

Title	鉄道建設工事における情報の一元化と視覚化に関する研究
Author(s)	田原, 孝
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/69594">https://doi.org/10.18910/69594</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

博士学位論文

鉄道建設工事における  
情報の一元化と視覚化に関する研究

田 原 孝

2018 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科



# 目 次

<b>第 1 章 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 現状の鉄道建設工事における情報交換と課題.....	1
1.2 課題の分析.....	3
1.2.1 資料作成労務が多い要因と対策.....	3
1.2.2 情報が希薄化する要因と対策.....	3
1.2.3 工事の計画に違いが生じる要因と対策.....	4
1.2.4 対策のまとめ.....	4
1.3 課題への対策.....	5
1.4 プロダクトモデルについて.....	7
1.4.1 プロダクトモデルと BIM/CIM.....	7
1.4.2 IFC.....	8
1.5 本研究の目的.....	9
1.6 本論文の構成.....	9
参考文献.....	11
<b>第 2 章 既往の研究</b> .....	<b>13</b>
2.1 既往の研究.....	13
2.1.1 建設工事での RFID の利用と情報管理端末に関する既往の研究.....	13
2.1.2 建設工事の計画における VR・AR の利用に関する既往の研究.....	14
2.1.3 建設工事の施工における AR・MR の利用に関する既往の研究.....	16
2.1.4 CSCW の利用に関する既往の研究.....	18
2.2 本研究の新規性.....	19
2.2.1 建設工事での RFID と情報管理端末の利用に関して.....	19
2.2.2 建設工事での VR・AR・MR と CSCW の利用に関して.....	19
参考文献.....	21
<b>第 3 章 鉄道工事に関する新しい情報共有システムの提案</b> .....	<b>24</b>
3.1 新しい情報共有システム像.....	24
3.2 現状の課題.....	28
3.3 共有情報の活用手法.....	29
参考文献.....	31

<b>第4章</b>	<b>RFIDを用いた施工情報の可視化と効率的な利活用</b>	<b>32</b>
4.1	概要	32
4.2	品質管理業務について	32
4.3	自動認識技術について	34
4.3.1	自動認識技術の概要	34
4.3.2	IC タグの概要と種類・分類	34
4.4	IC タグの特性と産業での利用例	37
4.5	構造物情報管理支援システム「IDSIMS」	40
4.5.1	IC タグの選定	40
4.5.2	IDSIMS の概要	43
4.5.3	ID の関連付け	46
4.6	現場の品質管理業務での実証試験	47
4.6.1	実証試験	47
4.6.2	ワークフローと作業時間の比較検証	51
4.6.3	試験から得られた課題	54
4.7	まとめ	55
	参考文献	56
<b>第5章</b>	<b>ARを用いた工事施工計画の視覚化</b>	<b>57</b>
5.1	概要	57
5.2	建設工事現場の工事監理について	57
5.2.1	現場の巡回と監視カメラ	57
5.2.2	日々の施工計画検討	57
5.3	画像の重畳	59
5.3.1	AR 技術について	59
5.3.2	位置合わせの手法	59
5.4	AR 技術を用いた施工計画視覚化システムの概要	62
5.5	建設構造物の施工計画への適用試験	63
5.5.1	カメラの仕様	63
5.5.2	レンズの歪み	64
5.5.3	重畳による見え方	65
5.5.4	画像上でのズレ	68
5.5.5	施工計画の打合せでの活用	71
5.6	まとめ	74

参考文献.....	76
<b>第 6 章 AR 計画システムの汎用化のための機能の拡充 .....</b>	<b>77</b>
6.1 概要 .....	77
6.2 システムの概要と実装した機能 .....	77
6.2.1 システムの概要 .....	77
6.2.2 実装した機能.....	78
6.3 現場での適用試験 .....	83
6.3.1 工事施工計画の打合せでの使用試験.....	83
6.3.2 通信機能確認試験.....	86
6.4 まとめ.....	87
参考文献.....	89
<b>第 7 章 AR 計画システムのホーム柵計画への活用 .....</b>	<b>90</b>
7.1 概要 .....	90
7.2 ホーム柵の整備に関する法令.....	90
7.3 従来のホーム柵設置計画の手法 .....	91
7.4 AR ホーム柵システムの概要.....	93
7.5 システムの機能と施設計画への適用による効果検証 .....	95
7.5.1 柵のレイアウトと種類の選択 .....	95
7.5.2 通路余裕幅の明示.....	96
7.5.3 線路形状に沿った設備の位置補正 .....	97
7.5.4 視認性の確認.....	100
7.5.5 簡単なオクルージョン処理.....	103
7.6 まとめ.....	104
参考文献.....	105
<b>第 8 章 結論 .....</b>	<b>106</b>
8.1 まとめ.....	106
8.2 今後の課題.....	108
<b>謝辞 .....</b>	<b>110</b>



# 第1章 序論

## 1.1 現状の鉄道建設工事における情報交換と課題

鉄道事業における建設・改良プロジェクトでは、建設生産システムの上流（企画・計画段階）から下流（維持管理段階）に至る各プロジェクト段階で、幾度も情報の交換を重ねながらプロジェクトを進捗させていく（図-1.1.1）。その過程では、多大な量の情報を作り出すため、時間と労力がかかるという課題がある。その原因のひとつとして、情報の交換は、紙媒体の図面や台帳を中心に行われるため、情報交換の場面やニーズに応じて、データや図面の加工・編集作業を繰り返すことが挙げられる。また、プロジェクトの企画・計画から、調査・設計、工事施工、維持管理までの業務プロセス段階を通して、多くの関係者が携わることから、情報が上流から下流に伝達されるのに伴い拡散し、希薄化される場合が多い。

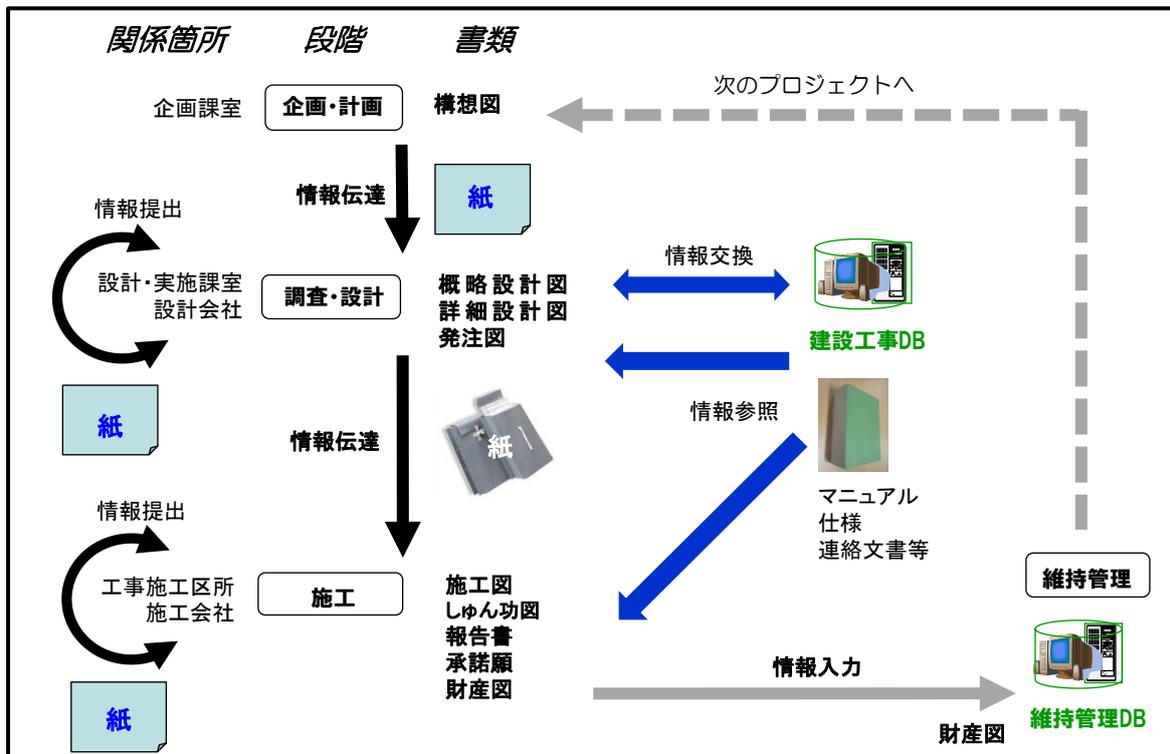


図-1.1.1 建設生産システムにおける情報交換のイメージ

また、鉄道建設工事に関係する部署は多岐に亘り、直接的に工事施工に携わるものとして、建築、土木、軌道、機械設備、電車線、電灯・電力、信号、通信などが挙げられる。現在の建設生産システムでは、それぞれの部門・系統において独自に書類またはデータを保有し、紙の図面により管理・引継ぎが行われているため、系統を跨いで情報を共有することは難しくなっている。

情報交換による情報の希薄化について、Bartlett<sup>1)</sup>は、記憶の再生実験を行い、人間の感情や過去の記憶の影響により情報の省略や置き換えが行われるため、その人が取得した元の情報と再生する情報の内容には変化が生じ、情報が脱落することを示している。また、古田ら<sup>2)</sup>は、自らの経験をもとに、組織内のコミュニケーションでは、情報交換を行うたびに情報が72%以下に減衰していくことを示している。この法則に倣い計画段階から施工段階までに2回の情報交換を行う場合の情報の減衰を模式的に示すと、図-1.1.2のようになり、施工段階では当初の情報量の52%程度になる。ここで注目すべき点は、伝達される情報量の割合ではなく、設計から施工段階で複数の箇所と情報の交換を行った場合、情報は一様に伝わるとは限らないため、減衰割合は同じであっても図-1.1.2に示すように施工者AとBで全く共有できていない情報（破線部の非共有情報 (a)と(b)）が発生する可能性があるということである。

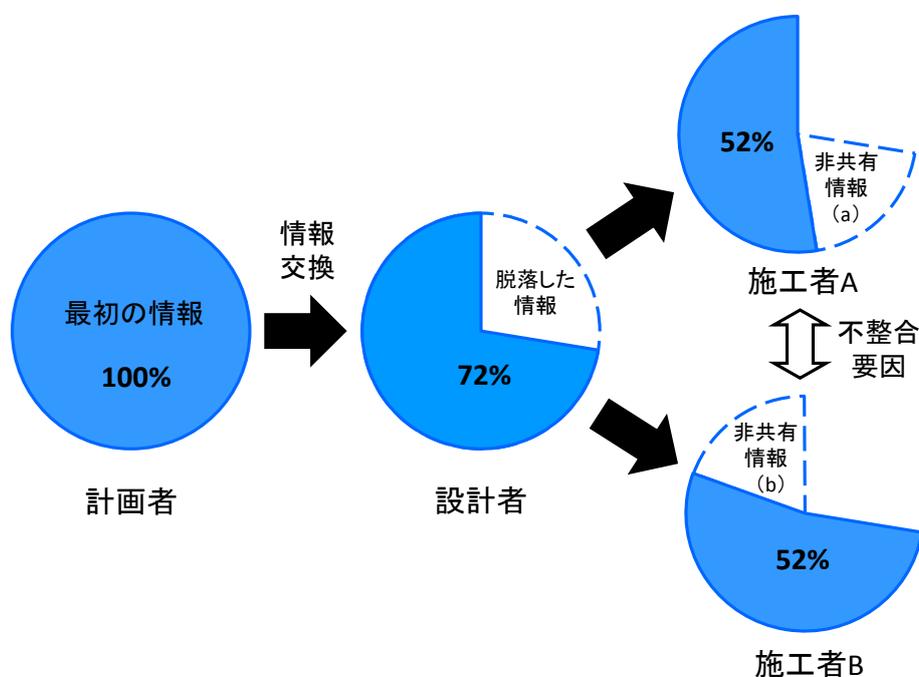


図-1.1.2 情報の減衰イメージ

このように、現在の建設生産システムにおける情報交換手法では、情報の脱落や情報の共有不足を引き起こす可能性が高く、不十分な情報の流通により、図面の不整合や施工時の取り合いの不良へと繋がり、作業の手戻りをたびたび発生している。また、施工の計画は、得られた情報をもとに技術者が自身の技術力に応じて策定するため、目に見えない情報が点在する場合、策定される計画の質にバラツキが生じる可能性が高い。ゆえに、現在の情報交換の仕組みはいくつかの問題点を抱えていると言える。

## 1.2 課題の分析

### 1.2.1 資料作成労務が多い要因と対策

現在の工事関係書類は、部門・部署ごとに紙媒体で蓄積するルールである。そのため、プロジェクトの進捗段階に合わせて行われる業務引継ぎや工事施工報告などの際に、関係箇所の数に応じた書類を作成する必要がある。工事の計画は途中段階で追加や変更となることが多く、また書類自体に単純ミスがある場合もあり、書類の変更や修正の機会が多い。業務の仕組みを変更しなければ書類の作成自体は減らすことが出来ないが、書類を共有して保有することを可能とすれば、作成する書類の量を減らすことは可能になり、業務は効率化できると考えられる。

紙媒体の書類を所在地が異なる複数の部署で共有することは物理的に難しいため、書類を電子化し、複数箇所で閲覧可能な状態を確保できれば共有化は可能と考えられる。そのため、関係箇所で情報の共有が可能な基盤を築き、そこに電子媒体の書類で一元管理する仕組みの構築が有意である。

また、現在の業務では報告書等の作成のためにデータの編集作業を行っているが、その作業を減らすことで業務の効率化が可能と考える。そのためには、書類作成を行わなくてもデータが自動的に書類に反映される仕組みまたは、データの転用が容易な環境を構築することが有意と考える。

### 1.2.2 情報が希薄化する要因と対策

前述のように、現在は複数箇所に分散して情報は保管されている。専門の担当に応じて、各箇所で情報を取捨選択して所有しているため、情報の密度が同一ではない可能性もある。各箇所では、それらの情報を二次利用して新たな書類を起こすため、箇所により情報に差異が生じる可能性がある。ま

た、前節で述べたように、情報交換を行うと情報の密度は薄くなってしまうため、情報に差異を生じさせないためには、情報を分散管理しない仕組みを築くこと、情報交換の頻度が少なくなる仕組みを築くことが必要であると考え。

そのため、情報の希薄化に対する対策としては、情報を一元的に管理する仕組みおよび、一元化された情報を利用して新たな情報を作成する仕組みを導入することが効果的と考える。

### 1.2.3 工事の計画に違いが生じる要因と対策

工事の計画を策定する際に、前述のように利用する情報そのものに違いがある場合は、計画の内容にも当然違いが生じる。一方、同じ情報をもとに工事の計画を策定しても、技術者により策定される計画は異なるものとなる。その理由は、技術者がそれまでに得た知識と経験により物事の捉え方には違いがあり、その違いが計画の成果物に反映されるためである。これは計画に限った話ではなく、施工の場面にも該当する。建設工事では複数の会社が専門に応じて作業を分担して共同で構造物を築き上げていく。関係者間に認識のずれが生じた場合は、施工の不具合や不整合へと繋がってしまう。そのため、誰が計画を策定しても違いが生じない仕組みを作ることが望ましい。そこで、考え方の違いを少なくするためには、人によって解釈が異なる頭で考えるのではなく、目で見て瞬間的に理解する仕組みを取り入れることが有効と考える。具体的には、現状の2次元の図面を読んで理解するのではなく、3次元のモデルを見て理解する。図面の中に隠れている設計者の意図を読み取るのではなく、3次元モデルが所持している情報を読むことで理解するというものである。これにより、技術者の知識や経験に依存しない工事の計画や施工が可能になると考える。

### 1.2.4 対策のまとめ

現在の鉄道工事における情報交換の課題を解決するためには、以下に取り組むことが有効と考える。

- ・ 情報を電子化する
- ・ 情報を一元的に管理し、利用できる仕組みを築く
- ・ 一元化した情報を直接的に利用することにより、情報交換の回数を減らす
- ・ 情報を編集することなく、報告書などの書類に二次利用できる仕組みを築く

- ・ 情報を視覚的に理解できる仕組みを築き，計画と施工に活用する

### 1.3 課題への対策

前述の問題点などを解消し，併せて業務の効率化と構造物の品質の向上を図るためには，情報蓄積の方法を見直すこと，および誰にでもわかりやすい計画を策定できるようにすることが必要であり，そのために新たな情報の共有と活用の手法の構築を目指す。その手法とは，これまで系統や部署ごとおよび業務の目的ごとに分かれて保存されていたデータやプロジェクトの情報を図-1.3.1に示すように建設情報DB（Database）システムにより一元化した上で，業務プロセス段階を跨いだ複数の関係者（計画担当，設計担当など）間での利用を可能とすることで生産性の向上を図る。また，業務プロセス段階の最上流である計画段階において，構造物の完成形のイメージを示すことを目的として，設計を可視化した情報を作成し，DBシステムに蓄積し，これらを図-1.3.2に示すように業務プロセス段階の下流まで共有しながら活用する。これにより，完成形の統一したイメージを視覚的に持ちながらプロセスを進めることが可能となり，工事の計画が理解しやすくなるとともに，プロセス段階ごとや個人ごとの認識違いの減少に役立てるものである。

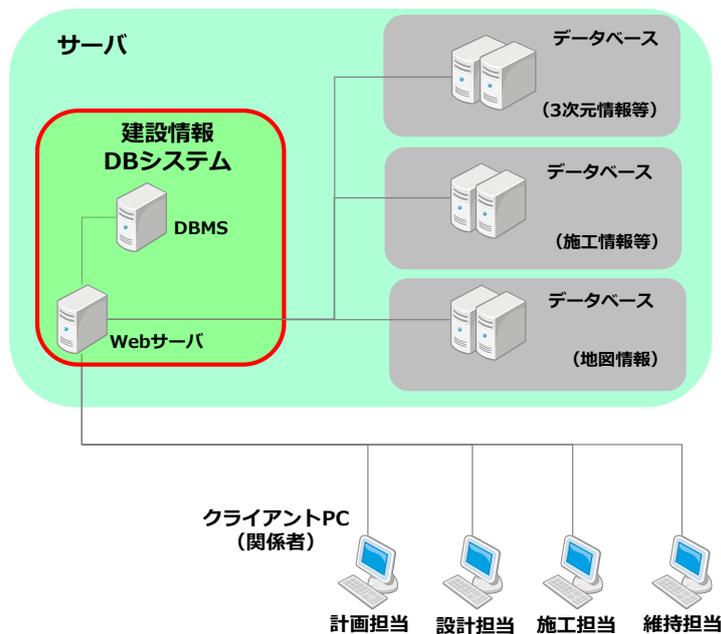


図-1.3.1 情報の一元化のイメージ

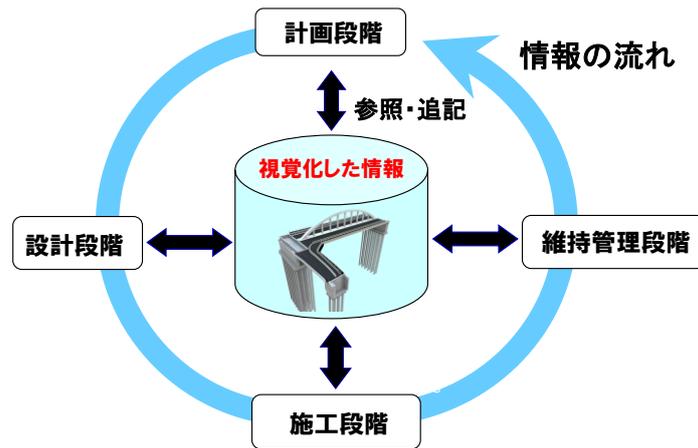


図-1.3.2 業務プロセス段階を跨いだ情報共有イメージ

これらの取り組みの中で、構造物を可視化する媒体として3次元モデルに着目した。現在、土木構造物の設計の品質を向上させるため、設計段階において、構造物の設計を3次元モデル化する取り組みを進めている<sup>3) ~5)</sup>が、設計段階で作成した3次元モデルをVR (Virtual Reality : 仮想現実) としてそのまま施工にも活用する仕組みを考案した。工事施工の現場空間に設計3次元モデルを映し出すことを可能とすれば、建設構造物のイメージの明確化、スケールの可視化ができるようになり、視覚を通して施工の計画を理解することができるとともに、設計を現場の状況を通して確認することができることから、設計精度が向上すると考えた。

そこで、現場空間を現す媒体として、建設工事現場の施工状況確認のために設置しているITV (Industrial Television : 監視カメラ) を用い、その映像にAR (Augmented Reality : 拡張現実感) 技術を用いて設計3次元モデルを重畳 (重ね合わせる) すること) するシステムを開発することにした。

また、3次元モデルはVRとして形状の情報だけを活用するのではなく、プロダクトモデル (Product Model) として情報を蓄積することを可能とすれば、建設ライフサイクルを通しての情報の利活用が効率化すると考えた。そこで、構造物のプロダクトモデルに付与したID (Identifier) と構造物の情報を連携させて蓄積・活用し、工事施工、維持管理段階での情報管理を効率化する情報管理支援ツールを開発することにした。

## 1.4 プロダクトモデルについて

### 1.4.1 プロダクトモデルと BIM/CIM

本研究では、建設ライフサイクルでの情報の蓄積・活用にプロダクトモデルの手法を用いることを念頭に置いている。プロダクトモデルとは、製品のライフサイクル全体に渡る情報の共有及び交換を可能とするデータおよび手順を交換するための標準規格で、ISO (International Organization for Standardization) が国際標準として、ISO10303<sup>6)</sup> の通称STEP (Standard for the Exchange of Product model data) を規定している。国内では、製品を製造するために必要な、形状、機能及びその他のデータによって、その製品をコンピュータ内部に表現したモデル<sup>7)</sup> と定義されている。自動車や航空機の分野では、各種ロボットを自動制御して製品製造を統合化するCAM (Computer Aided Manufacturing) や構造解析等をコンピュータで行うCAE (Computer Aided Engineering) 等の基幹技術として利用されている<sup>8)</sup>。

建設分野では、プロダクトは構造物のことを表し、構造物の3次元データに設計や施工段階の情報を蓄積し、フェーズを超えて利用する一体的なデータモデル<sup>9)</sup> を意味する。プロダクトモデルの導入により情報連携による建設生産システムの効率化が期待され、建築分野では、BIM (Building Information Modeling) として建築物の設計・施工での情報共有・交換手法として実用化がなされている<sup>10)</sup>。土木分野では、国内では国土交通省が主体となって推進しているCIM (Construction Information Modeling/Management) により一部の事業で試行的に使われ始めている<sup>11)</sup>。

3次元モデルを用いた情報連携について、国土交通省が定めたCIMの概念<sup>12)</sup> を図-1.3.3に示す。CIMは、計画、調査、設計段階から3次元モデルを導入することにより、その後の施工、維持管理の各段階においても3次元モデルを連携・発展させて、事業全体にわたる関係者間の情報共有を容易にし、一連の建設生産システムの効率化・高度化を図ることを目的としている。ミスや手戻りの大幅な減少、単純作業の軽減、工程短縮などの施工現場の安全性向上、事業効率及び経済効果に加え、より良いインフラの整備・維持管理による国民生活の向上、建設業界に従事する人のモチベーションアップ、充実感等の心の豊かさの向上が期待されている<sup>12)</sup>。国土交通省は、2017年度からCIMの運用を開始し、概ね3年間でCIMの活用の充実化を図り、2020年度から概ね5年間でCIMの活用を原則化する方針を打ち出している<sup>13)</sup>。

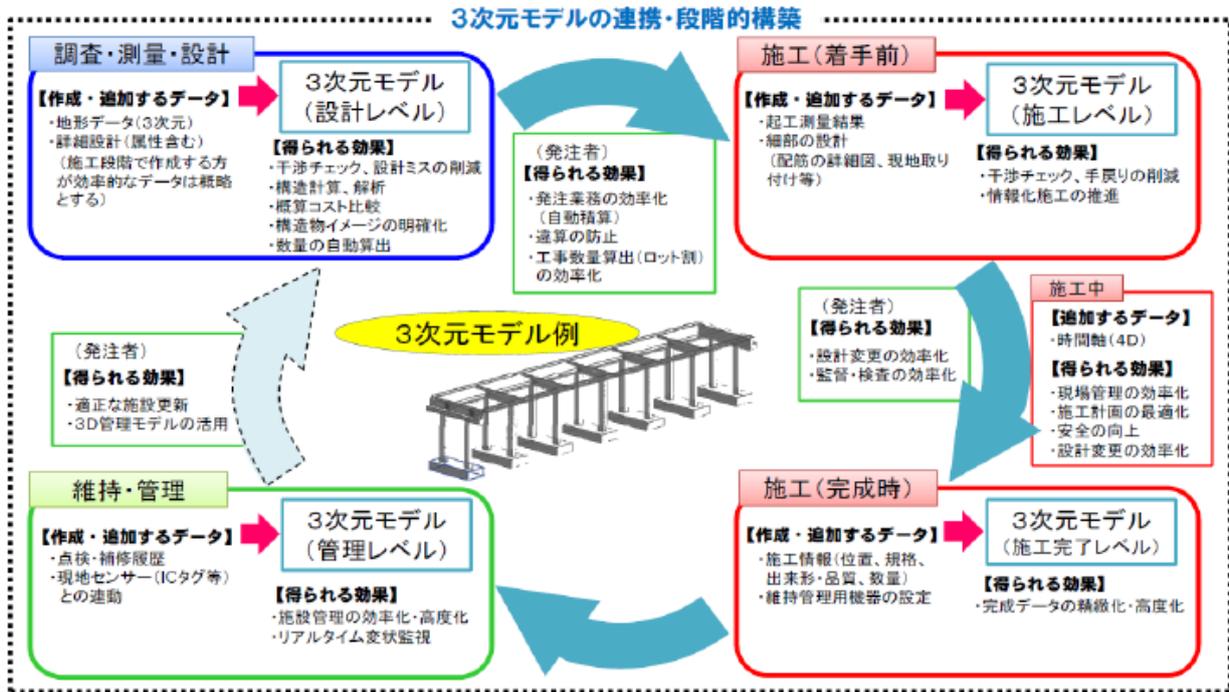


図-1.3.3 CIMの概念 (出典：CIM導入ガイドライン(案))

### 1.4.2 IFC

建築分野では、CAD (Computer-Aided Design) のベンダーやファイル形式に依存することなく、データの交換と共有をできるフォーマットとして、IFC<sup>14)</sup> (Industry Foundation Classes) が用いられている。IFCは、非営利団体であるIAI (International Alliance for Interoperability, 現在の buildingSMART International<sup>15)</sup>) が規定したもので、建築物の要素や構造、分類を規格化した国際標準となっている。2013年にはISO16739:2013<sup>16)</sup> に制定され、国際的な信頼性が増している。

土木分野では、IFCに準拠し、橋梁 (IFC-Bridge<sup>17) 18)</sup>、道路 (IFC-Road)、シールドトンネル (IFC-ShieldTunnel<sup>19) 20)</sup> などのプロダクトモデルが開発されている。鉄道分野 (IFC-Railway) については、国際標準は定められていないが、中国<sup>21)</sup> や韓国<sup>22)</sup> が標準化を目指して開発を進めている。

筆者は、鉄道構造物へのプロダクトモデルの導入を検討しているが、検討の過程でプロダクトモデルそのものに関して整理しておくべき点が多々あることを明らかにしている<sup>23)</sup>。それゆえ、鉄道構造物での本格的な活用にはまだ時間がかかると言える。

## 1.5 本研究の目的

鉄道建設工事の従来の非効率的な情報交換の仕組みを改善し、情報の一元化と視覚化を実現するための3次元の情報共有基盤のあるべき姿を提案するとともに、その情報共有基盤上で3次元モデルを活用するためのツールを開発し、工事監理業務を支援することを目的として研究に取り組む。

また、工事の計画を理解し易くするために開発したカメラの画像上に3次元モデルを投影するシステムと現場での検査およびその後のデータの管理を効率的にするために開発した情報管理支援システムを工事の計画・施工の場面で使用し、その結果を通して開発品は建設生産システムの生産性向上に寄与していることを示すことを本研究の目的とする。

## 1.6 本論文の構成

本論文は、全8章で構成した。以下に各章の概要を示す。

第1章では、研究の背景として、鉄道建設工事における現在の情報の交換・管理における課題について整理し、本研究の目的を述べる。

第2章では、既往の研究および本研究の新規性について述べる。

第3章では、鉄道工事に関する新しい情報共有システムのあるべき姿を提案する。

第4章では、IDを活用して施工情報の可視化と情報の効率的な利活用を行うシステムの開発について述べ、現場試験を通して成果品の有効性について示す。

第5章では、AR技術を用いて工事施工計画の視覚化を行うシステムの開発について述べ、現場試験を通して成果品の有効性について示す。

第6章では、第5章で開発したシステムをより多くの現場で活用するための機能の拡充について述べ、現場試験を通して成果品の効果を示す。

第7章では、第5章で開発したシステムをホーム柵の計画検討に活用するための機能改良について述べ、現場試験を通して成果品の有効性について示す。

最後に、第8章で結論を述べる。

本論文の構成を図-1.6.1に示す。

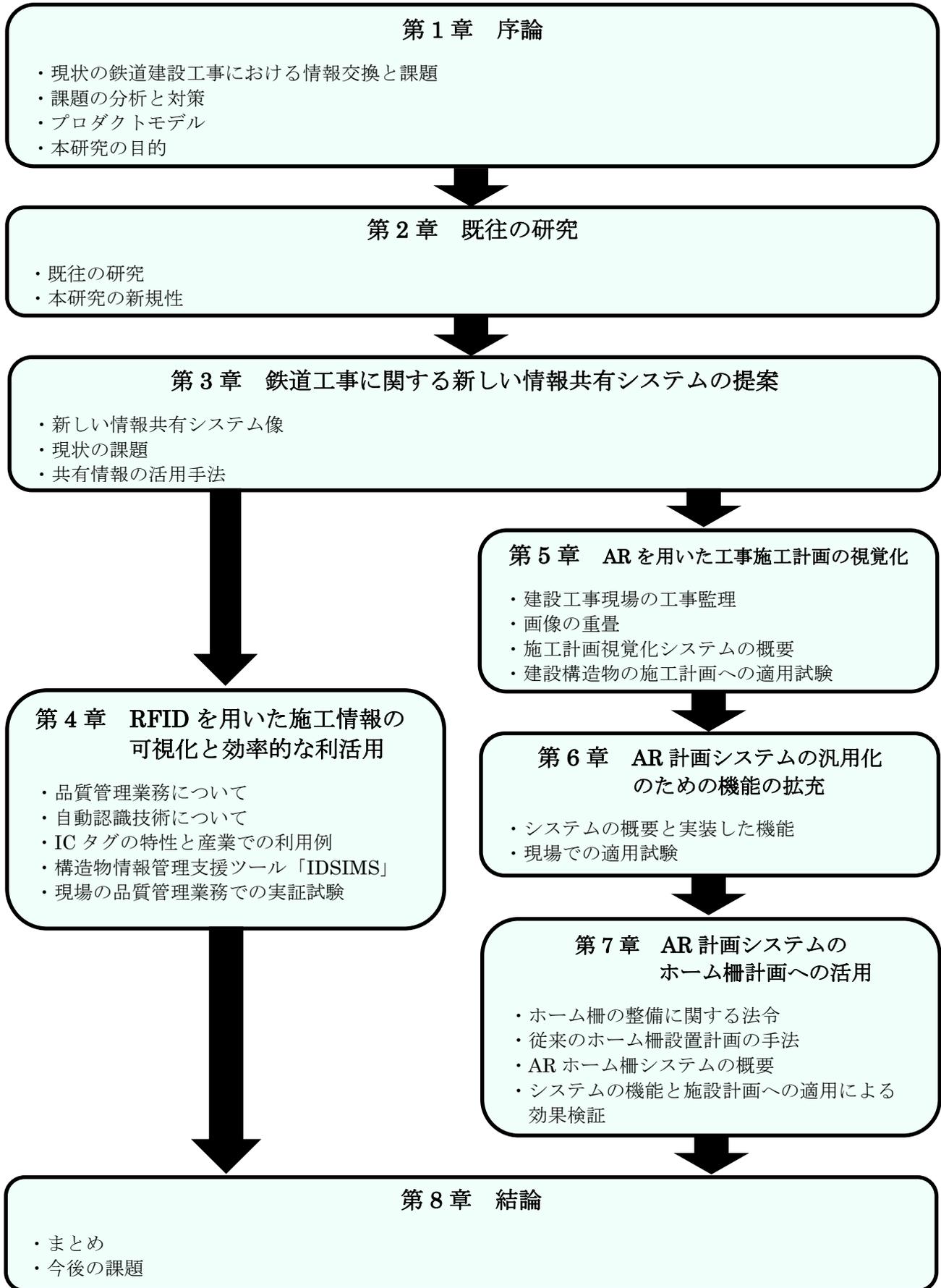


図-1.6.1 本論文の構成



- 21) CRBIM : buildingSMART International Standards Summit 2015 – Singapore, 2015.
- 22) IFC-based Railway Conceptual Model : 土木学会第 71 回年次学術講演会 International Roundtable Meeting, 2016.
- 23) 田原孝:鉄道構造物へのプロダクトモデルの導入に向けた課題, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, VI-757, pp.1513-1514, 2017.

