

MRを活用した品質管理システム「holonica™」の開発

中 村 允 哉 中 林 拓 馬

池 田 雄 一

Development of MR Quality Management System “holonica™”

Masaya Nakamura Takuma Nakabayashi

Yuichi Ikeda

Abstract

The inspection of construction to ensure that they have been done as planned according to the design drawings and specifications is an essential task for quality control in the construction field. To simplify the task, we developed an inspection system, “holonica™,” which utilizes mixed reality (MR). In this study, we introduce the main functions of the system, and report the accuracy verification, and the comparison between conventional inspection for interior finishing work and the application of the system at an actual construction site. In conclusion, the appropriate interval of the reference markers for misalignment correction was a maximum of 12 m. Additionally, we conclude that the system can reduce the time required for inspection by 30% compared to the conventional method.

概 要

建築工事における品質管理の基本は、設計図書通りに施工がなされているか確認することである。著者らはMR（複合現実：Mixed Reality）を活用し、確認作業を簡略化した品質管理システム「holonica™」を開発した。本論文では、システムの主要機能を解説し、実現場における現実とBIMデータの重ね合わせ精度、および、品質管理業務へ適用した時の作業時間を検証する実験についてまとめた。実験の結果、本システムをタブレット端末で用いた場合、位置補正マーカーは、最大でも12m以下の間隔で配置することが適切であることがわかった。また、内装仕上げ検査および是正確認作業に本システムを適用したところ、約30%の作業時間短縮効果が得られた。

1. はじめに

建築工事における品質管理は、工事が設計図書通りに行われているか、あるいは記載内容の是非も含めて確認することが基本的事項である。従来では、膨大な設計図書の中から参照する箇所を選び出し、現実の施工箇所と照らし合わせて正誤を判断するため、確認業務には多大な時間を要していた。また、2次元図面や文字情報が主である設計図書に対し、それらを正しく読み取り、施工物の計画や品質的な正誤を判断するにはある程度の経験が必要であり、経験の浅い若年職員ほど品質管理における不具合の見落としや誤認識が生じる可能性があった。

近年、施工管理にもBIM (Building Information Modeling) を導入する現場が増えてきており、これを活用した品質管理の実現が期待されている。しかし、BIMデータをタブレット端末等で直接閲覧・確認するには、その都度目的の箇所を3Dモデルから見つけ出して比較する必要があるため、タブレット端末での操作性やスペック等を加味すると実用的ではない。必要な情報を選択し、施工箇所と照らし合わせて確認するというプロセスを簡略化できれば、より高効率な品質管理が可能になる。

こうした背景から、BIMデータを施工物に重ね合わせることができるMR（複合現実：Mixed Reality）を活用し

た品質管理システム「holonica™」（以下、本システム）を開発した。本論文では、システムの構成、および、従来の品質管理手法との比較実験の結果について報告する。

2. システム概要

2.1 システムの開発コンセプト

従来の品質管理業務では、施工管理者が各種図面や仕様書を基に3次元でイメージし、現実の施工対象物と照し合わせる。さらに、コンベックス等の計測機器を用いて寸法や形状等を確認して紙面や端末に記録するといったプロセスを踏む。これに対し、MRでは対象物の形状、位置や間隔といった情報を盛り込んだ3次元のBIMデータを基盤としているため、施工管理者は一元化した情報を直接的、視覚的に施工対象物と重ね合わせて確認できる（Photo 1）。なお、更なる効率化を図るには、重ね合わせによる確認だけでなく、品質管理業務のプロセス全体を同一のシステム内で完結させることが望ましい。

