

論文・報告

MR を活用した出来形管理の効率化

～根古屋川橋第 1 橋における新技術の実証～

Improve efficiency of shape inspection using MR

藤野 大地 *1
FUJINO Daichi畠中 真一 *2
HATAKENAKA Shinichi四月朔日 勉 *3
WATANUKI Tsutomu青山 貴彦 *4
AOYAMA Takahiko藤田 敏明 *5
FUJITA Toshiaki

鋼橋上部工事において、検査路・排水装置等の付属物や足場等の仮設材は架設時に現場で取付けられるが、これらを固定する金具位置の誤り・設置漏れや計画経路の不備に伴う不具合・手戻りは、工事工程に多大な影響を及ぼす。根古屋川橋第 1 橋の工場製作時において出来形の検証作業を省力化するため、MR を導入した実証試験を行った。試験では、製作承認図の 3D モデルを MR により実物大で投影し、工場での仮組立時に実物の鋼桁に重ね合わせて表示させ、周辺を巡回しながら部品の数量や取り付け位置に誤りが無いか検証した。また、作業の省人化や災害リスクの排除効果、精度、使用感などについて客観的なデータを採取し、実用化の見通しや課題を整理した。

キーワード：MR、複合現実、HoloLens、出来形管理、省人化

1. はじめに

検査路・排水装置等の付属物や足場等の仮設材は架設時に現場で取付けられるが、これらを固定する金具位置の誤り・設置漏れや計画経路の不備に伴う不具合・手戻りは、工事工程に多大な影響を及ぼす。金具位置や経路の妥当性を検証する方法として従来は、桁の仮組立時に、作業員が付属物・足場の固定用金具（桁付き金具）を図面と実構造物を照らし合わせながら、1 箇所ずつ 2 人で巻き尺により寸法を測定して確認する方法、または、一部の付属物を仮組立の桁に実際に取付けて確認する方法が採られる。しかし、いずれの方法も多大な労力を要するうえに、高所での作業が含まれるため、墜落等の災害リスクも伴う。

これに対し、今回実証する新技術では、現実空間に 3 次元の CIM モデルを重ねて可視化する MR（Mixed Reality：複合現実）技術（図 1）を活用し、本橋の上部工検査路、排水装置及び足場に関わる桁付き金具の設置位置とそれら付属物の経路の妥当性を、正確かつ効率的に検証するものである。これにより、検証作業に要する労力を大幅に省力化するとともに高所での作業を排除し、災害リスクも低減する効果が期待できる。ここでは、本手法の実用化に向けた改良の取組と、実証試験を通して得られた効果・課題について報告する。

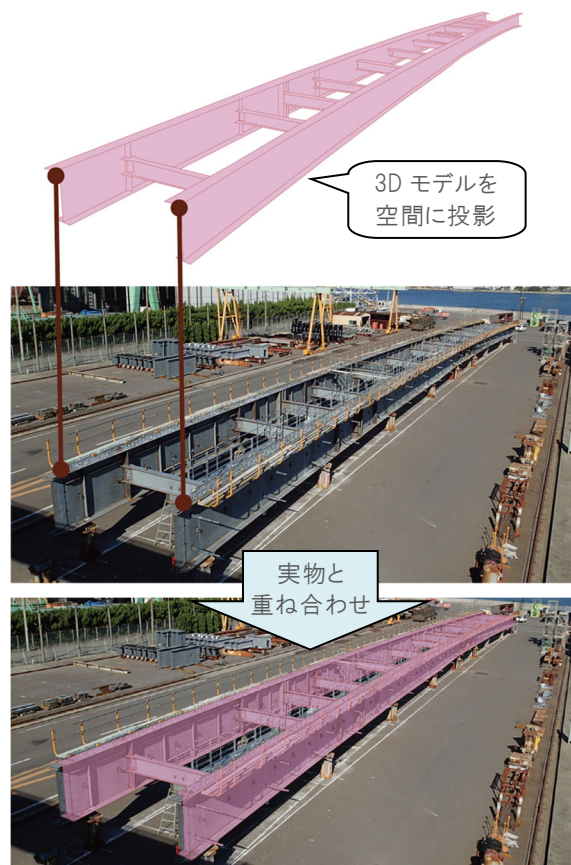


図 1 MR 技術の活用イメージ

*1 川田工業㈱橋梁事業部橋梁企画部開発室

*2 川田工業㈱橋梁事業部橋梁企画部開発室 室長

*3 川田テクノシステム㈱ES 事業部ネクストイノベーションセンター 部長

*4 川田テクノシステム㈱ES 事業部ネクストイノベーションセンター

*5 川田工業㈱四国工場橋梁技術課 係長

2. 工事全体の概要

本工事は、平成 30 年度に国土交通省が試行を開始した新技術導入促進（Ⅱ）型^{*}工事の鋼上部工での最初の事例であり、MR 技術の試行は本制度への提案として実施したものである。

