

Title	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
Author(s)	羽鳥, 文雄
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/61727">https://doi.org/10.18910/61727</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University

博士学位論文

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

羽 鳥 文 雄

2017年1月

大阪大学大学院工学研究科



## 目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.1.1 プラント建設における課題.....	1
1.1.2 プラント運転・保守における課題.....	3
1.1.3 作業におけるヒューマンエラー.....	4
1.1.4 拡張現実感技術.....	5
1.2 研究の目的.....	6
1.3 本論文の構成.....	7
参考文献.....	9
第2章 既往の研究.....	11
2.1 概要.....	11
2.2 既往の研究.....	11
2.2.1 ARに関する要素技術.....	11
2.2.2 ARにおける位置合わせの手法.....	12
2.2.3 ARをプラント建設や運転・保守に応用した研究.....	14
2.3 本研究の新規性.....	16
参考文献.....	18
第3章 複数マーカを用いた拡張現実感技術の施工への応用.....	20
3.1 概要.....	20
3.2 大空間向け複数マーカを用いた位置合せ手法.....	20
3.3 位置合せ手法の印象評価.....	24
3.3.1 検証機器.....	24

3.3.2	検証方法.....	25
3.3.3	検証結果.....	26
3.4	施工現場への試験的応用.....	32
3.4.1	施工時の安全対策向け AR システム.....	32
3.4.2	システムの稼働実験と評価.....	37
3.5	まとめ.....	38
	参考文献.....	40
第4章	画像特徴点を利用した拡張現実感技術のプラント運転作業支援への応用.....	41
4.1	概要.....	41
4.2	プラント運転作業支援.....	41
4.3	画像特徴点を利用した位置合せ手法.....	42
4.4	AR 応用プラント運転支援システム.....	45
4.4.1	システム概要.....	45
4.4.2	実務適用に向けた高速処理方法の検討.....	48
4.5	システムの有効性評価.....	52
4.5.1	検証方法.....	52
4.5.2	評価結果.....	54
4.6	まとめ.....	57
	参考文献.....	58
第5章	メータ自動読取り機能の拡張現実感技術を利用したプラント運転 作業支援システムへの応用.....	59
5.1	概要.....	59
5.2	AR 応用プラント運転支援システムの課題.....	59
5.3	メータ認識方法の検討.....	61

5.4	メータ画像読取り実験.....	65
5.4.1	実験方法.....	65
5.4.2	実験結果.....	68
5.5	プラント運転支援システムへの応用.....	72
5.6	まとめ.....	74
	参考文献.....	76
第6章	結論.....	77
6.1	結論.....	77
6.2	今後の課題.....	78
	謝辞.....	81

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 プラント建設における課題

建設現場の生産性向上はこれまで長く求められている課題である。現在においても、他の産業に比べると生産性が低く<sup>1)</sup>、技術革新が期待されている分野である。「建設業ハンドブック 2016年」<sup>2)</sup>によれば労働時間に対する仕事を作り出す付加価値を表す労働生産性に関して、製造業がこれまで右肩上がりでも生産性が向上しているのに対し、建設業は2012年時点でも製造業の半分以下であり大きな差があると述べられている。主な要因は単品受注生産等の建設生産の特殊性と工事単価の下落によるものとの見解であるが、建設業における生産性向上は大きな課題である事は間違いない。

また、建設就業者数は建設投資の減少と共に減ってきており、就業者数が減少すると共に就業者の高齢化が問題になっている。図1.1.1に建設業就業者の高齢化に関する資料を示す。建設業に従事する若年層が低下すると共に、相対的に高齢者の割合が高くなっており、他産業と比較し

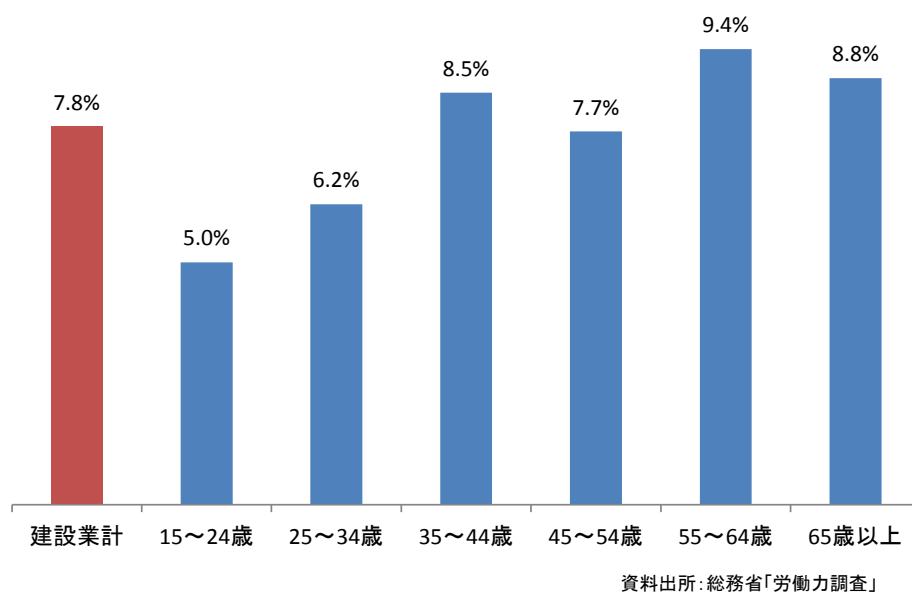


図 1.1.1 建設業就業者の高齢化（建設業ハンドブック 2016年より）

でも高齢化の傾向が顕著に現れている。これらの事から熟練技術者の高齢化への対応、熟練技術者が引退した後の後継者問題への対応が急務であるとする。

更に、建設業においては安全に関する課題がある。図 1.1.2 に全産業での死亡者数、建設業での死亡者数の推移を示す<sup>1)</sup>。死亡事故の件数は減少傾向にあるものの、建設業は他の産業に比較して高い比率を占めており安全管理の高度化が重要な任務になっている。

上記に提示した建設業における生産性向上、高齢者対策、安全管理の高度化という課題に対し、ICT (Information & Communication Technology) の活用に期待が寄せられている。建設機械や計測機、情報機器等、建設を支援するツールも発展しつつあり、活用範囲は拡大している<sup>2)</sup>。特に技術革新の早い ICT を活用した生産性向上への取組みは様々な事例が報告されている<sup>3)4)</sup>。