## 第2章 既往の研究

### 2.1 既往の研究

#### 2.1.1 建設工事でのRFIDの利用と情報管理端末に関する既往の研究

建設工事分野におけるICタグを用いた個品管理や携帯式PC（Personal Computer）やPDA（Personal Digital Assistant）による生産管理、品質管理については、これまでも多くの取り組みがなされている。ICタグを用いた品質管理について、松本ら<sup>1)</sup>、および松元ら<sup>2)</sup>は、プレキャストコンクリート部材（以下、PCa部材）のトレーサビリティを確保するため、PCa部材にICタグを直接貼り付け製品管理を行う手法を考案し、さらに、松元ら<sup>2)</sup>は、骨材の管理にICタグを用いる手法も考案している。また、君島ら<sup>3)~5)</sup>は、コンクリートにICタグを埋め込み、ucodeにより管理を行う電腦コンクリートと呼ばれる手法を開発している。

ICタグを用いた施工支援については、吉田ら<sup>6)</sup>は、鉄骨架設の進捗管理にRFID（Radio Frequency Identification）を用いる手法を考案している。この手法では、鉄骨部材に取り付けたICタグに施工履歴を登録するとともに、3次元モデルと連携させ、3次元モデル上に施工箇所を塗り分けて表示することで、進捗管理を行うものである。志谷ら<sup>7)</sup>は、現場でデジタル写真とそれに関連する情報を素早く入手、および蓄積することを目的とした管理システムを考案した。このシステムでは、ICタグは対象物の特定のために用い、写真画像などのデータは、PC内に構築されたICタグのIDに紐づいたDBに蓄積する。ICタグのIDとプロダクトモデルの属性をリンクさせることにより、対象構造物の3次元モデルをPC上で表示することを可能としている。嶋田ら<sup>8)</sup>は、ICタグを活用して維持管理における巡視点検を支援するシステムの開発を行っている。このシステムは、点検箇所にベンチマークとして貼り付けたICタグからPDAで検査履歴を読み取り、PDAに構築した検査システムにより、点検を実施するもので、データの使用頻度と容量に応じて、ICタグとPDAに分けてデータを蓄積している。

ICタグと3次元モデルの連携については、Meadatiら<sup>8)</sup>は、RFIDとBIMの技術を連携させ、現場でICタグから施設の情報を参照できるシステムを考案している。この研究は、施設のライフサイクルに合わせ、計画、設計、施工、維持管理の各段階において、DBをどのように構築すべきか明らかにすることを主眼としている。また、Motamediら<sup>10)</sup>は、施設のライフサイクルに合わせた情報管理を行

うことを目的として、施設に取り付けたICタグとBIMモデルを連携させるシステムを考案し、ライフサイクルごとの施設のIDの構成と運用の方法を提示している。

携帯端末を用いた作業支援については、金子ら<sup>11)</sup>は、鉄筋の配筋検査の効率化を目的として、PDAおよびタブレットと工事事務所内のPCを連携したシステムを開発している。このシステムでは、携帯端末とPCが同期することにより、相互にアップロード、ダウンロードが行えるものである。田辺ら<sup>12) ~14)</sup>は、現場での品質管理時にクラウド上からスマートフォンで設計図面を呼び出し、その場でテキストの書き込みや写真の貼り付けを行うシステムを開発している。羽鳥ら<sup>15)</sup>は、プラント建設工事における管理業務の効率化を目的として、RFIDを応用して資材の管理と写真の管理を行うアプリケーションを開発している。同手法はGPSを併用することにより、RFIDの通信範囲外の資材についても所在を管理することを可能としている。また、携帯式端末と連携したものではないが、黒台ら<sup>16)</sup>は、現場での情報共有を目的として、調査～設計～施工～維持管理の情報を3次元モデルと連携して立体的に蓄積するDBを考案している。

これらの研究・開発は、工事の施工段階、あるいは構造物の維持管理段階における製品管理の高度化、作業性の向上、情報蓄積の効率化などを果たすために、主に施工者または維持管理者（およびその受委託者）を中心に行われている。そのため、工事施工、または維持管理においては効果を発揮している。しかし、施工と維持管理は主体が異なる場合が多く、工事施工段階から維持管理段階への情報連携を行うためには、主体間での情報の受け渡しが必要となるが、その点についての議論は少なく、課題として残されている。

また、調査・計画段階から維持管理段階までの建設ライフサイクルにおける情報を一元的に蓄積するDBの開発においては、情報を蓄積することに主眼がおかれ、その情報を活用するための手段までは明確になっていない。

### 2.1.2 建設工事の計画におけるVR・ARの利用に関する既往の研究

建設工事分野において、仮想の構造物を施工の検討や合意形成に活用する研究が近年盛んになってきている。福地ら<sup>17)</sup>は、CGA（Computer graphics animation）を用いて、ダムの施工を時系列に従い可視化する手法を考案し、緒方ら<sup>18)</sup>は、VM（Virtual Model）を用いて、情報の統合を行い、仮想

空間内に建設プロジェクトの模型を構築する手法を考案している。また、田代<sup>19)</sup>は、3次元VRソフトであるUC-win/Road<sup>20)</sup>を用いて、建設重機械の施工をシミュレートしている。これらの研究は、仮想空間を作りこみ、その中で、VRのモデルを動かして表現するものである。

仮想の建築物を臨場感を持って視覚的に捕らえさせる試みとして、瀬田ら<sup>21)</sup>は、小型CCD (Charge Coupled Device) カメラにより街並みの模型を歩行者のアイレベルで撮影し、街並みの背景には現実の空の映像を重畳することで拡張現実によるアイレベル画像を提供する手法を考案し、孫ら<sup>22)</sup>は、街並みの模型とVRで作成した街並みの位置合わせを行い、模型上にレーザポインタを照射した場合、その地点の歩行者が見える風景を自動算出してVRで風景を描画する手法を考案している。岩滝<sup>23)</sup> <sup>24)</sup>らは、建設機械の遠隔操作支援を目的として、ブルドーザに搭載した複数のカメラ映像により、機体の外周とブレードの中の状況を同時に提示できる手法を考案している。この手法は、あらかじめ周囲の環境とブルドーザのブレードを想定した形状でモデリングして空間内の位置関係を定め、周囲の状況はブルドーザに搭載した魚眼カメラで撮影した画像をテクスチャマッピングし、ブレードの上部に設置した前方監視カメラで得た映像を3次元モデルのブレード平面と地表面に投射することで、全体の状況を提示する。これらは、仮想空間内に現実空間を取り入れるAV (Augmented Virtual : 拡張仮想感) に近い手法と言え、VRの精度により重畳の結果にバラつきが生じやすい。

Kamatら<sup>25)</sup>は、被災した建物の調査を支援することを目的として、災害にあった建物の壁面に健全な状態の構造物のグリッド線データを重ね合わせることで、その変形の程度を視覚的に判断できるシステムを考案した。Woodwardら<sup>26)</sup>は、地図データ上に簡単に建築物のBIMモデルを表示するシステムを構築した。このシステムでは、On Site Playerを用いることにより、PDA上で建物の重畳を行うことができる。この手法は、手軽に重畳が行える点が有意であるが、位置合わせにGPS (Global Positioning System : 全地球測位システム) を用いており、GPSそのものが持つ誤差を補完するために、ランドマークとなるものをプレスマークとして事前に登録しておかなければならない点に課題がある。

本研究では、2つの重畳方法を併用し、精度の高い重畳を行う場合は測量した座標系による手法を用い、簡単な重畳を行う場合は、マーカと言われるARの位置合わせに用いる標識物を用いて位置を合わせる。(後者は、前者よりも重畳の誤差が大きくなるが、本システムのユーザインターフェイス上で

簡単に誤差を修正できる。)これにより、高精度または手軽な重畳を目的や現場条件に合わせて選択して実施できる点が既往の研究と異なる。重畳の手法としては、マーカを必要としないマーカレスなARのシステムの開発も近年行われている。Schubertら<sup>27)</sup>は、対象の建築物の特徴となるパターンを用いて位置合わせを行う手法を考案しているが、屋外の現場では、多様な建築物を対象に精度良く位置合わせを行うことが難しい。また、計画段階では、現場に何度も赴くケースは少なく、一度の現場調査の機会にその場で計画の検討を行うことが多い。そのため、特徴点をあらかじめ記憶しておく手法は、本研究の対象としては不向きである。

ARの分野において、オクルージョン（重畳による遮蔽）は、重要な問題として従来から様々な研究が行われている。神原ら<sup>28)</sup>は、ステレオカメラで撮影した画像から現実空間の奥行き情報を取得する手法を提案し、Luら<sup>29)</sup>は全方位カメラを用いて前景領域の抽出を行う手法の提案している。これらは、仮想の構造物と現実空間の前後関係の把握には有効な手法である。しかし、特殊なカメラやHMD（Head Mounted Display）などの機材を手配しなければならない点、画像の復元やマッチングなどを実施しなければならない点が課題となる。画像処理を行うソフトウェアは種類も豊富になってきているが、建設現場で一般的に流通しているものとは言い難く、またそのソフトウェアを使いこなせる要員が確保できるかも不透明である。本研究では、現場において簡便に重畳作業を行い、計画の検討に役立てることを目指しているため、専門知識がなくても、本研究のシステムのユーザインターフェイス上で誰でも容易にオクルージョンの処理ができるようにした。この点は既往の研究には見られない特徴である。

### 2.1.3 建設工事の施工におけるAR・MRの利用に関する既往の研究

建設工事の分野においても、様々なARやMR（Mixed Reality：複合現実）技術の応用を目的とした研究がなされている。近久<sup>30)</sup>らは、トンネル切羽の工事現場におけるMRシステムの現場での活用手法を提案した。この提案では、自動追尾機能を持ったトータル・ステーションと人の頭部に取り付けたジャイロセンサによってセンシングし、得られたデータにより、PC上で人の位置と視覚方向を算定することで、仮想空間の構造物の座標を変換し、現実空間と同期させることを試みている。

筒井<sup>31)</sup>らは、地下空間における建設工事の設計と施工の円滑な進行を支援するツールを提案した。

この提案は、人の目の代わりとしてCCDカメラ2台を設置した携帯型PCを用い、非線形ひずみを考慮した共線条件式からカメラの位置・姿勢を推定し、カメラ視点から見える画像と仮想空間を重畳するものである。今井<sup>32~34)</sup>は、現場での測線の設定や杭の位置出し作業の効率向上を目的として、計測ロボットにMR技術を導入して自動化する手法を提案した。この提案では、対象構造物などの位置をレイアウトした仮想空間をVRで作成し、マーカをもとにHMD上で現実空間と重畳するシステムの開発を試みている。また、今井<sup>35)</sup>は、位置マークをもとに、建設現場での部材管理、位置管理を行うウェアラブルシステムを考案している。このシステムは、センサーユニットとマーカにより、カメラの位置を検出し、ウェアラブルPCでマーカとVRで作成した仮想空間の相対位置を算出し、仮想空間内に配置した構造物情報と現実空間の情報を重畳して、HMDに表示するものである。矢吹<sup>36)</sup>は、建設現場でプロジェクト説明や施工計画検討時に用いるAR作成を容易にすることを目的として、3次元レーザーキャナとプロダクトモデルを用いた高精度なARの位置合わせ手法を提案した。この提案では、ビデオ画像の特徴点とモバイルマッピングシステムによって得られる点群データを座標既知の点として合わせることにより、屋外での高精度な位置合わせの実現を試みたものである。羽鳥<sup>37)</sup>は、複数マーカとプラント内の画像特徴点の抽出を併用することにより、タブレット端末上に作業方法や点検項目などの画像を重畳し、プラントにおける作業を支援するシステムを開発している。

Satoら<sup>38)</sup>は、物体を複数の視点から撮影し、得られた画像から3次元形状を復元するStructure from Motion (SfM)<sup>39)~42)</sup>の手法と局所特徴量による画像マッチングを用いた位置合わせ手法を併せた画像の重畳手法を考案した。この手法は、構造物の維持管理において、対象構造物の点検項目のガイダンスを表示できるなど検査支援に有意であるが、建設工事の施工段階では、施工の進捗に従い現場の風景が日々変化するため、事前に撮影した画像と現場の現在の画像のマッチングが難しいという課題がある。

以上に挙げた研究報告は、現実空間と仮想空間の重畳にマーカを使用（マーカ認識型と言う）する、あるいは現実空間にあるオブジェクトをマーカに代わる標識物として使用（物体認識型と言う）し、それらの特徴点の検出精度の向上、および現実空間と仮想空間の重畳精度の向上を探求したものである。また、これらの研究では、標識物を検出するために、通常の工事施工で用いている資機材の他に新たな機材を用意している。

#### 2.1.4 CSCW の利用に関する既往の研究

CSCW とは、Computer Supported Cooperative Work の略で、計算機科学と社会科学の協力を得て、グループウェアのデザインと組織的・社会的影響について研究する分野<sup>43)</sup>のことを言う。CS は通信技術・工学、コンピュータの研究を示し、CW は人類学・社会心理学・認知心理学的視点から、人間・社会・仕事の間で起こる人間同士の協調を研究することを示す。建設工事に関係するものとしては、CS の部分に該当するコンピュータ・システムによる協調作業支援の技術に関する研究が数多く行われ、遠隔地間で情報共有するためのグループウェアなどが開発されている。

仮想空間を通じた情報の共有に関する初期の研究としては、Habitat システム<sup>44)</sup>が挙げられる。Habitat は、2次元のユーザインターフェイスを持つ共有の仮想世界で、仮想世界の中でアバターを通してチャットにより会話を交わすものである。仮想世界内での建物などとアバターの空間的な位置関係や動作が明確になり、ユーザの情報理解を支援する効果があるため、離れた場所にいるユーザ間のコミュニケーションシステムとして機能した。仮想世界は現実の空間を忠実に再現したものではないため、現実空間との直接的な対比は難しいという課題がある。

桑田ら<sup>45)</sup>は、地理情報を基にした情報共有システムを作成し、電子地図上に記入した手書きの情報を離れた場所にいる相手と共有することにより、情報の伝達が正確かつ迅速になることを示している。Rekimoto<sup>46)</sup><sup>47)</sup>は、ハンドヘルドディスプレイを有する PDA の背面にカメラを接続し、マーカを認識することにより、現実世界の風景に情報を付加するシステムを開発し、遠隔地で撮影した映像にスケッチを書き込むことで、遠隔地間作業指示を支援出来ること<sup>48)</sup>を示している。これらの手法は、作成した情報を相手に伝えることを主眼としており、情報は2次元的なものとなっている。

Hakkarainen ら<sup>49)</sup>は、MR 技術を用いて、モバイル端末により地理座標上に配置した4次元の CAD モデルを呼び出し、リアルタイムで建築物の BIM 情報の読み書きが可能なシステムを開発した。このシステムでは、GPS とデジタルコンパスを用いることで正確に構築物の位置を描写することを可能としている。付加する情報は CAD 上で書き込みを行い、処理した後の情報をモバイル端末または、PC 上で表示するシステムのため、複数のユーザで情報交換をする用途には不向きと言える。

SUN ら<sup>50)</sup>は、VR を利用した合意形成システムである VR-Cloud<sup>51)</sup>の通信機能を用いることで、ユーザ間でのディスカッションや VR 空間内での図形や文字の表示が可能となり、遠隔地の設計者に

よる協調設計が可能になることを示している。VR-Cloud は、3DCAD で作成した精緻な 3 次元モデルをサーバ上で共有し、インターネット回線を通してシステムを利用しているユーザが自由に VR 空間を操作できるものである。精緻な VR のため、現実空間に近い感覚を得ることが出来る利点があるが、現実空間と仮想空間の対比を行うためには、VR 空間と現実世界を描写した写真や映像を並べて見比べる必要がある。

遠隔地間のコミュニケーションに関する新しい研究としては、Pejsa ら<sup>52)</sup> は、デプスカメラを使用してローカルユーザの 3D キャプチャを行い、バーチャルコピーを実際の規模でリモートスペースにリアルタイムで投影する Room2Room というシステムを開発し、対面式での会話を可能にしている。相手の身振りや視線などを等身大で視覚的に捉えることが出来るため、コミュニケーションにより臨場感が増すことを示している。本研究では、工事の内容を関係者間で相互に理解するために、情報を共有することに主眼を置いており、対話者の音声や姿を伝えることについては検討していない。

## 2.2 本研究の新規性

### 2.2.1 建設工事での RFID と情報管理端末の利用に関して

本研究は、将来的に構造物を所有する工事の発注者が、情報共有基盤を整備・管理し、調査・計画段階から維持管理段階まで一貫して、その基盤で受発注者を含めた関係者間での情報の共有・活用を行うことを目標として、情報蓄積、情報交換を行うためのツールを開発するものである。また、現地構造物に設置した IC タグを通じて、構造物の情報を取得できる手法のため、工事施工段階では設計の趣旨を知り、維持管理段階では施工の状況をその場で知ることができ、技術者の迅速な判断を可能とする。これら一連の情報連携を一つのツールを通して行うことは、既往の研究には見られない新たな取り組みである。

### 2.2.2 建設工事での VR・AR・MR と CSCW の利用に関して

本研究の目標は、施工計画の内容を具体的に把握できるようにするために、現場映像に 3 次元モデルを重畳した画像を活用することである。現在の施工計画の打合せでは、図面や写真などに記号や文字を記入し、関係者間でそれをもとに議論して行われている。そこで、本論文では、3 次元モデルを重畳し

た画像上に文字や記号を記入できる仕様とし、かつ、それらをインターネット回線を通じて複数の関係者で操作・共有できるものとしている。WWW（World Wide Web）上に構築された掲示板は数多く存在するが、ネットワークカメラによりリアルタイムの映像から注目したい箇所を選択して描写できる機能と3次元モデルを重畳することでほぼ正確な建設位置に構造物を立体的に表現できる機能、文字などを書き込む機能、通信により情報交換をする機能を併せて備えたコミュニケーションツールは、既往の研究には見当たらず、本研究の着想の独自性を示している。

なお、詳細は後述するが、本研究は、現場で構造物の視覚化を迅速に実行するための持ち運びが可能なスタンドアロンタイプのシステムと建設現場等に常設し、複数のユーザで画像と情報を共有出来るサーバを介したネットワークタイプのシステムの2つのシステムから、現場の条件に合わせてタイプを選択する手法としている。

## 参考文献

- 1) 松本慎也, 大久保孝昭, 森達哉, 小山至: PCa コンクリート部材の施工における RFID 技術の活用に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.253-258, 2007.
- 2) 松元和伸, 原島誠, 松下慎治, 大平信吾, 小笠原剛: 土木構造物への RFID の適用例, セメントコンクリート, No.749, pp.58-64, セメント協会, 2009.
- 3) 君島健之: 次世代社会資本整備と電脳コンクリート, 建設マネジメント技術, No.351, pp.24-27, 経済調査会, 2007.
- 4) 君島健之, 坂村健: 電脳コンクリートの展開, セメントコンクリート, No.749, pp.39-43, セメント協会, 2009.
- 5) 君島健之, 井ノ川尚, 浅野文男, 川島恭志: RF タグのコンクリートへの適用性に関する検討, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.246-253, セメント協会, 2011.
- 6) 吉田知洋, 土橋稔美, 古庄真一郎, 蔡成浩: 3次元モデルを活用した鉄骨工事の施工支援システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.347-348, 2009.
- 7) 志谷倫章, 矢吹信喜: IC タグを用いた現場デジタル写真および設計情報管理システム, 土木情報利用技術論文集, Vol.14, pp.59-66, 土木学会, 2005.
- 8) 嶋田善多, 矢吹信喜, 坂田智己: 土木設備の維持管理体系における巡視点検と IC タグの活用, 土木学会論文集, No.777, VI-65, pp.161-173, 2004.
- 9) Meadati, P., Irizarry, J. and Akhnoukh, A. K. : BIM and RFID Integration : A Pilot Study, Second International Conference on Construction in Developing Countries (ICCIDC-II), pp.570-578, 2010.
- 10) Motamedi, A. and Hammad, A. : LIFECYCLE MANAGEMENT OF FACILITIES COMPONENTS USING RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION AND BUILDING INFORMATION MODEL, Journal of Information Technology in Construction, pp.238-262, 2009.
- 11) 金子智弥: タブレット端末を利用した配筋検査支援システム, コンクリート工学, Vol.50, No.9, pp.835-840, 日本コンクリート工学会, 2012.
- 12) 田辺要平, 清水友理, 佐藤康弘: 次世代携帯端末を用いた施工管理手法の開発 その1 システム概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.955-956, 2011.
- 13) 清水友理, 田辺要平, 佐藤康弘: 次世代携帯端末を用いた施工管理手法の開発 その2 建築施工現場での検証結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.957-958, 2011.
- 14) 清水友理, 田辺要平, 佐藤康弘: 次世代携帯端末を用いた施工管理手法の開発 その3 業務効率化検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.149-151, 2012.
- 15) 羽鳥文雄, 吉村康史, 江幡伸一: プラント建設における作業履歴管理システム開発と RFID の活用, 土木情報利用技術論文集, Vol.17, pp.127-134, 土木学会, 2008.
- 16) 黒台昌弘, 黒田清隆, 小野正樹: 施工履歴と品質情報の一元管理を目的とした立体データベースの開発, 電力土木, No.334, pp.156-159, 電力土木技術協会, 2008.
- 17) 福地良彦, 小林一郎, 野村大樹, 山根崇: 施工段階における CG アニメーションの役割と有効性に関する考察: 田島ダム建設工事での適用の統括, 土木情報システム論文集, Vol.7, pp.1-8, 土木学会, 1998.
- 18) 緒方正剛, 小林一郎, 福地良彦: 建設プロジェクトにおける合意形成のためのバーチャルモデルの利用, 土木情報システム論文集, Vol.7, pp.81-88, 土木学会, 1998.
- 19) 田代則雄: 3次元 VR 技術を用いた建設・施工シミュレーションの活用, 建設の施工企画, Vol.7, pp.48-52, 日本建設機械施工協会, 2007.

- 20) FORUM8 HP : UC-win/Road, <http://www.forum8.co.jp/product/ucwin/road/ucwin-road-1.htm>, (入手 2018.1).
- 21) 瀬田恵之, 松本直司, 岡島達雄, 河野俊樹, 神谷彰伸, 山内比呂史 : 知覚行動直結型ビジュアルシミュレータの開発, 日本建築学会技術報告集, Vol.4, pp.92-96, 1997.
- 22) 孫磊, 福田知弘, 徳原俊樹, 矢吹信喜 : 模型と VR との視点連携による都市プレゼンテーションシステムの開発, 日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No.668, pp.953-961, 2011.
- 23) 岩滝宗一郎, 藤井浩光, Alessandro, M., 山下淳, 浅間一, 吉灘裕 : 建設機械の操作支援のための 3DCG モデルへのテキストチャマッピングを用いた周囲環境と作業部映像の同時提示システム, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, pp.2106-2109, 2014.
- 24) 岩滝宗一郎, 藤井浩光, Alessandro, M., 山下淳, 浅間一, 吉灘裕 : 建設機械の操作支援のための周囲カメラ映像および作業部カメラ映像統合による任意視点映像提示, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 2P1-P03, 2015.
- 25) Vineet, R. K. and Sherif, E. T. : Structure of an augmented situational visualization framework for rapid building damage evaluation, Proceedings of Conference on Construction Applications of Virtual Reality, ADETTI/ISCITE, Lisbon, Portugal, pp.101-107, 2004.
- 26) Woodward, C., Hakkarainen, M., Korkalo, O., Kantonen, T., Aittala, M., Rainio, K. and Kähkönen, K. : Mixed reality for mobile construction site visualization and communication, Proceedings of 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR2010), Sendai, Japan, pp.35-44, 2010.
- 27) Schubert, G., Schattel, D., Tönnis, M., Klinker, M. and Petzold, F. : Tangible Mixed Reality On-Site : Interactive Augmented Visualisations from Architectural Working Models in Urban Design, Computer-Aided Architectural Design Futures, Communications in Computer and Information Science, Vol.527, pp.55-74, 2015.
- 28) 神原誠之, 大隈隆史, 竹村治雄, 横矢直和 : ビデオシースルー型拡張現実感のための実時間ステレオ画像合成, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J82-D2, No.10, pp.1775-1783, 1999.
- 29) Lu, B. V., 角田哲也, 川上玲, 大石岳史, 池内克史 : 全方位カメラを用いた屋外複合現実感におけるオクルージョンを考慮した移動物体の検出と影の除去, 情報処理学会研究報告, Vol.2008, No.36 (2008-CVIM-163), pp.295-300, 2008.
- 30) 近久博志, 松元和伸, 筒井雅行, 小林薫, 中原博隆 : 建設工事へ適用するために開発した複合現実感システムについて, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, CS-226, pp.452-453, 2000.
- 31) 筒井雅行, 近久博志, 小林薫, 阿保寿郎 : 複合現実感による地下空間の可視化に関する実験的研究, 地下空間シンポジウム論文報告集, vol.8, pp.211-216, 土木学会, 2003.
- 32) 今井博 : テレイグジスタンス基礎技術の研究—MR 技術による—, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, VI-060, pp.119-120, 2007.
- 33) 今井博 : テレイグジスタンス基礎技術の研究 (その 2) —MR 技術によるマーキング—, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, VI-043, pp.85-86, 2008.
- 34) 今井博 : テレイグジスタンス基礎技術の研究 (その 3) —テレイグジスタンス技術とその将来—, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, IV-152, pp.303-304, 2009.
- 35) 今井博 : AR 技術を用いた現場支援システムの研究—建設業にテレイグジスタンスの概念を導入する第一歩として—, 大成建設技術センター報第 41 号, pp.56-1-56-4, 2008.
- 36) 矢吹信喜 : 3 次元レーザーキャナとプロダクトモデルを用いた高精度の建設分野野外拡張現実感技術の開発, JACIC 研究助成事業報告書第 2010-12 号, 2011.
- 37) 羽鳥文雄 : 拡張現実感技術を利用したプラント施工・運転作業支援システムの開発に関する研究, 大阪大学大学院工学研究科博士学位論文, 2017.

- 38) Sato, Y., Fukuda, T., Yabuki, N., Michikawa, T. and Motamedi, A. : A Marker-less Augmented Reality System Using Image Processing Techniques for Architecture and Urban Environment, Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2016), pp.713-722, 2016.
- 39) Tomasi, C. and Kanade, T. : Shape and Motion from Image Streams under Orthography : a factorization method, International Journal of Computer Vision (IJCV), Vol.9, pp.137-154, 1992.
- 40) 織田和夫 : 解説 : Structure from Motion (SfM) 第一回 SfM の概要とバンドル調整, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.3, pp.206-209, 日本写真測量学会, 2016.
- 41) 布施孝志 : 解説 : Structure from Motion (SfM) 第二回 SfM と多視点ステレオ, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.4, pp.259-262, 日本写真測量学会, 2016.
- 42) 中野一也 : 解説 : Structure from Motion (SfM) 第三回 SfM による三次元形状復元ソフトウェアについて, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.5, pp.321-324, 日本写真測量学会, 2016.
- 43) 石井裕 : CSCW とグループウェア—協創メディアとしてのコンピュータ, オーム社, 1994.
- 44) Morningstar, C. and Farmer, F. R. : The lessons of Lucasfilm's Habitat, The First International Conference on Cyberspace, Austin, Texas, USA, 1990, pp.282-307, MIT Press, 1991.
- 45) 桑田喜隆, 神成淳司, 大谷尚通, 井上潮 : 地理情報に基づく防災情報のリアルタイム共有システム, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.11, pp.3419-3428, 2002.
- 46) Rekimoto, J. : Augmented Interaction : Toward a New Human-Computer Interaction Style Based on Situation Awareness, Proceedings of Interactive Systems and Software II (WISS'94), pp.9-17, 1994.
- 47) Rekimoto, J. : NaviCam : A Magnifying Glass Approach to Augmented Reality Systems, Presence : Teleoperators and Virtual Environments, Vol.6, No.4, pp.399-412, 1997.
- 48) Rekimoto, J. and Nagao, K. : The World through the Computer : Computer Augmented Interaction with Real World Environments, Proceedings of the 8th annual ACM symposium on User Interface Software and Technology(UIST '95), pp.29-36, 1995.
- 49) Hakkarainen, M., Woodward, C., and Rainio, K. : Software Architecture for Mobile Mixed Reality and 4D BIM Interaction, Proceedings of 25th CIB W78 Conference, pp.1-8, 2009.
- 50) SUN, L., FUKUDA, T. and CHRISTOPHE, S. : A SYNCHRONOUS DISTRIBUTED VR MEETING WITH ANNOTATION AND DISCUSSION FUNCTIONS, Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2013), pp.447-456, 2013.
- 51) FORUM8 HP : VR-Cloud®, <http://www.forum8.co.jp/product/ucwin/VC/VR-Cloud.htm>, (入手 2018.1).
- 52) Pejsa, T., Kantor, J., Benko, H., Ofek, E. and Wilson, A. : Room2Room : Enabling Life-Size Telepresence in a Projected Augmented Reality Environment, Proceedings of the 19th ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work & Social Computing (CSCW '16), San Francisco, pp.1716-1725, 2016.