このような背景から、MRによってBIMデータと現実を重ね合わせ、発見した相違点を記録・共有する機能を組み込んだ品質管理システムの開発を目標とした。

また、建築工事においてMRを活用するには、現実とBIMデータとの重ね合わせ精度が重要になる。Fig. 1に示



Photo 1 MRを活用した品質管理方法の一例
Example of Quality Management Method Using MR

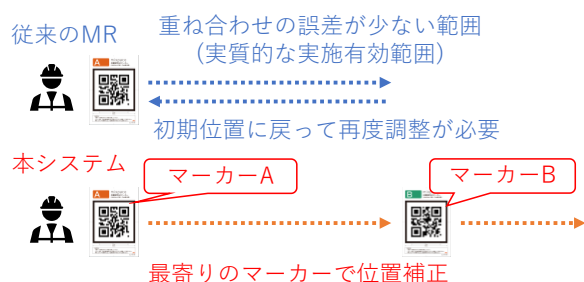


Fig. 1 測位誤差補正用マーカーの運用方法
Operational Procedure of Reference Marker

すように、既存のMRシステムの多くは、初期位置を合わせるためのマーカーを1つ利用し、端末の初期位置を認識してBIMデータを重ね合わせる。しかし、マーカーを認識してから長距離を移動すると、重ね合わせの精度が低下してしまうため、初期位置に戻ってマーカーを再認識する必要があった。よって、本システムでは、測位誤差補正用のマーカー（以下、位置補正マーカー）を複数配置し、そのいずれから位置の補正を可能とすることで、初期位置に依存しない広範囲での重ね合わせの実現を目指した。

2.2 システム全体像

本システムの概要をFig. 2に示す。本システムは以下の4つの主要な機能から構成されている。

- 1)MRモデル作成機能：BIMデータをMRモデルに変換するとともに、検査時に参照できるようにプロパティ情報をMRモデルに紐付けて保存する。
- 2)位置補正機能：現実とMRモデルの両方に位置補正マーカーを複数配置し、端末の自己位置と向きを補正する。

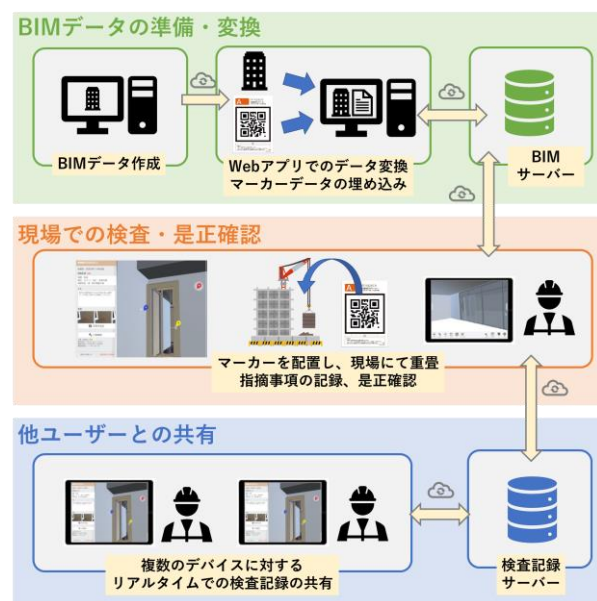


Fig. 2 システムの概要
System Overview

Table 2 対応ハードウェアの特徴
Supported Hardware Features

	タブレット型端末 (Apple社製iPad)	メガネ型 ウェアラブル端末 (Microsoft社製 HoloLens2)
外見		
センシング能力	△ 単眼カメラ+IMU	○ カメラ(4台)+ TOFセンサー
重ね合わせ時の 没入感	△	○
映像の見やすさ	○	△ モニターの性質上、直射 日光下で映像が見づらい
バッテリー	○	△
価格	○	△
操作の容易性	○	△
備考	運用時は両手が ふさがる	運用時はハンズフリー

3)重ね合わせ機能：現実に対し端末越しにMRモデルを重ね合わせる。

4)検査記録および是正確認機能：検査時は不具合箇所にピンを立て、是正確認時は一覧表から選択して確認日を記入する。

上記の機能により、本システムでは広い範囲におけるMRの重ね合わせを安定化するとともに、BIMデータと現実の差異から不整合を示し、かつ、その情報を記録・関係者で共有することができる。