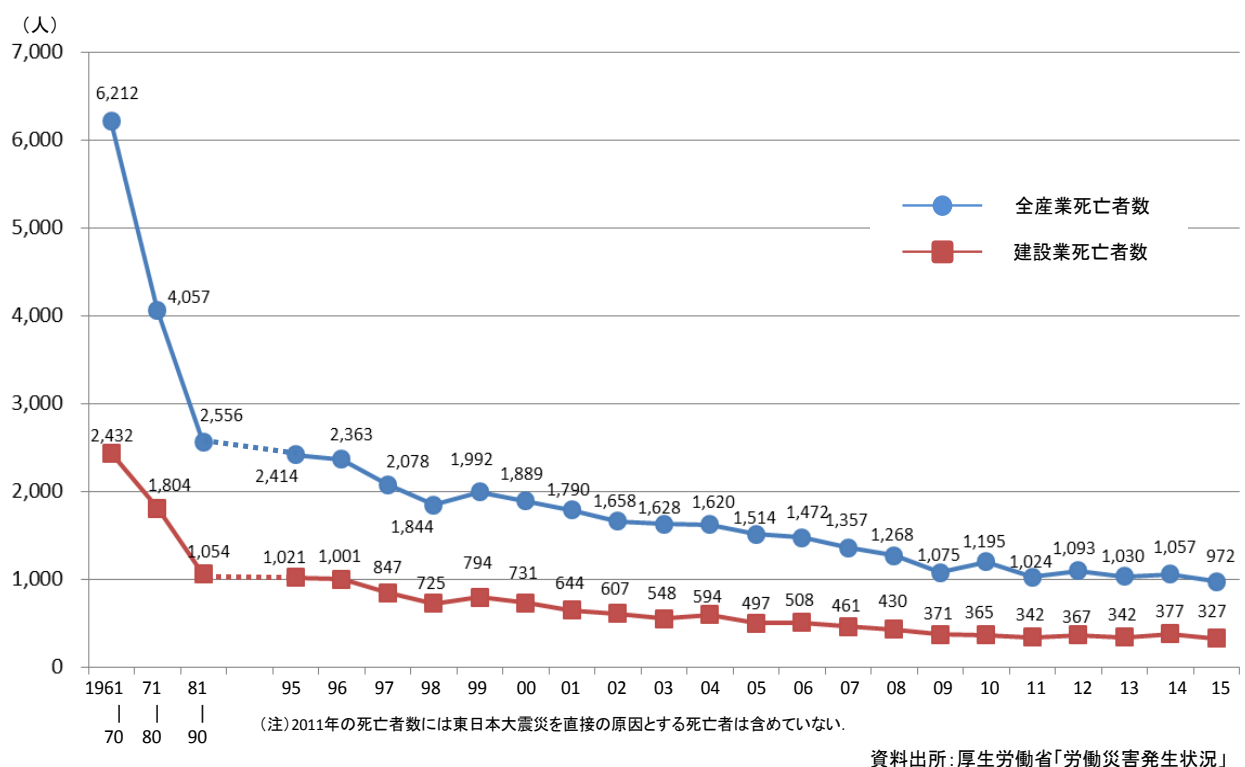


図 1.1.2 労働災害発生状況の推移 (建設業ハンドブック 2016 年より)



### 1.1.2 プラント運転・保守における課題

電力プラントや水処理プラント等，社会インフラとして国民の社会生活や経済活動の基盤となる施設では，24時間稼動する設備も多く，設備を止める事なく，適正に運転する事が求められる．一方，国内の社会インフラ設備は，高度経済成長期に建設されたものが多く，設備の老朽化が問題になっている．表 1.1.1 に国土交通省による建設後 50 年を経過する社会資本の割合<sup>5)</sup>を示す．

水処理プラントに係る下水道管きよでは 2013 年 3 月時に 2%が 2033 年 3 月には 24%に拡大するなど，今後，飛躍的に老朽化が進む事がわかる．しかし，老朽化した設備の維持，管理，更新には膨大な費用が掛かる．全ての社会インフラを一度に更新する事は難しく，設備の長寿命化や効率運営が求められている．

表 1.1.1 建設後 50 年を経過する社会資本の割合<sup>5)</sup>

	2013年3月	2023年3月	2033年3月
道路橋 (約40万橋)2m以上の橋から建設年度不明分を除く	約18%	約43%	約67%
トンネル (約1万本)建設年度不明分を除く	約20%	約34%	約50%
下線管理施設 (約1万施設)国管理の施設のみ	約25%	約43%	約64%
下水道管きよ (総延長:約45万km)	約2%	約9%	約24%
港湾岸壁 (約5千施設)建設年度不明分は除く	約8%	約32%	約58%

資料)国土交通省

また，拡大する社会インフラ設備の維持管理，保守業務に対し，人口減少に伴う高齢化や熟練者不足が大きな課題となっており，限られた財源，人的リソース等の様々な制約の中で効率良く管理するためのマネジメント手法の必要性が掲げられている<sup>6)</sup>．総務省では社会資本の維持管理及び更新に関する行政評価・監視結果報告書<sup>7)</sup>として，港湾施設や上下水道施設に関する施設管理のマネジメント手法の実践を提案している．各省庁では図 1.1.3 に示すような「ストックマネジメント」手法として，維持管理に関わるデータを収集・整備し，これらの客観的なデータを中

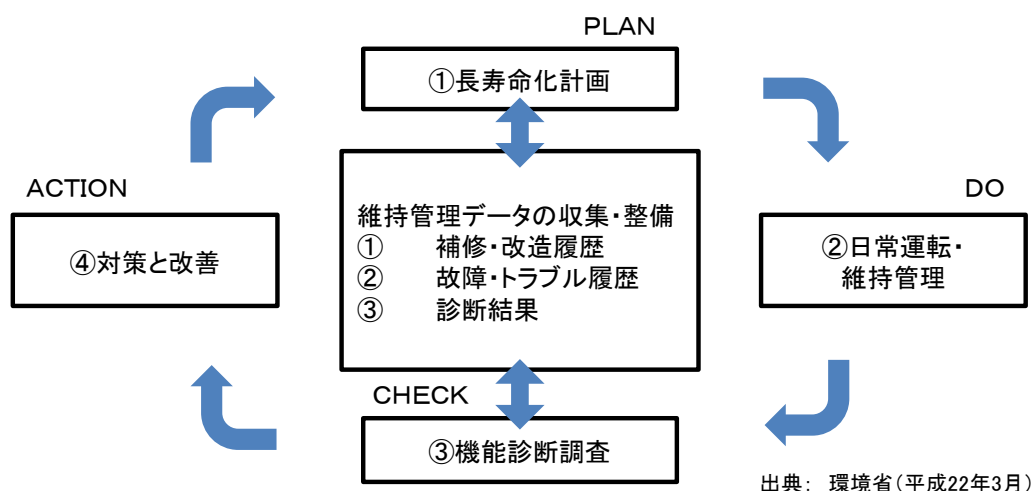


図 1.1.3 スtockマネジメント手法概要

心にして、長寿命化計画（Plan）、日常運転・維持管理（Do）、機能診断調査（Check）、対策改善（Action）のPDCAサイクルを回す手法を提案している<sup>8) 9)</sup>。

