本位置合わせ手法では、起動位置によらず、位置合わせの成功率も高くなり、マーカー画像を再認識させれば初期位置がずれた場合でも補正が容易な面がある。

### 3.3 ユーザーインターフェースの設定

HoloToolkitは、MR体験を迅速に実現するためのツールコレクションである。本システムのユーザーインターフェースの設定として、正しく表示するためにHoloLensのSpatial Mapping、Air Tap機能を使用した。Spatial Mappingとは、アプリケーション起動中にユーザー周辺の空間をスキャンし、それらをメッシュ化した情報をアプリケーション内で利用を可能とする機能である。Air Tapとは、HoloLensがユーザーのを用いたハンドジェスチャー操作を認識した際に実行する処理を、Unityのスク립ト上で設定することを可能とする機能である。

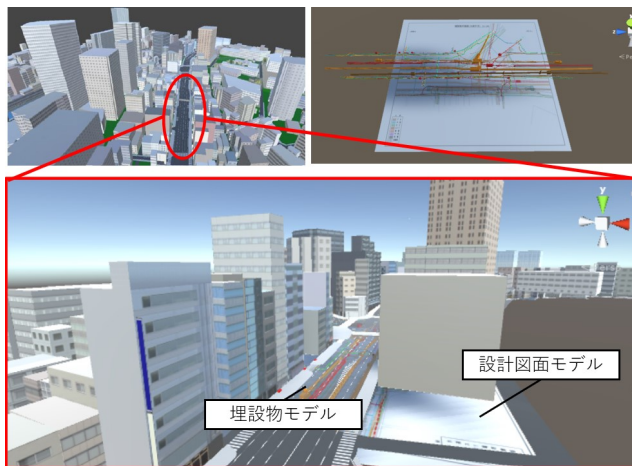


図-5 可視化情報 1

### 3.4 描画・位置合わせ

本システムの位置合わせの様子を 図-4 に示す。アプリケーション実行後、本システム測量点の座標を用いてマーカーを現地に設置し、読み込みを行う。設定したマーカー画像を検出して、その座標を 3D モデルに与えることで、重畳位置を決定する。その後 Spatial Mapping によりユーザー周辺の空間認識が行われ、周辺空間の形状を有したメッシュが自動的に生成される。ユーザーは、地面に生成されたメッシュ上に CG 映像を配置するのだが、このとき、配置したい箇所に Gaze で視線カーソルを合わせ、Air Tap で選択されたモデルを移動することで、空間メッシュと視線方向との接点上にモデルを配置することができる。本システムでは、Unity の Button オブジェクトを使用する。CG 映像の切り替えを選択するには、選択するボタンを Air Tap 直接見ながらする。

## 4. 可視化結果

本研究で構築した HoloLens による MR 可視化システムを用いて、屋内においては設計図面上への CAD モデル MR 可視化、屋外においては施工現場における埋設物の MR 可視化を行った。それぞれについて以下に説明する。

### 4.1 設計図面上への CAD モデル MR 可視化

#### 4.1.1 可視化情報

屋内における活用適用例として、紙媒体の設計図面上への CAD モデルの MR 可視化を行った。可視化情報を 図-5 に示す。図-5 に示す通り、可視化情報はある施工現場における地下埋設管・構造物及び施工予定の構造躯体をモデリングしたものと設計図面モデル、設計図面モデルと地下埋設管・構造物との位置関係を事前に考慮することで、図面と対応した位置に CAD モデルを重ねている、また、その地上部に当たる都市モデルからなる。

なお、ボタンメニューを 図-6 に示す、ボタンメニューの上によりそれぞれのボタン操作でモデルの表示非表示を切り替えることができるシステムを構築した。

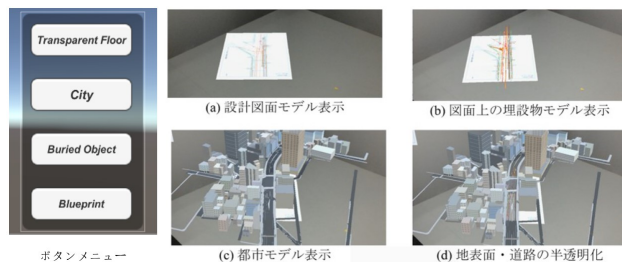


図-6 紙設計図面上への CAD モデルの MR 可視化



(a) 三脚を用いたマーカー (b) 固定構造物を用いたマーカー

図-7 屋外におけるマーカー設置

#### 4.1.2 可視化結果

設計図面上への CAD モデルの MR 可視化結果を 図-6 に示す。本適用例四つ部分になっており、一つは 図-6(a) 設計図モデルのみ表示する、もう一つは 図-6(b) に示す通り、設計図モデルに併せて CAD モデルを表示する。また、図-6(c) に示す通り、埋設物の地上部の都市モデルの表示の切り替えや、図-6(d) に示す通り、都市モデルの地表面・道路の半透明化の操作を可能としている。