2.3 ハードウェア

本システムが対応するハードウェアとその特徴を

Table 2に示す。開発当初、対応するハードウェアをHMD（メガネ型ウェアラブル端末：Head Mounted Display）のみとしていた。これは、現場においてハンズフリーで利用できることや、測位精度が高く、高い没入感が得られるといった利点がある理由であった。しかし、実運用を考慮すると、HMDが高価であること、操作に習熟が必要であること、日照・照明等の光環境の変動に弱いことなどの課題があり、現状では導入および普及のハードルが高い。これらの課題は、試作段階での検証実験において明らかとなり、環境や条件を選ばず誰でも使用できるシステムを開発した方が良いと判断した。

そこで、大林組の現場職員に支給されているタブレット端末に対応するハードウェアに含め、使用目的や用途によってハードウェアを使い分けできるシステムとすることにより、汎用性を向上させた。本論文では、タブレット端末について主に記述する。

2.4 運用イメージ

2.4.1 BIMデータの変換 BIMデータの変換機能は、株式会社ホロラボ製のWebアプリケーション（以下、Webアプリ）「mixpace」を利用した。mixpaceはWebアプリ上で変換したいBIMデータをドラッグ＆ドロップすることで、MRで利用可能なデータ形式(USDZ)へ自動的に変換され、サーバーにアップロードされるサービスである。

変換されたMR用のデータ（以下、MRモデル）を格納したサーバーは、端末にてMRを実施する際のビュー

ワーアプリケーション（以下、ビューワーアプリ）と連動しており、同アプリ上でダウンロードするとMRが実行できる。

2.4.2 位置補正マーカーの配置 Webアプリでの位置補正マーカーの配置方法をFig. 3に示す。同図のように、複数の位置補正マーカーを任意の位置に配置できる。また、マーカーは、施工物に対して水平（床面への設置）と垂直（壁面、柱等への設置）に設定でき、さらに設置角度を微調整できる。

上記の設定後、実際の施工物に対し、Webアプリ上で設定した座標と同一の場所に位置補正マーカーを貼り付ける。この時、マーカーの歪みや汚れ、光環境が安定しない（極端に明るい／暗い）場合、ビューワーアプリ上でマーカーを認識できない可能性があるため、光環境が安定した場所を選択し、汚れや破損がないマーカーを平らな状態を保って貼り付けることが望ましい。

2.4.3 MRの実行 MRモデルと施工物の重ね合わせ方法をFig. 4に示す。同図のように、WebアプリにてMRモデルに埋め込んだマーカーデータと対応する位置補正マーカーをビューワーアプリにて読み込むことで初期位置が決まり、その場所の現実とMRモデルを重ね合わせることができる。なお、MRモデルと現実の施工物が重なった状態で双方を比較確認しやすくするため、ビューワーアプリ上でのモデルの透過率を0～100%間で調整できるようにした。

2.4.4 プロパティ情報の参照 BIMデータの各部材に関するプロパティ情報（符号、寸法、仕様など）をビューワーアプリ内で参照できるようにした。ビューワーアプリで部材のプロパティ情報を参照する方法をFig. 5に示す。MRモデルを施工物に重ね合わせた後、画面下部に配したツールバーの「部材」ボタンをタップすると、部材選択モードに移行する。部材選択モードにて任意の部材を選択し、「属性情報」ボタンをタップすると、部材のプロパティ情報を確認できる。

2.4.5 指摘事項の記録・共有 ビューワーアプリでの指摘事項の作成方法をFig. 6に示す。本システムでは、現実空間と重畳したモデルに対し、任意の箇所に位置情報を含めた指摘事項をデータとして保存できる。この指摘事項は、他のタブレット端末（他のユーザーIDでログ