このようなストックマネジメントは社会インフラ設備から集めた運転データや保守・点検データの活用がキーポイントになり、データの収集、解析、提示においてM2M（Machine to Machine）システムやタブレット型の保守・点検システム等、有効なICTシステムが求められる。

### 1.1.3 作業におけるヒューマンエラー

ここまで、発電所や水処理プラント等、社会インフラ関連プラントに関する施工現場の課題とプラント運転・保守に関わる課題を述べてきた。これらに共通する点は高齢化社会の到来に伴う熟練者不足への対応、ICT活用による効率管理が挙げられる。人に起因する問題としてはヒューマンエラーへの対応も難しい課題と考えられる。特に、熟練不足によるマンツーマンでの技術伝承が困難になる将来においては、施工現場での不安全行為やプラント運転時の運転ミス等のヒューマンエラーの発生リスクが高まると考えられる。

小松原<sup>10)</sup>によれば、原因からみたヒューマンエラーの種類を以下の6つに分類している。

- ① 人間能力的にできないという「無理な相談」「できない相談」

- ② 取り違い, 思い違い, 考え違いなどの判断の「錯誤」
- ③ し忘れなど, 記憶の「失念」
- ④ その作業を遂行する能力, 技量が不足している「能力不足」
- ⑤ すべきことを知らない「知識不足」
- ⑥ 手抜きや怠慢などの「違反」

②や③は熟練者にも起こりうるエラーであるが, ④や⑤は熟練不足による技術の伝承が充分に行われない場合, 発生リスクは高まると考える. ICT の活用で期待される事の一つとしてこのようなヒューマンエラー低減に寄与する事があると考え.

#### 1.1.4 拡張現実感技術

最新の ICT 技術の一つとして拡張現実感 (Augmented Reality : AR) が注目されている<sup>11)</sup>. 前述した課題に対応するための作業支援技術の一つとして AR の活用が考えられる. AR とは, 現実世界の映像にコンピュータグラフィクス (CG) や文字などの仮想情報を重畳させ, 現実を拡張・強化する技術である<sup>12)</sup>. AR を用いる事で, 施工作业を実施する前に完成時の姿を確認したり, 運転作業を行う際に, 作業対象となる計器の位置や順序の把握, 各作業対象に関する状態や操作方法の確認が容易になり, 操作ミスを防止したり, 効率的に作業を進められると考えられる.

AR は 1960 年代より研究開発が進められており, エンターテインメント, 教育, 広告, 医療等, 適用範囲が広く, 様々な分野への応用が期待されている<sup>13) 14)</sup>. エンターテインメントや広告分野では一部実用化された例も見られるが, 産業分野では実用化された技術はまだ少ない<sup>15)</sup>.

AR を実現するためには, 現実空間と仮想空間を一致させるための位置合わせ手法が重要となる. 位置合わせ方法としてはセンサベースの手法<sup>16) 17)</sup> とカメラからの画像情報に基づく手法がある. センサベースの手法とは, GPS (Global Positioning System) やジャイロ스코ープ, 磁気センサ等を用いて位置情報を取得する方法である. センサベースの手法は比較的簡単に位置情報を取得できるが, 特別なハードウェアが必要であるためシステムが高価になる傾向がある. カメ

ラからの画像情報に基づく手法は、カメラ以外に特殊なセンサが不要で低コストで実現できるため、ARの研究において主流になりつつある。本手法には、人工マーカを用いる手法と自然特徴点を用いる手法<sup>18)19)</sup>の二つがある。ARシステムを開発する際には、ARで取り扱う空間の大きさや対象物、位置合わせ精度などを考慮して適切な手法を選定する必要がある。

## 1.2 研究の目的

プラント建設段階での、現場の生産性向上、及び安全対策の支援、プラント竣工後の運転・保守段階における熟練技術の伝承やヒューマンエラーによる操作ミス対策は、特に永続的、安定的な運転が求められる社会インフラシステムにおいては、小さいなミスが重大事故に繋がる恐れもあり重要な問題である。近年、設備の老朽化に伴う整備の遅れや技術者不足が原因による事故などの発生リスクは高まっており、特に熟練技術者が減少する将来においては、深刻かつ重要な問題と考えている。これらの課題に対し、熟練者の知識をデータベース化すると共に、新たな知見も含めて随時蓄積、再利用できる仕組みがますます重要になる。ここで蓄えられたデータを有効に活用する仕組みとして、如何に的確なタイミングで的確な場所で情報を提示する新しいヒューマンインタフェース技術がARである。蓄えた知見をARを用いて作業者に効果的に提示できれば支援システムとして有効と考える。そこで、本研究は熟練者が減少する将来に向け、プラント建設時や運転・保守段階における作業支援方法として、施工・運転・保守に関連する技術やノウハウを伝承し、同時にヒューマンエラーの削減を目的に、ARを用いた作業支援システムを開発するものとした。

特に、建設現場では他の産業に比べ大型で重量物の取扱いが多く、また仮設物に囲まれ、日々作業環境が変化する等の特殊要因を考慮した位置合わせ手法が必要である事から、大空間で大型の構造物を扱う際の位置合せ手法を検討し、プラント施工現場を想定したARを用いた安全指示方法について開発するものとした。

また、プラント運転・保守向けには画像特徴点を利用した AR による作業支援システムを開発した。本システムを水処理プラントの実務に適用しながら、システムの有効性を評価した。更に、より高度な AR システムの実現に向け、作業者が AR で提示された指示に従い実施した作業の正確性を確認する仕組みについてメータ読取り作業を例に開発するものとした。

### 1.3 本論文の構成

本論文は、全 6 章で構成した。以下に各章の概要を纏める。

**第 1 章**では、研究の背景として、プラント建設及び運転・保守における課題を整理し、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。既往の研究については、建設やプラント保守に関連する AR を応用した研究について整理し、その上で、本研究の新規性を述べる。