工事件名：

H30 牛久土浦 BP 根古屋川橋第 1 橋上部工事

橋梁諸元：

鋼 5 径間連続 2 主 I 桁橋、橋長 181(m)、鋼重 289.6(t)

発注者名：

国土交通省 関東地方整備局 常総国道事務所

受注形態：単独（川田工業）

工 期：

平成 31 年 1 月 16 日～令和 2 年 7 月 20 日

施工場所：茨城県牛久市遠山町地先

※新技術導入促進（Ⅱ）型：主として実用段階には達していない技術、又は要素技術など研究開発段階にある新技術のうち、当該工事において新技術を活用することによって、施工管理の効率化若しくは安全性の向上等の観点から有効な技術を現場に導入する工事である。

3. MR について

MR は現実の映像と実寸大の CIM モデルを重ねて可視化できる技術であり、MR を実現するデバイスとして図 2 に示すマイクロソフト社製の HoloLens を使用する。HoloLens の形状はヘッドマウントディスプレイと同様であり、頭部に装着すると視界全面がディスプレイで覆われるが、本機のディスプレイは透明であるため、ディスプレイ越しに周囲の現実の風景が見える。このディスプレイに、設計・原寸作業時に作成した 3 次元 CIM モデルを実物大で映し出し、HoloLens 越しに見える現実の仮組立の桁と重ね合わせて可視化することができる。

HoloLens は赤外線センサーを使って装着者周辺の地面や壁・構造物・自然物などの物体の形状を常時センシングしており、それらの変化から装着者の移動や頭の向きを分析している。このため、HoloLens 装着者が歩いたり向きを変えたりしても、投影された実物大の CIM モデルはあたかも床に固定されているように表示され、装着者は CIM モデルの中を歩いて通り抜けることができる。HoloLens は市販のコントローラと連動させることができ、今回は 3D モデルの移動や回転操作をコントローラのボタンに割り当てて使用した。装着者の操作イメージを図 3 に示す。

4. 実用化に向けた改良

HoloLens を利用した MR 技術はいまだ研究開発段階にあり、実用化に向けて多くの分野で検討が行われている。本工事における仮組立時の出来形検査への活用にあたっては、「初期位置合わせの精度向上」を主な改良課題として設定し、改良に向けて取り組んだ。

(1) 位置合わせ用マーカー

HoloLens で試行を始めた当初は、実構造物と CIM モデルを重ね合わせるため、構造物の端点などの特徴点を利用して位置合わせを行っていた。しかし、複数の被験者が同じ HoloLens を装着して対象物を見た場合に、奥行き感にばらつきが発生し、位置合わせに個人差が生じてしまう状況にあった。そこで、表 1 に示すような十字線マーカーとフレーム型マーカーを試作し、効果を比較した。十字線マーカーは設置が簡単であるが、奥行き感が得にくく、少し離れると視認性が悪くなるなどの問題が生じた。フレーム型マーカーでは、数 m 離れた複数のマーカーも同時に見ながら位置合わせができ、個人差の少ない良好な精度が確保できることが判った。



(a) 正面



(b) 側面

図 2 HoloLens (MR 器械)