### 第3章 鉄道工事に関する新しい情報共有システムの提案

#### 3.1 新しい情報共有システム像

筆者は、3次元プラットフォームによる情報管理の手法について検討を行ってきた<sup>1) ~3)</sup>。情報共有プラットフォームは、**図-3.1.1**に概略イメージを表すように、プロジェクトの情報を一元化した上で、業務プロセス段階を跨いだ複数の関係者間での利用を可能とするもので、これにより情報の蓄積と交換が効率的になると考えられる。また、構造物の情報を3次元モデルにより視覚化したものとDBの連携を図ることで、視覚的に情報を把握することが可能となり、理解力の向上と手戻りの減少が期待される。企画・計画、調査・設計、工事施工、維持管理の各プロセス段階を通して、一元化した情報を利活用していくことにより、建設生産システムの生産性は向上していくと考えられる。

この仕組みを実現するためには、情報を蓄積する媒体、情報を記録する媒体、情報を視覚化する媒体、業務プロセス段階を跨いで情報を交換する媒体の一体的な整備が必要である。筆者は、情報の記録と交換のためのツールとして、構造物情報管理支援システムを開発し、併せて情報蓄積のためのサーバと視覚化のためのプロダクトモデルをこのシステムに連携させる仕組みを構築した。

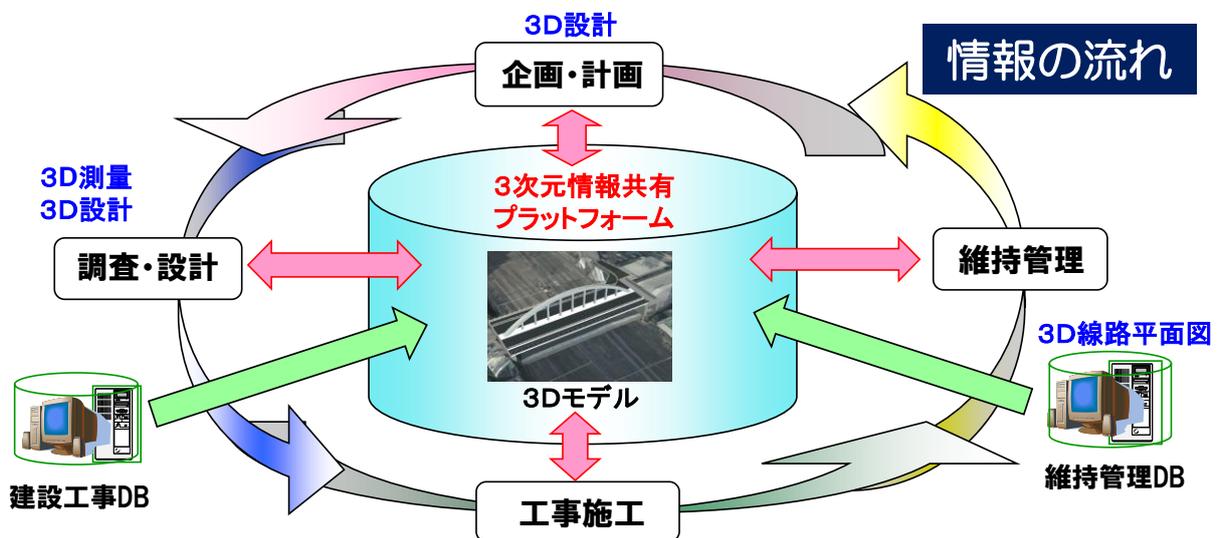


図-3.1.1 新たな情報交換の手法

筆者および東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR東日本）の社員らが開発している情報共有プラットフォームの一例を図-3.1.2に示す。JR東日本のエリア内に整備しているデジタルの市街地図と航空写真によるオルソ画像に3次元の線路平面図情報を統合した「鉄道GIS」<sup>4)</sup>（JR東日本 鉄道事業本部設備部の業務用システム、GISはGeographic Information System：地理情報システムの略）（図-3.1.3）の線路上に見かけ上の情報基盤を築き、そこに駅舎や鉄道構造物のプロダクトモデルを収めることで、視覚的に構造物の情報を得ることができるものである。見かけ上の基盤と表現したのは、実際のデータはそれぞれのDBに収納されており、DBMS（DataBase Management System）により統合されたデータ群が見た目としてモニタ上に表示されているためである。

鉄道構造物プロダクトモデルの品質管理に関する属性情報は、本論文で詳述する構造物情報管理支援システムによって、編集・更新がなされていく。

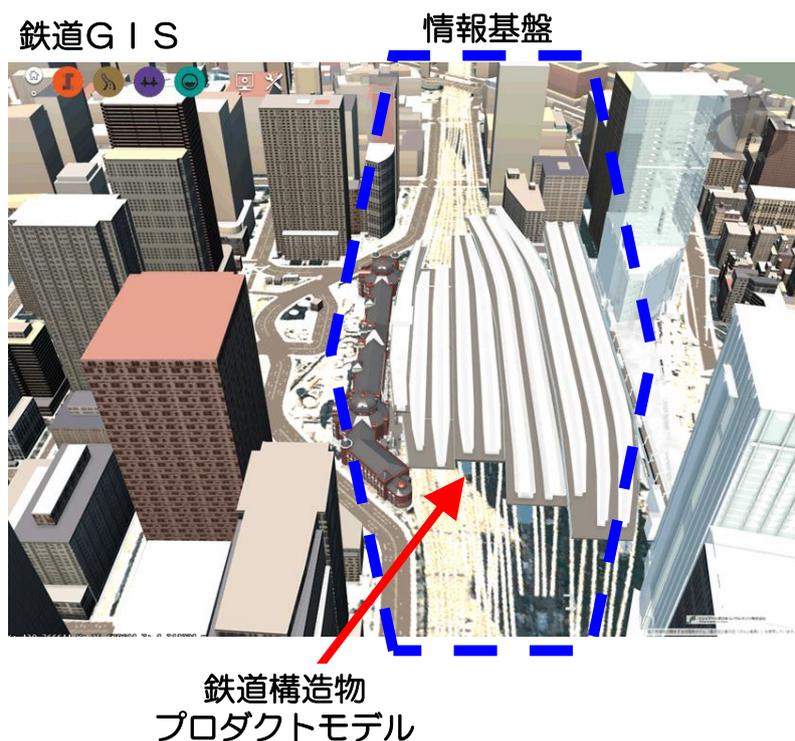


図-3.1.2 情報共有プラットフォームの例



図-3.1.3 鉄道 GIS の例

GISと3次元モデルの連携による情報基盤に関する既往の研究としては、道路会社を中心に、点群データをもとに作成した構造物の3次元モデルをGIS上に整備し、維持管理に活用する取り組みが進められている<sup>5) 6)</sup>。しかし、これらは、土木構造物の維持管理に用途が限定されている。また、地図形式で作成された3次元GISソフトに3次元モデルを配置する取り組みとして、Shenら<sup>7)</sup>は、Trimble社の3次元モデリングソフトSketchUp<sup>8)</sup>で作成した建築物をGoogle Earth<sup>9)</sup>に配置し、都市計画の可視化を行った。そして、関係者でon-lineで共有して都市計画の設計を行うために、クラウド型VRツールについて比較検討を行った<sup>10)</sup>。これらは、計画された構造物などが現況地形・風景と調和しているかを視覚的に確認することが可能な場を提供し、計画の理解と検討をしやすくすることを主たる目的として行われている。

本研究の取り組みは、3次元地図と構造物のプロダクトモデルにより、JR東日本エリアの鉄道構造物の情報を視覚的、空間的に把握することができるものである。土木構造物を中心に検討を進めるものの、設備や電気構造物の情報をこの基盤上に蓄積していくことも視野に入れている。また、プロダクトモデルを計画段階から維持管理段階まで活用することに特徴がある。広域なインフラ情報を総合的に管理するプラットフォームの実現を目指すという点に本研究の独自性がある。

図-3.1.4は、情報基盤に蓄積された3次元情報を視覚的に検索するためのユーザインターフェイスの一例を示し、JR東日本エリアの鉄道地図を拡大していくと、路線上に蓄積された情報が表示されるようになっており、一目で情報が蓄積されていることを理解することができる。図-3.1.5は、駅舎のモデルの一例で、このモデルをクリックすることで情報検索へと進むことができる。

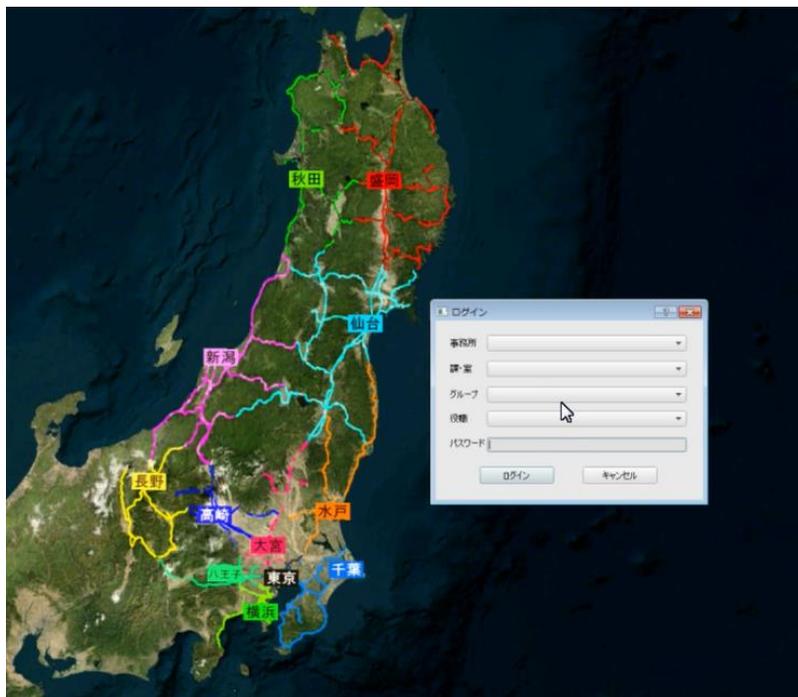


図-3.1.4 システムのインターフェイスの一例

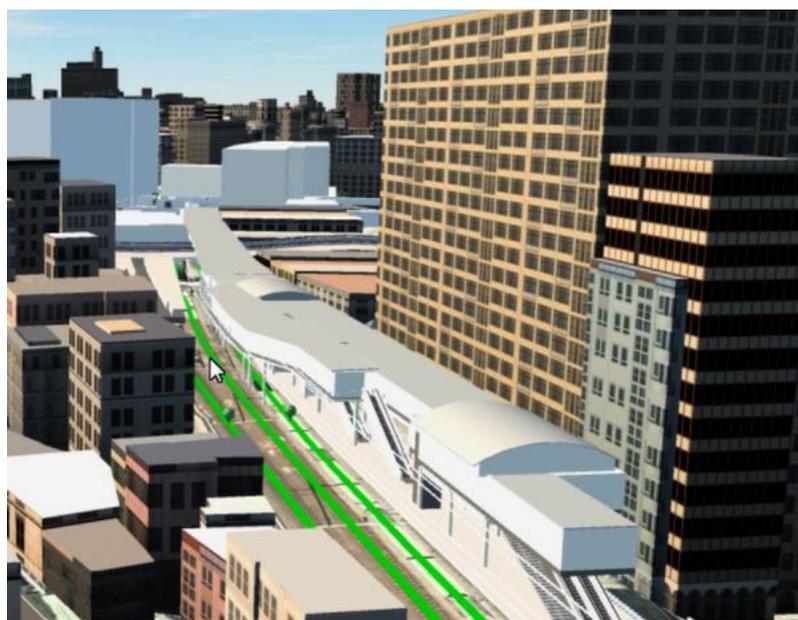


図-3.1.5 GIS上に蓄積された構造物情報の一例

## 3.2 現状の課題

本情報共有システムは試験環境でのみ検証を行っており、実用化の検討は行っていない。その理由は、①セキュリティ上の問題、②費用の問題、③ハードウェアの問題が存在するためである。

情報共有システムとしては、鉄道に関するすべての情報が一元化されることが理想的である。しかし、JR東日本では、1日約12,400本運転される電車<sup>7)</sup>の運行管理データ、それに携わる乗務員のデータ、鉄道インフラを維持管理するためのデータや1日約1,700万人の乗客<sup>11)</sup>が利用する鉄道の乗降データ、約6,180万枚に及ぶsuica<sup>12)</sup>（鉄道やバス、買い物などで利用できるJR東日本のICカード）のデータなどが保持されており、障害をきたすと何百万人も乗客に影響を与えるため、それぞれのシステムに厳重なセキュリティが課されている。システムへの障害を予防するため、現状では、鉄道構造物の建設に関わるDB、維持管理に関わるDBは、鉄道の運行に関わるDBとは切り離して構築されているとともに、相互のDBは連携しない個別のシステムとなっている。なお、既存の個別システムに支障をきたさずに連携を図る手法として、各々のDBの複製データをクラウド上に集積し、API（Application Programming Interface）によりデータ利用を可能とする仕組みについて検討が進められている。

新しくシステムを構築する場合、他のシステムに影響を及ぼす可能性が無いと言い切れないため、高度なセキュリティ診断が必須となっている。本研究では、情報共有システムの検討を行う中で、セキュリティの検証のためにかかる費用の検討を行ったが、数千万円規模となることが明らかになった。そのため、建設工事の効率化を主たる目的とするには費用が嵩み過ぎ、実現の見通しが厳しい点が課題と言える。

また、今回の情報共有システムの検討は、エリアを絞り、地形や構造物のデータ量を小さくした上で模擬的に稼働させているが、3次元情報をモニタ上で表示する際に画面が固まるなどの症状が見られた。そのため、東日本エリアの莫大なデータを対象としたシステムを構築するためには、相当の処理能力を要するハードウェアが必要となること、データの処理に負荷がかからないようなDBの構成を考案する必要があることなどが課題となる。

本論文では、情報共有システムについては、概要のみを述べ、情報共有システム上に蓄積される情報を活用するためのツールの開発について詳述することにする。

### 3.3 共有情報の活用手法

情報共有のためのプラットフォームに蓄積される情報は3次元のプロダクトモデルを想定している。プロダクトモデルは、形状情報と属性情報、情報交換のための仕様を持ち合わせているモデルである。本研究では、このうち形状情報と属性情報を活用する仕組みを構築することにより、効率的な情報の蓄積と生産性の向上を目指す。

プロダクトモデルの属性情報とは、製品の素材情報や形状、寸法などの情報のことを言い、モデルの作成初期、作成途中、完成後の任意のタイミングで属性を付与することができる。プロダクトモデルは、オブジェクトと呼ばれる部品の集合体であり、共通するオブジェクトを組み合わせてモデルを作成する場合も多い。同一のオブジェクトをいくつか組み合わせる場合は、モデルの作成の初期にオブジェクトに属性を付与すれば、オブジェクトを流用できるため属性の入力は一度で済む。しかし、モデルの完成後に属性を入力する場合、すべてのオブジェクトに属性を入力することになり手数が多くかかる。そのため、属性情報はできるだけ初期の段階にルール付けして付与し、手数を少なくすることが望ましい。本研究では、ひとつのプロダクトモデルまたは任意の単位のオブジェクトに属性情報としてIDを付与し、そのIDに紐付いた施工情報をDBに蓄積する仕組みの構築を目指す。これにより、プロダクトモデルに直接的に施工情報に関する属性情報の書き込みを行わないでも、モデルの外部にあるデータを参照することで属性情報を得ることができる。また、プロダクトモデルに直接属性を書き込んでいる場合は、変更があれば書き直す必要があるが、外部データの参照であれば、そちらのデータの書き換えを行うのみで良い。このため、本手法は効率的にプロダクトモデルの属性情報を更新できるものと言える。さらに、外部DBへの施工情報の登録にはRFIDの手法を用いる。RFIDはIDに紐付いたデータを瞬時に読み書きする機能を持っているため、簡便に施工情報の記録を行うことが可能である。

次に、3次元の形状情報は、視覚的にその構造を理解させる特性を持っている。そこで、この特性を工事の計画、設計、施工に活かすことができれば、計画、設計、施工の理解力が向上するものと考えた。理解力の向上が実現すれば、すなわち各プロセスでの手戻りが減少し、生産性の向上に繋がると考えられる。そこで、各プロセス段階で3次元モデルの形状を活用する仕組みを考案することにした。従来から計画等の検討にVRやフォトモンタージュといった手法が用いられているが、VRは空間

のすべてがグラフィックでバーチャルに作成されているため、現実の空間との対比に多少の違和感を感じる。フォトモンタージュは現実の画像を用いているものの対象物を強調したり、見せたくない部分を意図的に隠すことができるため、現物とは異なる印象を与える場合がある。

そこで、本研究では、現実空間と計画建造物の対比を容易にするためにARの技術を用いることを検討した。ARとは、現実環境にVR環境の情報を重畳して提示することで現実世界にVR環境の持つ機能を与え、現実環境における情報活動を支援する概念である<sup>13)</sup>。

工事を計画している現場の画像に、建造物の3次元モデルを重ね合わせる手法を構築することで、計画、設計、施工の各プロセスで、技術者が容易に事柄を理解できることを目指す。

## 参考文献

- 1) 柳沼謙一, 田原孝, 小林三昭, 池田美紀 : 次世代の建設生産システムの高品質化に関する基礎研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, VI-524, pp.1047-1048, 2010.
- 2) 田原孝, 柳沼謙一, 小林三昭 : 建設生産システムにおける 3 次元モデル導入に関する研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, VI-134, pp.267-268, 2011.
- 3) 田原孝, 金子達哉, 清水満 : 3 次元モデルを活用した建設生産システム構築の試み, コンクリート工学, Vol.50, No.9, pp.804-809, 日本コンクリート工学会, 2012.
- 4) 小林三昭, 久保田直樹, 楠達夫 : GIS を活用した統合資産管理システムの開発, 土木情報利用技術講演集, Vol.28, pp.9-12, 土木学会, 2003.
- 5) 首都高技術株式会社 HP : InfraDoctor, <http://www.shutoko-eng.jp/technology/infradoctor.php/>, (入手 2017.12).
- 6) 大伴真吾, 鈴木清, 土橋浩, 永田佳文, 菅野晶夫, 安中智, 平岡卓爾, 乾義文 : 道路・構造物維持管理支援システムにおけるポイントクラウドの高度利活用について, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.1, pp.27-31, 日本写真測量学会, 2016.
- 7) Shen, Z., Lei, Z., Li, X. and Sugihara, K. : Design Coordination Regarding Urban Design Guidelines Using Google Earth, International Review for Spatial Planning and Sustainable Development, Vol.1, No.3, pp.53-68, 2010.
- 8) SketchUp HP : <https://www.sketchup.com/>, (入手 2018.1).
- 9) Google Earth HP : <https://www.google.co.jp/intl/ja/earth/>, (入手 2018.1).
- 10) Shen, Z., Ma, Y., Sugihara, K., Lei, Z., and Shi, E. : Technical Possibilities of Cloud Based Virtual Reality Implementing Software as a Service for Online Collaboration in Urban Planning, International Journal of Communications, Network and System Sciences, Vol.7, No.11, pp.463-473, 2014.
- 11) 東日本旅客鉄道株式会社 HP : <http://www.jreast.co.jp/company/outline/>, (入手 2017.10).
- 12) 東日本旅客鉄道株式会社 2017 年 3 月期決算資料, p.36, 2017.
- 13) 舘璋, 佐藤誠, 廣瀬 通孝 監修 : バーチャルリアリティ学, pp.138-156, 日本バーチャルリアリティ学会, 2011.

## 第4章 RFIDを用いた施工情報の可視化と効率的な利活用

### 4.1 概要

本章では、工事施工、維持管理段階での情報交換を効率的に行うことを目的として、構造物のプロダクトモデルに付与したIDを建設ライフサイクルを通して活用する情報管理支援システムの開発成果について述べる。まず、4.2では、建設工事の品質管理業務について述べる。4.3では、自動認識技術について整理する。4.4では、自動認識技術を用いた既往の製品と品質管理手法について整理する。4.5では、RFIDを用いた構造物情報管理支援システムの概要について述べる。4.6では、同システムの現場への適用試験について述べる。なお、本論文で用いる用語として、可視化は、「目に見える状態にすること」、視覚化は、「目に見えることで理解できるようにすること」と定義する。

### 4.2 品質管理業務について

工事施工段階では、発注者側の監督者は原則として毎日現場の巡回を行い、構造物の施工状況と出来形の確認を行っている。これは品質管理業務と呼ばれている。出来形の管理手順は、図-4.2.1に示

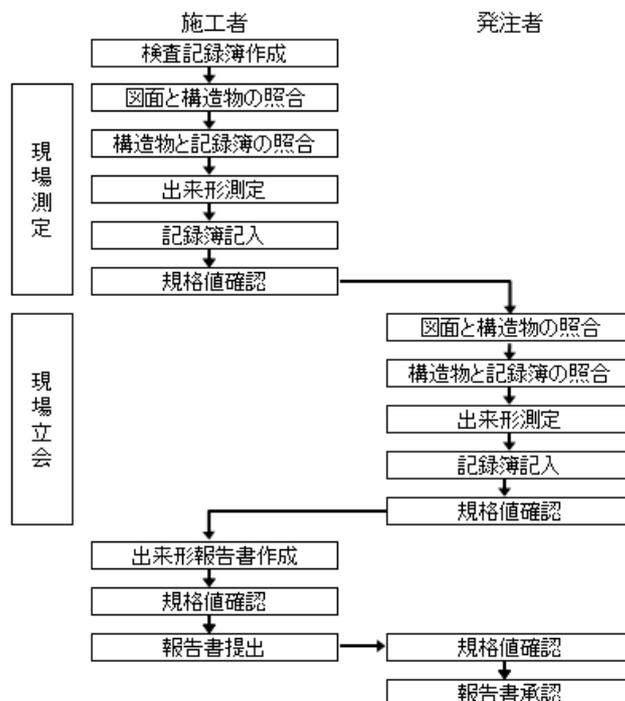


図-4.2.1 出来形管理の概略フロー

すように、まず、施工者が設計図面をもとに検査記録簿を作成する。次に、現場で、設計図面集の中から検査対象の構造物のものを探し、図面との照合を行い、検査記録簿から検査対象構造物のページを探し出した後、測定に入る。構造物の寸法や形状を確認し、その結果を検査記録簿に記入した後、規格値を満たしているかチェックを行う。そして、発注者側の監督者が施工者の事前の測定値をもとに立会い確認検査を行う。最後に、一連のこれらの記録を紙媒体の報告書として整理するためにデータを書き写す。この作業を工事の進捗に応じたブロックごとに何度も繰り返し行う。

この過程において、検査対象構造物の取り違え（本来とは違う検査記録簿への記入）、検査記録簿の記入欄の間違い、測定値の誤記入といった事象が発生している。その原因として考えられるのは、いくつもの似たような構造物を人間の判断で見分け（図-4.2.2）、同様な検査作業を何度も続けるため、作業量の増加に伴い、見誤り、勘違い、書き間違いといったヒューマンエラーが生じることである。人間がデータを入力する際に生じるミスについて調査を行った古谷野<sup>1)</sup>の研究では、単純入力作業であっても2%程度の入力ミスが発生し、また、吉村ら<sup>2)</sup>の調査では、入力作業での単純な打ち間違いは1%以下であるが、入力作業において勘違いを起こすことで8%程度の入力ミスが発生することが示されている。そのため、ミスを減らすためには、読み書きをする機会を減らすことと主観の入らない自動的に処理をする仕組みを導入することが望ましい。

また、現状の品質管理業務では、出来形の確認を始めるまでの構造物と検査記録簿の同定に時間を要している。その理由は、一見同じように見える構造物の中から、構造物の位置や特徴点をもとに照



(a)



(b)

図-4.2.2 (a) 構造物の見分けイメージと(b) 現場の構造物の一例

合を行う（実際の作業方法としては、〇〇線（路線名称）・上り本線・海側・起点方から何本目といった具合に位置をカウントしている）ため、構造物が多くなれば抽出が煩雑になり、照合にかかる時間が増えたり、勘違いが生じやすくなるためである。それゆえ、迅速な照合は検査における課題のひとつとなっている。

このため、一意に検査対象を特定することを可能とすれば、人為的なミスを減らすことができるとともに、時間の短縮が図れ、作業が効率化することが見込まれる。

そこで、自動認識技術に着目し、同技術の持つ個体識別特性を活用することにより、一意での対象物特定が可能になり、また、追記特性により容易にデータの更新が可能になると考え、自動認識技術のひとつであるICタグと携帯式端末を用い、品質管理業務を支援する構造物情報管理支援システム「IDSIMS」(Identification-based Structure Information Management System)の開発を行うことにした。

### 4.3 自動認識技術について

#### 4.3.1 自動認識技術の概要

自動認識技術 (Automatic Identification) は、「人間を介さず、ハード、ソフトを含む機器により自動的にバーコード、磁気カード、RFIDなどのデータを取り込み、内容を認識すること<sup>3)</sup>と規定される。その種類は、1次元シンボル (バーコード)、2次元シンボル (QRコード)、RFID (ICタグ)、OCR、磁気ストライプカード、コンタクト付きICカード、コンタクトレスICカード、バイオメトリクスがあり、これらを総称して「データキャリア」と呼ばれている。このうち、バイオメトリクスを除くデータキャリアは、あらかじめ規定されたデータやシンボルなどを機械により認識するものである。これに対して、バイオメトリクスは、指紋・網膜・虹彩・音声など生物個体が持つ特性を認識するものである。

#### 4.3.2 ICタグの概要と種類・分類

ICタグは、記憶装置を持つICチップとアンテナから構成されたカード状またはタグ状の媒体を商品などの物体に設置し、電波を用いて非接触で記憶されたデータを送受信する。ICタグの情報の読み書

きは、リーダー（読み取り）／ライター（書き込み）（以下、r/w）を用いて行われ、そのデータは、コンピュータのDBで管理されるのが一般的である。

電波を用いた非接触型自動認識技術全般を指す言葉としてRFIDという言葉がある。このため、ICタグはRFIDタグと呼ばれることがある。その他にも、電子タグ、IDタグ、RFタグ、無線タグなど様々な呼び方をされることもあるが、本論文では「ICタグ」という用語を用いることとする。

## (1) ICタグの通信方式

ICタグとr/wとの通信方式は、電磁誘導方式と電波方式の2つの方式がある。

### a) 電磁誘導方式

電磁誘導方式は、r/wの発する磁力にICタグ内のコイルをさらすことで発生する誘起電圧を利用して交信する方式である。タグとリーダー（またはライター）間にプラスチックや紙などの絶縁体が存在しても高い信頼性の通信を行える半面、金属に影響を受けやすい。最大通信距離は、タグの種類、及びリーダーのアンテナや出力により異なるが、数cmから2m程度である。使用する周波数帯は主として150kHz以下（主に125kHz帯）や13.56MHzなどである。

### b) 電波方式

電波方式は、電波帯の中でも比較的短い波長の周波数を利用してICタグと交信する方式であり、最大通信距離は、周波数帯域、リーダー（またはライター）の出力、アンテナにより異なるが、数m程度である。日本で現在、主に使われている周波数帯はUHF帯（920MHz帯）と2.45GHz帯が挙げられる。このうち、2.45GHz帯は、水分に吸収されやすいというデメリットがある。

## (2) ICタグの周波数帯

ICタグは、主に以下に示す周波数帯を用いて通信を行う。以下、国内外で利用されている周波数と通信距離、ICタグの仕様は以下のように分類される。なお、記載されている通信距離は、一般的な数値であり、アンテナの形状（指向性の有無や出力）、ICタグのアンテナ（主に大きさ）により異なる。

### a) 長波（135kHz以下）

電磁誘導の通信方式で採用される周波数帯であり、通信距離は数十cmである。水分の影響、金属

の影響を受け難いが、他の周波数帯域に比べて通信距離が短い。

**b) 短波 (13.56MHz)**

電磁誘導の通信方式で採用される周波数帯であり、通信距離は最大1m程度である。ISO15693で規格化されている。歴史の長い135kHz以下の帯域の商品に取って代わり、現在、様々なアプリケーションで利用されている。

**c) UHF帯 (860~960MHz)**

マイクロ波方式で採用される周波数帯域であり、周波数帯域別で見ても通信距離が長く取れる帯域である。我が国では従来、携帯電話の周波数と重なるためUHF帯の使用はできなかったが、総務省が2006年1月にUHF帯をICタグに使うための省令改正を実施し、2006年末から製品が発売されており、現在ではUHF帯の使用も可能である。なお、据え置き型リーダで使える周波数帯は952M~954MHzの2MHz幅分であり、これを200kHz幅ずつの9チャンネルに分けて使用する。諸外国では、米国が26MHzの帯域幅を500kHz幅ずつの50チャンネルに分けて利用しており、それに比べるととても狭い範囲の利用になる。さらに、同時に使うチャンネルは2つ程度離す必要があるため、必ずしもすべてのチャンネルを使えない。

**d) マイクロ波 (2.45GHz)**

マイクロ波方式で採用される周波数帯域であり、通信距離は1m程度である。単位時間あたりの読取り時間が短い特長を持つ反面、周囲の環境やノイズの影響を受けやすい短所もある。

**(3) ICタグの記憶方式**

ICタグに内蔵されているICチップの記憶方式は、以下のように分類される。なお一般的に、書き込み機能（ライト機能）を有するほどICタグの価格が高価になる。

**a) リードオンリー型**

ICチップ製造時に書き込まれた識別用IDを利用して、情報の読み出しだけを行う。

**b) ライトワンス型**

ICタグを利用する際に、一度だけ情報の書き込みが可能なものであり、書き込み後はリードオンリー型と同様に利用する。

### c) リードライト型

ICタグの利用中に何度でも情報の再書き込みが可能である。

## (4) ICタグの電源方式

ICタグは、タグがリーダ（またはライタ）に対して情報を送信する際に使用する電源によって以下のように分類される。

### a) パッシブタグ

リーダ（またはライタ）から供給される電磁波をエネルギーとして交信を行う。一般的に電池を内蔵しないため、アクティブタグに比べて小型化が容易であるとともに、電池交換等のメンテナンスが不要であるというメリットがある。その反面、自ら情報処理や情報発信が行えないとともに、通信距離が限定される。

### b) アクティブタグ

電池を内蔵し、自ら情報処理や情報発信を行うことが可能であるとともに、交信距離が前述のパッシブタグに比べて長くなる。その反面、電池を内蔵するため電池交換や充電が必要となるとともに、小型化に限界があり、またコスト的にもパッシブタグよりも高価になる。

## 4.4 ICタグの特性と産業での利用例

ICタグには、以下に述べるような特性があり、産業界において様々な用途で使用されている。

### (1) 非接触で読み取りが可能

ICタグは、タグ自体に接触することなく、ICチップに記憶されたデータの読み出しや新たな情報の書き込みを行うことができる。

例として、商品の検品作業などでは、服などの商品に取り付けられたICタグが見える位置でなくても、その方向にリーダをかざすだけでICタグに記録されている情報を読取ることができる。その他、書店や図書館などでは、出入口に設置したゲートの通過により、書籍に対して会計・貸出処理がされているかをチェックすることも実用化されている。

## (2) 一括（同時）に読み取りが可能

ICタグは、バーコードのように1つずつ読み取り作業を行う必要がなく、輻輳制御機能を備えたり、アンテナを用いることにより、複数のICタグに対して、一括して同時に読み取り、書き込みを行うことができる。例えば、ベルトコンベアに流れてくる個々の商品に取り付けられたICタグを一括読み取りすることで、商品管理や出庫検査を効率化させたり、図書館の複数の蔵書に対して、貸出・返却処理を一度に行ったりすることが可能であり、既に実用化されている。

## (3) 移動中でも読み取りが可能

ICタグは、ベルトコンベア上の荷物など、移動する物体（商品）に対して設置されたICタグを、動きを止めずに情報の読み取りができる。例えば、電車のパンタグラフのすり板の磨耗測定時に、走行車両のID番号、運行番号をリアルタイムに識別し、測定結果とともに記録することなどが可能<sup>4)</sup>であり、既に実用化されている。

## (4) 被覆されていても読み取りが可能

箱（金属質のものを除く）の中など遮蔽するものがある場合でも情報を読み取ることができる。例えば、ダンボールなどに箱詰めされた個々の商品にICタグを設置することにより、箱の外側から商品の点数などを測定することが可能である。また、図書館の蔵書に付与したICタグとハンディスキヤナを利用することにより、書架に並んだ状態のまま点検を行うことができ、既に実用化されている。

## (5) 書き込みが可能

ICタグは、バーコードやQRコードと異なり、タグ自身に情報を追記したり、記録されている情報を消去して新しい情報を記録したりすることができる。例えば、生産や流通経路の履歴情報を書き込むことができたり、車への部品の装着完了時に、完了した工程の内容を記録したりすることによる生産ラインの厳密な品質管理が可能<sup>5)</sup>であり、既に実用化されている。

#### (6) 小型

ICタグの種類によっては非常に小さいものもあるため、対象物が小さなものであっても、スペースをあまり意識せずに貼付することができる。

#### (7) 大容量

ICタグは、バーコードやQRコードなどと比較して、大量の情報を記録することができる。例えば、原材料の産地や生産者の情報だけでなく、流通経路の履歴情報など多くの情報が記録できる。

#### (8) 複製が困難（セキュリティの確保）

ICタグは、バーコードやQRコードと比較して偽造や複製が困難であり、さらに、読み取りや書き込みの制限ができるなど、高いセキュリティを確保することができる。例えば、美術品の裏側にICタグを貼付することで、真贋判定、偽造防止ができたり、コンテナの扉の開閉を自動的かつ電氣的に記録し、不要な扉の開閉をチェックしたりすることが可能であり、既に実用化されている。

#### (9) 環境に対する耐性

ICタグは、埃や汚れ、水などに強く、高温や化学薬品使用などの環境下でも利用できる。例えば、シリコンウェハー生産工程のように高温な上に有害な化学製品を使用する製造環境でもICタグの利用が可能である。

## 4.5 構造物情報管理支援システム「IDSIMS」

### 4.5.1 IC タグの選定

前述のように、ICタグには様々な種類が存在する。田原ら<sup>6)</sup>は、建設工事現場での使用に適したデータキャリアを選定するため、キャリアの機能を確認する試験を実施した。

使用したICタグの種類は、表-4.5.1に示す2.4GHz、902～928MHz（以下、UHF帯）、13.56MHzの周波数帯のパッシブタイプのもので、135kHzと13.56MHzは、ほぼ同様の機能であるので、一般的に使用されている13.56MHzを選定した。コンクリート面、金属面、土面にICタグを設置し、タグに対して、表-4.5.2に示すリーダを0度、45度、90度の角度にセットした場合のリーダで取りが可能な距離を計測した。図-4.5.1に45度の場合の位置関係を示す。

表-4.5.1 使用したデータキャリア

	タグ名称	製作会社	型式	仕 様							寸法 (mm)	写真
				周波数帯	読取距離 (mm)	リード	ライト	容量	表面素材	動作温度範囲		
1	H型 金属製タグ (μチップ)	日立 システムズ	H02H	2.4 GHz	10	○	×	IDのみ	SUS	0°C ～ +40°C	3×13×52 (約6.0g)	
2	UHF 金属タグ (μチップN)	日立化成	IM5-X07	902 ～928 MHz	500	○	×	96bit	SUS	-40°C ～ +70°C	22×24×5.3	
3	コインタグ (I-CODE SLI)	NXPセミコン ダクタース	—	13.56 MHz	50	○	○	896bit	PPS	-25°C ～ +75°C	直径15×2.4 (0.8g)	