従来、記録・長期保管できない紙媒体の設計図面では図面内に現実空間との位置関係が記載されているが、現実空間のどの位置なのか理解しづらいという問題点があった。本システムを用いる事による観察でき、様々な位置においても正しく重畳され続け、安定的な MR 可視化が行えていることも確認できる。これらにより、施工過程において実際に現場に行かずとも埋設物と地上空間との位置関係を把握し、より高度な合意形成を図ることが可能になる。また、実際の町の風景を再現した都市モデルと併せて表示させることで、より詳しい位置の把握を行うことが可能となる。

### 4.2 施工現場における埋設物の MR 可視化

#### 4.2.1 可視化情報

屋外における適用性の検討として、まず、施工現場における埋設物の MR 可視化を行った。用いたマーカー画像は 図-7 に示す通りである。既往研究では、図-7(a) に示したように、三脚によるマーカー設置を行ってきた。しかし、三脚によるマーカー設置では、手作業で位置と角度

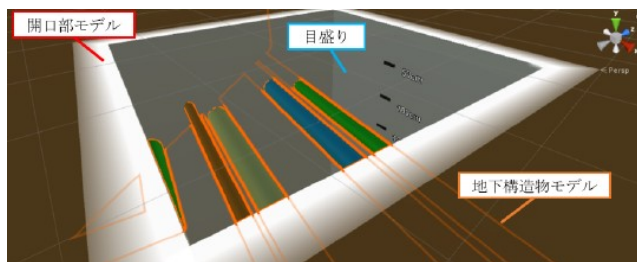


図-8 開口部モデル

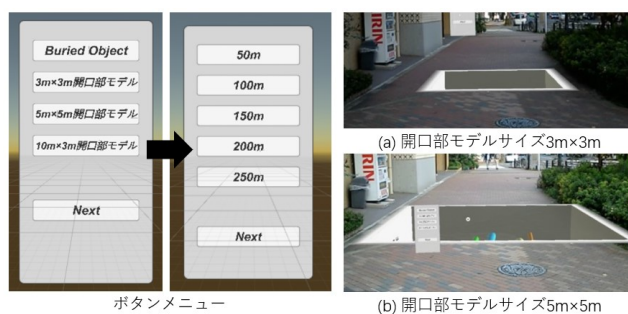
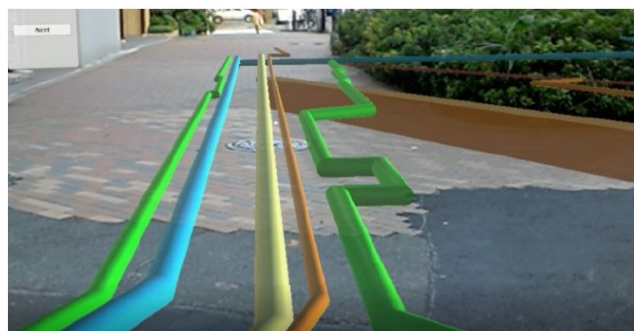
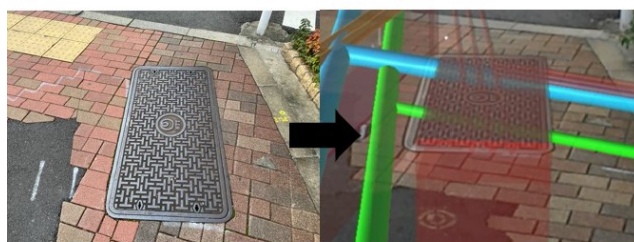


図-10 開口部モデルのサイズ変更



(a) 視点(1)からの埋設物モデルの全部表示



(b) 重畳位置が正しい様子

図-9 埋設物モデルのみ可視化結果

を決めるため、正しい位置と角度での設置に時間がかかってしまうというデメリットがある。そのため、本研究では、図-7(b)に示したように平面座標の分かる既設の固定構造物にマーカーを設置した。位置合わせに必要なマーカーを固定の既設構造物に設置したことにより、簡便かつ容易にCGモデルを正しい位置に重畳できるようになった。また、可視化情報は、屋内の適用例と同様の地下埋設管・構造物及び施工予定の構造躯体を用いた。

また、CG映像を重畳した際に現実感を向上させるために、図-8の示すような深さ方向に目盛をつける開口部モデルを導入する。開口部モデルは地面に穴を設定して、可視化したい地下埋設構築物の範囲を示す“覗き窓”である。可視化したい領域のみ表示をする開口部モデルを用いる。また、使用上の向上のために、本システムは開口部モデルの大きさ変更できるような機能を追加した。開口部モデルで、3m×3m、5m×5m、3m×10mサイズのもの可視化する。また、Air Tapによるボタン操作で、大きさの変更を行う。

#### 4.2.2 可視化結果

本システムを用いて現場検証を行った、図-8に埋設物モデルのみを可視化した際の結果を示す。図-8(a)は視点(1)から見る可視化結果である、図-8(b)より現実世界のマンホールに3Dモデルを重畳した可視化結果である。ここから、CG映像が安定的な可視化を行えていることが確認できる。また、現場での自動車、人の行き来などの複雑な状況に応じて、安定して行えることが確認できた。