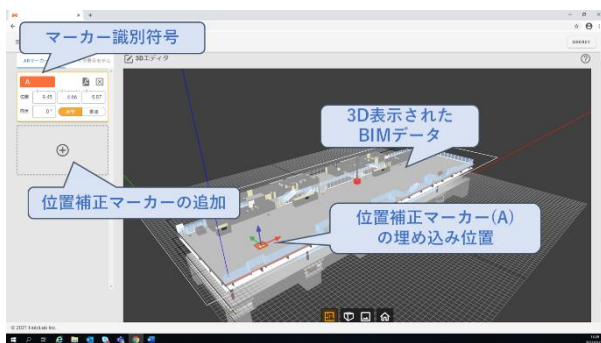


Fig. 3 Webアプリでの位置補正マーカーの配置
Web App for Reference Marker Configuration



Fig. 4 MRモデルの重ね合わせ方法

Procedure of Initialization for BIM Data Superposition

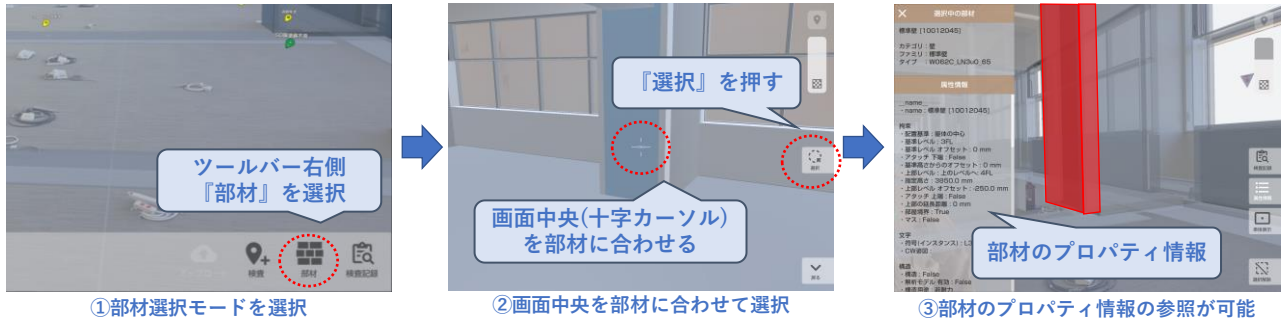


Fig. 5 プロパティ情報の参照方法
Procedure of Reference of BIM Property

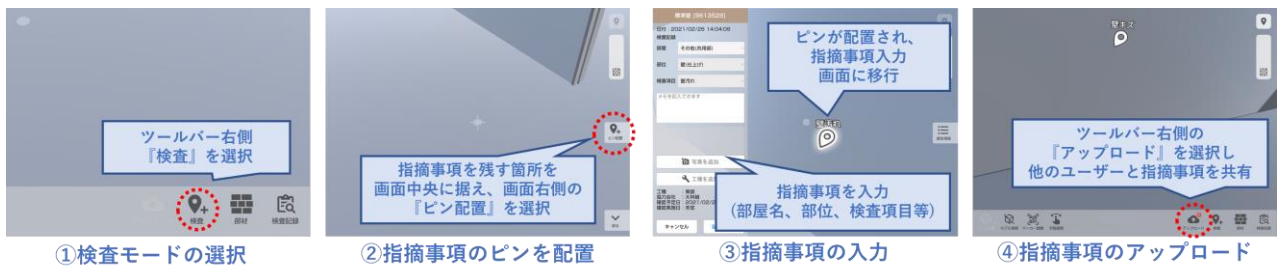


Fig. 6 指摘事項の作成方法
Procedure of Inspection Record Creation

インしたビューアアプリ)と同期されるため、検査情報を迅速に共有できる。

3. システムの検証実験

3.1 実験目的

開発した本システムによるMRの重ね合わせ精度、および品質管理業務における作業時間短縮効果を確認するため、新築工事の仕上げ工事を対象とした検証実験を行った。検証対象の工事概要をTable 3に示す。

3.2 実験内容

3.2.1 重ね合わせ精度の把握 検証方法をFig. 7に示す。ユーザーの挙動に対するMRモデルの追従性、および、その結果から求められる位置補正マーカーの適正な配置間隔を把握するため、位置補正したマーカーを原点とし、通り芯(柱芯)間を直線移動したときのMRモデルのずれ量を確認した。なお、ずれ量はPhoto 2に示すように施工物の入隅または出隅を対象に測定した。