**第 3 章**では、大空間に AR を適用させるために開発した複数マーカを用いた方法とプラント設備の建設現場への適用事例について述べる。

**第 4 章**では、プラント運転時におけるヒューマンエラーの防止を目的に、画像特徴点を利用した AR によるプラント運転支援システムの有効性について述べる。

**第 5 章**では、アナログメータの読取り作業を対象に、AR で指示した作業指示に対し、指示通りの作業を実施したかを確認する事でヒューマンエラーを削減する方法について述べる。

**第 6 章**では、結論を述べる。

本論文の構成を図 1.3.1 に示す。

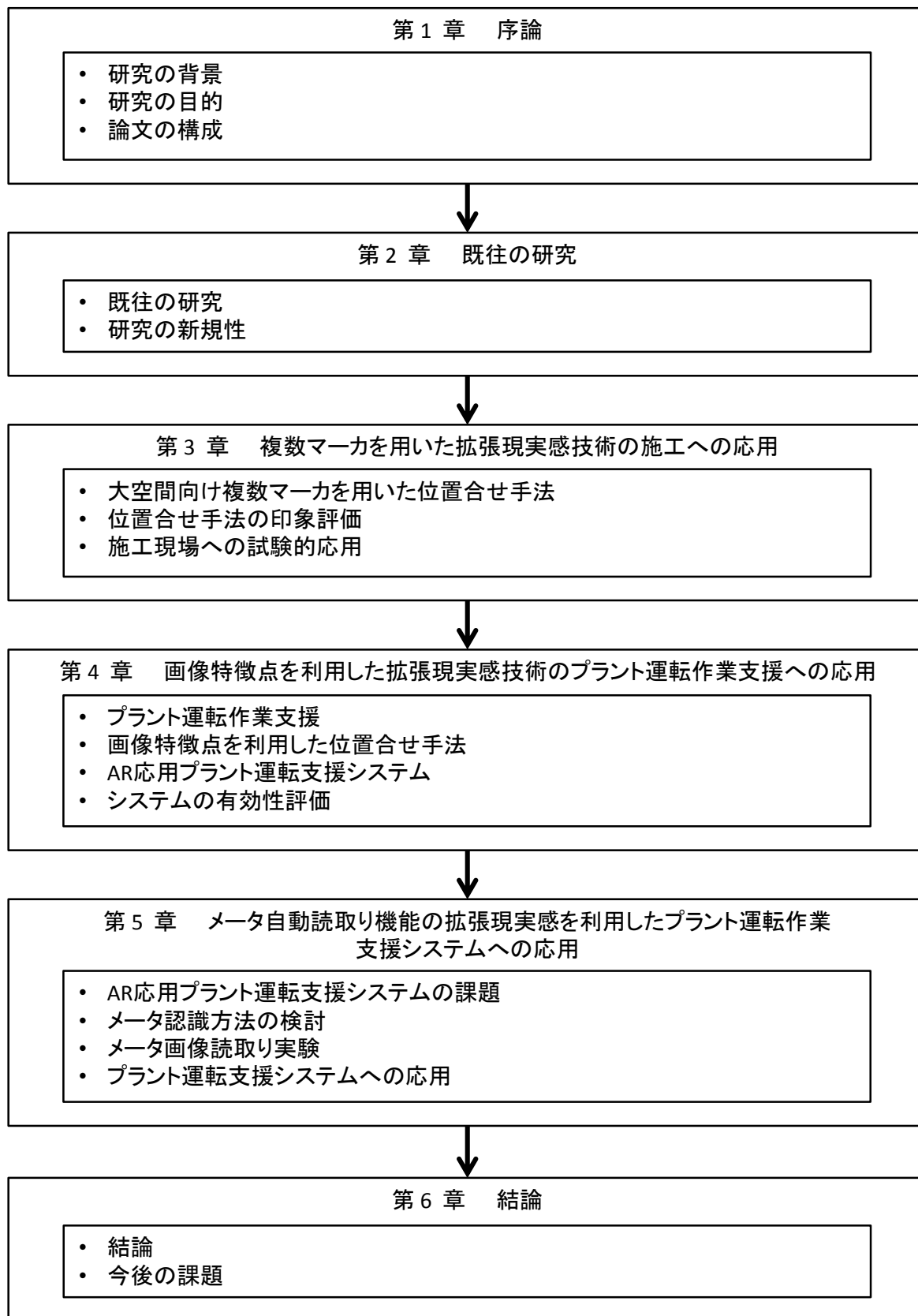


図 1.3.1 本論文の構成

## 参考文献

- 1) 日本建設業連合会：建設業ハンドブック 2016，一般社団法人日本建設業連合会，2016.
- 2) 藤盛紀明：建設業の技術経営（MOT）第7章 建設業の生産革新と機械化・自動化・ロボット化戦略（テクノロジープッシュ・マーケットプル），鉄構技術，Vol.22 No.257, pp.70-81, 2009.
- 3) 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, 2005.
- 4) 鹿島：KAJIMA monthly report digest 2013 04 スマートデバイス建設現場活用事例，[http://www.kajima.co.jp/news/digest/apr\\_2013/feature/index-j.html](http://www.kajima.co.jp/news/digest/apr_2013/feature/index-j.html), Last accessed December 2015.
- 5) 国土交通省：国土交通省白書 2014, p.28, 2014.
- 6) 宇都正哲，植村哲士，神尾文彦，小林庸至，北崎朋希：人口減少時代におけるインフラ整備の問題と対応策，知的資産創造, 17(10), pp.78-95, 2009.
- 7) 総務省行政評価局：社会資本の維持管理及び更新に関する行政評価・監視結果報告書，総務省報道資料，2012年2月
- 8) 環境省大臣官房 廃棄物・リサイクル対策部 廃棄物対策課：廃棄物処理施設長寿命化総合計画作成の手引き（ごみ焼却施設編），環境省, 2015年3月
- 9) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：ストックマネジメント手法を踏まえた下水道長寿命化計画策定に関する手引き（案），国土交通省，2013年9月
- 10) 小松原明哲：ヒューマンエラー，丸善株式会社，2003.
- 11) 矢吹信喜：VR, MR, AR の基礎と建設分野への適用について，JACIC 情報，Vol.26, No.3, pp.5-16, 2011.
- 12) 神原誠之：基礎 1: 拡張現実感 (Augmented Reality: AR) 概論，情報処理, Vol.51, No.4, pp.367-372, 2010.
- 13) Oliver Bimber: What's Real About Augmented Reality?, Computer, Vol.45, No.7, pp.24-25, 2012.
- 14) Nassir Navab: Developing Killer Apps for Industrial Augmented Reality, Computer Graphics and Applications, Vol.24, No.3, pp.16-20, 2004.
- 15) Pierre Fite-Georgel: Is there a Reality in Industrial Augmented Reality?, Proceedings of 10<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2011, pp.201-210, 2011.
- 16) 横小路泰義，菅原嘉彦，古川恒夫：画像と加速度計を用いた HMD 上での映像の正確な重ね合わせ，日本バーチャルリアリティ学会論文集，Vol.4, No.4, pp.589-598, 1999.