表-4.5.2 使用したリーダー

	周波数帯	製作会社	型式	仕様			写真
				送信出力	読取距離 (mm)	寸法 (mm)	
1	2.4 GHz	セコニック	R001M	10mW以下	100	215×90×35	
2	902 ~928 MHz	マイティキューブ	AT880	250mW以下	4000	158×78×28	
3	13.56 MHz	ウェルキャット	RCT 200-01	—	50	160×56.6×39	

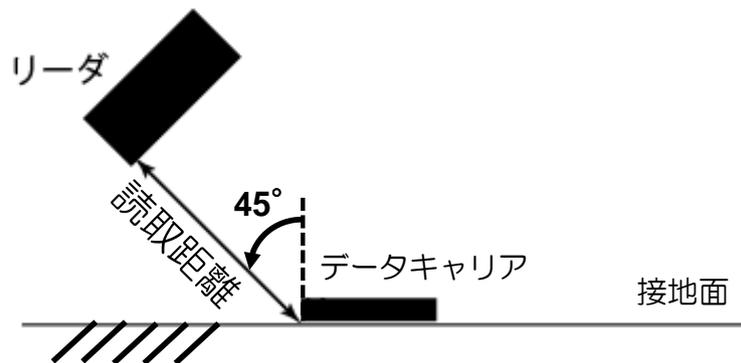


図-4.5.1 読取り角度と距離

試験を3回実施した結果、読取距離の平均値は、表-4.5.3に示すように2.4GHzのタグは10mm程度、UHF帯のタグは300~1000mm程度、13.56MHzのタグは50~80mm程度であった。2.4GHzのタグは、リーダーとICタグが正対していない場合は読取りが不可能であったため、リーダーの読取り範囲が制限されることから、2.4GHzのタグは選定から外した。

また、読取距離ではUHF帯のタグが優位であるが、読取り可能距離が長いがゆえに、かえって近接のタグを読取ってしまうという弊害が見られたため、ツールにはパッシブタイプの13.56MHzのコインタグを採用することにした。

表-4.5.3 読取り距離結果 (mm)

	角度	2.4GHz	UHF 帯	13.56MHz
コンクリート	0 度	9	536	70
	45 度	×	441	81
	90 度	×	260	48
金属	0 度	11	905	0
	45 度	×	1029	×
	90 度	×	669	×
土	0 度	9	537	80
	45 度	×	514	105
	90 度	×	274	54

(凡例) × : 読取り不可

#### 4.5.2 IDSIMS の概要

IDSIMSの概念は、図-4.5.3に示すように、構造物に付与したID（ここでは、高架構造物の1ブロックに「A1」というIDを付与）をもとに、設計段階で作成した「A1」のPRODUCTモデルの属性情報に、構造物に取り付けたICタグを通して、施工・維持管理段階の情報を逐次追加・更新する（図-4.5.4）ものであり、なおかつ施工段階の品質管理業務，維持管理段階の点検業務を支援し，業務の効率化を可能にするシステムである。ICタグにより，現場で構造物に関する情報の可視化が図れる。

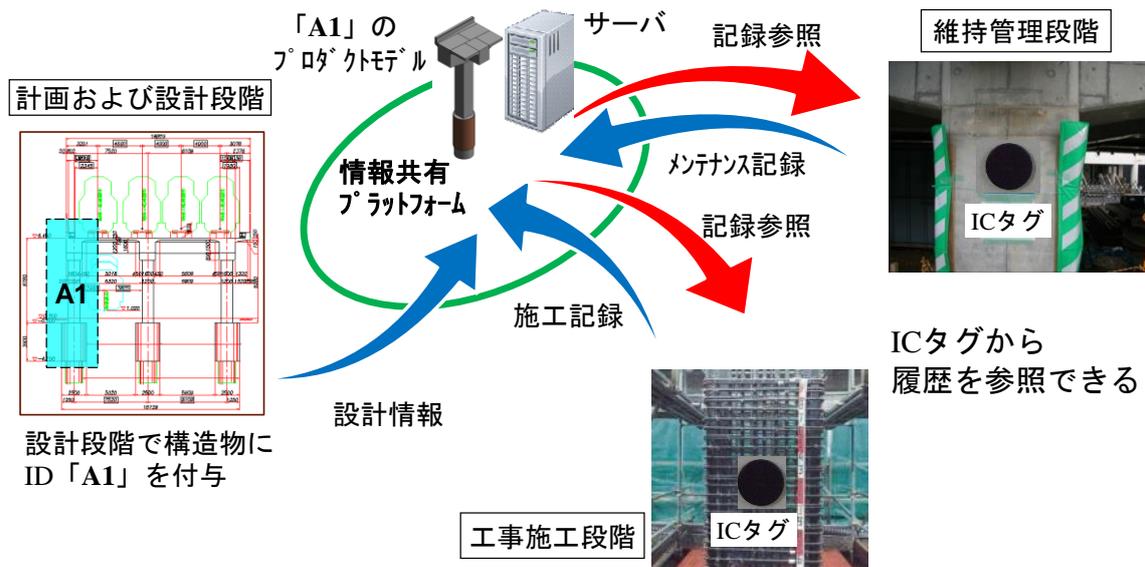


図-4.5.3 情報共有プラットフォームとICタグでの連携

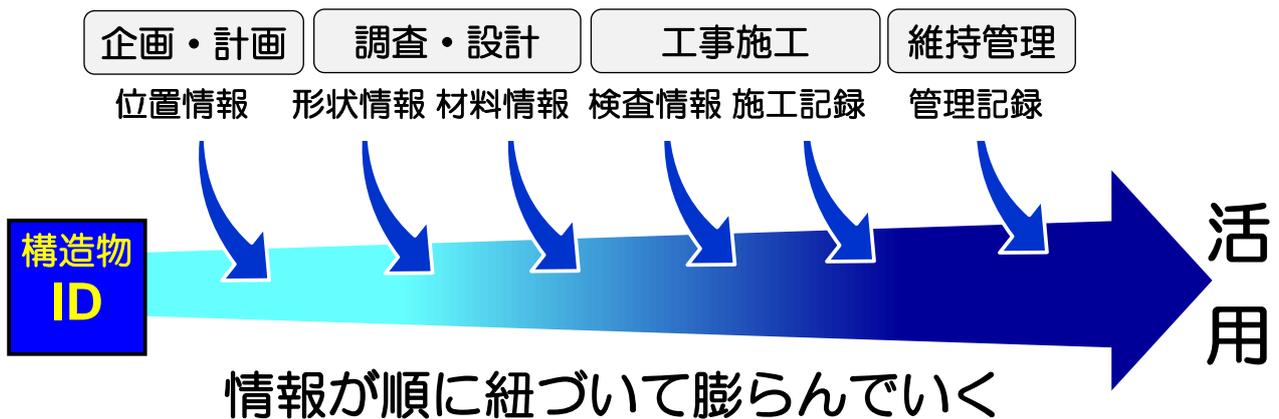


図-4.5.4 IDをもとにした連携のイメージ

IDSIMSは、図-4.5.5に示すように、ICタグと携帯式端末、DBサーバ、および通信回線で構成され、r/wにはNFC（Near Field Communication）のものを用いている。（携帯式端末にNFCが内蔵されている場合は、r/wは不要である。）なお、携帯式端末にインストールした本システムのアプリケーションソフトウェアを「情報管理ツール」と呼ぶことにする。

設計段階で構造物の任意の単位（例えば、コンクリートの打設単位とした場合、図-4.5.6に示す構造物では、打ち継目で分けた3つのブロック）ごとに付与した各IDに応じたデータを収納するDBを構

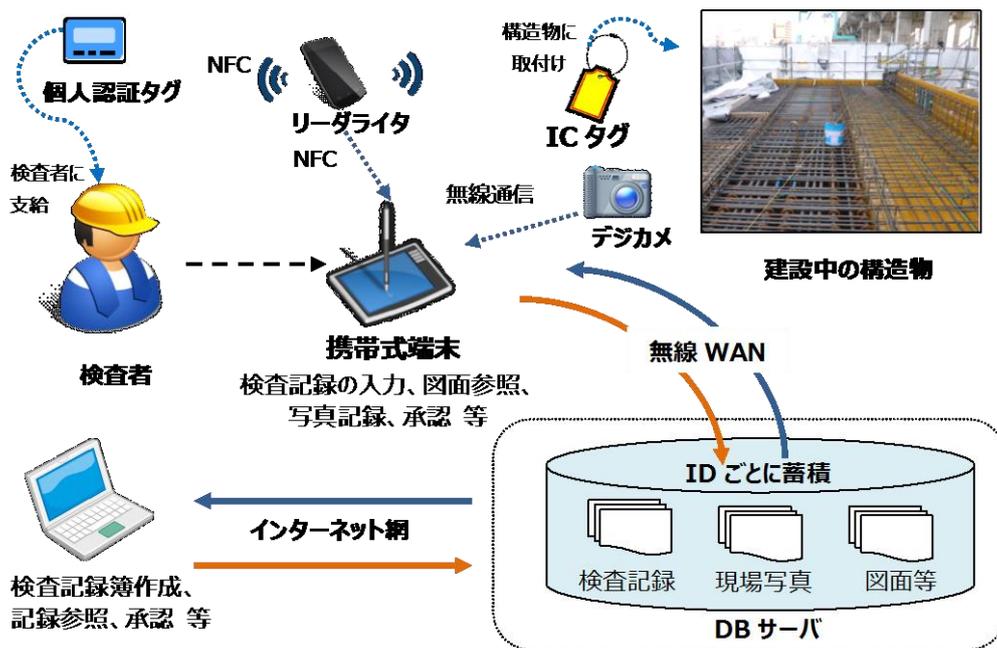


図-4.5.5 IDSIMSの構成イメージ

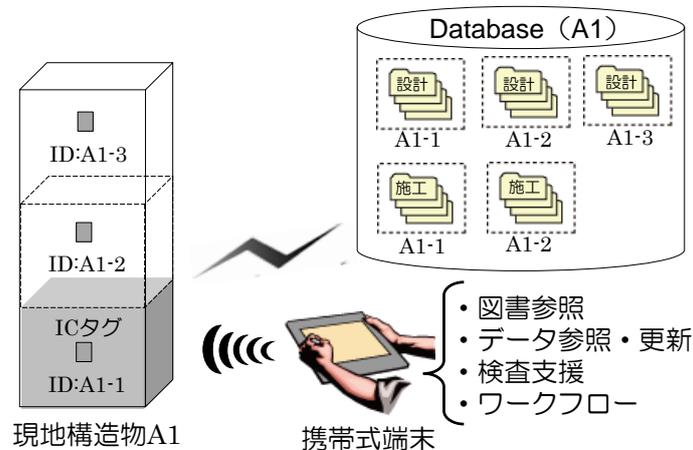


図-4.5.6 IDの割付とDBの構成

築し、DBとの紐付けを行ったIC タグを施工段階において構造物に設置する。このIC タグを r/wにより認識すると、携帯式端末にそのIDに関する構造物情報が呼び出され、設計情報の参照や品質管理記録や維持管理記録の登録が可能となる。なお、ICタグの取り付けミスを防止するため、構造物には何も記録されていない状態のICタグを取り付け、現地でICタグにr/wをかざし情報管理ツールの情報を書き込むことによりIDを付与する。ICタグの設置後にプロダクトモデル上で属性情報を確認することで、ICタグが計画通りに配置されていることをチェックすることができる。

従来の品質管理業務では、出来形の確認検査を実施する段階、出来形管理記録を報告書として整理する段階、および施工者から発注者に提出された報告書の内容を確認する段階において多くの時間を要している。また、プロジェクトを通して提出される報告書の量が膨大となるため、その保管場所がかさむ(図-4.5.7)ことや書類の検索に手間取ることが問題となっていた。そのため、IDSIMSでは、出来形の確認検査における閾値判定の自動化と検査結果データを報告書としてそのまま監督員へ提出できるワークフローシステムの導入により、処理の迅速化を図るとともに、報告書のDB化により保管上の課題を解消した。このIDSIMSでは、DBがあらかじめIDごとに構成されていることに特長がある。DBの構成単位が検査の1単位と同一のため、データの編集を行うことなく、そのままID一つ分のデータ群を報告書としてワークフローシステムにかけることができる。

なお、次節で述べるようにIDは統合を図ることができる。一方、情報が収納されている状態のDBを要素別に分割するには大変手数がかかるため、計画段階では細かめにIDの設定を行っておくことが



図-4.5.7 現状の報告書の保管状況

望ましい。

ICタグを用いて、情報管理を効率化する取り組みは第2章に記したように従来から多くなされているが、一つのシステムでID連携、検査機能、報告書処理機能、情報蓄積機能を果たし、複合的に建設生産の効率化を実現させる点に本研究の新規性がある。

なお、IDSIMSでは、建設段階で構造物に設置したICタグを完成後もそのまま使い続けることを想定しており、工事竣功後の現地構造物から構造物の生産の生い立ちを知り得ることができる。鉄道構造物の維持管理は、鉄道の運行終了後から翌日の運行開始前までの間合いで実施されている。首都圏の路線の場合、その間合いは3～4時間程度と短時間であり、迅速に検査・修繕業務が行われている。これまでの業務の場合、構造物に何らかの症状の発生が見込まれる場合、検査終了後に執務区所に戻ってから文献等の調査を行っていた。IDSIMSを導入することにより、現場で施工時の構造物の情報を知ることが出来るため、迅速な判断と行動を支援することができる。

#### 4.5.3 IDの関連付け

IDSIMSは、施工段階の構造物にICタグを貼り付ける仕様になっている。ICタグ設置面へのコンクリート打設や隣接した構造物の構築により、物理的にICタグの読み取りが不可能な環境が発生することやICタグの寿命により読み書きが不能となることが想定されるため、検査記録簿に複数のIDを関連付ける機能を本ツールに装備した。これにより、ICタグの切り換えが可能になるとともに、施工の進捗に応じて複数のICタグを一つのICタグでまとめて管理することが可能となる。例えば、前述の図-4.5.6に示す構造物A1の場合、新たにA1-0というICタグを設置し、ID:A1-3の検査記録簿に登録した場合、タグA1-0からもID:A1-3の情報が参照可能となり、タグA1-3をタグA1-0と置き換えることができる(図-4.5.8(a)参照)。また、A1-0とA1-1, A1-2, A1-3の3つのIDを関連付けた場合、タグA1-0から構造物A1に関するすべての情報を参照することが可能となる(図-4.5.8(b)参照)。

なお、本論文では簡略化のため、A1と言うIDを用いたが、実運用の際には、線名、キロ程、上下線別、構造物種別、構造物位置、検査位置、通し番号、枝番などを示す20～30桁程度の文字列となるため、あらかじめナンバリングのルールを定めておく必要がある。また、現場に設置されるICタグには、この文字列のみが記録されている。構造物の詳細情報を参照するためには専用のアプリケーションと

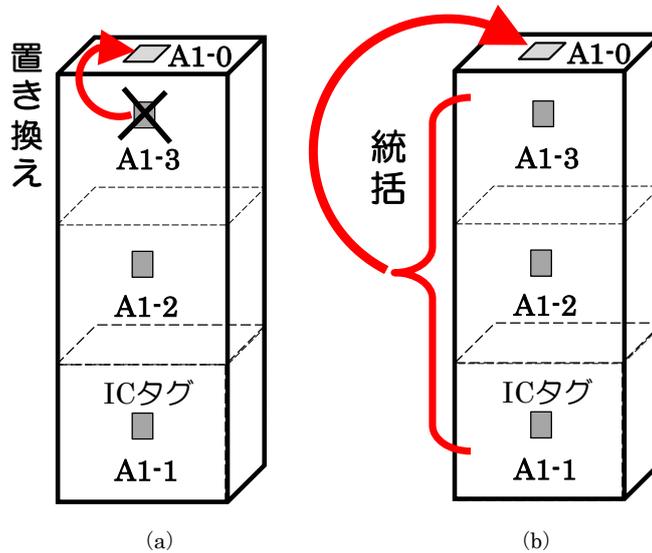


図-4.5.8 IDの (a) 置き換えと (b) 統括のイメージ

ユーザIDが必要となるため、第三者が汎用ソフトウェアで情報を読み取ることはできない。

## 4.6 現場の品質管理業務での実証試験

開発したIDSIMSの機能を検証するため、建設工事現場において実証試験を行った。試験対象の構造物は、鉄筋コンクリートラーメン高架橋で、鉄筋工の工程において組み立て段階の鉄筋にICタグを取り付け、システムの通信状況の確認と検査データの処理状況、検査後のワークフローシステムとの連携について検証した。

### 4.6.1 実証試験

#### (1) 個人IDの登録

IDSIMSでは、発注者と施工者がアプリケーションを共用することにより、情報交換の効率化を図っている。あらかじめユーザIDを登録したICカードを端末使用時に認識させることによりユーザが特定され、発注者・施工者のそれぞれのユーザ（監理技術者、助役など）に対応したアプリケーションが起動する仕様とした。ユーザID登録時に定めた承認順序（表-4.6.1）により、報告書の回付は1番から昇順で実行される。試験では、図-4.6.1(a)の写真に示すように、r/wにICカードをかざし、携帯端末で情報管理ツールを起動させ、ユーザが認証されていること、ユーザに対応したアプリケーションが起動していることを確認した。

表-4.6.1 ユーザ ID の登録例

タグID	名称	氏名	承認順序
施工者01	工事係	千葉一郎	1
施工者02	監理技術者	東京二郎	2
施工者03	所長	高崎三郎	3
発注者01	施設係	仙台四郎	4
発注者02	助役	盛岡五郎	5
発注者03	区長	新潟六郎	6



(a)



(b)

図-4.6.1 個人管理用 IC カード認証状況

## (2) ICタグの認識, 検査記録簿・図面の参照

図-4.6.2(a) に示すように、現場の鉄筋に結束帯でICタグを取り付け、r/wによる読み取り確認を行った。r/wには通信距離の短いNFCを採用したため、鉄筋や隣接のタグに影響されることなく、正常にタグを認識し、ICタグに紐づいたIDの構造物情報（検査記録簿，設計情報）をDBから瞬時に読み出すことに成功した。また、複数の異なるICタグの読み込みを行い、それぞれに紐づいた情報を呼び出しできることを確認した。これにより、現場での構造物情報の照合を一意に、瞬時に行えることを示した。なお、コンクリート打設後にコンクリート表面にICタグを移設し、そのICタグからもこれらの情報を照合できることを確認した。これにより、工事竣工後に構造物上のICタグから施工当時の情報を取得する手法が可能であることを示した。



(a)



(b)

図-4.6.2 構造物管理用 IC タグと認証時の画面

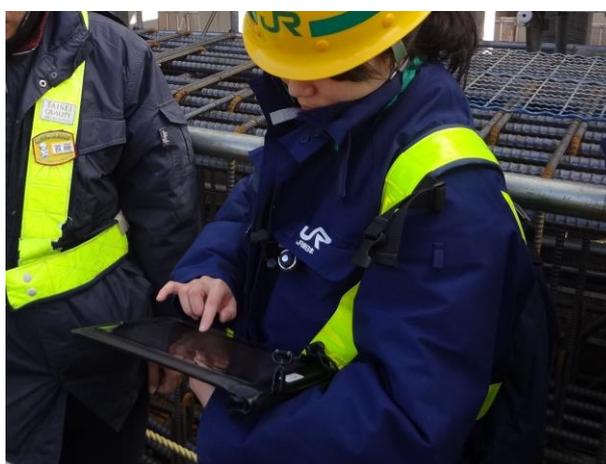


図-4.6.3 ツールでの入力状況

### (3) 検査記録の登録，報告書の提出

前節で読み出しを確認した検査記録簿について，検査記録の入力とDBへの結果の登録が正常に行われるか，システムの動作確認を行った（図-4.6.3）．試験的に規格値を超える数値を入力した場合，図-4.6.4に示すようにセルが着色表示されることを確認した．これにより測定値が適正な場合，着色箇所が無いことを確認すれば良いことになり，従来の赤ペンでの数値チェック作業を省略できることを示した．また，検査値の入力後，登録を実行すると検査記録はIDごとにそれぞれDBに登録された．

続いて，IDSIMSでは，Wi-Fi機能付きカメラを用いることで，ICタグの認証後にカメラ操作を行うと，IDごとに写真がDBに登録される仕様となっており，それらが実行されていることも同様に確認した（図-4.6.5）．



図-4.6.4 検査記録簿の構成と規格値判定と承認状況



図-4.6.5 工事写真登録状況

IDSIMSでは、検査記録の整理と報告書承認を迅速化するため、IDごとに集約された検査記録をそのまま報告書として利用し、監督員に提出する仕組みとし、報告書の作成作業と書類の提出作業を削減している。そのため、情報管理支援システムと電子メールソフトを連動させ、電子メール上に貼られたリンクから検査記録の入ったDBを参照できるようにし（図-4.6.6）、また、ユーザID登録の際に設定した表-4.6.1の承認順序に応じて、ワークフローでの承認（または否認）行為が進むシステムとした。



図-4.6.6 検査記録の承認依頼画面の例

なお、改ざんを防止するため、上位者が承認行為を行った後は、データの編集ができない仕組みとしている。否認を行う場合は、任意の順位者まで書類の差し戻しが可能で、差し戻しを受けた場合に限り、データの編集が可能となる。本試験では、現場で登録した出来形の確認検査データがワークフローに従って最終承認者まで処理され、図-4.6.4の承認欄に示すような電子押印が実行されることを確認した。

#### 4.6.2 ワークフローと作業時間の比較検証

現状の出来形管理フローと本ツール導入後のフローを比較し、図-4.6.7に整理した。左側が現状の作業方法である。フローのうち二重線で囲んだ作業は、現状の作業と作業方法が変更となるもので、このうち、斜線を付けた「ID付与」と「DB構築」、「ICタグの設置」の作業は、従来の作業方法には無く新たに発生するが、淡色で色付けをした作業は手数が減少すると考えられ、また、破線で囲んだ作業は、作業そのものが省略となる。

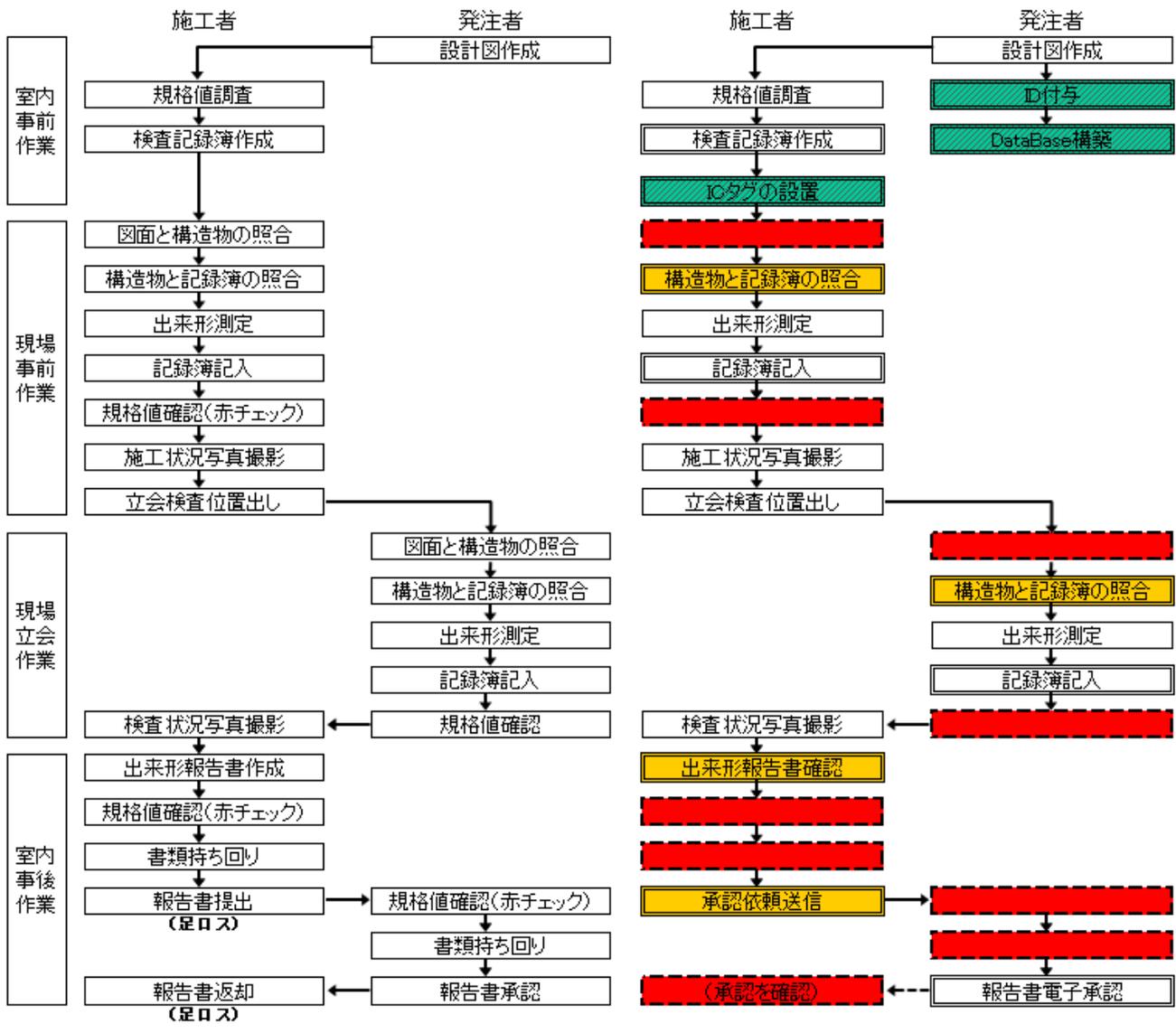


図-4.6.7 出来形管理のフロー比較（左は従来手法、右は本ツールの手法）

名称	①			②			③			④			⑤		
	設計	実測	差	設計	実測	差	設計	実測	差	設計	実測	差	設計	実測	差
かぶりA	50	52	+2	50	52	+2	50	52	+2	50	52	+2	50	52	+2
かぶりB	50	56	+6	50	56	+6	50	56	+6	50	56	+6	50	56	+6
名称	⑦			⑧			⑨			⑩			⑪		
	設計	実測	差	設計	実測	差	設計	実測	差	設計	実測	差	設計	実測	差
かぶりA	50	57	+7	50	55	+5	50	55	+5	50	57	+7	50	56	+6
かぶりB	50	56	+6	50	56	+6	50	55	+5	50	58	+8	50	59	+9
名称	I			II			III			IV					
	設計	実測	差	設計	実測	差	設計	実測	差	設計	実測	差	設計	実測	差
有効高さ	1109	1100	-9	1109	1028	-14	1109	1022	-17	1109	1020	-19			

※規格値 かぶり -5以上+20以下

図-4.6.8 鉄筋かぶり 検査記録簿の例

検査での構造物と記録簿の照合はICタグにより自動的に行うため、照合は瞬時に確実に出来るようになる。検査記録の閾値照合においては、現状作業では赤ペンでのチェック（図-4.6.8）が必須であるが、情報管理ツールにより一瞥で規格値を満たしていることがわかるため、赤ペン入れの作業が不要となる。また、ワークフローシステムによる報告書提出となるため、施工者・発注者とも書類の持ち回りが不要となり、監督員区所までの運搬の時間も不要となる。

現場試験では、建設会社の職員5人と監督員4人の合計9人の参加により、現状の作業時間とIDSIMS導入時の作業時間を2箇所計測した。比較したものを図-4.6.9に示す。各回の左側の棒グラフが現状の作業時間、右側が本システム利用時の時間を表す。積み上げた項目は、グラフの上部から順に、記録簿作成、（施工者の）事前検測、（発注者の）立会検査、承認で、承認は報告書の作成から承認までの時間を計上している。2回の試験とも承認の時間が現状に比べ大幅な時間短縮となっている。この要因は、現場と発注者執務箇所間の書類の運搬による足ロスを削減されたこと、情報管理ツールにより報告書類の記載内容の確認が容易になったこと、ワークフローシステムにより、承認行為がスムーズにできるようになったことが挙げられる。また、今回の検証では、報告書の差し戻し時間は考慮していないが、第4章第2節で述べたように報告書の作成ではケアレスミスによる修正が度々発生する。

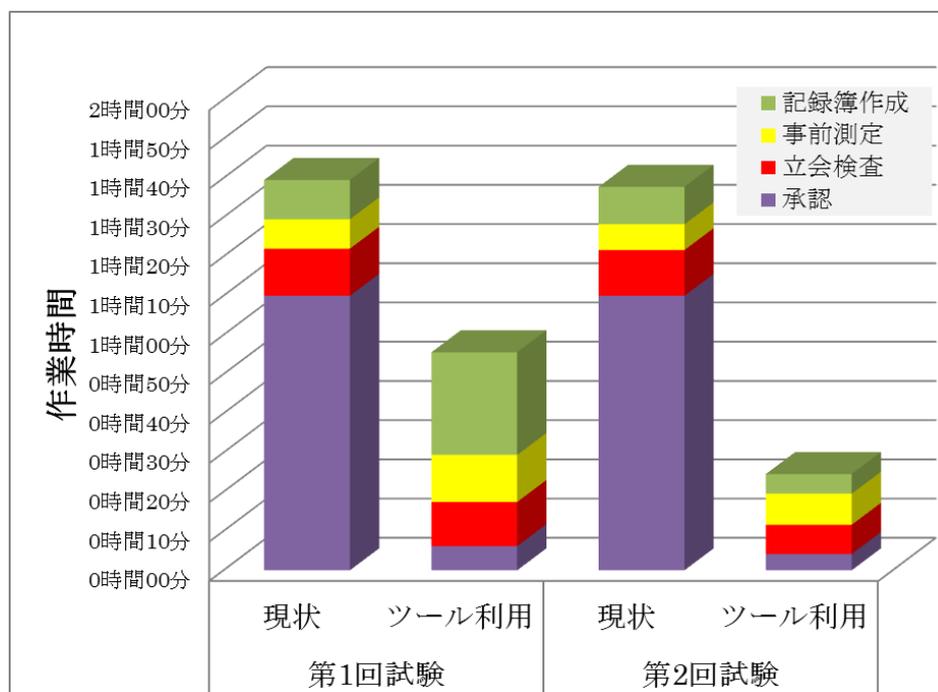


図-4.6.9 システム導入前後での作業時間の比較

現状の紙媒体の報告書を用いた作業では、報告書の書き直し・印刷・赤ペンチェック入れ・提出のための運搬を再度行うことになるので、多くの時間を費やす。この時間を考慮すると、IDSIMSを用いることで、更に時間短縮の効果が表れることが見込まれる。

検査記録簿作成と事前測定の時間については、第1回試験では現状作業に対して時間が増加していることを図-4.6.9では示しているが、これはシステム端末の操作に不慣れなことが原因と言え、操作に慣れた第2回試験では所要時間が短縮し、現状の作業より若干短い程度の時間となっている。本試験では、延べ20人の現場従事者がシステム端末の操作を行ったが、その中にはタブレット端末を使用したことがない60歳代の技術者もいた。当初、画面の文字のサイズが小さく見難いことから端末の操作に手間取ったものの、インターフェースの改良により文字の表示を大きくしたところ、問題なく使用でき、さらに、第2回試験では端末入力の手際も良くなった。これらのことから、日常的に情報管理ツールの使用を繰り返すことで、更なる時間短縮が期待できる。

現時点では、室内事前作業は斜線を付けた作業の手数が増加となるが、将来的な建設生産システムでは、プロジェクトの計画段階でIDを設定し、DBを構築して情報を共有する計画としているため、これらの手数増加は過渡的なものとなると考える。また、構造物にICタグを設置する手間については、設置作業に要する時間以上に事後の作業における時間短縮効果が見込めるため、施工者は負担増とは受け止めないと考える。

#### 4.6.3 試験から得られた課題

本システムでは、携帯式端末を使用することを特徴としている。一方、現時点で、現場ではタブレットやスマートフォンを使用しており、所持する端末数が多くなることが課題として挙げられた。情報管理ツールはWebアプリケーションのため、個人で使用している端末にダウンロードすることも出来、これにより台数の増加を回避することも可能である。また、端末数は増加するものの、手が塞がる状態を回避するため、本試験では首からぶら下げるハードカバーを作成した。長時間の使用により、凝りが発生する可能性は残るが、作業への支障は減らすことが出来、また端末破損の可能性も減少することが出来た。

端末そのものを使用するという点については、新たなシステムのため、初期に講習が必要となり、

要員と時間が増加することが課題である。操作については、前述のように、高齢の技術者も慣れることが確認できたため、反復により問題なく使用できるようになると考えられる。講習のために必要に要員については、システムを使い続けることによる効率化で、その費用を賄うことは可能であると考えられるが、期間が短い工事については、費用が回収し切れない可能性はある。

情報管理ツールの入力、タッチペンまたは手により行う。本試験は、寒冷地でも実施したため、手袋を使用しての入力に支障があるとの声が挙がった。この点については、現在では導電糸で縫製されたタッチパネル対応手袋が流通して来たため、問題はないと言える。

#### 4.7 まとめ

本章では、品質管理業務の効率化と情報の蓄積方法の改善を図るため、自動認識技術を用いた構造物情報管理支援システム「IDSIMS」を作成した。建設工事現場での試験の結果、RFIDによる一意の認識により検査対象構造物の取り違いが防止できること、検査記録簿を素早く確実に呼び出せること、検査時の規格値のチェックが瞬時に行えること、IDごとに検査記録値をDBに登録できることを確認した。現地構造物に取り付けたICタグからそれら情報を参照できることを確認し、現場で構造物情報を可視できることを示した。また、検査後の報告書作成・承認作業において、検査記録の蓄積・読み出し、承認が行えることを確認した。これにより、出来形確認検査から報告書提出までの処理が迅速になるとともに、関係者間での情報の利活用が容易になると考えられる。

課題事項として、システムの端末については、専用の端末を使用するか、現在使用している端末を活用するか見極めていく必要がある。また、IDSIMSを使用することにより、コスト的に効果があるかどうかについても、今後検討していく必要がある。

IDSIMSは、施工段階では設計段階の情報、維持管理段階では施工段階の情報と、建設ライフサイクルの上流の情報を現地構造物を通じて瞬時に得ることができる。そのため、現場の技術者の判断が迅速化し、円滑な施工やメンテナンス作業の着手に繋がることが期待される。

本研究では、工事施工段階を対象として論じたが、ICタグを用いることで現地構造物に設計、施工、維持管理の履歴を記録することができる特徴を活かすため、施工段階に留まらず、他のプロセス段階での検証を進め、建設ライフサイクル全体での効果を明らかにしていく。

## 参考文献

- 1) 古谷野英一：入力ミスの特性とその対応，日本経営工学会誌，Vol.41，No.1，pp.51-54，1990.
- 2) 吉村治正，小久保温，澁谷泰秀，渡部諭：社会調査の入力ミスの発生率について，青森大学付属総合研究所紀要，Vol.15，No.1，pp.1-5，2014.
- 3) 日本自動認識システム協会 HP：<http://www.jaisa.jp/about/index.html>，（入手 2016.10）.
- 4) 三島潤一郎，一木剛，杉浦芳光：画像によるパンタグラフすり板計測装置の開発，JR EAST Technical Review，No.55，pp.17-18，東日本旅客鉄道株式会社，2016.
- 5) 日本自動認識システム協会：よくわかる RFID（改訂 2 版）－電子タグのすべて－，pp.194-196，オーム社，2014.
- 6) 石間計夫，田原孝：自動認識技術を用いた構造物管理支援ツール構築に向けた基礎研究，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，VI-426，pp.851-852，2012.