図 3 装着者の操作イメージ

表 1 マーカーの改良

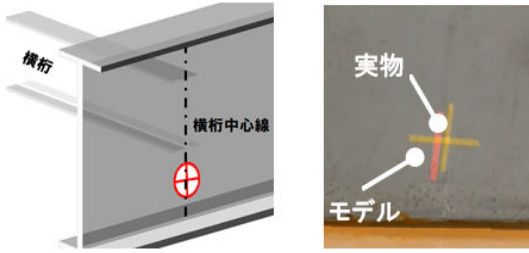
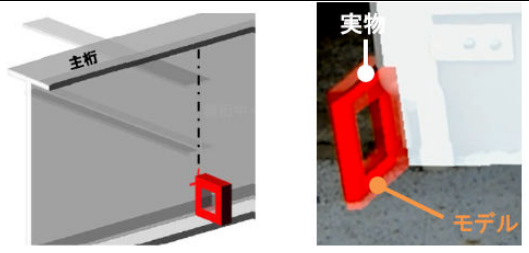
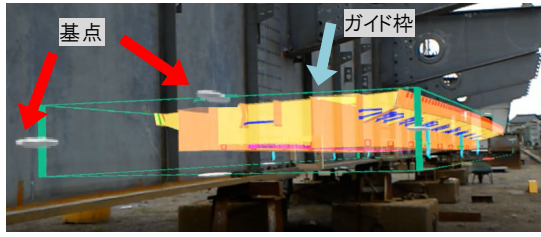
十字線マーカー	
	模式図
	実際の見え方
フレーム型マーカー	
	模式図
	実際の見え方
外郭サイズ: 150mm×150mm, 線幅 15mm	
●幅 15mm 程度の線では細くて表示されない場合がある。	
●奥行きが合っているかどうかわからない。	
外郭サイズ 300mm×300mm, フレーム太さ 45mm×45mm	
●視認性が大幅に改良され、奥行きだけでなく、面の向きや大きさを比較できる。	

表 2 UI 改良点

No	改良点	従来方法(汎用 UI)
①	位置合わせ用の ガイド枠 を表示	機能なし
②	平行移動は構造物の軸に沿って 1 軸ごとに平行移動 する	操作者から見た軸設定(左が X 軸プラス等)であったため、構造物の軸に沿った移動が困難
③	回転移動では、回転中心を決めて 1 軸ごとに回転移動 する	
④	スケール調整の際は、先に 拡張基点を指定 する	拡張基点はモデルの中心付近
⑤	極微量の調整量 にも対応できるように改良する	操作感度が高すぎるため微調整が困難
⑥	操作パネルの機能割付けを再考し、 2 軸操作を不可 とする	意図しない 2 軸操作が発生していた
①③ モデル表示(例)	 モデルにガイド枠(緑線)を表示し、移動や回転の基点(白丸や赤丸)となる軸を選択する	
⑥ 操作状況(例)	 操作パネルへの機能割り付けを変更し、2軸同時操作を不可とする改良を加えた	

(2) 位置合わせに関する UI(ユーザーインターフェース)

位置合わせでは、実物と CIM モデルを重ね合わせて 7 つのパラメータ(平行移動 3 成分+回転移動 3 成分+スケール)をできるだけ正確に合わせる操作を行う。汎用の UI では、X 軸と Y 軸の平行移動操作が 1 本のジョイスティックに割り付けてあり、スティックを正確に十字方向に押さなくては操作者の意図しない 2 軸同時操作が発生するなど、正確性を欠く可能性があったため UI を改良した。改良点と従来方法を表 2 に示す。これらの UI の改良により、位置合わせ精度が向上し、初期位置合わせにかかる時間を短縮できることが判った。

(3) グリッド機能

MR による品質管理では、実物に近過ぎると 3D モデルが実物に埋もれたようになり、正しく表示されない。着目箇所に対峙して 2~3m の距離を置いて眺めた場合に実物と 3D モデルの位置関係が最も正確に表示される。このため、実物と 3D モデルにずれが発見された場合でも、装着者が自ら対象箇所に近づいて巻き尺で測る方法は得策ではない。また、検証の記録として残した動画を後から見る際にも、撮影された部位の寸法が解らないという問題があった。そこで、改良の試みとして検査の現場でも記録動画で確認する場合でも、センチ単位程度の寸法の把握が出来るように、モデル表面に 100mm の方眼(グリッド)を表示する機能を追加した。