- 17) 藤井博文, 神原誠之, 岩佐英彦, 竹村治雄, 横矢直和: 拡張現実のためのジャイロセンサを併用したステレオカメラによる位置合わせ, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU99 192-203, pp.1-8, 2000.
- 18) 廣瀬亮, 齊藤英雄: 頂点追跡に基づく AR のためのマーカレス位置合わせ手法, 情報処理学会研究報告, No.2005-CVIM-150, pp.103-110, 2005.
- 19) Bolan Jiang, Ulrich Neumann: Extendible Tracking by Line Auto-Calibration, IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, pp.97-103, 2001.



## 第2章 既往の研究

### 2.1 概要

本章では、本研究に関連する分野の既往の研究を整理し、本研究の新規性について述べる。2.2 において、AR の要素技術及び AR を用いた建設現場への応用や保守管理に関する既往の研究について述べる。2.3 では、既往の研究に対する本研究の新規性を述べる。

### 2.2 既往の研究

#### 2.2.1 AR に関する要素技術

AR に関する要素技術には現実世界と仮想世界の整合性に関連する技術、情報の入力に加え、仮想情報を出力するディスプレイ等の入出力デバイスに関する技術が挙げられる。また要素技術では無いが AR を応用したアプリケーションは様々な検討がなされており、アプリケーションに合わせて各要素技術の新しい手法が提示されたり、求められる精度レベルや水準が設定される事となる。

現実世界と仮想世界の整合性に関しては、以下の3つの整合性が取上げられている<sup>1)2)</sup>。

##### (1) 幾何学的整合性

仮想オブジェクトの位置・遠近感の表現に関して、現実世界と幾何学的に整合性が取れているかを示し、これにより現実世界の正しい位置に仮想物体が存在するような映像を作り出す技術である。そのためには、何らかの手段にて位置情報を取得し、現実世界と仮想世界におけるユーザの視点の位置・姿勢を推定する必要がある。

##### (2) 光学的整合性

現実世界と仮想世界の画質や陰影等の光学現象の整合性が取れているかを示す。そのためには、現実世界と仮想世界のオブジェクトの間の照明環境による反射特性に矛盾が生じないよう推定する必要がある。

### (3) 時間的整合性

ユーザの移動、視点の変化、実環境の変化などによって生じる現実世界に対する遅延等が無いよう整合性が取れているかを示す。そのためには、仮想オブジェクトの表示時間を高速にし、ユーザの視点の位置・姿勢に追従させる必要がある。

(2)(3)は特にコンピュータの処理速度に大きく依存すると考えられ、これら 3 つの整合性の中で、特に(1)の幾何学的整合性が、現実世界と仮想世界を重ねる際にユーザに違和感を与える最も大きな要因であり、ユーザの視点の位置・姿勢制御を推定する位置合わせ手法の精度向上が AR における大きな課題である。

入出力デバイスとしては現実世界の情報を入力するためのカメラやカメラの絶対位置を取得するための GPS 等が挙げられる。また仮想オブジェクトを重畳表示した映像を表示するための出力デバイスとしては HMD (Head Mounted Display)、タブレット型端末、プロジェクター等が利用されている。特に出力デバイスについてはユーザが現実世界を直接見ている上に仮想オブジェクトを表示する光学シースルー型と、カメラで撮影した現実世界の映像の上に仮想オブジェクトを表示して全てを映像として見るビデオシースルー型の二種類に分けられる。

#### 2.2.2 AR における位置合わせの手法

現在の AR の位置合わせ手法としては、GPS (Global Positioning System) やジャイロセンサ、磁気センサなどを用いたセンサベースの手法<sup>3)</sup>とカメラからの画像情報に基づくビジョンベースの手法の二つがある<sup>4) 5)</sup>。センサベースの手法は、視点や環境の変化に対し制御がしやすく、ユーザやカメラの位置姿勢を容易に計測することができるため、ユーザに負担を掛ける事が少ない。その反面、高精度な幾何学的整合性を実現するためには高価で特別なハードウェアが必要であり、また、移動可能範囲がセンサの有効範囲に限られてしまうといった問題が挙げられる。これに対し、カメラからの画像情報に基づくビジョンベースの手法は、カメラ以外に特殊なセンサは必要とせず、比較的低コストであるため AR の研究において頻繁に用いられている。

今回、プラント建設・施工及びプラント運転・保守という観点で AR を用いると考えた場合、屋外空間で建物景観を確認するというよりも、作業者が作業を行う建設空間で機器や配管を据付る、もしくはそれら进行操作するという事を想定している。この場合、屋内でありながらある程度の移動空間があるという事になる。これには GPS 等のセンサーベースの手法は不向きであり、ビジョンベースの手法を採用する事とした。ビジョンベースの手法には位置検出のために環境中に人工物を配置する人工マーカを用いる手法と人工物を配置しない自然特徴点を利用する手法が存在する。人工マーカによる位置合わせ手法として、特に ARToolKit<sup>6)</sup> は有名である。ARToolKit とは、奈良先端科学技術大学院大学の加藤博一氏とワシントン大学ヒューマンインターフェース技術研究所 (HITLab) によって開発されている画像処理に基づいたオープンソース・ライブラリ群である。

マーカを用いる手法の場合、現実世界と仮想世界の位置合わせはマーカの大きさとカメラの精度が影響する。マーカの大きさはカメラが捕らえた映像上でマーカの占めるピクセル数であり、マーカの大きさを既知とすることで現実世界の単位と仮想世界の単位を一致させていることから、マーカのピクセル数が大きくなる程、精度は高くなるが、マーカが大きくなればカメラが捕らえる映像の中でマーカ以外の領域が小さくなってしまいう問題がある。カメラの精度とは、カメラの解像度やレンズによる歪みのことを指し、ハードウェアによる誤差であり、対策としてレンズによる歪みを補正するためにカメラキャリブレーションが行われている。

一方、画像自然特徴点を利用する手法は、カメラが捕らえた画像の中に存在する物体の特徴点を抽出するため、人工マーカを必要としない。しかし、自然特徴点には位置合わせの基準となる座標系が定義されていないため、そのままでは現実世界と仮想世界の相対的な位置関係を決定することができないことが問題である。また、カメラ画像内の三次元位置を推定するためには複数画像間の特徴点を対応付ける必要があり、大きな視点の移動や障害物の往来があるとトラッキングに大きな乱れが生じたり、類似特徴点の探索に掛かるコンピュータ処理時間等、画像処理分野

での様々な課題が存在する。但し、近年のコンピュータ処理能力の飛躍的な進歩から、様々な解決策が検討されており、これらは主にコンピュータビジョンの分野で研究<sup>7)</sup>が進められている。