## 第5章 ARを用いた工事施工計画の視覚化

### 5.1 概要

本章では、AR技術を用いて工事の施工状況を視覚化させるシステムの開発成果について述べる。まず、5.2では建設工事の現場監理業務について説明する。5.3では、画像の重畳について整理する。5.4では、開発したAR技術を用いた施工計画視覚化システムについて述べる。5.5では、現場での実証試験の結果について述べる。

### 5.2 建設工事現場の工事監理について

#### 5.2.1 現場の巡回と監視カメラ

鉄道建設工事の現場組織は、発注者側の監督者が所属する工事区、技術センター等（以下、工事区）と元請事業者の監理技術者などが所属する作業所で構成される。作業所は、主に工事施工箇所に近接して設置されるが、工事区は複数の現場をまとめて監督している場合が多く、現場から離れた市街地などに設置されている。

工事区の監督者は、現場を巡回して工事監理を行うが、一日に巡回できる現場の数には限りがある。そのため、現場に赴くことができなくても、現場の状況を映した映像を視聴できる設備を整備すれば、on-lineで現場の確認が可能となることから、監理業務を補助する手段として、工事区にITVが設置されている。一方、作業所には地盤掘削部、高所などの人の目が届かない範囲の作業状況確認や、河川や法面の状況監視、第三者の進入の防止等を目的として、ITVが設置されている。特定の用途のために設置されているITV以外のものは、整備されていても、あまり活用されていないケースがある。そのため、既存の監視カメラ装置を有効に使用するための新たな活用方法の考案は課題の一つである。

#### 5.2.2 日々の施工計画検討

鉄道建設工事では、ひとたび事故が発生すると、乗客の死傷や鉄道運転事故に繋がる可能性が大きい。そのため、細心の注意を払って工事を施工している。監督者と工事施工者による日々の施工計画および、保安計画の打合せ（建設業界では、KY（Kiken Yochi）活動と呼ばれている）では、-5.2.1に示す



図-5.2.1 施工計画打合せ図のイメージ

ような工事種類ごとに施工をイメージした図を作成し、互いにリスクを確認しながら施工方法と安全対策の検討を行っている。これらの図は設計図面や現場状況を撮影した写真の上に、施工予定の部材や仮設物、重機などを書き込むことで作成するが、大変に手間がかかり、また、図の作成者の想像力、描画力に依存しているため、分かりやすさはケースバイケースであるという課題がある。そこで、施工計画をイメージすることができる図を簡単、かつ、正確に作成する手法を検討した。

その結果、構造物の施工手順を考慮して作成した3次元モデルは、施工の時系列に沿って構造物を構築する状態を具現することができるため、これを工事施工の現場の原位置に映し出すことができれば、施工計画が一目瞭然になるとともに、新たな図面を作る必要もなくなり効率的であると考えた。そこで、ITVにより映し出された施工現場の画像上に設計3次元モデルを重畳するシステムの開発を試みた。これにより、ITVおよび、設計3次元モデルが新たな目的で活用されるとともに、現場の監理業務が効率化されることが期待できる。

## 5.3 画像の重畳

### 5.3.1 AR 技術について

現実空間の一部を実際には目の前にないコンピュータで作成されたデジタル情報（仮想空間）に置き換えることで現実を補う手法をAR技術と言い<sup>1)</sup>、仮想を取り入れることにより現実よりも拡充した情報を提供することができる。一例として、テレビのスポーツ中継で、ボールの飛距離や選手の走行位置にCG（Computer Graphics）で線を重畳し、視聴者に現実を拡張した情報を提供する手法が以前から知られている。近年では、スマートフォン等の携帯端末の流通に伴い、ARアプリケーションを装備された端末を通して対象物や地点を見ると、その現実空間に対応した情報や画像が提供されるサービスが盛んになり、ユーザー参加型の情報提供ツールである「セカイカメラ」<sup>2)</sup> や駅構内情報提供サービスの「JR×AR」<sup>3)</sup>、エンターテインメント製品の「3DS」<sup>4)</sup> などが続々と提供され、2016年にスマートフォン向け位置情報ゲームアプリPokemonGO<sup>5)</sup> が国内で爆発的に流行したことにより、身近な技術として認識されつつある。

現実空間に視覚情報を重畳するには、物体からの光が人の目に到達するまでの間にコンピュータで作成された映像を合成する必要がある。映像を合成する手法は、カメラで撮影した現実世界の映像に仮想のオブジェクトを重ね合わせ、非透過型ヘッドマウントディスプレイやパソコンの画面に表示するビデオ透過方式と、メガネの片目の一部にハーフミラー等などディスプレイを設け、そこに映し出された仮想情報ともう片方の目を見た現実情報を統合する光学透過方式がある。光学透過方式は、対象物を直接観察するため、ビデオ透過方式に比べ、現実空間と仮想空間の位置合わせの精度が要求される。

### 5.3.2 位置合わせの手法

現実空間と仮想空間の位置合わせの手法としては、マーカーなどを用いた Vision-based ARやGPSを使用したLocation-based ARが社会的に広まりつつある<sup>6)</sup>。

Location-based ARは、GPSから得られる位置精度そのものが高くないこと、平沢<sup>7)</sup>、中林<sup>8)</sup> らが述べているように、GPSにより得られる位置情報とセンサーにより得られる角度情報から精度良くカメラの姿勢を算出するためには複雑な補正処理が必要であること、現実空間と仮想空間を重畳した時の

合致精度が高くないこと、機材が大掛かりになることなどの課題があり、建設現場で手軽に導入する手法とは言い難い。なお、測位の精度に関しては、現状のGPS衛星では約10m程度であるが、準天頂衛星システム「みちびき」が2018年より4機可動体制となることから、数cm程度となり、飛躍的に向上することが期待される<sup>9)</sup>。

Vision-based ARは、Location-based ARに比べ重畳精度が高く手軽な手法であるが、マーカ認識型の場合、日々施工が進捗し現場の状態が変化する屋外の建設現場において、複数のマーカを安定して可視できる状態で設置することは、自然環境的、現場環境的に制約が多いと考えられる。また、物体認識型の場合は、物体の特徴点の検出に高度な演算、あるいは特別な機材が必要となることから導入が容易ではない。本研究では、現場において簡単、かつ、正確に施工計画をイメージすることができる画像を作成することを主眼としているため、位置の精度が高くないGPSを用いたLocation-based ARの手法は不適であり、また複雑な計算や物体認識のための新たな機材が必要となるVision-based ARの手法も適当ではないと考えられる。

そこで、簡単に現実空間との重畳を行うため、3次元モデルの設計図により作成された仮想空間に現実空間上での実座標値を付与し、座標系を合致させることにより重畳する手法の導入を試みた。

重畳の試験を行うために、駅の階段などに設置されている監視カメラと同型の機種（Panasonic製・BB-SW175）を試験施設内に固定して設置した。このカメラは、pan・tilt・zoom（以下、PTZ）の動作が可能なネットワークカメラである。図-5.3.1(a)は、吹き抜けの室内に定めた点に設置したカメラで撮影した画像を示しているが、設置したカメラのレンズの中心点を座標中心として、図-5.3.1(b)で示す水平および鉛直方向で構成される仮想空間の座標平面（VR平面）と同じスケールで合わせることにより、重畳を行っていることをイメージ化したものが図-5.3.1(c)である。仮想空間は、現場に設置されているITVのレンズ中心の座標を座標系の原点として構成し、図-5.3.2に示すようにITVのレンズの画角により視界が設定される。カメラのPTZ動作による視線の方向移動に応じて、この領域内での3次元モデルの見え方を変化させるものである。仮想空間の見た目上の位置は、カメラのPT動作に伴う雲台の回転角度から姿勢情報を算出し、それに合わせて制御する。提案する手法の特徴は、現場に設置されているITVと発注図面として現場にある3次元モデル設計図を使用し、新たに用意する機材は画像重畳のためのプログラムのみで、HMDや標識物の特徴点検出のための機材

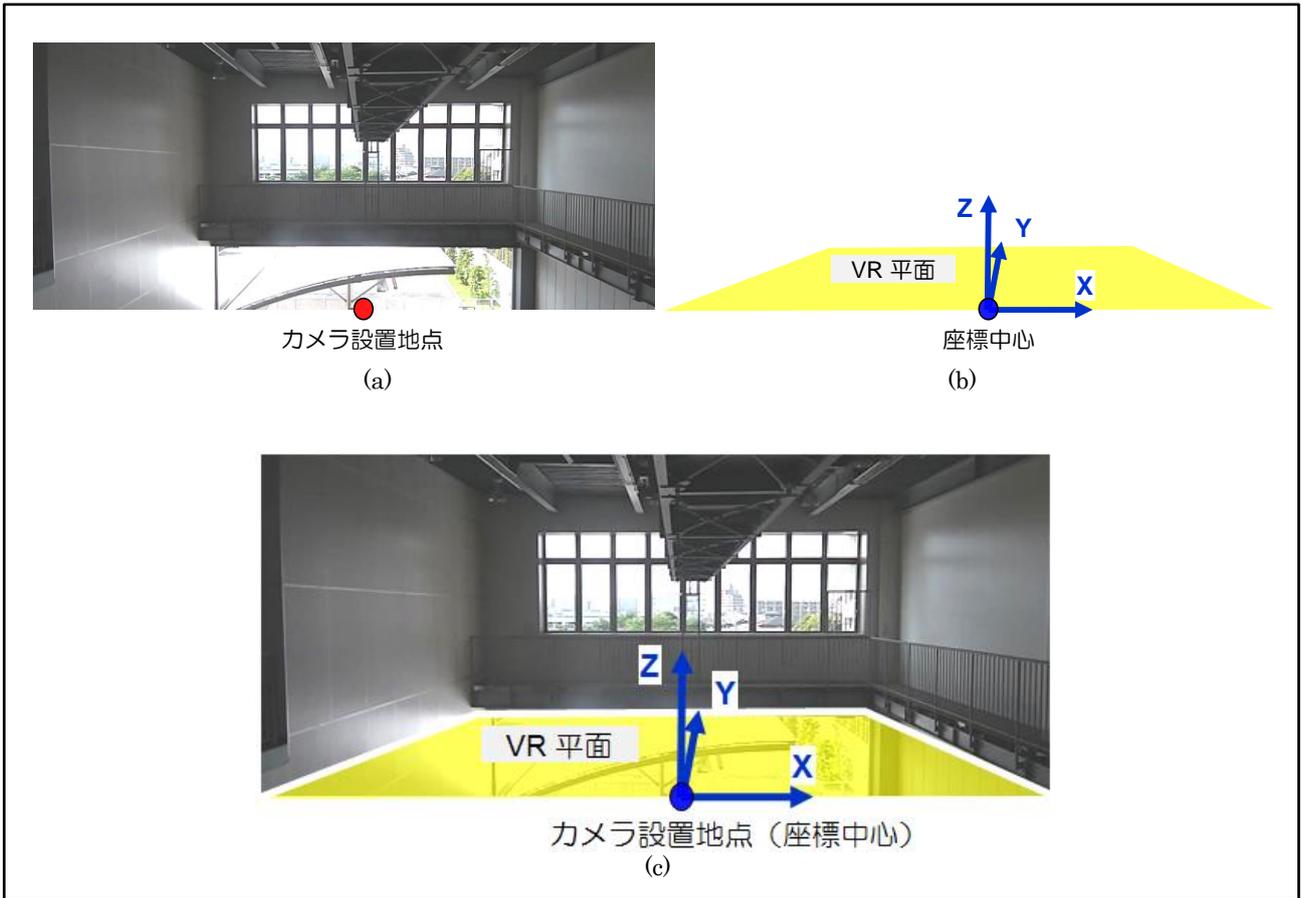


図-5.3.1 座標系合わせのイメージ

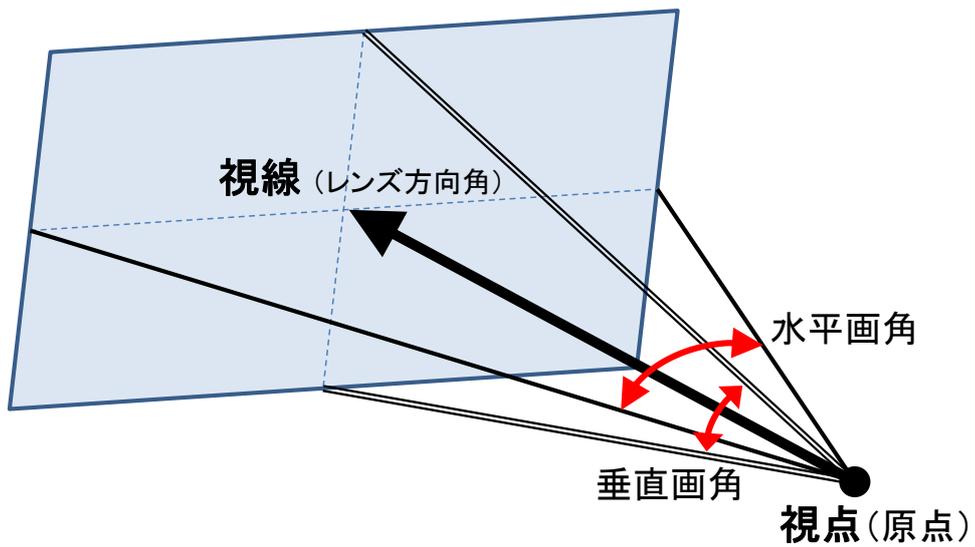


図-5.3.2 仮想空間の構成イメージ

を用意する必要がない点、マーカ認識型の場合、カメラが移動するたびにマーカを認識して位置を合わせる必要があるが、本手法はカメラを回転させても、カメラの移動量を算出して3次元モデルを自動的に回転させるため、位置合わせの再設定が不要な点が既往の研究と異なる。また、ITVの座標値は機器設置時の設計値または、測量により算出する値を使用するが、測量機器は建設現場では常備されているものであるため、新たに手配する必要がないことから、現場で簡便にARを実施しやすいという点で意義のある研究である。

#### 5.4 AR技術を用いた施工計画視覚化システムの概要

本節では、建設構造物のイメージを現実空間に描写することを目的として、建設現場の状況を映し出した画像に3次元の構造物設計図を重ね合わせるシステムを提案する。このシステムをARを用いた施工計画視覚化システム（以下、AR計画システム）と呼ぶこととする。本研究では、日々の施工計画検討でAR計画システムを活用することを念頭に置いているため、日常的に用いている用具を活用して簡便に拡張現実の体感を可能にする。現場状況確認のために作業所などに常設されているITVを使用し、その中に3次元モデルの処理機能を組み込むことを試みた。その構成は、図-5.4.1に示すようにITV

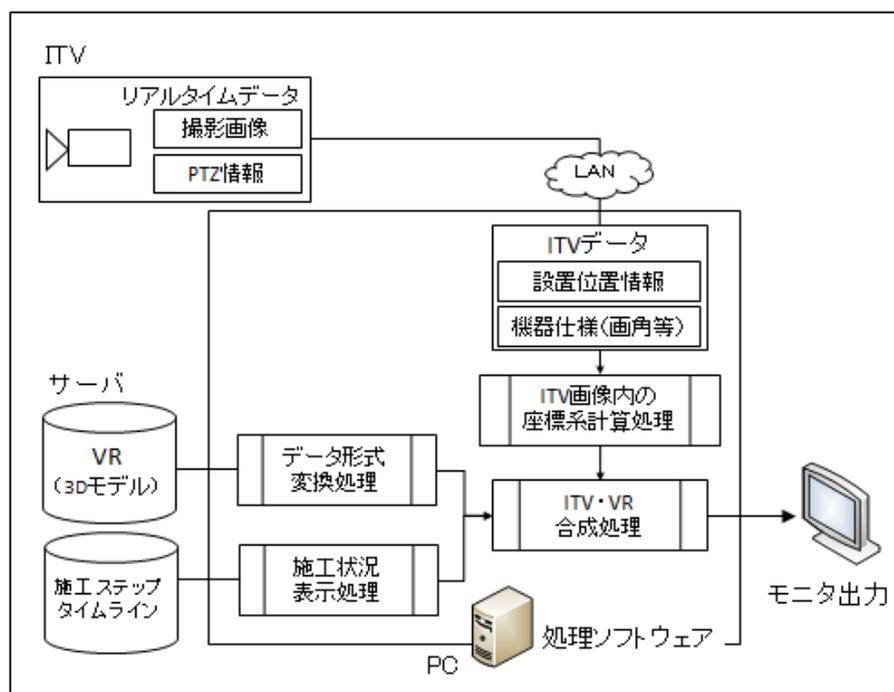


図-5.4.1 システム構成図

のカメラとモニタの間に画像処理のためのPCを挿入し、構造物の3次元モデル設計図と施工手順の情報、カメラの制御情報を合わせてモニタに出力する。

プログラム言語には、Embarcadero Technologies社の Delphi<sup>10)</sup>、および、Microsoft 社のMicrosoft Visual Studio (Visual C++ )<sup>11)</sup> を用い、ITV映像の入出力、3次元モデルの入出力、座標計算、ディスプレイでの3次元表示などに外部ライブラリを使用してシステムを構築した。また、構造物の設計図面をもとに3次元モデルをAutodesk 社のAutodesk AutoCAD<sup>12)</sup> で作成し、構造物を構築する手順ごとの工程を表すタイムラインデータをMicrosoft 社のMicrosoft Excel<sup>13)</sup> で作成し、3次元モデルに施工ステップに合わせた属性情報を付与した上で、Autodesk 社のAutodesk Navisworks Manage<sup>14)</sup> を使用してデータの統合を行うことで4次元でのVRの描写を可能にした。

現場に設置されているITVを用い、目印となる標識なども用いないため、新たな設置作業は発生しないが、現実空間と仮想空間の重畳を正確に行うためには、ITVの設置位置とカメラの仕様を把握する必要がある。本研究では、ITVの設置地点の座標と3次元モデルを重畳する地点2箇所の測量を行うことにより位置出し、空間座標系を把握し、カメラの仕様については、メーカーから入手し把握した。

## 5.5 建設構造物の施工計画への適用試験

作成したAR計画システムの動作確認を目的として、JR東日本研究開発センター内に設置されている試験施設である Smart Stationにおいて実証試験を行った。主な確認項目は、ITV映像と3次元モデルの重畳による見え方、ズレ具合、およびカメラの PTZ動作に連動して3次元モデルの描写が切り換わるかについての把握である。

### 5.5.1 カメラの仕様

試験では、図-5.5.1に示すようにADVAS社製のカメラのHDS-1000をリモートコントロール雲台である PT1にセットして使用した。カメラの主な仕様（設計値）は以下のとおりである。

- ・映像素子 : 1/2.8 型CMOSセンサー
- ・有効画素数 : 約200万画素
- ・画素サイズ : 2.5 $\mu$ m



図-5.5.1 試験に使用したカメラ

- ・焦点距離 : 5.196mm (被写体距離 (WD) 5m $\sim$  $\infty$ )
- ・水平画角 : 49.584°
- ・垂直画角 : 37.188°
- ・最小回転角 : 0.0012°
- ・フレームレート : 最大59.94 fps

### 5.5.2 レンズの歪み

光が球面レンズを通過する際に生じる屈折率が、入射位置により異なるため、焦点位置が不均一になり、レンズ歪み（ディストーション）が生じる。図-5.5.2に示すように、レンズを通過した光が内側に歪んだ場合は糸巻き型歪曲、外側に歪んだ場合は樽型歪曲となって現れるが、直交座標系で作成されている3次元モデルと重畳した場合、歪んだ部分がズレているように見えてしまう。そこで、ディストーションの影響を調査するため、レンズの歪み率を測定した。WD = 0.5m, 5m, 10mの各距離で測定した結果、いずれも -1%程度であり、目視では歪曲の具合が判断できないことが明らかになった。そのため、本検討では、歪曲収差は考慮しないことにした。

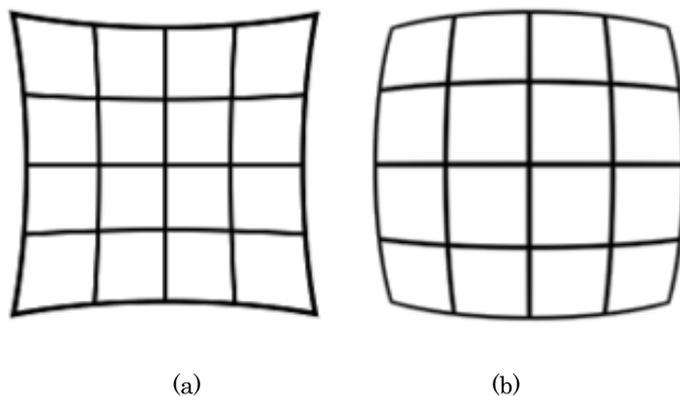


図-5.5.2 (a) 糸巻き型歪曲と(b) 樽型歪曲

### 5.5.3 重畳による見え方

本試験では図-5.5.3に示す空間の右奥手に外壁を構築し、左手にエスカレータ（以下、ESC）を設置する工事をシミュレートした。

システム上で施工ステップに応じた3次元モデルの重畳を試みた結果、図-5.5.4に示すように、(a) ESCの覆工板撤去・ピット設置、(b) ESC下部工、(c) ESC上部工、(d) 外装・完成までの工程が描写され、機能的には問題なく作動することが確認された。また、図-5.5.4を見ると、構造物、設備の位置関係やスケール、施工手順が視覚的に明確になることがわかり、AR計画システムは工事を施工する前の段階で施工計画の把握を容易にする効果があると言える。



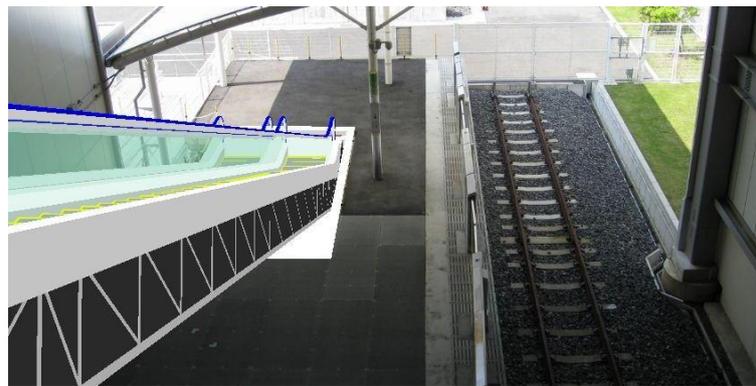
図-5.5.3 試験現場の状況



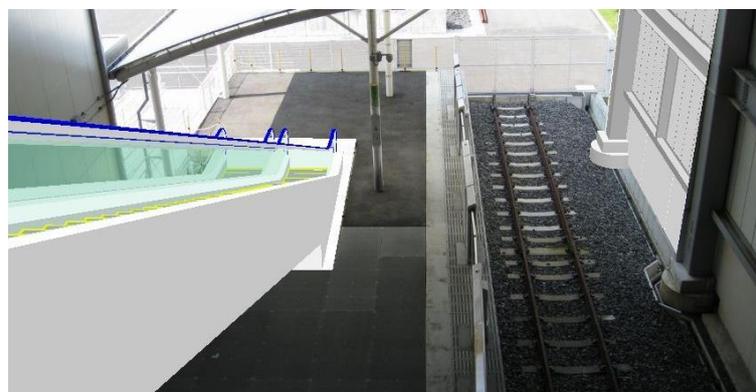
(a)



(b)



(c)



(d)

図-5.5.4 システム上で施工手順を可視化した例

なお、重畳する3次元モデルに陰影を施すことにより、3次元モデルの見やすさと本物らしさが向上する効果がある<sup>15) ~17)</sup> ため、現実空間の床面との関係性がより明確になる。システム上で光源設定を追加し、日陰計算を実施することで、影の表示は可能となるが、計算には時間を要する。本システムは、現場で素早く重畳した画像を作成することを目的としているため、影を表示する機能を整備していない。

試験前の確認段階において、現実空間と3次元モデルの座標を単純に合わせて重畳を行ったところ、**図-5.5.5**の破線で囲んだ範囲に示すように、ESCのピット部が浮き上がって見えたり、**図-5.5.6(a)**の線で囲んだ範囲に示すように、本来は奥にある壁面が手前に見えるなど、位置関係に相違を生じるなどの不整合が発生することが確認された。そこで、現場での確認試験の前にオクルージョンの処理を行った。不整合となる**図-5.5.5**、および**図-5.5.6**の線で囲んだ範囲についての3次元モデルを作成し、構造物の3次元モデルとモデル同士の重畳を行い、前者と後者が重複する部分の構造物の3次元モデルを非表示にするマスク処理を施した。このため、3次元モデルを作成する段階では、マスク処理の作業を増やさないために、構造物の位置関係や施工手順などをある程度把握して、モデリングしておくことが重要であるとの知見を得た。

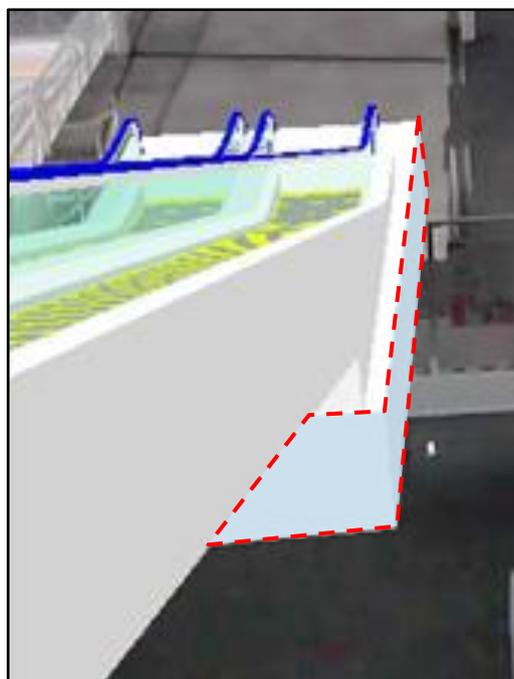
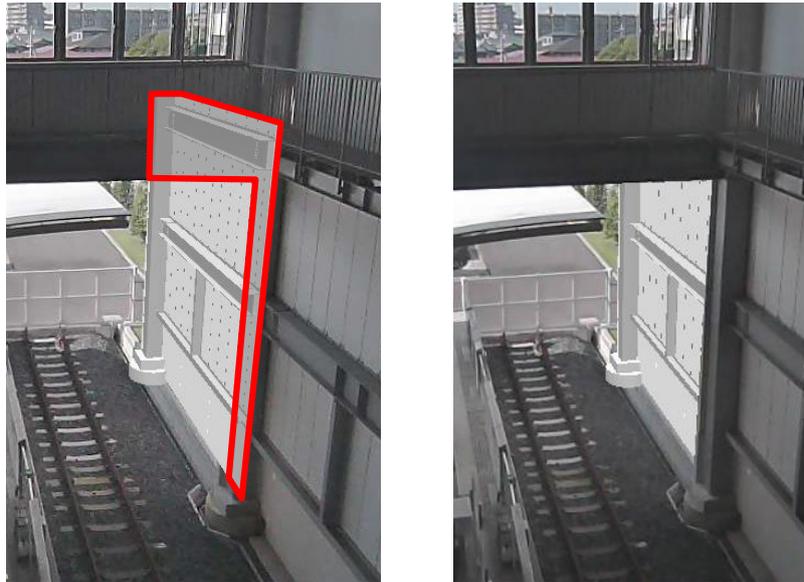


図-5.5.5 浮き上がりの状況



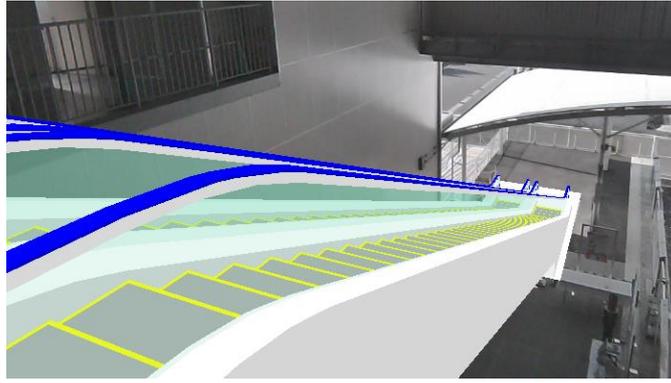
(a)マスク前

(b)マスク後

図-5.5.6 マスク前後の部材の重なり状況

#### 5.5.4 画像上でのズレ

PTZによる画像の歪み、および3次元モデルとのズレは、図-5.5.7に示されるように今回の試験領域および使用機材では目視で違和感を受けるほどのものは生じなかった。詳細に誤差量を検証するため、図-5.5.8に示すように測量により求めた点とVR上の点のズレをシステム上のピクセル数で算出した結果、もっとも大きなもので4ピクセル程度であった。ピクセルの大きさをわかりやすくするため実寸法を概算すると、図-5.5.8に示した白のグリッド線は1m四方で、1mの線分上に含まれるピクセル数から単位長さあたりの数量を割り出すと、チルト角度-21度でパン角度-5度の場合、1ピクセル≒1.2cmとなり、4ピクセルは5cm程度に相当する。カメラのチルト角度ごとに誤差を整理した結果を図-5.5.9に示す。カメラの位置から測点までの距離が約17mであることを考慮すると、目視では認識できない程度の数量であり、重畳の精度は良好とすることができる。なお、測点はカメラを右に約20度パンさせた位置で、カメラのレンズ面と正対する。図-5.5.10にパン角度の位置関係を示す。図-5.5.9、図-5.5.10より、測点とカメラのレンズ面の位置関係に関わらず誤差がほぼ一定であることから、本試験では仮想空間の原点の設定が適切であったと推測される。