3.2.2 省力化効果の把握 本システムを使用して内装仕上げ検査およびは正確認を行った場合の作業時間、および、従来手法で同作業を行った場合の作業時間を比較した。比較対象となる従来手法は、平面図を印刷した紙面に手書きで指摘事項を記載し、現地に付箋を貼る手法(以下、従来方式)、および、タブレット端末上で平面図のイメージにアイコンを置き、指摘事項を入力する既存の仕上げ検査向けアプリケーション(以下、既存検査アプリ)である。

検証方法の概要をTable 4、検証エリアをFig. 8に示す。

Table 3 工事概要

Construction Outline

建物用途	庁舎(事務所)
建築面積	2820.11m ²
延床面積	10716.68m ²
階数	4階
構造	鉄筋コンクリート造

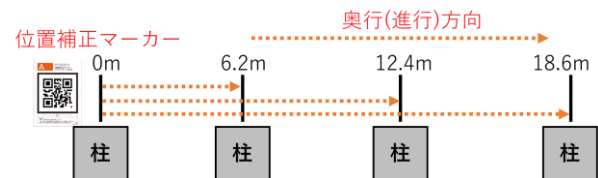


Fig. 7 重ね合わせ精度の検証方法
Measuring Method of Superposition Accuracy



Photo 2 重ね合わせ精度の測定
Example of Superposition Accuracy Measurement

Table 4 検証方法の概要
Overview of Verification Method

検査方式	指摘事項	作業員Aによる作業フロー (検査作業)	作業員Bによる作業フロー (是正確認作業)
従来方式		1: 指摘事項を発見 2: 付箋に番号を記入し、 指摘箇所へ貼付け 3: 用紙に内容を記録	1: 是正指示書と現地の 付箋を照合 2: 是正を確認し、是正 確認日を記録 ^{※3} 3: 付箋を剥がす
既存検査 アプリ ^{※1}	15箇所	1: 指摘事項を発見 2: 付箋に番号を記入し、 指摘箇所へ貼付け 3: アプリ内で指摘事項を 記入 ^{※2}	1: アプリ内の平面図と 現地の付箋を照合 2: 是正を確認し、是正 確認日を記録 ^{※3} 3: 付箋を剥がす
本システム ^{※1}		1: 指摘事項を発見 2: アプリ内でピンを立て、 指摘事項を記録 ^{※2}	1: MRにより指摘事項 を照合 2: 是正を確認し、是正 確認日を記録 ^{※3}

※1: アプリケーションの立ち上げ等の準備作業は本検証から除外している。

※2: 事前に定めた指摘事項を作業員に伝達する相番者を配置している。

※3: すべての指摘事項が是正済みである前提で確認業務を行っている。

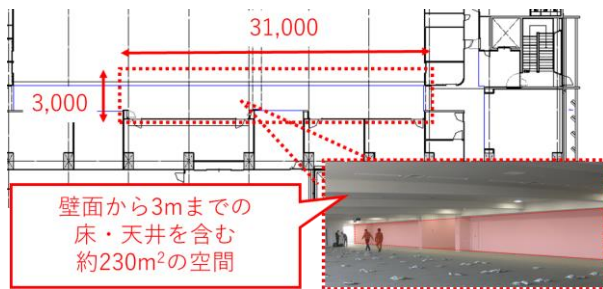


Fig. 8 検証エリア
Target Area for Verification

Table 4に示すように、新築工事現場の仕上げ工事の最終段階のエリアを対象に検査を行い、15箇所の指摘事項を記録する時間、および、その是正を確認する時間をそれぞれ比較した。