### 2.2.3 AR をプラント建設や運転・保守に応用した研究

プラントの建設・施工、運転・保守における作業に AR を適用する際に考慮すべきと考えられる特徴を以下に整理する。

#### (1) プラント建設・施工

プラント建設・施工は必要な資機材を搬入し、それを加工、組立、据付するという過程の中で資材の切断や溶接、ケーブルの敷設等、様々な作業を実施してゆく。作業対象物は比較的大きいものが多く、工場とは違い、作業対象や作業環境が時間と共に常に変化する。更に作業環境の変化に伴い、作業員の作業位置や姿勢も大きく変化する場合が多い。また、安全対策についても作業環境の変化に伴い、適宜考慮しなければならない。

#### (2) プラント運転・保守

プラント運転・保守には定常時の運転・保守とプラント起動や停止、異常発生時等の非定常時の運転・保守がある。建設とは違い作業対象も作業環境も固定されている。作業姿勢は運転のしやすさ等も考慮されており、位置の変化は比較的少ない。非定常時も作業環境は同様であるが、非定常時の作業は頻度が少ないため、操作方法はマニュアル等にしたいが実施する。保守の観点で大きな改修や部品交換などを行う場合は、作業対象物は大きく、プラント建設と同様の作業となる。

既往の研究としては産業分野への応用を整理したもの<sup>8)</sup>があり、Industrial Augmented Reality<sup>9)</sup>と呼ばれたりしている。また、建設分野への AR 応用を提案したもの<sup>10)</sup>、建設に適用する際のユーザインタフェースやクラウドコンピューティング環境がもたらすデータアクセス方法などと合わせた AR アプリの開発トレンド等が調査されている<sup>11)</sup>。また建設業界は BIM (Building Information Modeling) の普及と共に 3 次元データの活用が進められている<sup>12) 13)</sup>。

これによって設計段階から 3 次元の形状データが保有出来るため、これらを利用した AR の実現が可能となり研究も進められている<sup>14)</sup>。AR の利用例として、よく取上げられるのものとして建物の完成モデルを現実空間に重ね、景観のシミュレーションやデザイン検討を行った事例<sup>15)</sup>やフィンランドの国立技術研究センター (VTT) では、建設分野を AR 技術の最重要応用分野と見てとらえ BIM 情報を施工プロセス従って順番に見せる事によって、施工計画、安全衛生計画を行う携帯型 AR システム<sup>16)</sup>を開発している。しかし、ここで用いられる AR はプラント建設・施工における作業を対象としたものではなく、全体を俯瞰した建物の変化を捉えたものである。作業支援としては屋外における重機を利用した建設手順を AR にて作成する検討<sup>17)</sup>はなされいるが作業レベルの視点ではない、作業レベルの視点としては矢吹ら<sup>18)</sup>が 2007 年に鉄筋の配筋検査に AR を利用する研究を実施しているが対象を配筋検査に絞っており、作業完了後の検査に注力している。

プラントの運転・保守への AR 応用に関する研究としては、PDA (Personal Data Assistant) と音声認識技術を応用した事例<sup>19)</sup>や、石井ら<sup>20) 21)</sup>は原子力発電プラントにおける保守作業を対象とした AR の応用を検討し、プラント作業支援への応用として以下を提示している。

### (1) 環境状況の可視化

作業対象物の内部構造や圧力、温度分布など、通常は直接見る事が出来ない情報をセンサーやデータベースから取得し、3 次元的に可視化して重畳表示できる。

### (2) 現実世界の位置や操作方法の提示

AR 技術を用いて操作対象の機器の位置や操作方法を提示することが可能である。これにより、従来の紙のマニュアルを用いる場合と比較して、短時間にかつ確実に作業を実施する事が可能となる。

### (3) 現実世界と仮想世界との比較

モデル化した 3 次元 CAD データと現実のカメラ画像を比較する事で、その違いを把握し、修正することが容易になる。この特徴を用いる事で、例えば、施工などの進捗の管理や、CAD

データと実際の機器との違いを把握する事が可能となる。また、施工や解体においては、作業の支援や作業記録の支援が可能となる。

### 2.3 本研究の新規性

AR の応用範囲は広く研究は盛んであるが、プラント建設・施工時やプラント運転・保守の作業を支援するという分野においては、まだ事例も少なく、要素技術も含めて課題が残されている。要素技術の面では、作業支援を想定した場合のプラント機器や配管などの大規模構造物を高精度かつ実用的に位置合わせする手法が確立されているとは言えない。ARToolKit は机上での作業を対象とし、一般的には、マーカの大きさは 50x50mm 程度の小さなものを想定している。しかし、規模の大きいプラント機器や配管を対象とした場合、それらの構造物に合せた大きなマーカが必要となる。これに対し、Yabuki ら<sup>22)</sup> は精度向上のため 900x900mm の巨大な正方形マーカを使用して屋外で ARToolKit による位置合わせの精度検証を行っているが、マーカが大きいと取り扱いの観点からは実用的とは言えない。そこで、Ota ら<sup>23)</sup> は異なる内部パターンを持つ 4 個の正方形中型マーカを巨大な正方形の頂点位置に配置し、ARToolKit のアルゴリズムを利用して、仮想的に巨大なマーカと同等の精度を得ようとする 4 点マーカ法を開発した。この手法は屋外大規模空間が対象でも誤差が大きくなりやすく取り扱い性にも優れるが、4 個のマーカが正方形の頂点位置になくならないため配置に自由度が無く、また、常に配置した 4 個のマーカを認識し続けることが必要であり、視野が限られるという問題がある。

特に、建設、施工段階では、様々に変化する周辺環境条件に合わせて、比較的大きな構造物を提示する位置合わせ手法が必要となる。そこで、本研究では施工現場にマッチした大規模構造物の位置合わせ手法を開発すると共に、本手法を安全管理に関連するアプリケーションを開発し、実務者による評価によってその有効性を検証する事とした。

また、プラントの運転・保守段階では、施工時に比べて作業範囲が限定される事、施工時のように周辺環境が頻繁に変化する事が無い事から画像特徴点を利用した位置合わせの可能性を評

価する事とした。運転ミスや保守のミスが致命的な事故につながるような重要な作業において、ARにて作業手順を提示する事が有効な手段になると考えられるが、実業務の中での評価事例は見当たらず、本研究では実際の水処理プラントの現場で実務に合わせた操作手順表示のアプリケーションを開発して評価を行った。

更に作業手順の提示が有効であっても、実際に実施した作業が間違っていたり、運転結果の入力値が間違っている場合は意味がなく、作業者が作業を実施した際に作業手順の正しさを確認できる事が望ましい。そこで、本研究ではプラント運転時のアナログメータ読取りに関して、ARによって作業手順を提示した後にコンピュータが作業者が入力した値をチェックする機能として、アナログメータの自動読取り機能を開発した。固定カメラを利用してアナログメータの読取りを行う研究は事例<sup>24)</sup>があるが、ARのようにカメラが常に動く事を想定した検討はなされていない。本研究ではプラント運転・保守作業の一部であるが、ARによる作業支援のサブシステムとしてアナログメータ値の自動読取り方法を検討し、これを組み込む事でARによる作業指示とそれらの指示に従って実施した作業内容をコンピュータがダブルチェックする事で重要作業における操作ミスを防止する方法を提案する事とした。