(a) 左パン



(b) 右パン

図-5.5.7 カメラを左右にパンした時の状態

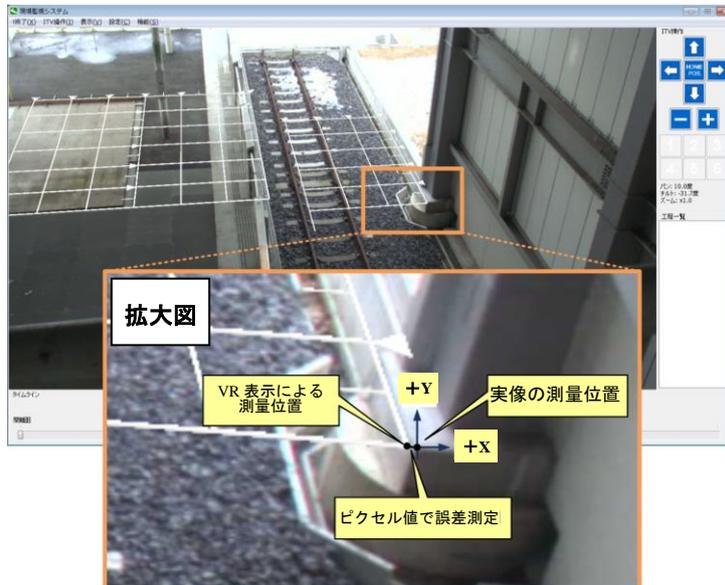


図-5.5.8 誤差の測定イメージ

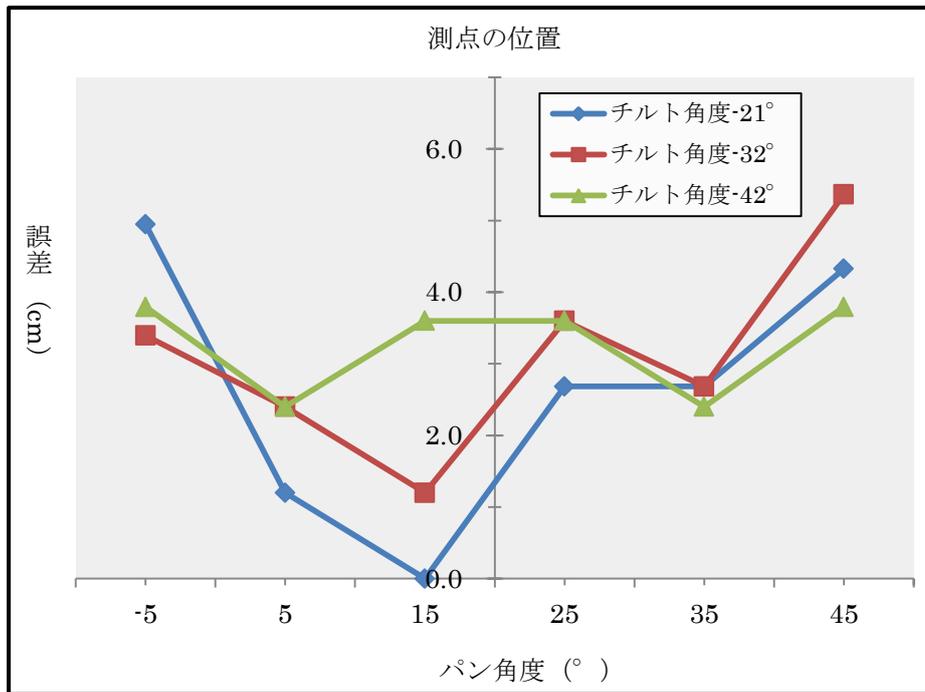


図-5.5.9 誤差の測定結果

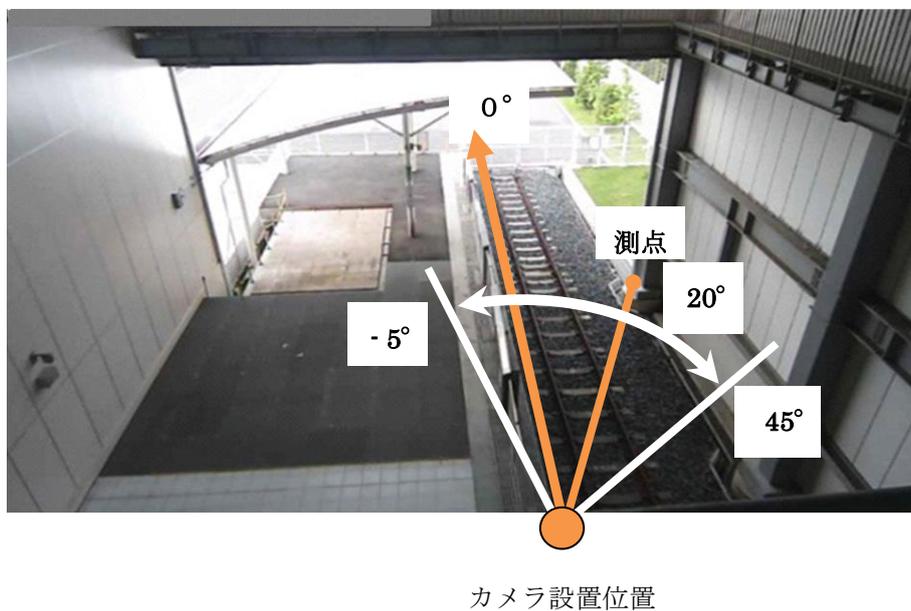


図-5.5.10 カメラのパン角度イメージ

試験当初、レンズ仕様として公表されている設計値をもとにシステムの設定を行ったところ、大きなズレが生じたため、メーカーにて焦点距離、画角の測定を行い、その実測値に基づいてシステムの再設定を行った結果、**図-5.5.9**のような小さな誤差となった。このことから、公表値は目安値として扱い、重畳の精度を上げるためには、レンズの仕様を正確に把握することが必要であることが明らかになった。

### 5.5.5 施工計画の打合せでの活用

本研究は、施工計画や保安計画の打合せ時にAR計画システムを活用することを目的としていることから、現場での使用を想定した試験を行った。**図-5.5.11**は、RC（Reinforced Concrete：鉄筋コンクリート）ラーメン高架橋新設工事の現場において、隣接するスラブ上に設置したカメラを用いて、(a) 現況から、(b) 鉄筋組立、(c) 足場設置、(d) 型枠設置、(e) コンクリート打設完了までの施工過程をシステム上で具現した結果を示したものである。室内試験と同様に、施工の手順と構造物の位置関係が明白になっていることがわかる。

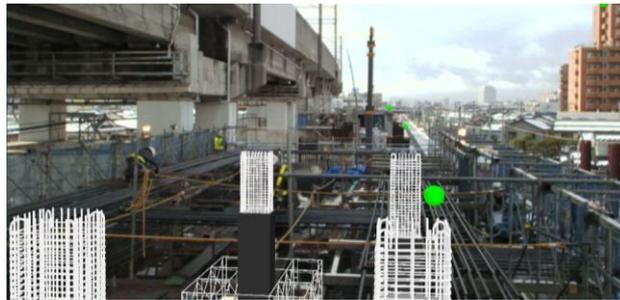
本試験では、実際の施工を意識して、足場、型枠といった仮設物の描写を行った。その結果、現場の監理者からは、施工のイメージが理解しやすいとの評価を得た。仮設物は発注の段階では標準図や参考図となっており、本体構造物と同一の図面上に描かれていない場合が多く、施工計画の検討時にそのイメージが付き難い。本システムは現況と本体構造物、仮設物を合わせて確認することができるため、施工計画を理解する上で効果的なものであることが実証的に示された。

留意しておく点としては、本システムは工事の全体イメージを把握することには適しているが、詳細な点の把握には不向きと言える。例を挙げると、隣接構造物との間隔や接地面での取り合いの確認などには効果的であるが、鉄筋の一本一本の組み上がりや継手の位置などが適切であるかと言うような細かな点を確認するには十分なシステムではない。構造物の詳細な構造の検討は、3次元CAD上で行うことが適している。

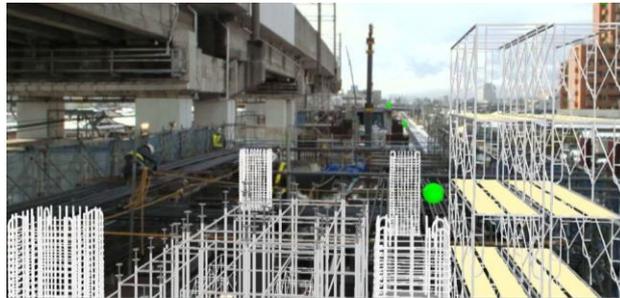
鉄道には、建築限界という特有の規格が存在する。建築限界とは、「鉄道車両を安全に運行するため、車両にいかなるものも触れないよう、施設のいかなる部分も侵すことが許されないものとして、軌道上に確保された空間の境界線。<sup>18)</sup>」で、**図-5.5.12**にその断面を示す。鉄道に近接して構造物を建設す



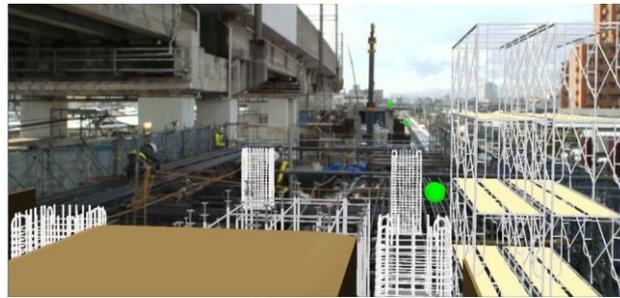
(a) 現況



(b) 鉄筋組立



(c) 足場設置



(d) 型枠設置



(e) コンクリート打設完了

図-5.5.11 建設現場での施工手順検討の使用例

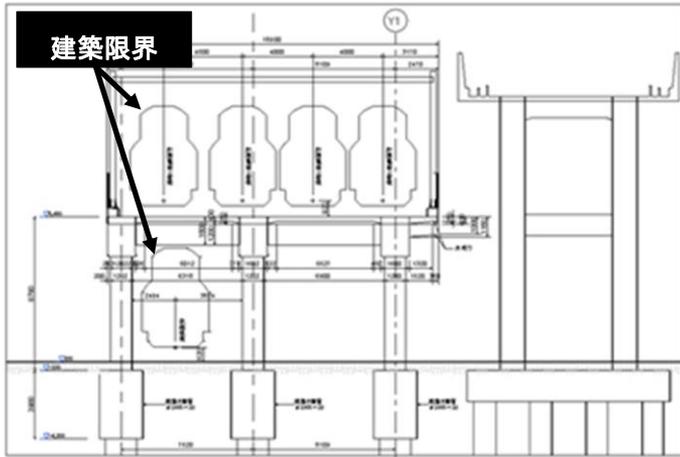


図-5.5.12 建築限界

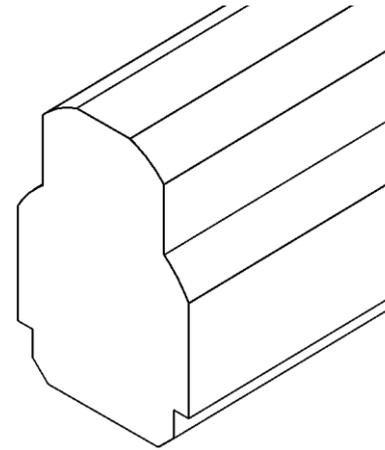


図-5.5.13 建築限界の3次元モデル

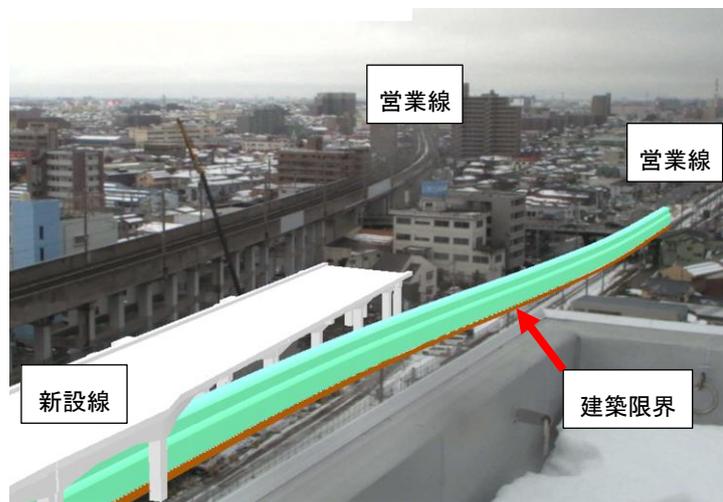


図-5.5.14 建設中の構造物と建築限界の3次元モデルの重畳状況

る場合、常にこの建築限界を意識して施工を行っている。建築限界は、目に見えるものではなく、また、通常時は列車が運行しているため、計測することが出来ず、その範囲を把握することが難しい。本システムでは、図-5.5.13に示すような建築限界の3次元モデルを作成し、施工の現場の画像に重畳することにより、容易に建築限界を把握することが出来る特徴がある。図-5.5.14は、高所に設置したカメラの画像を用いて、図-5.5.12の断面の近辺を視覚化したものである。緑色で示した営業線の建築限界と施工中の構造物の関係が明白になっている。GL（地盤面のこと）付近で線路の断面方向にカメラを設置すれば、更に詳細に位置関係を把握することが出来るが、残念ながら本試験では実施していない。

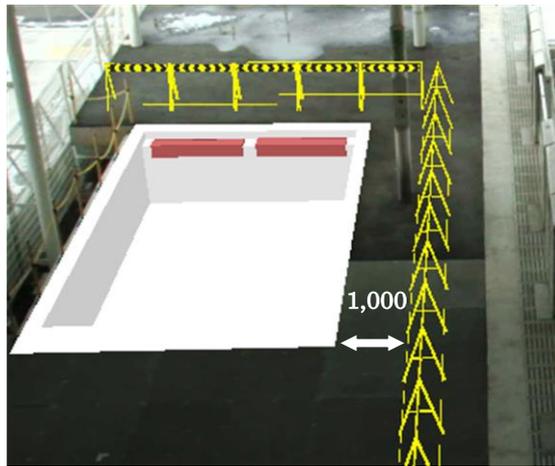


図-5.5.15 保安計画での活用例

図-5.5.15は、保安計画打合せにおいて、監督者と工事施工者として新たに安全柵の設置を検討する場面を想定して、システム上での表示を試みたものである。3次元モデルは3次元CADで作成されているため、CAD側の座標値を用いて構造物の離れを算出することができる。レイアウトや見え方を確認しながら検討できることは、計画策定において効果があると考えられる。現在のシステムでは、離隔の測定値や計画の検討事項をシステム上にテキストで表示する機能を実装していないため、この点は今後の課題事項として検討していく。

また、ITVを利用しているため、カメラのPT動作範囲外については、描写することが出来ない。そのため、複数台設置されている場合は、他の地点に設置されているカメラを用いるか、別の場所にカメラを移設する必要がある。この点に制限があるため、今後の課題として検討していく。

## 5.6 まとめ

本章では、施工段階の監理業務を支援するシステムを開発することを目的に、現場に設置されているITVと設計段階で作成した3次元モデルを有効活用し、任意の施工段階の現場状況を視覚化する手法について検討を行った。現場での確認試験の結果、構造物の施工段階に応じた3次元モデルを重畳することができるため、そのタイミングでの構造物の位置関係やスケール感が明確になり、施工計画をイメージしやすくなる効果があることを示した。座標系をもとに現実空間と仮想空間の重畳を行うことで、精度の良い位置合わせが可能となり、また、カメラのパンチルト動作の影響も受けないことを示した。今回の試みで、特別な機材を用いることなくARを体感できることを示せたことから、多くの

現場で簡便に実施することが可能になると考えられる。

一方、ITVの可動範囲外は描写することができないため、より広い範囲でシステムの利用を行う場合、どのように対処するか、今後検討していく必要がある。

本手法により、現場状況と設計図の対比が容易になるため、施工の進捗具合や異常を一目で確認できるようになり、また、施工する前の段階で構造物のイメージが明確となるため、関係者の理解の向上、意思の疎通に繋がり、現場合わせや手戻りが減少することが期待される。

## 参考文献

- 1) Azuma, R. T. : A Survey of Augmented Reality, Presence : Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 6, No. 4, pp.355-385, 1997.
- 2) セカイカメラ HP : <http://sekaicamera.com/>, (入手 2013.10).
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社 HP : <http://www.jreast.co.jp/press/2012/20120406.pdf>, (入手 2013.10).
- 4) 任天堂 3DS AR ゲームズ HP : <http://www.nintendo.co.jp/3ds/software/built-in/ar/>, (入手 2013.10).
- 5) PokemonGO HP : [www.pokemongo.jp/](http://www.pokemongo.jp/), (入手 2017.5).
- 6) 林昌希 : コンピュータビジョンのセカイ - 今ここにあるミライ 第5回～第7回, マイナビニュース, 2011.
- 7) 平沢岳人 : D-GPS を利用した建築・都市スケールでの拡張現実感システム, JACIC 研究助成事業報告書第 2010-13 号, 2011.
- 8) 中林拓馬, 江原司, 加戸啓太, 平沢岳人 : 大規模空間において実寸大表現が可能な拡張現実感システムの開発, 日本建築学会計画系論文集, Vol.76, No.667, pp.1753-1759, 2011.
- 9) 内閣府 みちびき (準天頂衛星システム) HP : <http://qzss.go.jp/index.html/>, (入手 2017.10).
- 10) Embarcadero Technologies HP, Delphi : <https://www.embarcadero.com/jp/products/delphi/>, (入手 2017.10).
- 11) Microsoft HP, Visual Studio : <https://www.microsoft.com/ja-jp/dev/default.aspx/>, (入手 2017.10).
- 12) Autodesk HP, AUTOCAD : <https://www.autodesk.co.jp/products/autocad/overview/>, (入手 2017.10).
- 13) Microsoft HP, Office : <https://products.office.com/ja-jp/excel/>, (入手 2017.10).
- 14) Autodesk HP, NAVISWORKS : <https://www.autodesk.co.jp/products/navisworks/overview/>, (入手 2017.10).
- 15) Sugano, N. , Kato, H. and Tachibana, K. : The effects of shadow representation of virtual objects in augmented reality, Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR03), pp.76-83, 2003.
- 16) Madsen, C. B. , Sorensen, M. K. D. and Vittrup, M. : The importance of shadows in augmented reality, Proceedings of 6th Annual International Workshop on Presence, p.21, 2003.
- 17) 角田哲也, 大石岳史, 池内克史 : 高速陰影表現手法を用いた飛鳥京 MR コンテンツの開発とその評価, 映像情報メディア学会誌, Vol.62, No.9, pp.1466-1473, 2008.
- 18) 鉄道総合技術研究所 編 : 第2版 鉄道技術用語辞典, p.199, 丸善, 2006.

## 第6章 AR計画システムの汎用化のための機能の拡充

### 6.1 概要

本章では、AR技術を用いて工事の施工状況を視覚化させるシステムを多くの工事現場で汎用化させるために行ったAR計画システムの機能の拡充について述べる。まず、6.2では新たに実装した機能について説明する。当初のシステムは、定置されているITVが描写可能な範囲でのみ利用できるという制限がある。そのため、利用範囲を拡大するため、可搬式のカメラでも使用できるシステムとした。また、カメラの映像と3次元モデルの重畳について、座標系ベースとマーカベースから手法を選択できる機能と重畳後の3次元モデルの位置合わせができる機能を追加した。また、複数人で施工の計画を検討することができるように、通信機能を導入しAR情報の共有とコメントのやりとりができる機能を持たせた。6.3では、機能を拡充したシステムの現場での実証試験結果について述べる。

### 6.2 システムの概要と実装した機能

#### 6.2.1 システムの概要

AR計画システムは、図-6.2.1に示すように建設工事現場の作業所などに常設されているITVのカメラとモニタの間に画像処理のためのPCを挿入し、構造物の3次元モデルの設計図と施工手順の情報、位置

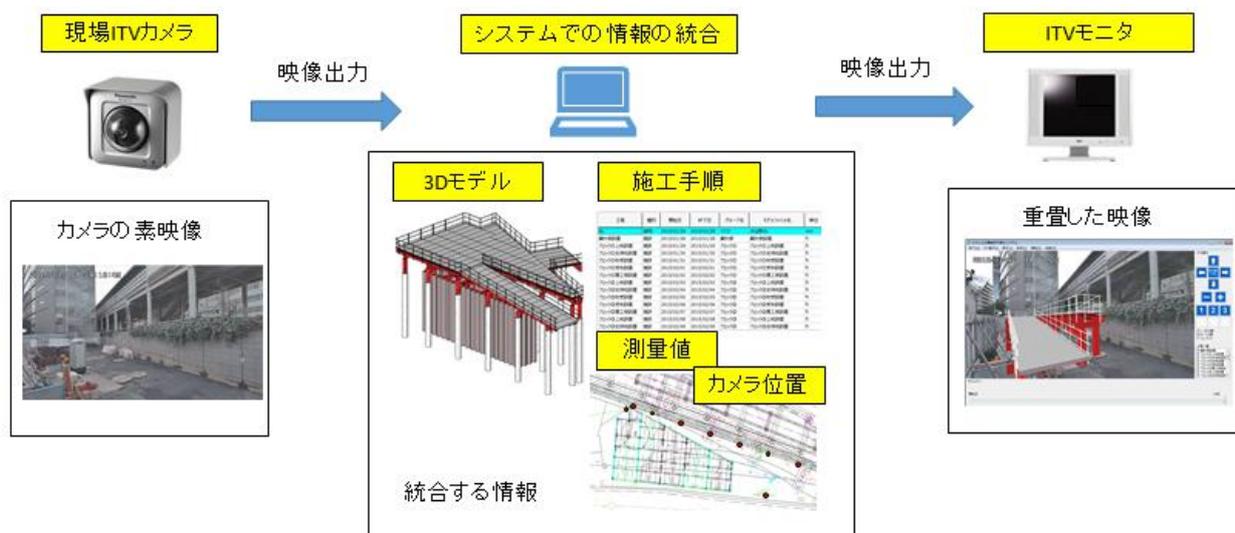


図-6.2.1 システムでの情報統合イメージ

情報、カメラの制御情報を合わせてモニタに出力するものである。

Autodesk AutoCADで作成した構造物の3次元モデルと位置情報、Microsoft Excelで作成した構造物の構築手順ごとの施工時間データをAutodesk Navisworks Manageを使用してデータの統合を行うことで、3次元モデルに時間の要素を持たせ、施工の進捗に応じたバーチャルな構造物をモニタ上に描写することを可能にしている。

多くの現場での簡単な構造物の重畳とそれを用いた検討を実現するため、システムに以下の仕組み・機能を追加して整備した。

- ・様々なカメラと映像素材への対応
- ・現場条件に応じた重畳手法の選択
- ・構造物の位置の補正機能
- ・重畳画像を通した打合せ機能

## 6.2.2 実装した機能

### (1) 様々なカメラと映像素材への対応

AR計画システムの目的は、施工の計画を視覚的に把握できるように、現実空間にVRの構造物を映し出した映像を提供することである。開発の当初、現実空間を表す媒体としてITVを選択した。その理由は、建設現場に常設されており、新たな機器を手配することなく、簡便に重畳を行うことができること、および設置場所が固定されているため、位置出しが容易であることである。しかし、ITVのPTZの動作の範囲外については、現場の状況を映し出すことができないため、ITVの設置場所を移動させるか、新たなカメラやビデオなどの撮影機器を用意する必要がある。そのため、定置式のカメラの使用を主眼としているが、汎用性を高めるため、可搬式のカメラにも対応させた。また、3次元モデルを重畳させる映像素材については、静止画・動画ともに対応し、動画は生映像・録画映像のどちらでも読み込むことができるシステムとした。さらに、重畳させる3次元モデルは、静止状態の他、施工の時系列に沿った4次元での再生を可能とすることで、より臨場感を得られるシステムとした。

### (2) 現場条件に応じた重畳手法の選択

本研究では、3次元モデルの設計図により作成された仮想空間に現実空間上の実座標値を付与し、座

標系を合致させることにより重畳する手法を導入している。

現実空間と仮想空間の位置合わせの手法は、主に画像認識によるもの（Vision Based AR）と空間内の位置関係を算出するもの（Location Based AR）とに分けられるが、前者は重畳する範囲が広がるほど位置のずれが大きくなるため、多数の画像認識媒体（以下、ARマーカ）が必要となる<sup>1)</sup>。また後者のうち、センサを使用するものは、センサの精度により誤差が大きくなる<sup>2)</sup>。

本研究では、重畳時の精度を高めるため、ITVの設置地点を測量により計測し、座標系を定める手法を主として用いている。工事計画箇所の現場状況により測量が難しい場合も想定されるため、そういった箇所では、**図-6.2.2**に示すようなARマーカを基準点とした直交座標系を構成し、現場に設置したARマーカの座標と仮想空間の座標系を合致させる手法を採用した。両手法を併用することにより、現場での測量が難しい場合はARマーカを使用し、その逆の場合は測量を行うことでお互いを補完し、多くの現場条件で使用が可能なシステムとした。測量による手法を用いることにより、高い重畳精度が実現しており、試験で誤差を計測したところ、カメラから17m先の地点を描写した場合、14インチモニタディスプレイのモニタの画素数をベースとして1%以下の誤差である。

ARマーカを用いた重畳を行う場合に注意しておくべき点は、この手法は、カメラで矩形のマーカを認識し、認識した形状により離れと角度を推定する手法であるため、ARマーカが完全に読み取れることが必要がある。そのため、カメラとARマーカ間を遮らない空間を確保する必要があるとともに、ARマーカ

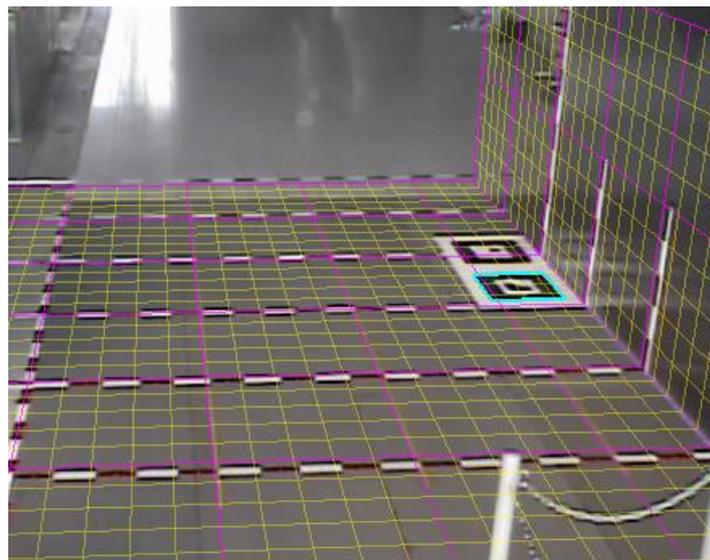


図-6.2.2 マーカを基準とした座標系

を安定して設置出来る場所または、鉛直方向に掲示するための用具が必要である。建設工事現場は、足場が悪いことが多く、また、見通しが良くない場合が多いため、高所にARマーカを設置するか、あるいはマーカを床面に設置するためのスペースを確保する必要がある。また、ARマーカを認識する手法のため、晴天時には、日射によりマーカが反射して読み取れない場合もあり、うまく重畳出来ないという短所もある。

なお、本研究では、ARマーカの検出手法としてARToolkit<sup>3)</sup>を用い、マーカをもとに空間内の座標系の設定を行った。

### (3) 構造物の位置の補正機能

カメラ画像は、線遠近法の影響により奥行き方向が狭くなって描写されるため、画像の重畳を行った場合、図-6.2.3に示すように仮想の構造物が奥に行くに従って浮き上がって見える場合や狭まって見える場合（これを知覚誤差と言う<sup>4)</sup>）がある。そのため、視覚的な違和感を解消するために、システムのインターフェイスに鉛直方向角度と水平方向角度を修正できる機能を整備した（図-6.2.4）。この機能は指定した点を支点としてVRを画面上で回転させるもので、回転の他に単純に水平方向・鉛直方向への移動も可能である。これにより、重畳の検討を行っている現場で画像を見ながら即座に奥行き知覚誤差の修正と位置の補正をすることが可能である。この機能は、3次元モデルの角度と位置を調整するものであり、モデルそのものの形状を修正するものではない。そのため、重畳した時点で、地盤面と3次元モデルの接



図-6.2.3 奥行きの狭まりのイメージ

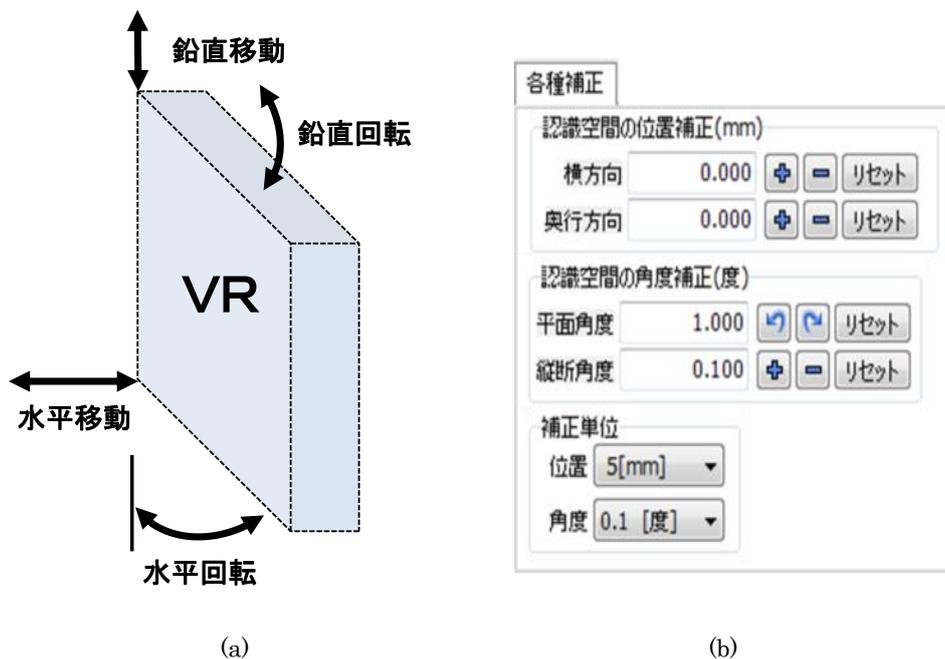


図-6.2.4 (a) 補正のイメージと(b) インターフェイス

地点に不均一に隙間が発生している場合は、調整することができない。地盤面と3次元モデルの接地面が均等または一定の傾斜で離れている場合は、インターフェイス上でモデルの位置を動かすことで重畳位置を調整することが可能であるが、地盤面と3次元モデルが曲線的に離れている場合は、3次元モデルの形状を修正することができないため、調整することができない。3次元モデルの形状が現況にフィットしていない場合のモデルの修正機能については、今後の課題事項として検討していきたい。

#### (4) 重畳画像を通じた打合せ機能

AR計画システムの開発目的は、施工計画を視覚的に表し、理解をしやすくすることの他に、これを担当者間の打合せで用いることで、打合せ内容の具体化に繋げることである。そのため、システムにより重畳したARの画像上に記号やコメントの記入を行えるようにし、打合せ参加者同士でこれを共有できる仕組みを構築した。

システムの構成は図-6.2.5に示すように、インターネット回線を介してカメラとDBサーバを接続し、DBに蓄積されるテキストなどの情報をユーザが共有することで打合せを行う。このシステムの主な機能は、図-6.2.6に示すように画面上への矢印などの記号の記入、コメントの書き込み・応答、対話ログの