2名の被検者にて当該作業を実施し、検査と是正確認は、それぞれ異なる被検者が行った。これらの被検者の経験や習熟度が実験結果に影響を与えないようにするため、いずれも仕上げ検査業務の経験が無い被検者とし、それぞれの検査・是正確認方式に関する習熟時間は同程度とした。なお、エリア内で指摘事項を残す位置を同一とすると、是正確認作業員がその位置を記憶してしまう恐れがあるため、指摘事項を残す位置は検査作業員の判断に一任した。また、検査作業中は是正確認作業員を別室で待機させ、指摘事項の位置がわからないようにした。

3.3 実験結果

3.3.1 重ね合わせ精度 モデルの重ね合わせ精度の測定結果をTable 5に示す。現実の施工物とMRモデルのずれ量は、移動距離に比例して大きくなった。特に奥行（進行）方向へのずれが大きく、12.4mおよび18.6mでは実用上支障が出る誤差を生じた。

このずれ量は、タブレット端末版において測位計算に

Table 5 重ね合わせ精度の測定結果
Verification Results of Superposition Accuracy

マーカー認識後の 移動距離(m)	モデルと現実のずれ量(mm)	
	左右	奥行方向
0	3	34
6.2	48	98
12.4	122	374
18.6	265	450

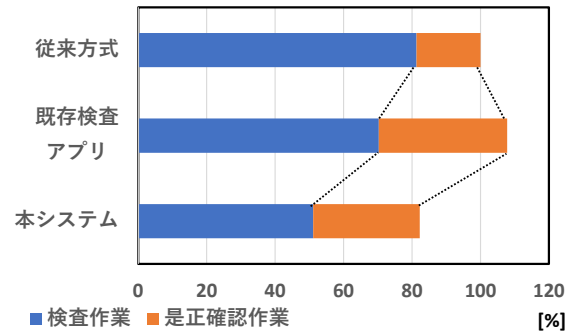


Fig. 9 所要時間の比較
Comparison of Time Required

利用しているAR開発ツール（ARKit）の測位計算の処理上の特性に起因するものであり、現状ではビューワーアプリ側の改修では対応できない内容である。したがって、本実験結果から、タブレット端末にて本システムを運用する場合、位置補正マーカーによる位置補正の間隔（マーカーの適切な配置間隔）は、最大でも12m以下とするのが適切であることがわかった。広範囲での運用や精度をより重視する場合、HMDでシステムを利用することを推奨する。

3.3.2 検査および是正確認の作業時間 内装仕上げ検査および是正確認の作業時間の比較をFig. 9に示す。同図は従来方式を100%とした場合の相対値で示した。同図のように、本システムを使用した場合、従来方式と比較して20%程度の作業時間短縮効果が得られた。ただし、作業時間の内訳に着目すると、検査作業に要する作業時間は大きく短縮されたが、是正確認に要した時間は従来方式と比較して長くなった。従来方式では、是正指示書に是正確認日を記入するだけであったが、既存社内アプリおよび本システムでは、是正確認日を入力するまでの操作が増えたことがその理由である。さらに作業時間を短縮するためには、是正確認に対する作業フローを見直し、余剰な入力・選択作業を削減する必要がある。

3.4 システムの改善

3.4.1 作業フローの見直し 作業フロー見直し後の実装機能をFig. 10に示す。前節に示した実験（以下、検証1）結果を踏まえて、是正確認に関する作業フローを見直した。その結果、是正確認時に目的の指摘箇所の探索や検査ピンの選択などに余剰な作業が発生していることが分かった。そのため、指摘事項の一覧から任意の指



Fig. 10 指摘内容確認の操作性向上のための追加機能
Added Features for Improving Usability of Confirming Inspection Record

Table 6 検証方法の概要(作業フロー改善後)
Overview of Verification Method

検査方式	指摘事項	作業者Aによる作業フロー (検査作業)	作業者Bによる作業フロー (是正確認作業)
従来方式		1: 指摘事項を発見 2: 付箋に番号を記入し、 指摘箇所に貼付け 3: 用紙に内容を記録	1: 是正指示書と現地の 付箋を照合 2: 是正を確認し、是正 確認日を記録※3 3: 付箋を剥がす
本システム※1	15箇所	1: 指摘事項を発見 2: アプリ内でピンを立て、 指摘事項を記録※2	1: MRにより指摘事項を 照合 ※ピンをタップして 記録画面へ移行 2: 是正を確認し、是正 確認日を記録※3