## 参考文献

- 1) 神原誠之：基礎 1:拡張現実感 (Augmented Reality: AR) 概論, 情報処理, Vol.51, No.4, pp.367-372, 2010.
- 2) 矢吹信喜：VR, MR, AR の基礎と建設分野への適用について, JACIC 情報, Vol.26, No.3, pp.5-16, 2011.
- 3) R.Azuna, B.Hoff, H.Neely, R.Sarfaty: A Motion-Stabilized Outdoor Augmented Reality System, Proceedings of IEEE Virtual Reality (VR'99), pp.252-259, 1999.
- 4) 植松裕子：基礎 2:拡張現実感 (AR) 概論, 情報処理, Vol.51, No.4, pp.373-378, 2010.
- 5) S.You, U.Neumann, R. Azuma: Hibrid Inertial and Vision Tracking for Augmented Reality Registration, Proceedings of IEEE Virtual Reality (VR'99), pp.260-267, 1999.
- 6) 加藤博一, Mark Billinghurst, 浅野浩一, 橘啓八郎: マーカ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
- 7) 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳 編: コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, pp.37-48, 1998.
- 8) Pierre Fite-Georgel: Is there a Reality in Industrial Augmented Reality?, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.201-210, 2011.
- 9) Industrial augmented reality: [https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial\\_augmented\\_reality](https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_augmented_reality), Last accessed December 2016.
- 10) Xiangyu Wang: Augmented reality in architecture and design: potentials and challenges for application, International Journal of Architectural Computing 7 (2), pp.309-326, 2009.
- 11) Hung-Lin Chi, Shih-Chung Kang, Xiangyu Wang: Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction, Automation in Construction, Vol.33, pp.116-122, 2013.
- 12) 山梨和彦：業界が一変する BIM 建設革命, 日本実業出版社, 2009.
- 13) Dana K.Smith, Michael Tardif: Building Information Modeling A Strategic Implementation Guide for Architects, Engineers, Constructors, and Real Estate Asset Managers, Wiley, 2009.
- 14) Chan-Sik Park, Do-Yeop Lee, Oh-Seong Kwon, Xiangyu Wang: A framework for proactive construction defect management using BIM, augmented reality and ontology-based data collection template, Automation in Construction, Vol.33, pp61-71, 2013.
- 15) 福地良彦, Mani Golparvar-Fard: 4D 拡張現実による施工工程の自動可視化技術, JACIC 情報, Vol.26, No.3, pp.50-55, 2011.



- 16) 矢吹信喜, Charles Woodward: フィンランド国立技術研究センター (VTT) における AR と MR の建設分野への応用について, JACIC 情報, Vol.26, No.3, pp.17-21, 2011.
- 17) Amir H.Behzadan, Vineet R. Kamat: Automated Generation of Operations Level Construction Animations in Outdoor Augmented Reality, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol.23, No.6, pp.405-417, 2009.
- 18) 矢吹信喜, 李占涛: 拡張現実感技術を用いた配筋施工支援に関する基礎研究, 土木情報利用技術論文集, Vol.16, pp.33-106, 2007.
- 19) Stuart Goose, Sinem Guven, Xiang Zhang, Ra Sudarsky, Nassir Navab: PARIS:Fusing Vision-Based Location Tracking with Standards-Based 3D Visualization and Speech Interaction on a PDA, Proceedings of International Conference on Distributed Multimedia Systems, 2004.
- 20) 石井裕剛: 応用 2: プラント保守作業支援, 情報処理, Vol.51, No.4, pp.392-397, 2010.
- 21) 石井裕剛: 拡張現実感を応用した解体作業支援, JACIC 情報, Vol.26, No.3, pp.33-38, 2011.
- 22) Nobuyoshi Yabuki, Kyoko Miyashita, Tomohiro Fukuda: Evaluation of Invisible Height for Landscape preservation Using a Driving Simulator, CONVR2009, pp.279-286, 2009.
- 23) Ota, N., Yabuki, N. and Fukuda, T. : Developpment of an accurate positioning method for augmented reality using multiple markers, Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, pp.4-7, 2010
- 24) 藤田悠介, 浜本義彦: 画像処理によるアナログメータ自動読み取り, 電気学会論文誌 C, Vol.129, No.5, pp.901-908, 2009.

## 第3章 複数マーカを用いた拡張現実感技術の施工への応用

### 3.1 概要

本章では、大空間に拡張現実感技術を適用させるために開発した複数マーカを用いた方法について記し、プラント設備の建設現場への適用事例により、当技術の具体的な活用方法について述べる。まず、3.2で大空間を対象とした複数マーカを用いた位置合せ手法について記述する。3.3では複数マーカを用いた拡張現実感技術の評価について記述する。3.4では施工現場への応用例について記述する。

### 3.2 大空間向け複数マーカを用いた位置合せ手法

拡張現実感技術を大規模な土木工事やプラント建設分野等の大規模構造物に適用する場合、机上サイズでの位置合せではなく、大空間において、現実空間と仮想空間を一致させるための位置合わせ手法が必要になる。ARにおける位置合わせ手法については2章に示したが、プラント建設現場への適用を想定した場合、屋内もある為、GPSの利用は困難であり、また日々変化する現場環境では、画像特徴点を利用する方法も大きな視点移動や通行者の往来によりトラッキングが困難になる事が予想され、人工マーカを用いる手法が良いと判断した。

人工マーカを用いた位置合せ手法は、サイズの既知な人工マーカをカメラで捕らえる事で空間の座標を把握する方法である。特殊な機器を必要とせず、コストパフォーマンスが高く、ARの代表的手法として様々な研究<sup>1)2)</sup>が為されてきたが、位置合わせの精度が画面上に占めるマーカの大きさに依存するため、大規模構造物を対象とすると、非常に大きなマーカを設置する必要があることが問題であった。

これに対しOtaら<sup>3)</sup>は4個のマーカを正方形頂点位置に設置し仮想的に巨大なマーカと見立てて位置合わせを行う4点マーカ法を開発したが、4点マーカ法はマーカ設置位置に自由度がなく、また4個のマーカを常に認識する必要があることが課題であった。そこで本研究では、大規