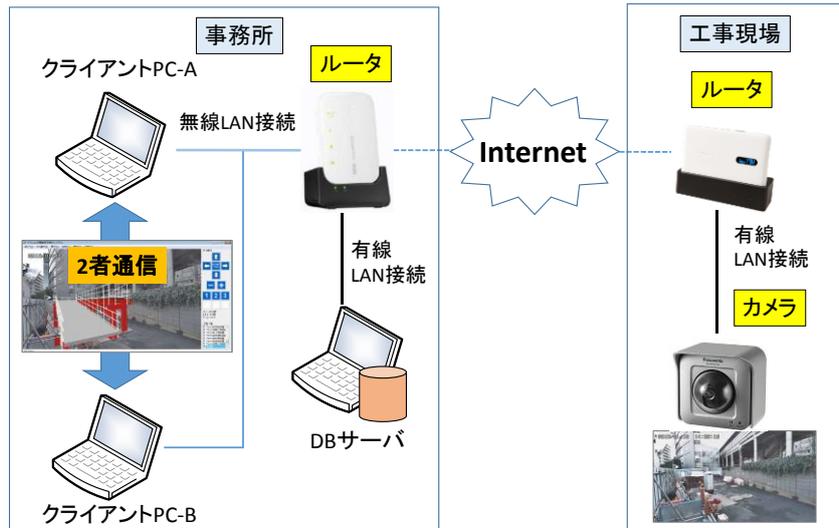


図-6.2.5 システムの構成

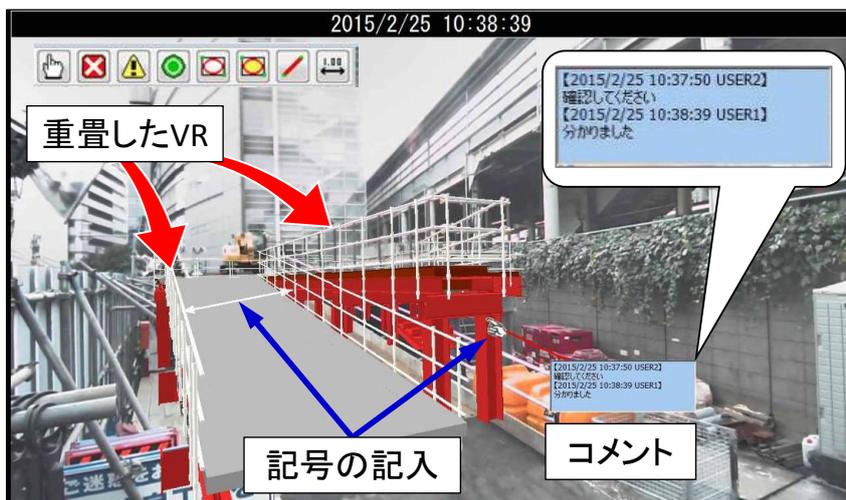


図-6.2.6 システムを通じた打合せのイメージ

記録などで、書き込みした画面のハードコピーを蓄積する機能を持たせることで、打合せ記録簿作成時の添付書類としての利用を可能にした。

コメント等の記入は、工事写真編集ソフトウェアなどの整備により一般的になってきているが、これらは現実空間の映像や写真への書き込みである。また、山元ら<sup>5)</sup>は、Webカメラと設計・施工情報データベースを関連付け、3次元モデル上に現場の計測データを蓄積し、共有するシステムを開発したが、VR上でWebカメラの映像は活用されていない。合意形成に関するシステムとしては、保田ら<sup>6)</sup>は、仮想空間内の視点を自由に移動させることにより、打合せ参加者に工事計画を分かりやすく提示するシステムを開

発しているが、現実空間との紐付けは行っていない。また、小林ら<sup>7) 8)</sup>は、開発したWeb掲示板の中で、工事計画のVRを用い合意形成を行っているが、現実空間との複合は行っていない。

AR計画システムは、AR技術とITVを融合することにより、最新の現場状況の中に任意の施工段階の構造物を仮想的に表示することができ、これからの施工の計画を視覚的に把握できるとともに、通信機能を持たせることにより、複数の関係者間で各自が見たい地点の映像を選択して、画像と文字で情報を共有できるものである。このような複合的なコミュニケーション手法は、建設工事分野では従来行われておらず、本システムにより工事施工計画の打合せが更に具体化することが期待できるという点で本研究は意義深い。

### 6.3 現場での適用試験

工事計画段階および工事施工中の現場において、計画の検討にAR計画システムを使用し、その効果を検証した。

#### 6.3.1 工事施工計画の打合せでの使用試験

施工計画の打合せのための機能について、高架構造物の建設を目的とした構台の構築現場で使用して検証を行った。本試験では、現場状況把握のために常設しているITVを使用し、その映像を受信している作業事務所の操作端末にAR計画システムを登載したPCを接続し、モニタ上でARの画像を見れるようにした。そして、同PC端末をホストコンピュータとし、無線LAN (Local Area Network) を通じて接続した複数のクライアントPCから操作および情報共有できるようにした。なお、3次元モデルの重畳のために、ITVの設置地点と構造物の構築地点の位置出しを測量により行い、空間の設定を行った。

AR計画システムの特徴は、ITVを操作することにより、着目したい地点の画像を得られること、任意の施工段階の構造物をARにより表示できること、通信機能により画面上でコミュニケーションを行い、その履歴を蓄積できることである。図-6.3.1(a)に計画時点の現場の状況を示し、図-6.3.1(b)～図-6.3.1(d)に施工途中の構造物、図-6.3.1(e)に完成時の構造物を表示した例を示す。ARにより、施工の手順が明確になっていることがわかる。図-6.3.1(f)は、構造物の設置位置をシステム上で変更して検討した事例を示し、VRを半透明にすることにより、構造物に隠れた部分の状況がわかる。また、図-6.3.1(g)にカメラを右にPanしたもの、図-6.3.1(h)に図-6.3.1(e)をZoomしたものを示し、それぞ



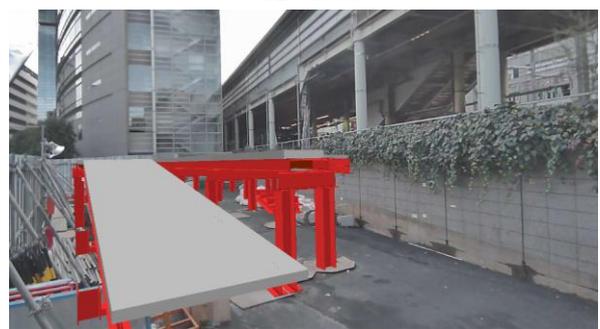
(a) 着手前



(b) 施工段階 1



(c) 施工段階 2



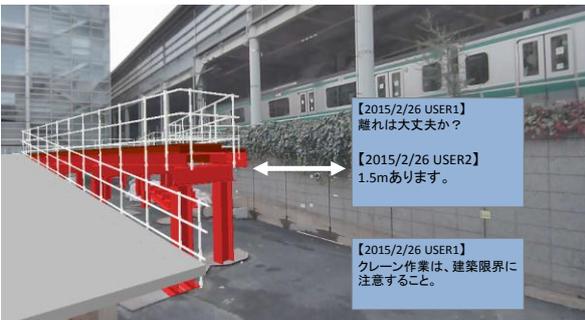
(d) 施工段階 3



(e) 完成時



(f) 代替案



(g) Pan



(h) Zoom



(i) 現況

図-6.3.1 システムを通じた計画検討での使用例

れ3次元モデルがカメラ動作に連動していることがわかる。

AR計画システムには、**図-6.3.2**に示すように、1人のユーザが利用する通常モードと複数のユーザで利用する会議モードの設定があり、通常モードの場合は、各クライアントPCから自由にARの操作をすることができるが、操作中のクライアント（USER1）以外のPCでは、ホストコンピュータ上の画像の複製を閲覧することになる。（各クライアントPCにシステムをインストールしている場合は、各クライアントPC上で自由にARの操作を行うことができるが、カメラは1台のため、視線方向の変更を同時に行うことはできない。）一方、会議モードの場合は、会議参加者同士でホストコンピュータにアクセスしてARとカメラの操作を行うことができるとともに、会議参加者間で画面上にコメントを記入することができるため、画面を見ながら打合せを行うことができる。**図-6.3.1(c)**と**図-6.3.1(g)**はシステムを通じて打ち合わせを行った一例を示しており、USER1の問い合わせに対し、USER2が呼応している。図中に表示されているコメントは、画面上に単純に表示されたもので、VRとの3次元的な位置関係は考慮されていない。そのため、カメラのPTZ動作には連動しないが、記号部分とコメントの相対的な位置関係は保持されているので、画面上の任意の位置に手動でレイアウトし直すことは可能である。**図-6.3.1(i)**に完成後の現況を参考のために示すが、**図-6.3.1(e)**と対比して、計画通りに施工がなされたことがわかる。

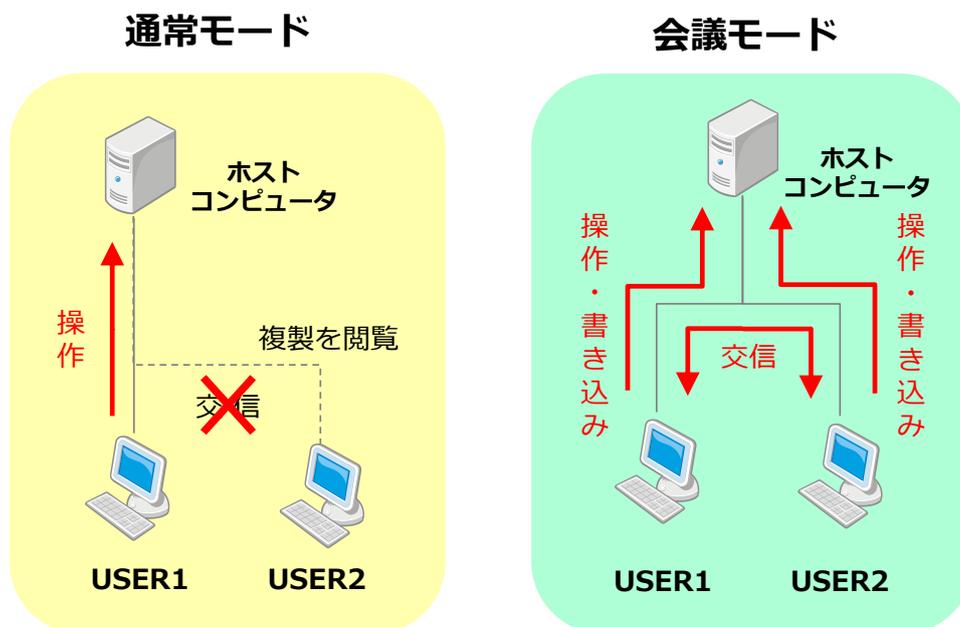


図-6.3.2 二つの利用モード

### 6.3.2 通信機能確認試験

離れた2箇所地点をVPN（Virtual Private Network：仮想プライベートネットワーク）で結び、2人のユーザにより、システムの動作確認を行った（図-6.3.3）。通信回線の設定は、ITVの設置時に合わせて行うため、通信時に改めて設定する必要はなく、PC端末の電源を入れるだけでよい。また、本試験は、ITVと座標系を用いる手法のため、ARマーカを用いる場合のような空間的な制限やマーカの設置などの段取りはない。

図-6.3.4は、クライアントPCを並べて撮影したもので、交信をしたUSER1とUSER2のコメントが反映され、お互いのPC画面に同じ情報が表示されている様子が分かる。

AR計画システムの使用后、現場ユーザのヒアリングを行い、その結果、従来の打合せ業務に比べ、以下の項目が良化したことを確認した。

- ・ 現地の映像をもとに書き込みをするため、従来の打合せ資料に比べ現実に即し、わかりやすくなる。
- ・ カメラのPTZにより、参照したい地点を取り挙げて検討することができる。
- ・ 3次元モデルを施工手順に応じて描写させることで、そのタイミングごとの施工について議論することができる。
- ・ 3次元モデルを半透明で表示させることで、裏側に隠れる支障物の検討ができる。

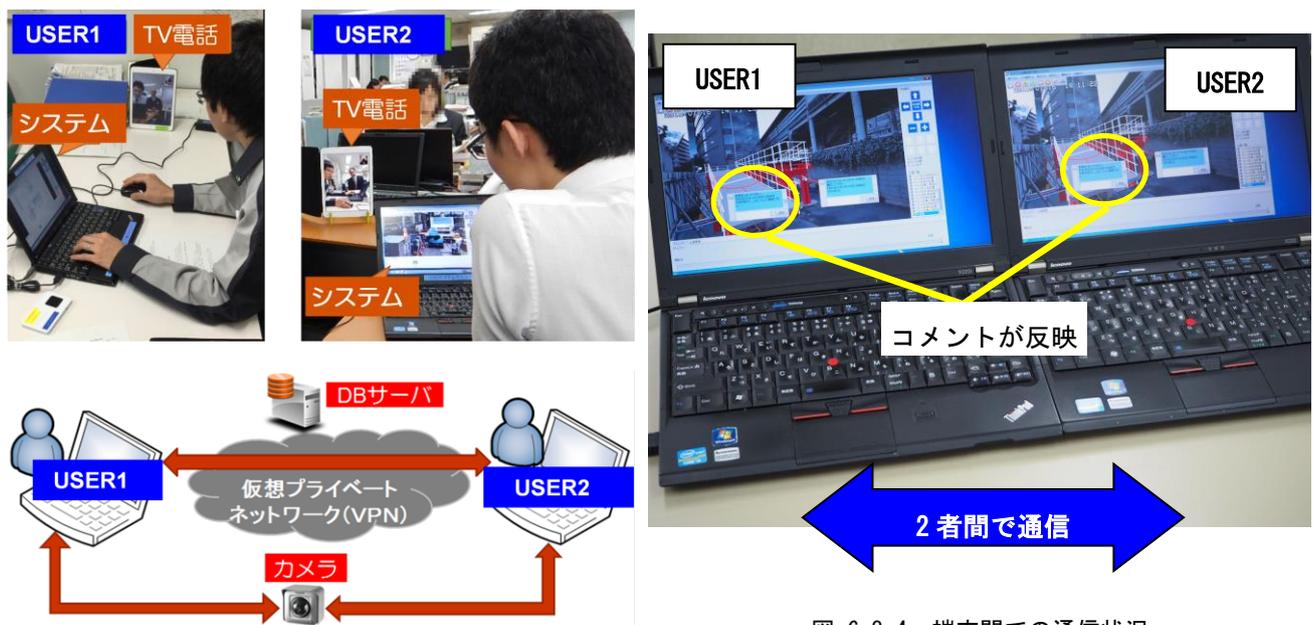


図-6.3.3 2点間での通信試験

図-6.3.4 端末間での通信状況

- ・ 打合せだけでなく、会議での現場説明に活用することができる。

これらにより、AR計画システムが打合せ作業の深度化に貢献していることが示された。

本試験により得られた課題として、本システムには通信しているユーザ同士を映す機能は搭載していないため、インターフェイス上でコメントを記入するタイミングをはかるのが難しいとの意見が挙げられた。AR計画システム的设计思想としては、インターネット上のチャットのような使用を想定して、コメント機能を整備した。しかし、ユーザ的には相手の顔を見ながらの会話のほうが安心感があり、文字面でのコミュニケーションには不安があることが明らかになった。そのため、本試験は、別途用意したタブレットのテレビ電話機能を併用し、コメントを記入した旨を相手方に伝えるという方法で行った。

AR計画システムのインターフェイスに通信相手の画像を表示する機能を追加することは可能であるが、画像の送受信を行うと回線の処理容量が大きくなるため、システム上で重畳画像の表示やITVのPTZ操作への反応に遅延が生じる可能性がある。そのため、試験で行ったように、テレビ電話などを併用することがベターな方法と考える。しかし、一台の端末で処理できることが最良であるので、そのためのシステム上の課題や回線容量などについて、検討することを課題事項として検討していきたい。

## 6.4 まとめ

本章では、工事を施工する前の段階での施工計画の把握を容易にすることを目的として開発したAR技術を用いた施工計画視覚化システムを多くの工事現場で汎用化させるために機能の拡充を行い、その実用性について検証を行った。

現場での試験の結果、本システムにより、現場状況と設計図の対比が容易になるため、構造物と周辺構造物との関係を明確に捉えることができること、カメラの方向や位置を変えて検討を行うことができるため、注目したい地点の情報を得て計画の検討ができること、複数の関係者で実作業を想定した画像を共有しながら打ち合わせを行えるため、打合せが深度化することを示した。また、インターフェイス上の操作で簡単に記号やコメントを表示できることを示し、これらを通して、AR計画システムは、現場での工事施工計画の検討の実務に即していることを明示した。

また、ユーザは、通信している相手の姿を見ることにより安心感を得ることを把握した。本研究では、対話者の声や姿を伝えることを検討していなかったが、第2章に記したPejsaら<sup>9)</sup>の研究が示すように、相手の身振りを見ながら会話をすることで、コミュニケーションが円滑になることを裏付ける結果とな

った。そのため、通信相手を表示するためのシステムの機能改良と通信環境について、整理することがこれからの課題事項である。

より多くの現場で使用するシステムとするためには、重機械や仮設構造物といった施工計画検討の中で多用するアイテムの描写などの実用的な機能の実装を目指してインターフェイスの改良を進めていくことが求められる。

## 参考文献

- 1) 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行: カメラと 3 次元センサの組み合わせによる現実空間と仮想空間の位置合わせ手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.295-302, 1999.
- 2) 田村秀行, 大田友一: 複合現実感, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.3, pp.266-272, 1998.
- 3) 加藤博一, Billinghamurst, M., 浅野浩一, 橘啓八郎: マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.607-616, 1999.
- 4) 大山正, 今井省吾, 和気典二 編: 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, 1994.
- 5) 山元弘, 二瓶正康, 藤島崇, 小林一郎, 池田直広: Web カメラと現場計測データを利用した段階確認手法の一提案, 土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.241-248, 土木学会, 2006.
- 6) 保田敬一, 黒木紀男, 山崎武伸: VR 技術による 3 次元 GIS を用いた合意形成用プロクタイプシステムの構築, 土木情報利用技術論文集, Vol.12, pp.73-78, 土木学会, 2003.
- 7) 小林一郎, 馬場健, 山本一浩, 前川勝人: VR 技術を用いた意見集約型工程計画システムの考案, 土木情報利用技術論文集, Vol.12, pp.149-158, 土木学会, 2003.
- 8) 小林一郎: 建設情報の有効利用のための人材運用システムの開発, JACIC 研究助成事業報告, 第 2011-03 号, 2011.
- 9) Pejsa, T., Kantor, J., Benko, H., Ofek, E. and Wilson, A.: Room2Room: Enabling Life-Size Telepresence in a Projected Augmented Reality Environment, Proceedings of the 19th ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work & Social Computing (CSCW '16), San Francisco, pp.1716-1725, 2016.

## 第7章 AR計画システムのホーム柵計画への活用

### 7.1 概要

ホームドア及び可動式ホーム柵（以下、ホーム柵）の設置を検討するにあたって、現地の状況と設置に伴う周囲への影響を予測して把握する必要がある。しかし、筐体の取り合いや支障を及ぼす物を計画時に十分に把握することは難しく、施工中に支障が判明し、工事の追加や設計の変更をするケースもある。そこで、本研究で開発したAR計画システムを応用してホーム柵を可視化することにより、設置時の状況をより具体的に把握することを可能にした。まず、7.2でホーム柵の整備に関する法制について整理する。7.3では、従来のホーム柵設置計画の手法について述べる。7.4では、機能改良したAR計画システムについて述べる。7.5では、プロジェクトでの使用例を交え、計画段階における作業の高度化、効率化の成果について述べる。

### 7.2 ホーム柵の整備に関する法令

ホーム柵は、プラットホーム上の線路に面する部分に設置し、車両側のドア開閉操作に連動して地上側の柵が開閉するもので、ホームと線路を仕切ることでお客さまの線路への転落や列車との接触などの事故を防止する安全設備である。ホームドアと可動式ホーム柵との違いは、図-7.2.1に示すように、(a) 天井まで完全に覆うフルスクリーンタイプのものをホームドア、(b) 高さが腰高以下のものを可動式



(a)



(b)

図-7.2.1 (a) ホームドアと(b) 可動式ホーム柵

ホーム柵と呼んでいる。

ホーム柵の整備については、平成18年12月施行の「高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律」（通称：バリアフリー新法）において、「車両扉の統一等の技術的困難さ、停車時分の増大等のサービス低下、膨大な投資費用等の課題について総合的に勘案した上で、優先的に整備する駅を検討し、地域の支援の下、可能な限り設置を促進する。」<sup>1)</sup>とされ、また、国土交通省主催の「ホームドアの整備促進等に関する検討会」が、平成23年8月に中間とりまとめとして、「利用者10万人以上の駅においては、原則として、ホームドア若しくは可動式ホーム柵又は内方線付きJIS規格化点状ブロックの整備による転落防止対策を、ホームに応じ、優先して速やかに実施するよう努める。」<sup>2)</sup>ことを示している。これらを受け、鉄道事業者は、主に利用者数が10万人以上の駅や視覚障害者からの要望が高い駅を中心にホーム柵の整備を進めている。

また、視覚障害者の転落事故を契機に発足した「駅ホームにおける安全性向上のための検討会」の中間とりまとめとして、利用者数が10万人以上の駅について、「車両の扉位置が一定している、ホーム幅を確保できる等の整備条件を満たしている場合、原則として平成32年度までに（ホーム柵を）整備する。」<sup>3)</sup>ことが平成28年12月に示された。これにより、鉄道事業者ではホーム柵の整備を前倒しで進める動きが出てきており<sup>4)</sup>、ホーム柵の設置についての検討が国内各地で今後ますます進められることが予想される。

### 7.3 従来のホーム柵設置計画の手法

ホーム柵設置計画の検討の手順としては、まずは計画対象の駅に赴き、現地の状況把握を行い、計画担当者は自身の頭の中で設置時のホーム柵の姿を描く。続いて、現場状況を撮影した写真等の上にホーム柵のイメージを書き込んだり、図面を重ね合わせるなどにより設置時のイメージを具体化し、支障が想定される設備や構造物をリストアップし、計画を練る。これらの情報をもとに現地立会いを実施する。立会いには、運転、車掌、駅、建築、土木、機械、信号、通信、電力などの関係者が集うため、20～30名前後の規模となることが多い。立会いでは各々が管理や保有する設備などへの影響を検討することになるが、台帳や設計図を参照しての確認が必要な事柄が多く、その場では判断が難しいため、現地立会いを複数回実施し、計画を詰めていく場合が多い。関係箇所が多く、列車の着発線の変更などを伴う場合もあるため、立会いの開催に伴う調整には多くの時間と労力を費やしている。

現場条件が特殊であったり、新しい構造の設備を導入する場合は、設置した時のイメージがつかみ難いため、図-7.3.1のようにプラットフォームにホーム柵をイメージした模型を配置して検討を行う場合もある。また、模型よりも更に精度よく現場の状況を把握するために、HMDを用いて、MRによりプラットフォーム上に仮想的にホーム柵を設置（図-7.3.2）し、検討をする手法も行っている。MRによる検討では、HMDとワークステーションの製品価格が高額で機材も大がかりなため、気軽に使用できない点、MRは事前に組み込んだ3次元データを投影する仕組みのため、現場で急遽追加の検証や計画の変更が生じてもデータの修正が容易ではない点が課題である。なお、機材の小型化は年々進みつつある。

また、お客さまの安全性と列車の運行を確保するため、これらの取り組みは電車の運行が終わった後でないと行うことができないという課題がある。そこで、これらの課題を解消するため、いつでも簡単にホーム柵設置時の現場状況を予測して把握できるシステムを開発することにした。

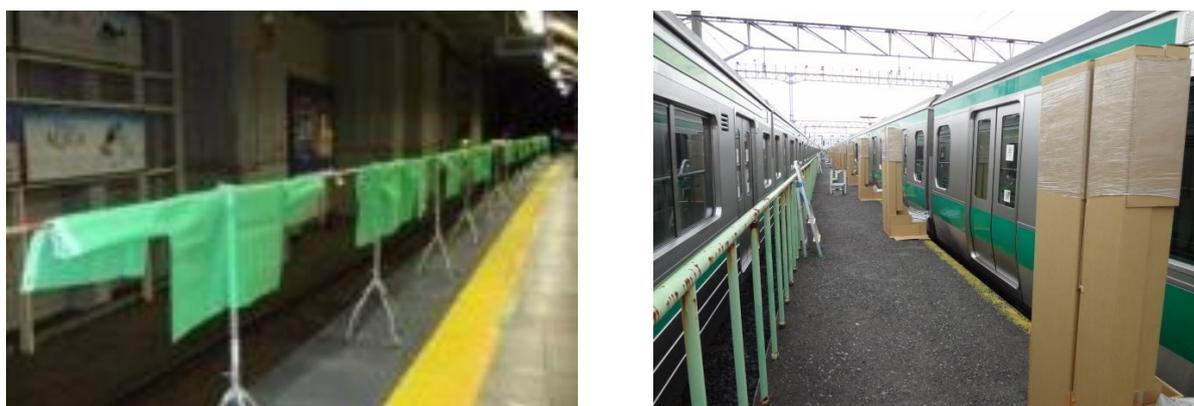


図-7.3.1 模型によるホーム柵イメージ化

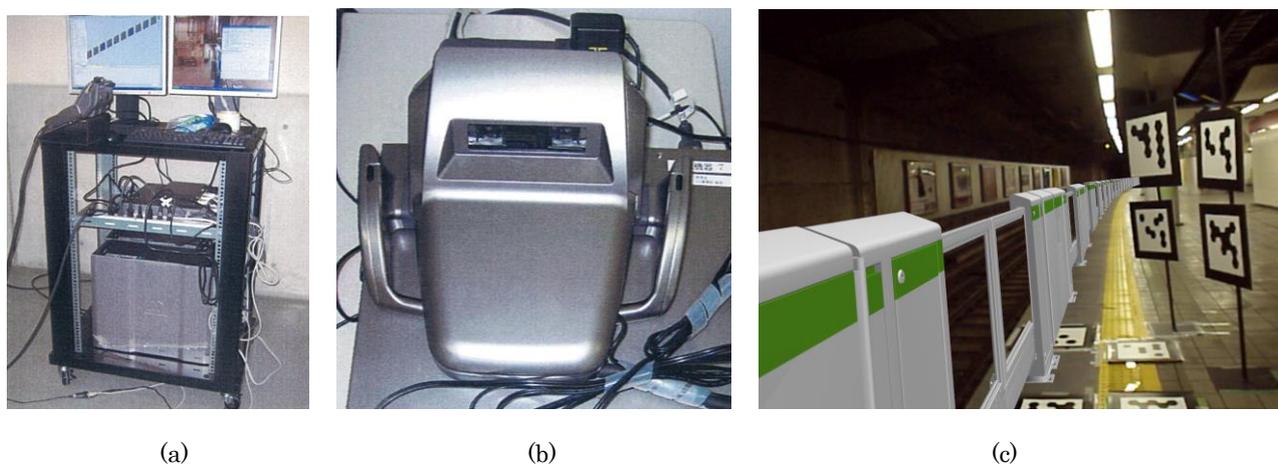


図-7.3.2 (a) MR システムと(b) HMD, (c) MR によるホーム柵イメージ

## 7.4 AR ホーム柵システムの概要

従来の手法から、視覚的な要素は理解を深めるために役立つということを窺い知ることができる。そこで、構造を視覚化する特性を有している3次元モデルに着目した。ホーム柵の設置を計画している現場の空間に設計3次元モデルを映し出すことが出来れば、設備や構造物のイメージの明確化、スケールの可視化が図れ、視覚的に計画を理解することができるとともに、現場の状況を通して設計を確認できることから、設計の精度も向上すると考えられる。

そこで、現場空間を現す媒体として、駅の乗客の安全確認のために設置しているITVを用い、その映像にAR計画システムを用いてホーム柵の設計3次元モデルを重畳するシステム（以下、ARホーム柵システム）を製作した。

開発の当初に現実空間を表す媒体としてITVを選択した理由は、多くの駅に常設されており、新たな機器を手配することなく、簡便に重畳を行うことができること、および設置場所が固定されているため、カメラの位置と姿勢の割り出しが容易であることである。このシステムは、駅に今現在設置されているカメラを使用するため、乗客の乗降と列車の運行を妨げないだけでなく、旅客流動や周辺設備を把握しながら、実際に設置する状態により近い環境で検討することができる。そして、常用しているカメラを用いることにより、日中時間帯での検討が可能で、夜間の線路閉鎖（線路近接での作業を行う際に、万一の列車の進入による事故等が生じることが無いように進入防止の処置を講じること）手続きが不要な点が従来の検討手法と大きく異なる。さらに、このシステムは、3次元モデルの種類や設置位置をインターフェイス上で簡単に変更処理することができるため、設置した場合のシミュレーションを容易に行うことができるという特徴がある。

3次元モデルを重畳させる映像素材については、静止画・動画ともに対応し、動画は生映像・録画映像のどちらでも読み込むことができるシステムとした。さらに、重畳させる3次元モデルは、静止状態の他、4次元での再生を可能とすることで、柵の開閉や車側灯の滅灯などをより臨場感をもって確認できるシステムとした。

システムの設定は、監視カメラシステムに出力端子が備わっている場合は、そこから映像を出力し、座標の初期設定を行うのみである。駅の上家の梁に常設されているカメラと駅務室に設置されている監視カメラシステムにARホーム柵システムを接続した事例を図-7.4.1に示す。なお、監視カメラの画像には、歪みが大きく現われるものもある。本研究では、図-7.4.2に示すチェッカーボードを利用して、カ

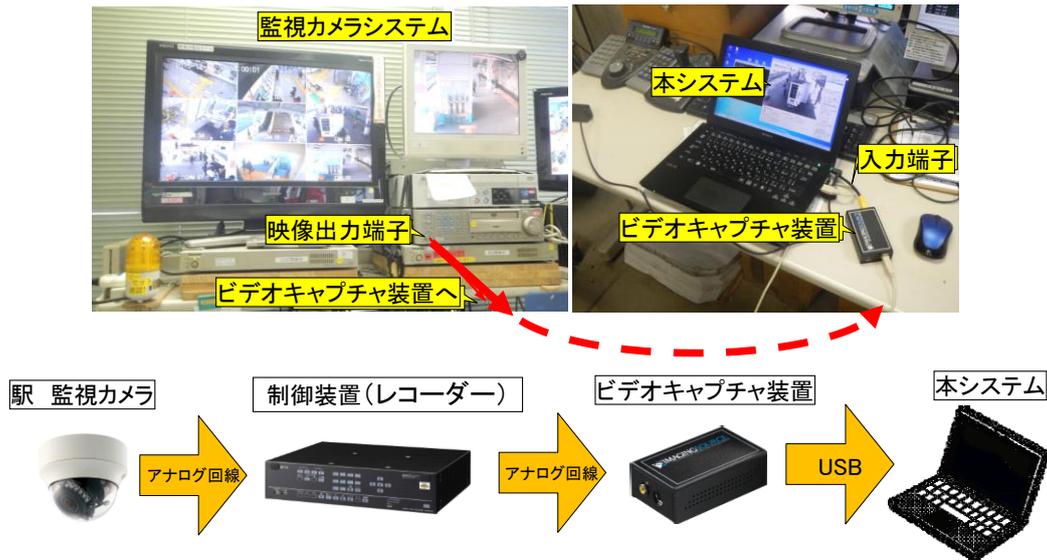


図-7.4.1 監視カメラシステムとの接続状況



図-7.4.2 チェッカーボードのカメラでの認識

カメラのキャリブレーションを行った。その原理は、レンズに歪みがない場合は、チェックの模様は直交に描写されるが、歪みがある場合は、第5章の図-5.5.2に示したような糸巻き型または、樽型に歪曲して描写される。チェッカーボードを様々な角度でカメラに認識させて格子の位置を測定し、もとの形状からいくら歪んで映るかを算出し、その結果からレンズの歪み量を算定するものである。

図-7.4.3は、この時の監視カメラの映像にARホーム柵システムを介してホーム柵を重畳した状態を示しており、島式プラットホームの両側にホーム柵を表示することにより、構造物の大きさと周囲の設備との空間的な位置関係が明確になることがわかる。このように現場に直接行かなくともホーム柵設置時のイメージを得ることが可能なため、ホーム柵の設置計画の策定者は画像をもとに立会い前に検証をすることができる。また、ARホーム柵システムで作成した資料を立会い前に関係者に配布しておけば、関



図-7.4.3 ホーム柵の重畳状況

係者が各自の設備への影響を事前に検討できるため、綿密かつ効率的な現地立会いが可能である。

なお、JR東日本では、現在ITVの映像の本来用途以外の利用を厳しく制限しているため、映像を利用することが難しくなっている。そこで、定置式のカメラだけでなく、可搬式のカメラ（デジタルカメラやビデオカメラ）にも対応するシステムとした。可搬式の場合は、カメラとシステムをインストールしたPCを用意すれば、その場でARホーム柵の確認を行うことが可能である。