※1: アプリケーションの立ち上げ等の準備作業は本検証から除外している。
※2: 事前に定めた指摘事項を作業者に伝達する相番者を配置している。
※3: すべての指摘事項が是正済みである前提で確認業務を行っている。

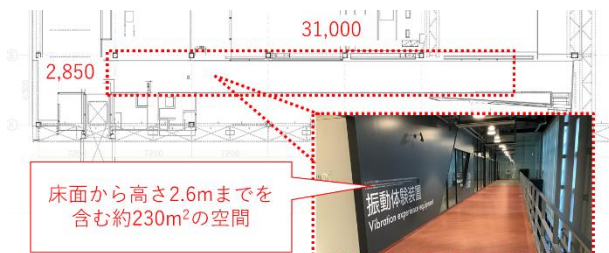


Fig. 11 検証エリア
Target Area for Verification

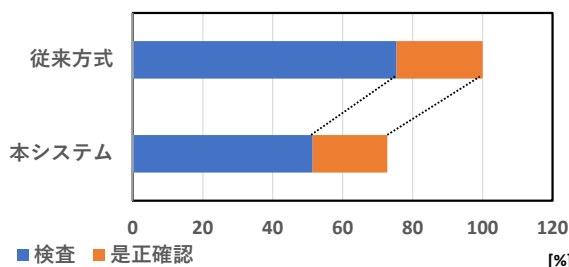


Fig. 12 所要時間の比較(作業フロー改善後)
Comparison of Time Required
(After Workflow was Improved)

指摘事項を選択した際にその指摘事項へ誘導するガイド機能、および、ピンを直接タップして編集できる機能をビューワーアプリに追加して改善を図った。

3.4.2 作業時間の比較(作業フロー見直し後) 追加実装した機能の効果を確認するため、再度、内装仕上げ

検査および是正確認の作業時間を比較した。

再検証(以下、検証2)の概要をTable 6に示す。同表に示す通り、検証1)との変更点は、本システムによる是正確認作業の作業フローを見直した点であり、指摘事項の数、被験者およびその他の作業フローは検証1)と同様である。なお、検証2)では既存検査アプリとの比較は行わず、従来方式のみと比較した。

検証エリアをFig. 11に示す。検証1)を実施した新築工事現場はすでに竣工・引き渡しをしたため、大林組技術研究所内にて同等の広さのエリアにて検証した。

内装仕上げ検査および是正確認作業の所要時間の比較をFig. 12に示す。同図は、従来方式を100%とした場合の相対値で示した。同図の通り、検証2)では、従来方式と比較して30%程度の作業時間短縮効果が得られた。作業時間の内訳に着目すると、是正確認作業に要する時間が従来方式と同程度の所要時間となり、作業フローの見直しによって作業時間短縮効果がより顕著になった。

4. まとめ

本論文では、MRを活用した品質管理システムを開発し、内装仕上げ検査を対象に作業時間の確認実験、および、MRの重ね合わせの精度検証を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- 1) 複数の位置補正マーカーにより、広範囲で安定して稼働するMRシステムをタブレット端末にて実現した。
- 2) 本システムをタブレット端末で用いた場合、位置補正マーカーは、最大でも12m以下の間隔で配置することが適切であることがわかった。
- 3) 内装仕上げ検査および是正確認作業に本システムを適用したところ、従来の仕上げ検査手法と比較して、約30%の省力化効果が得られた。

今後、さらにシステムの性能を向上させるとともに、品質管理以外の施工管理全般への展開を図る予定である。

参考文献

- 1) 西澤秀喜：携帯端末を利用する施工実習用教材群の開発と評価、日本建築学会環境系論文集、Vol. 82、No. 740、pp. 905-913、2017.10