グリッドを表示させる方法としては、入力に使用する 3D モデルは変更せず、HoloLens のソフトウェアで 3D モデルにグリッド状のテクスチャを覆い被せて表示させる方法を採用した。図 4 はグリッド表示の状況である。図 5 はグリッドの活用例であるが、ウェブ面に表示されたグリッドから排水管の支持金具(①と②)の高さがちょうど 1 グリッド分であることが読み取れ、高さ 100mm で製作された金具の寸法に一致している。また、これらの排水管支持金具や足場金具(③)の実物は製作キャンペーンの分、モデルより高い位置に見えていることも判る。以上のように、グリッドを表示させて検証作業を行うことで、概略数値ではあるがセンチ単位程度の寸法の把握が容易にできるメリットが確認された。しかしながら、グリッドの表示機能を使用した場合の HoloLens 内部の演算負荷を調べると、2.0~2.3 倍に増大することが判った。

た。演算負荷の増大は、HoloLens のセンサー情報のフィードバック周期を低減させ、装着者が構造物の周辺を移動した際に、投影した 3D モデルと構造物の位置に大きなずれが生じさせるため、グリッド表示は部分的な実施のみとし、今回の実証試験全体は、グリッド無しで実施している。

5. 実証試験方法

(1) 3D モデル作成

本橋は全長 181m、2 主 I 桁形式の主桁 5 径間で構成されている。検証で必要となる 3D モデルのデータは、CIM モデルのうち属性情報（防錆仕様や設計反力などの設計情報）を省いた形状データのみであり、部材の板厚を含む形状データをソリッド要素でモデル化した 3 次元モデルとして作成した。また、HoloLens の演算負荷を軽減する観点から、検証に必要な最小限の部材構成とするため、本検討の検証で対象としないボルト孔やボルト、添接板などの情報についてはモデル化の対象から外した。本橋のモデル化の対象範囲を表 3 に、作成した 3D モデルを図 6 に示す。

(2) 検証方法と対象部材

出来形検証のフローを図 7 に示す。製作承認図が確定した時点で、全橋の 3D モデルを作成し、これを HoloLens へ読み込ませ仮組立時の製品に投影する。



図 4 グリッド表示の例

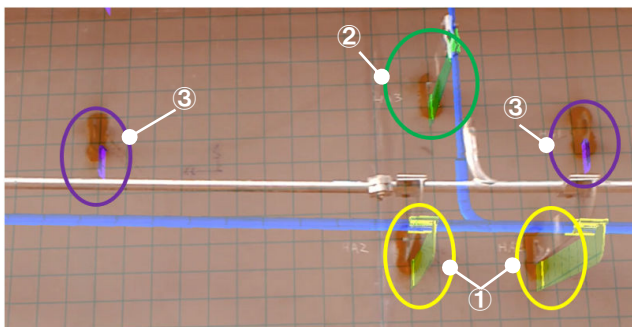


図 5 グリッドの活用例

表 3 モデル化対象

部材(*は検証対象)	モデル化の範囲
主桁・横桁	全数
位置合せ用基準点	間隔 10m 以下
上部工検査路取付金具*	全数(25 箇所)
上部工検査路外形	(経路の妥当性確認)
排水装置取付金具*	全数(90 箇所)
排水管外形	(経路の妥当性確認)
足場吊金具*	全数(888 箇所)

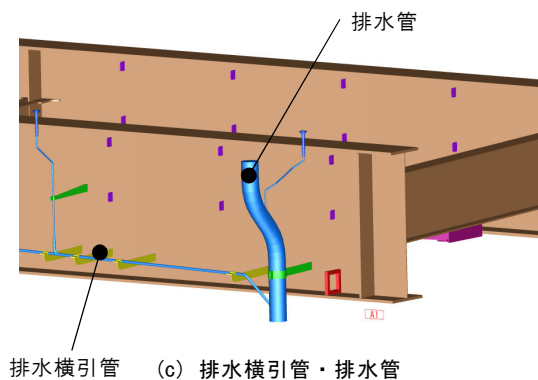
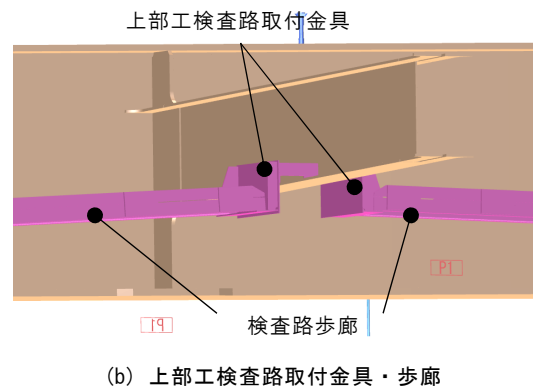
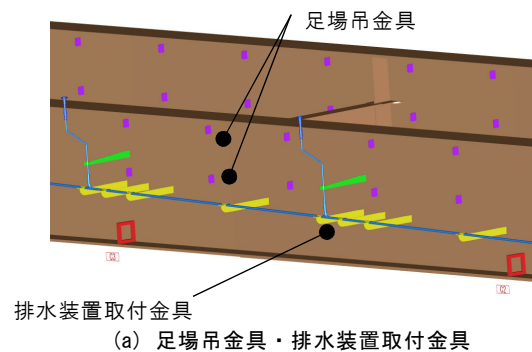