## 7.5 システムの機能と施設計画への適用による効果検証

ARホーム柵システムでは、現場で簡単にホーム柵の設置状況を把握し、検討できるようにいくつかの機能を整備した。

### 7.5.1 柵のレイアウトと種類の選択

図-7.5.1は、インターフェイス上でホーム柵の種類と位置を変えて検討を行った事例の一つで、図-7.5.1(a)を基準として、図-7.5.1(b)は線路奥行き方向にホーム柵の設置位置を動かしたものの、図-7.5.1(c)は図-7.5.1(a)のホーム柵を開いた状態のもの、図-7.5.1(d)はホーム柵の種類を変更したものを示している。ホーム柵の形式は、通常タイプ、昇降バー式、昇降ロープ式を選択が可能で、新形式のものも組み込み可能である。また、2扉車から4扉車用への切り換えなども容易である。(JR東日本には、1扉から6扉までの鉄道車両が在籍する。) このように3次元モデルにより視覚化することで各条件の比較が容易になり、ARホーム柵システムは比較検討に有用である。

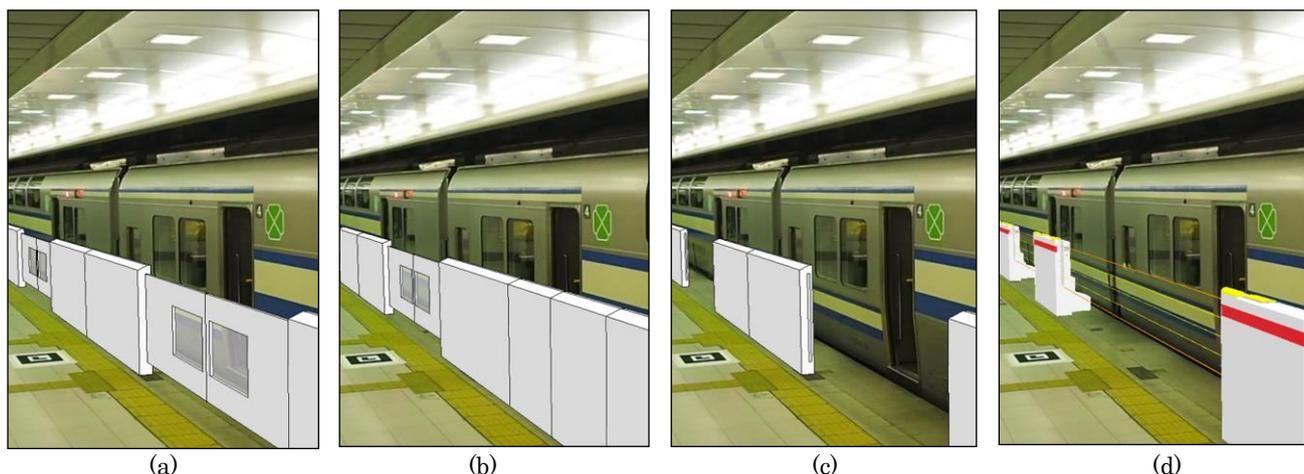


図-7.5.1 ホーム柵の設置検討事例

### 7.5.2 通路余裕幅の明示

「鉄道に関する技術基準」では、プラットホームに関する基準の中で、「ホームドア等を設けたプラットホームにあたっては、プラットホームにある跨線橋口、地下道口、待合室等とホームドア等との距離は、1.2m以上（旅客の乗降に支障を及ぼすおそれのない箇所にあつては、0.9m以上）とする。」<sup>5)</sup>と定めている。そのため、ホーム柵の計画時には1.2m以上の離れが確保できるか確認する必要がある。従来の作業では、プラットホームの図面や現地を計測して確認を行っていたが、ARホーム柵システムでは、図-7.5.2に示すようにインターフェイス上で、ホーム柵から1.2m、0.9m、および任意の距離の位置をワンクリックで表示することができるため、支障物の有無を瞬時に確認することができる。

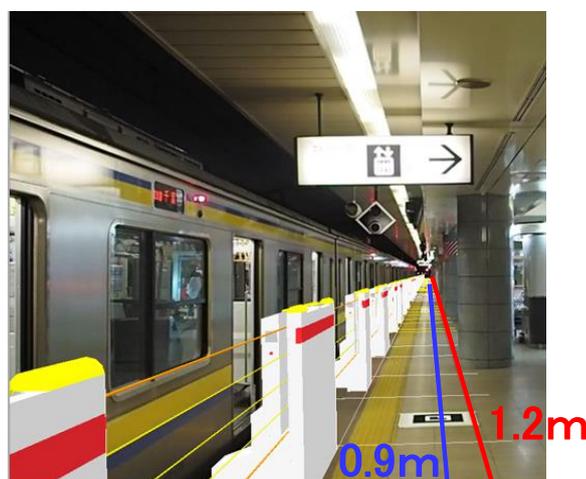


図-7.5.2 通路幅の可視化状況

### 7.5.3 線路形状に沿った設備の位置補正

ARは、ある基準点をもとに構成した座標系に対するカメラの位置と姿勢を推定して、仮想物を現実空間上に重畳している。直交した座標系を用いると重畳のためのパラメータの算出が容易になるため、ARホーム柵システムも図-7.5.3に示すような直交座標系をもとに仮想の構造物を並べる手法を用いている。図-7.5.3に示すようにARマーカを用いる場合は、カメラでマーカを認識できる必要がある。そのため、試験時には警備員を配置し、乗客がマーカを踏まないように注意を促した。

なお、ARマーカの設置方法に関しては、現場での検証試験に先立ち、屋内試験で検討を行っている。図-7.5.4に示すように、(a) 1つのマーカを床面に設置、(b) 2つのマーカを床面に並べて設置、(c) 床面に設置したマーカと垂直にもう1つのマーカを設置の3パターンについて、重畳時の精度を測定した。マーカを垂直に設置する場合、アイレベルに設置すればカメラとの角度が小さくなるため、認識の精度が上がるのが想定されるが、図-7.3.2(c)のMRの事例のように、マーカを設置するための治具が必要となるため、本試験では床に自立させる方式とした。試験の方法は、図-7.5.5に示すようなグリッドを現実空間に作成し、グリッド内で座標を変えてARマーカを設置した場合に、重畳時に図-7.5.6に示すような仮想空間のグリッドと空間的にどの程度ズレるかを測定した。12地点で測定をした結果のうち、最大値と最小値を除いたトリム平均を表-7.5.1に示す。この結果、マーカを1つ用いた場合に、精度が一番良くなったため、マーカを床面に1つ設置することにした。

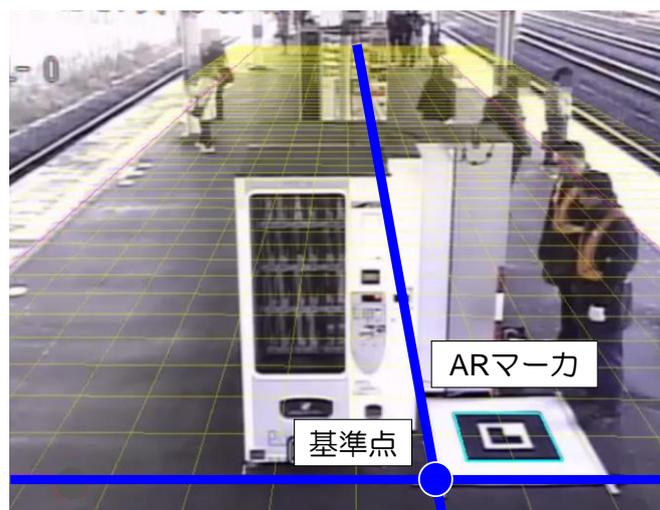


図-7.5.3 マーカを基準とした座標系



(a) 1 マーカ

(b) 2 マーカ (水平)

(c) 2 マーカ (鉛直)

図-7.5.4 マーカ設置方法の検討



図-7.5.5 現実空間のグリッド

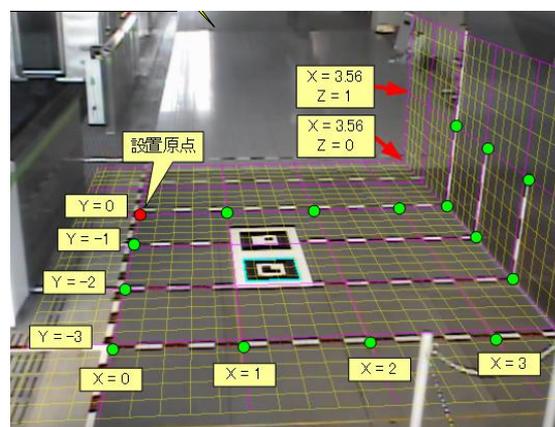


図-7.5.6 現実空間と仮想空間のグリッドの重畳状況

表-7.5.1 グリッドのズレ (mm)

	1 マーカ	2 マーカ (水平)	2 マーカ (鉛直)
トリム平均値	30	61	71

鉄道の線路形状 (以下, 線形) は, 直線, 曲線, 緩和曲線, および分岐器で構成されるが, 駅部ではホーム形状に合わせて曲線が多く採用されている. ホーム上に構造物などを計画する場合, 線路中心線からの離れにより設計を決定するため, 構造物を曲線状に配置することになる. そこで, 駅部での構造物などの計画策定に本システムを使用するため, 線形に応じて構造物などを配置する機能を整備し, インターフェイス上で, 通常の直行座標系を基準にした重畳と線形を基準とした重畳を選択できるようにした. 図-7.5.7に示すインターフェイスにおいて, 線で囲んだ「位置指定方法」の項目で, 左側の「線



## 7.5.4 視認性の確認

### (1) 車掌目線による信号類の見通し確認

昇降バー式ホーム柵（以下、簡易ホーム柵）は、従来のホーム柵に比べて筐体を軽量化することにより、ホーム基礎の改良工事を減少させるとともに、搬入と設置の労力を軽減したものである。従来型のホーム柵は左右に開閉する構造であるのに対し、簡易ホーム柵はバーが昇降する構造のため、車掌および乗客からの視認性が未知であるという課題があった。

そこで、ARホーム柵システムを用いて、車掌の目線による簡易ホーム柵の見通しを可視化し、検証を行った。本検討では、様々な地点および高さからの眺めを検証する必要があるため、持ち運び可能なカメラを用いた。図-7.5.9にプラットホーム上の車掌の立哨位置における身長ごとの眺めを示す。図-7.5.9(a)は、プラットホームの表面からカメラのレンズ中心までの高さが175cm、すなわち185cm相当の身長の人々の眺めを表し、図-7.5.9(b)は、同高さが160cmで、170cm相当の身長の人々の眺め、図-7.5.9(c)は、同高さが145cmで、155cm相当の身長の人々の眺めを表している。これらの結果、簡易ホーム柵の設置位置によって、プラットホーム上の鉄道標識（信号機の現示を補助する電子標識；通称：レピータ、列停など複数の種類有り）が見えなくなることが明らかになった。計画時点の鉄道標識の様子を図-7.5.10(a)に示すが、線路方向に二つの標識が設置されていることがわかる。ホーム柵重畳時には図-7.5.10(b)に示すように、ホーム柵により奥手の標識は完全に遮蔽され、手前の標識も一部が見えない状態となる。この結果を踏まえ、ホーム柵設置時には、図-7.5.10(c)に示すように奥手の標識を手前側に移設し、手前の標識は線路側に移設を行った。

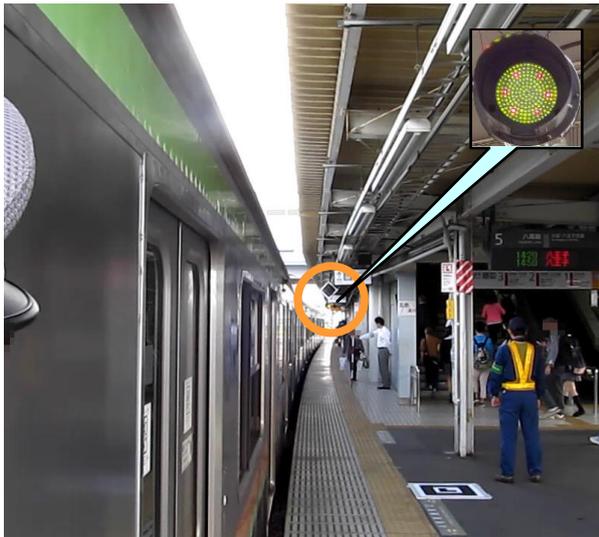


(a) 高身長（身長 185cm 相当）

(b) 標準身長（身長 170cm 相当）

(c) 低身長（身長 155cm 相当）

図-7.5.9 背丈に応じた視認性の検証結果の一例



(a) 計画時の鉄道標識の現況



(b) 重畳時の鉄道標識の状況



(c) 移設後の鉄道標識

図-7.5.10 支障物の確認状況と現況

従来の計画手法は、筐体の模型、または現物を現地に仮設置し、関係者立会いのもと設置位置と視認性を判定し、その結果、障害となるものがあれば、設計の変更と設備の移設を行っていた。ARホーム柵システムの活用により、立会いを行う前に支障箇所が明らかになるため、速やかに設計の変更が実施でき、コスト、時間的に大きな成果を得た。また、本システムの特徴である周辺の状況を確認しながら、レイアウトを決定できるため、ホーム柵の割付けと点字ブロックの移設を容易に設計することができた。

## (2) ITVでの見え方の確認

次に車掌用ITVの設置検討で活用した事例を紹介する。ホーム上で車掌が肉眼で乗客を視認出来る範囲には限界があるため、乗客の乗降確認を補助するためにITVが設置されている(図-7.5.11)。従来型のホーム柵の場合は、車両の高さよりも高い位置にITVを設置すれば乗客を捉えることが出来るが、上下開閉式の場合、影響する範囲が未知である。そこで、ITVの設置を想定している箇所にデジタルカメラを置き、そこからの視認性を検証した。図-7.5.12(a)にホーム柵設置前の現地の状況を示す。線で囲った人物は本検証のための被験者である。図-7.5.12(b)がシステムにより簡易ホーム柵を表示したものであるが、被験者が柵で隠れ視認することができないことがわかる。この人物を視認するためには、カメラの設置位置を線路側にずらし、かつ今よりも高い所に設置する必要があることがわかった。この駅ではカメラの位置を変更することが困難であったことから、簡易ホーム柵は当該駅には適当ではないということが明らかになった。



図-7.5.11 (a) ITV と (b) 車掌用モニタ



図-7.5.12 重畳による視認性の検証例

### 7.5.5 簡単なオクルージョン処理

現実空間の上に仮想空間の物体を重ね合わせた場合、オクルージョンが発生するため、仮想空間の3次元モデルを作成する場合、あらかじめ空間内の物体の前後関係を勘案しておく必要がある。しかし、位置関係が複雑で分かり難い場合やモデル作成時に考え違いがあった場合、現場の映像に3次元モデルの重畳を行った時に位置関係の相違などの不整合が発生することがある。図-7.5.13(a)はその一例で、本来は柱の奥にあるホーム柵が手前に見えるように見える。この場合、オクルージョンの処理が必要となり、その場で修正ができない場合、現場での検討がやり直しになってしまう。

ARホーム柵システムでは、不整合があった場合でもその場で簡単に修正し、検討作業を継続できるような仕組みを備えることを目標とした。そのため、画像上で前後不一致を生じている3次元モデルを見ただ目上から取り除く手法を取り入れた。図-7.5.13(b)に示すように不整合が生じている範囲をインターフェイス上で選択するだけで、簡単に手前にあった3次元モデルを非表示(図-7.5.13(c))にすることができる。この手法は、3次元モデルそのものの形状は変更せず、選択した範囲と重なっているグラフィックを表示しないものである。従来の手法では不具合が生じた場合、3次元モデルの修正作業を必要としていたが、それを行わないでも現場でスムーズに計画の検討を実施できるという点でこの手法には意義がある。

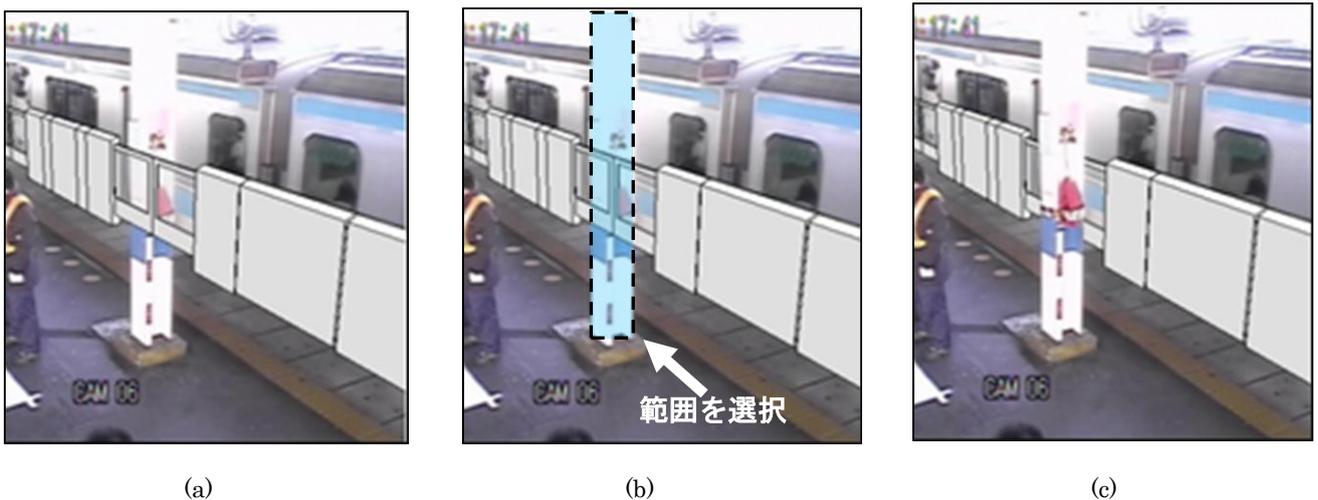


図-7.5.13 オクルージョン処理のイメージ

## 7.6 まとめ

本章では，計画段階において，ホーム柵設置時の現場状況の把握を容易にすることを目的として，カメラと3次元モデルを用いて構造物を視覚化するAR計画システムを拡充することにより，新たなシステムを製作し，現場での計画検討を円滑にするためのいくつかの機能を実装した．ARホーム柵システムにより，現場状況と設計3次元モデルの対比が容易になるため，ホーム柵のスケール感や周辺設備との取り合いが視覚的に明確となり，支障物の把握などに役立つことを現場での使用例を交えて示した．また，システムのインターフェイス上の操作で簡単にオクルージョンの処理や設備の配置をシミュレートできることを示し，本システムは現場での検討作業に即していることを示した．

ARホーム柵システムにより，計画段階での検討内容が具体化し理解し易くなるとともに，作成された資料を関係者で共有することにより，効率的な現場立会いを実施することが可能である．

## 参考文献

- 1) 国土交通省 HP, 鉄軌道及び鉄軌道車両におけるバリアフリー化の推進：  
[http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo\\_tk6\\_000018.html](http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk6_000018.html), (入手 2017.5).
- 2) 国土交通省 HP, ホームドアの整備促進等に関する検討会：[http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo\\_tk6\\_000017.html](http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk6_000017.html),  
(入手 2017.5).
- 3) 国土交通省 HP, 駅ホームにおける安全性向上のための検討会：[http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo\\_fr7\\_000015.html](http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr7_000015.html),  
(入手 2017.5).
- 4) 東日本旅客鉄道株式会社 HP, 駅ホームの更なる安全性向上に向けた取組みについて：  
<http://www.jreast.co.jp/press/2016/20170116.pdf>, (入手 2017.5).
- 5) 国土交通省鉄道局監修, 土木関係技術基準調査研究会・土木関係技術基準作業部会編：解説 鉄道に関する技術基準  
(土木編) 第二版, 日本鉄道施設協会, pp.455-483, 2007.

## 第8章 結論

### 8.1 まとめ

本研究では、建設情報を効率的に利活用するために、一元的に管理する情報共有プラットフォームの姿を検討し、続いてそこに蓄積される情報を利活用するシステムを開発した。現場での試験を通して開発成果品は建設生産システムの生産性向上に寄与していることを示した。

第1章は序論であり、現在の鉄道建設工事における情報交換についての課題を整理した。建設ライフサイクルでは、多くの関係者と情報交換するため、多大な量の情報を作り、時間と労力がかかる。また、多くの情報を流通させることにより、情報の拡散や希薄化が生じ、情報の捉え方の差が施工の品質にも影響を及ぼすことがある。これらを解決するため、情報を一元的に管理し、その情報を活用していく仕組みを作ること、情報を3次元化することにより、頭で考えずに目で見て直感的に理解できるようにすることが重要であることを説明した。また、一元化された情報を利活用するための鍵となる構造物のプロダクトモデルについて、その概要と関連する手法について説明した。

第2章では、RFIDに関する技術についての動向の調査と情報を管理する端末を使用した事例について調査を行った。さらに、工事の計画及び施工段階でVR・AR・MRを応用した既往の研究についての調査を行った上で、本研究の新規性についての説明を行った。

第3章では、鉄道工事に関する情報を利活用していくためのあるべき姿について検討を行った。現状の紙媒体による情報の交換手法は、非効率的であるとともに情報の希薄化を招く要因ともなり得るため、改善していくことが望ましいと言える。情報の蓄積と交換を効率的にするためには、情報を電子化するとともに一元化した上で、蓄積される情報を関係者間で共有し利活用を可能とする仕組みを構築することが有効であると考えた。そこで、情報を蓄積するための3次元プラットフォームと情報を利用するためのユーザインターフェイスを提案し、試験的なデータを用いてその姿を示した。

情報共有のためのプラットフォームに3次元データを蓄積するだけでは効率化は不十分であり、そのデータを活用していく仕組みを導入していく必要がある。そのため、どのように3次元データを活用するか、その手法を整理した。

第4章から第7章では、プロダクトモデルの属性情報と形状情報を工事の計画・施工に活用するために開発したシステムについて述べている。

第4章では、品質管理業務の効率化と情報の蓄積方法の改善を図る仕組みを検討し、自動認識技術を用いた構造物情報管理支援システム「IDSIMS」の開発を行った。建設工事現場での試験の結果、RFIDによる一意での認識により検査対象構造物の取り違いが防止できること、検査記録簿を素早く確実に呼び出せること、検査時の規格値のチェックが瞬時に行えること、IDごとに検査記録値をDBに登録できること、またそれらを現地構造物に取り付けたICタグから参照できることを確認した。また、検査後の報告書作成・承認作業において、検査記録の蓄積・読み出し、承認が行えることを確認した。これにより、出来形確認検査から報告書提出までの処理が迅速になることを示した。

第5章では、施工段階の監理業務を支援するシステムを開発することを目的に、ITVと3次元モデルを活用し、任意の施工段階の現場状況を視覚化する手法について検討を行い、「AR技術を用いた施工計画視覚化システム」の開発を行った。現場での確認試験の結果、構造物の施工段階に応じたVRモデルを重畳することができるため、そのタイミングでの構造物の位置関係やスケール感が明確になり、施工計画をイメージしやすくなる効果があることを示した。座標系をもとに現実空間と仮想空間の重畳を行うことで、精度の良い位置合わせが可能となり、また、カメラのパンチルト動作の影響も受けないことを示した。また、特別な機材を用いることなく簡便にARを体感できることを示した。

第6章では、施工計画の把握を容易にすることを目的として開発したAR計画システムを多くの工事現場で汎用化させるために機能の拡充を行い、現場での試験を通して実用性について検証を行った。

現場試験の結果、現場状況と設計図の対比が容易になるため、構造物と周辺構造物との関係を明確に捉えることができること、カメラの方向や位置を変えて検討を行うことができるため、注目したい地点の情報を得て計画の検討ができること、複数の関係者で画像を共有し、インターフェイス上の操作で記号やコメントを表示して打ち合わせを行えるため、打合せが深度化することを示し、本システムは実用性が高いことを示した。

第7章では、計画段階において、ホーム柵設置時の現場状況の把握を容易にすることを目的として、AR計画システムを拡充したARホーム柵システムの開発について述べた。本システムにより、現場状況と設計3次元モデルの対比が容易になるため、ホーム柵のスケール感や周辺設備との取り合いが視覚的に明確となり、支障物の把握などに役立つことを現場での使用例を交えて示した。また、システムのインターフェイス上の操作で簡単にオクルージョンの処理や設備の配置をシミュレートできることを示し、本システムは現場での検討作業に即していることを示した。

## 8.2 今後の課題

第3章で述べた情報共有のためのシステムは、今回は試験環境のみでの検証のため、実用化の見通しは不透明である。実環境で検討を行っていない理由は、セキュリティ上、および費用とハードウェアの各課題が存在するためである。

セキュリティ上の課題に関しては、情報共有のシステムとしては、鉄道に関するすべての情報を一元化することが理想的であるが、JR東日本は乗客の安全と列車の安全安定輸送の確保を第一とした鉄道事業者であるため、システム間の接続により個別のシステムに支障を及ぼさないことを担保する必要がある。現状では安全性を証明することは難しいため、情報通信に関する新たな技術開発を行う必要がある。次善の策として、鉄道に関する各システムの複製データをクラウド上に集積し、APIによりデータを利用する取り組みが始められているが、DBサーバのボリュームが2倍となり、メンテナンスの手間もその分増大する課題があるため、一時的な取り組みとしては良いが、恒久的な取り組みとしては課題がある。そのため、現状では閉ざされた空間内で限られた情報を交換するシステムがベターな形と言える。本来目指すべき姿である関連する情報を一元化し、すべての関係者で利用可能とするためには、情報通信技術が進化し、セキュリティが強固に確保された情報ネットワークシステムが構築され、汎用されることを期待したい。

費用の課題に関しては、建設工事の事業費に対し、システムの構築に関わる費用が高額過ぎて費用対効果が見込めないことが原因である。そのため、システムの実現によるメリットを説き、将来的には不可欠なシステムであるということを社内に認識させることで解決を目指していく必要があると考える。

ハードウェアの課題に関しては、現在BIM/CIMは草創期にあり、複数のDBを連携させるための適切な処理能力が明らかになっていないことに起因していると考えられる。そのため、BIM/CIMが隆盛することにより、必要なスペックも一般化し、それに対応したハードウェアおよびソフトウェアの開発も進み、処理の円滑化が実現すると期待する。

第4章で述べたIDSIMSは、施工段階では設計段階の情報、維持管理段階では施工段階の情報と言ったように、建設ライフサイクルの上流の情報を現地構造物を通じて瞬時に得ることができる特性がある。そのため、現場の技術者の判断が迅速化し、円滑な施工やメンテナンス作業の着手に繋がることが期待される。本研究では、工事施工段階を対象として論じ、維持管理段階についての検証は行っていない。ICタグを用いることで現地構造物に設計、施工、維持管理の履歴を記録することができる特徴を活かすた

め、施工段階に留まらず、他のプロセス段階も含めた検証を進め、建設ライフサイクル全体での効果を明らかにしていく必要がある。また、本システムはプロダクトモデルの ID と紐付けることにより、プロダクトモデルの施工に関する属性情報を蓄積していくことができる仕組みであるが、プロダクトモデルそのものの情報を参照するためには Navisworks などのソフトウェアを別途立ち上げる必要がある。現場では最小限の持ち物で簡便に使用できるシステムが求められているため、3次元モデル閲覧ソフトウェアなどとの連携についても検討していく必要がある。今後、本システムの改良を進め、更なる生産性の向上を探求していきたい。

第5章～第7章で述べた AR 技術を用いた視覚化システムに関しては、3次元モデルを重畳する機能についてはユーザからも満足を得ている。しかし、現在は3次元モデルを作成することがシステムを使用するための一番の障壁となっている。今後、建設業界、建築業界で3次元モデルが一般化して行けば解消する課題ではあるが、それまでの間にもユーザに使用して頂くために構造物サンプルや重機械や仮設構造物といった施工計画検討の中で多用するアイテムをシステムにプレインストールするなどの実用的な機能の実装を目指してインターフェイスの改良を進めていきたい。そして、より多くの現場で使用するシステムを作り上げたいと考えている。

最後に、本研究では、情報を一元化し共有して活用していくシステム像を描いたが、現状は個々のソフトウェアの開発に留まっている。将来は、前述した課題を解消し、総合的なシステムを作り上げたい。

## 謝 辞

本論文は、大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻 矢吹信喜教授のご指導のもとにまとめたものです。矢吹先生には、本研究を実施する機会を与えて頂き、ご指導とご鞭撻を賜りました。査読論文の投稿や国際会議での発表については、これまでの人生で経験がありませんでしたが、矢吹先生の懇切丁寧なご指導により乗り切ることが出来ました。ここに心から深く感謝申し上げます。

本論文および論文発表会を審査して頂きました大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻の澤木昌典教授、福田知弘准教授には、多くのご助言を頂きました。ご指導に対しまして深く御礼申し上げます。また、福田先生には、学会やシンポジウムのたびに暖かい笑顔で迎えて頂きました。顔見知りかほとんどいない社会人大学院生にとって、心強い存在でした。

私は、名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻では水理・水文学研究室に所属し、洪水予測についての研究を行ってきました。平成8年の東日本旅客鉄道株式会社入社後は、10年余り建設工事プロジェクトの実施部門に従事し、協定先との事業費についての協議やプロジェクトの工程管理を主に行う日々を過ごしており、建設生産システムとは無縁の状態でした。しかし、平成21年に現在の所属先であるJR東日本研究開発センターに着任したことで、最初の転機が訪れました。着任時に当時の上司である増田達次長（現・ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社 常務取締役）から、「これからは建設生産システムの時代となるので、建設に関わるシステムやITについて研究をしてください。」との指示を受けたのです。当時の私は、建設生産システムという言葉を知らず、また、社内の周りの人間も同様で、手探りの中での研究の開始でした。土木学会や日本建設情報総合センター（JACIC）のシンポジウムやセミナーなどを受講しながら独学で知識を習得し、研究についてある程度の成果が現われかけた時に第二の転機が訪れました。当時の所属箇所長である石塚哲夫フロンティアサービス研究所所長（現・日本コンサルタンツ株式会社 執行役員）から、「君の研究成果を田原システムとしてドクター論文にまとめたらどうか。」との助言を頂いたのです。博士論文は特別な人が書くものと思っていた当時の私にとっては、思いも寄らない出来事でしたが、これを契機として博士課程への進学を目指すことにしました。研究の機会を下さいました増田達氏、学びのきっかけを下さいました石塚哲夫氏に感謝申し上げます。

進学にあたり、この分野で日本で一番の先生に師事したいとの思いで、土木情報学の第一人者である矢吹先生に指導を願い出ました。矢吹先生とは面識がありませんでしたが、快く受け入れて頂きました。先生のもとで研究をさせていただく機会を与えて頂いたことに厚く御礼申し上げます。

大学院入学後、JR 東日本の上司・諸先輩方から多くの支援や激励を賜りました。浅見郁樹前建設工事部長（現・常務執行役員）からは、たびたび叱咤激励のお言葉を頂きました。特に松之山の夜の逸話は印象に残っており、励みになりました。フロンティアサービス研究所の樋浦昇前所長（現・日本コンサルタンツ株式会社 執行役員）、小野仁所長からは、幾度も暖かいお言葉を頂きました。歴代の次長・上席研究員である清水満氏（現・構造技術センター 次長）、岩田道敏氏（現・東北工事事務所 次長）、谷口善則氏（現・ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社 執行役員）、小林薫博士からは、在籍中のみならず離任後も継続してお心遣いを頂きました。すべての方々のお名前を挙げる事ができず、誠に申し訳ありませんが、JR 東日本の関係者の皆様に御礼申し上げます。

また、本論文では建設生産システムの効率化のために、いくつかのシステムの開発を行いました。システムのプログラム作成にご協力頂きました石間計夫課長をはじめとするジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社の皆様、堀井裕信専務取締役をはじめとする株式会社エムティシーの皆様、福田博之課長をはじめとするJIPテクノサイエンス株式会社の皆様に御礼申し上げます。皆様のご協力なくしては、本研究を完遂することはできませんでした。八千代エンジニアリング株式会社の藤澤泰雄副本部長には、社会人大学院生の先輩として、研究の進め方など様々な助言を頂きました。深く御礼申し上げます。本論文は、多くの皆様のご指導とご協力を得てまとめ上げることができたものであり、すべての皆様に心から深く御礼申し上げます。

最後になりましたが、陰から応援してくれた家族に感謝の意を表し、本論文の結びと致します。

平成 30 年 1 月  
田原 孝