しかしCG映像が正しい位置に重畳されてはいるものに、現実空間と合っていない・浮いている様に見えると言ったこと課題として挙げられた。この原因として、埋設物という本来地表面に隠れているものをMR技術を用いて地表面の上に重ねて表示しているため、CG映像の深さ方向の見え方のズレから違和感が生じてしまうと考えられることができる。

そこで、地表面以下にCG映像を描画する際に現実感が損なわれてしまうという課題を解決するために前述の開口部モデルを用いて、埋設物モデルの内の見える範囲を限定する事で現実感を損なわずにMR可視化を行うことを目指した。可視化結果を図-8に示す。図-12に示す様に、同じ視点(1)での可視化結果からと比較しても、Air TapすることでCG映像の見える範囲を制限し、より違和感なく埋設物モデルを可視化できている事が確認できる。

最後に、垂直方向に対して、底面を設け、深さ方向底面を変更できるシステムを構築した。開口部モデルに目盛りを追加した可視化結果を図-11に示す。深さ方向底面を変更できる機能を用いることで、全体表示からでの理解しづらい埋設物の埋まっている深さを正しく理解できた。本機能を用いることで、便利かつ容易に違和感なく地下埋設物モデルを可視化できることが確認できるようになった。

#### 5. おわりに

本報告では、HoloLensを用いたMR可視化システムを施工現場における埋設物モデルの可視化について屋内外の二ケースを想定し適用した。具体的には、屋内の事例として設計図面上へのCADモデルMR可視化、屋外の事例としては施工現場における埋設物のMR可視化にそれ

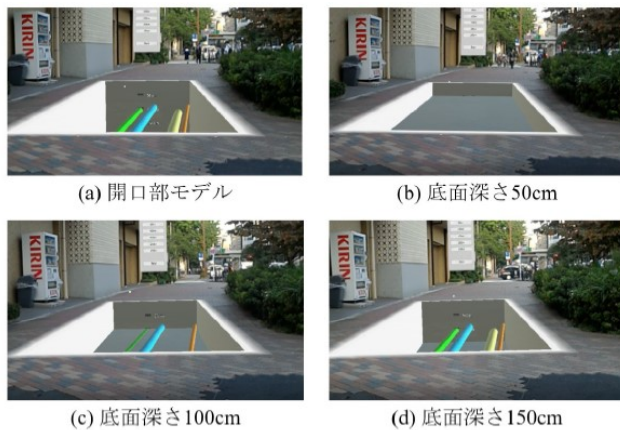


図-11 開口部モデルの深さ変更

ぞれ適用した。その結果以下に示す結論を得た。

- 本システムを用いる事で、現場の状況を視覚的に確認することができ、配置計画に掛かる時間と労力の削減が図れ、作業員とのイメージ共有も容易となるため、工事に伴う地下埋設物・構造物に伴うの損傷事故の防止や建設現場の安全確保にも施工現場における業務効率化を図ることが可能となった。位置合わせのときに必要なマーカーを固定の既設構造物に設置したことにより、簡便でかつ容易にCGモデルを正しい位置に重畳できることが確認できた。
- 屋内での適用例題から、都市モデルの道路の半透明より、埋設物の位置確認でき、埋設物と併せて都市モデルを可視化する事でより直感的な理解が図れる事を確認した。
- 現実感を損なう様な地下構造物のMR可視化において、開口部モデルを用いる事で違和感なく埋設物モデルを可視化できる事が明らかとなった、また位置合わせのときに必要なマーカーを固定の既設構造物に設置したことにより、簡便でかつ容易にCGモデルを正しい位置に重畳できることが確認できた。

#### 参考文献

- 1) 池田直旺, 榎山和男, 吉永崇, 琴浦毅, 石田仁: 施工現場における地下構築物のAR可視化システムの構築, 計算工学講演会論文集, Vol.24, C-13-01, 2019.
- 2) 花立麻衣子, 菅田大輔, 宮地英生, 榎山和男, 前田勇司, 西畑剛: 水環境流れ問題のためのマーカーレスARシステムの構築と適用性の検討, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.72, No.2, pp.192-199, 2016.
- 3) 吉永崇: 次世代ARデバイスの紹介—Microsoft HoloLensとGoogle Tangoの概要と利用事例—, 可視化情報学会誌, Vol.37, No.146, pp.128-133, 2017.07.
- 4) 池田直旺, 花立麻衣子, 榎山和男, 車谷麻緒, 吉永崇, 前田勇司: SLAM技術に基づく空間情報を用いたAR可視化システムの構築とその適用性の検討, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.73, No.2, pp.II48-II54, 2017.

- 5) Vuforia 開発者公式サイト (Vuforia Developer Portal) : <<https://developer.vuforia.com>>, (入手 2020.10.06) .
- 6) Wikipedia:Microsoft HoloLens<<https://en.wikipedia.org/wiki/>> (入手 2020.10.06) .
- 7) GitHub : microsoft/MixedRealityToolkit-Unity<<https://github.com/microsoft/MixedRealityToolkit-Unity>>, (入手 2020.10.06) .
- 8) Microsoft : Microsoft HoloLens—MixedRealityTechnologyForBusiness, <<https://www.microsoft.com/enus/hololens>>, (入手 2019.11.12) .