図 6 作成した 3D モデル

投影した実物大の 3D モデルを、実物の鋼桁に重ね合わせ、周辺を巡回しながら対象とする部品の数量や取り付け位置に誤りが無いか検証する。対象とする部品は、主桁や横桁に取り付く上部工検査路取付金具 (25 箇所)、排水装置取付金具 (90 箇所)、足場吊金具 (888 箇所)

の合計 1003 箇所とし、これらを対象に、金具の設置数の確認、金具の設置ミスの判定、検査路・排水装置の位置ずれの各項目を検証した。

(3) 記録事項

MR による方法は新技術の実証試験であるため、桁付きの金具類の出来形検査の結果以外にも課題抽出のため以下の項目に留意し記録を行った。

(i)MR による検証作業では、点検者視線の映像を後からでも検証できるよう動画として記録する。

(ii)検査路・排水装置の経路の確認についても、仮組立された桁に取り付けられた金具位置と配管や検査路の位置が異常な位置関係にないことを確認する。

(iii)MR による方法では、脚立などによる高所作業は生じない想定であるが、想定外の事象があれば、その内容を都度記録する。

(iv)MR による方法での品質管理に要する歩掛かり(人数、時間、労務費)を調査・集計する。

(v)作業従事者には、従来方法と MR による方法に関するアンケートを実施する。アンケート項目は、MR の使用感、良い点、悪い点、改善点、MR の用途、新技術のイメージ等に関する設問とした。

(vi)品質管理作業の中で生じた、3D モデルのずれ量をマーカーの各点で記録する。なお、進行方向のずれについてはマーカー位置毎に補正する。

6. 結果と考察

図 8 に 3D モデルを重ね合わせた時の見え方を示す。実物の鋼桁に対し、MR 装着者には、設計上の金具類の配置が重なって見える。部材は用途毎に色分けし、図面を携行しなくても一目で種類が判るようにしたほか、仮組立時には取り付かない配管も表示させ、完成時の配管経路がイメージできるようになっている。

今回の実証結果では、主桁・横桁に取り付く上部工検査路、排水装置及び足場吊金具を対象に、MR を用いて、(a)金具の設置数の確認、(b)金具の設置ミスの判定、(c)検査路・排水装置の位置ずれの 3 項目を確認した結果、いずれの品質管理項目も問題ないことが確認できた。

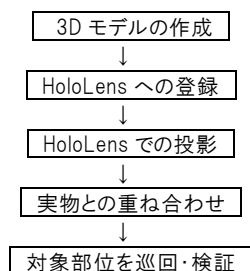


図 7 出来形検証のフロー

(1) 省力化

従来方法では巻き尺を使用し、金具毎に異なる複数の図面を見比べながらの検証作業となることや、高所作業車の移動や脚立の盛り換えを伴うことから 2~3 人一組での作業となり、全数を照合するのに 16 人日の工数を要した。従来方法での作業状況を図 9 に示す。

これに対し、MR による方法(図 10)では、図面情報が 3D モデルに統合されており、1 台の HoloLens に対して 1 人で作業を行うことができることから、延べ 4.3 人日の工数で完了することができた。従来方法に対して約 7 割の工数を削減できる結果となった。

(2) コスト

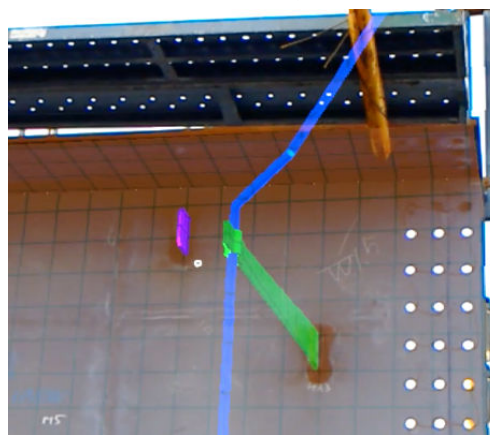
検証作業で使用する資機材の損料等を考慮した作業単価を想定し、本実証試験での費用比較を行った(表 4)。従来方法でのコスト 45 万円に対し、16.8 万円程度に抑えることができた。3D モデルの作成などは含めず、工場の仮組立ヤードで行った屋外作業についてのみ比較であるが、6 割以上のコストが削減できる結果となった。

(3) リスク排除

MR による方法では、4m 程度の高さに取り付けられた金具も正確に視認できることが判った。検証対象とした部品は全て地面に立った位置から見える範囲にあり、MR による方法では高所作業は発生しなかった。



(a) 実物の鋼桁



(b) 装着者からの見え方

図 8 完成時の排水管を投影した例



図9 従来方法



図10 MRによる方法

表4 省力化とコストの比較

項目	MRによる方法	従来方法
人件費	点検者 26 400(円/日)	点検者・記録者 各 26 400(円/日)
損料	HoloLens 1 200(円/日) ソフト使用料 6 000(円/日)	高所作業車 4 600(円/日)
日数	1人作業 5日 (4.3日切上げ)	2人作業 2日 3人作業 4日
人工	5人日	16人日
人工比	31%(▲69%)	100%
費用	168 000 円	450 000 円
費用比	37%(▲63%)	100%

高所の足場上での検査を行っていた従来方法に比べ、墜落災害リスクを排除できることが確認された。

(4) アンケート結果

MRを用いることで、「従来複数枚の図面に分散していた情報が一目で確認できる」、「検証の記録を動画として残せる」、「脚立の昇り降りが無くなり楽になった」、「検証時の携行品が少なくなった」などの点は、作業者に好評価であった。一方で、「HoloLens 装着時は通常より視野が狭くなり、足下や周辺の状況把握が疎かになる」と

言ったリスクに関する意見もあり、安全確保にも留意しつつ改良を進める必要性が指摘された。

(5) 精度

HoloLens は内蔵されたセンサーで自己の移動量を認識する仕組みであり、巡回移動に伴い 3D モデルと実物との間に多少のずれが生じる。今回の検証作業では、橋軸方向の移動に対し横桁位置(5~9.9m 間隔)毎にずれ量の測定を行い、平均で 48.5mm (サンプル数 96, 最大値は 210mm) のずれが確認された。ずれの大きさと移動距離の間には有意な関連性が認められず、ずれの発生は環境の変動(屋外作業における直射日光の影響など)に起因するものが支配的であると考えられる。

7. まとめと将来展望

MRによる方法は、現状の精度ではミリ単位での寸法チェックには不十分であったが、構造物を視覚的にイメージしたり、小さな部材の有無を全数チェックしたりする作業には効果的であり、省人化や安全性向上にも効果的であることが確認できた。将来的にCIMが導入されれば、既存の3D図面から必要な情報のみをMRで投影することで、誰でも製品の出来形管理が行えるようになることが期待されるため、今後も実用化に向けた開発をすすめる予定である。

MRで投影する3Dモデルを、3Dスキャナで取り込んだ現場の地形や既設構造物、工場製作された製品などに変更すれば、これまでは実現が難しかった遠隔地にある形状どうしを視覚的に容易に比較できるようになり、MRの用途はさらに拡大できる。他にも、HoloLensに備わっているネットワーク機能を活用すれば、HoloLens装着者が見ている映像と同じものを別のHoloLensやモニターに映し出して現場の状況を共有することができる。遠隔地においても現場の目線で対物確認を行うことができ、現場確認や課題解決に迅速な対応が可能となることが期待される。

謝辞

本実証は、新技術導入促進(Ⅱ)型工事である「H30牛久土浦BP根古屋川橋第1橋上部工事」において実施しました。実施にあたり、御指導を賜りました関東地方整備局の皆様に、この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 夏堀, 松下, 畠中, 藤野, 青山, 四月朔日: 根古屋川橋第1橋の工場製作時におけるMR(Mixed Reality)の活用, 土木学会第75回年次講演会, 2020.9.