模構造物を対象とした位置合わせへの適用を目的として、ARToolKit の 4 個以上の複数の正方形マーカを利用しながらもマーカ配置の自由度、カメラの視点の自由度、障害物の往来への対応性を高めた実用性の高い位置合わせ手法を開発することとした。

はじめに、マーカの作成、設置、登録について述べる。ARToolKitでそれぞれの正方形マーカを認識する際に座標系を統一して計算を効率化させるため、本手法ではそれぞれのマーカの中心点が同一平面上となり、かつ同一直線上に無いようにマーカを設置した。同一平面と言ってもマーカを設置する壁や鉄骨の精度に依存する。想定される条件として、壁や鉄骨の精度が $\pm 5\text{mm}$ 程度とすると、 $5\text{m}$ 以上離れた位置からマーカを読取る場合、 $5\text{m}$  ( $5,000\text{mm}$ ) の距離に対し $5\text{mm}$ のずれが生じる事になる。これは $1/1,000$ の誤差が生じる可能性がある事になり、 $250\text{mm}$ 角のマーカを用いた場合には $250 \pm 0.25\text{mm}$ となる。これに対し表示させる仮想物はメートル単位であり比較的大きいのでメートル単位の構造物に対し $1/1,000$ 程度の誤差が出ても影響は無いと考えた。

次に設置したマーカの内いずれか一つのマーカの中心点を原点として、各々のマーカ中心点の相対的な3次元座標値を計測する。原点位置が基準となるマーカの中心点であれば、各々のマーカ中心点の3次元計測を行うためのXYZ軸の取り方は自由であるが、3軸のいずれかは必ずマーカ設置平面に対して垂直方向を向くようにし、全てのマーカ中心点の3次元座標の特定の軸の成分が0となるようにした。本研究では、同一平面上に設置した全てのマーカの3次元座標のZ軸成分が0となるように軸方向を設定している (図3.2.1)。計測後、各マーカの3次元座標値を2次元配列に格納し、プログラムに登録する。登録後、プログラムを起動し、webカメラを用いて撮影する。このとき、設置した複数マーカの内、最低4個のマーカを画面内で認識する必要がある。

次に、開発したプログラムについて説明する。本研究では、マーカの検出・識別処理にARToolKit、カメラの位置・姿勢推定にOpenCV<sup>4)</sup>、仮想オブジェクトの描画にOpenGL<sup>5)</sup>の機能を使用している。まず、マーカの検出を容易にするためにwebカメラからの入力画像の二値化を行う。二値化処理後、ARToolKitのarDetectMarker関数が二値化画像の中からマーカを検出し、そのマーカ

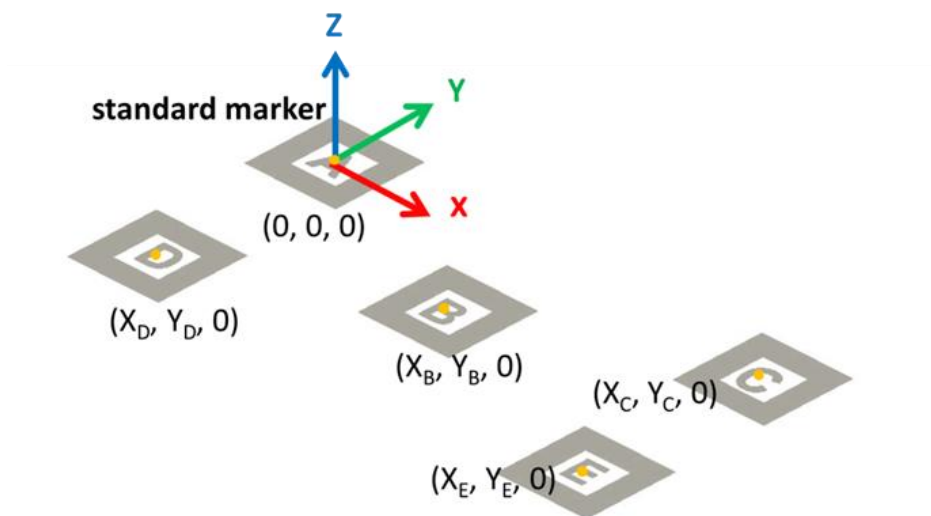


図 3.2.1 基準マーカ中心点と各々のマーカ中心点の相対的な 3 次元座標値

のパターンを認識する。マーカを認識できた場合、ARToolKitでは、マーカ毎にスクリーン座標系でのマーカの位置情報がメモリ内部に記憶されるため、異なるマーカパターンを用いることでマーカ毎の位置情報に容易にアクセスできる。具体的には、ARToolKitでは検出されたマーカに関する情報は全てARMarkerInfo 構造体に格納される (図3.2.2)。

ARMarkerInfo構造体はマーカ面積、認識ID、マーカの向き、一致度、スクリーン座標系におけるマーカの中心座標、マーカの輪郭の直線式、マーカの頂点座標で構成されている。認識IDは、

```

typedef struct{
    int    area;           // マーカ的面積
    int    id;            // マーカの認識 ID
    int    dir;           // マーカの向き
    double cf;            // 一致度
    double pos[2];        // 観測スクリーン座標系におけるマーカの中心座標
    double line[4][3];    // マーカの輪郭の直線の式
    double vertex[4][2];  // マーカの頂点座標
}ARMarkerInfo;

```

図 3.2.2 ARMarkerInfo 構造体の内部構成

アプリケーションが使用するマーカと類似したパターンファイルを検出したときに格納される、そのパターンファイルのID番号である。一致度は、マーカとして検出された領域とパターンファイルとの一致度を表す係数であり、画像中にパターンファイルと類似した領域が複数見つかったときに、最も一致度の高い領域を見つけるために使用される。ARMarkerInfo構造体はARToolKitのマーカ検出処理を用いて検出されたマーカの数だけ作成される。マーカの検出・識別処理後、検出した4個以上のマーカのARMarkerInfo構造体からそれぞれスクリーン座標系における中心座標 (pos[2]) を取得し、あらかじめ登録してある基準マーカ中心点を原点とする各マーカの相対的な3次元座標と対応付ける。この対応付けは、マーカの認識IDとパターンマッチングの一致度をもとに正確に対応付ける。この時、一致度の低いマーカを使用するとマーカの取り違えが発生する可能性があるため、一致度には閾値を設けており、それを下回る一致度のマーカは位置合わせに使用しない。次に、マーカ抽出の際に取得したスクリーン座標系で4つの頂点座標値を利用し、マーカ座標系からカメラ座標系への変換行列を推定する事になる。この時に、計算によるスクリーン座標値と実際の画像処理によって求められた値の誤差の2乗和が最小となるようにしてカメラ位置を決定するパラメータを算出する。プログラムでは対応付けたマーカのスクリーン座標と3次元座標の各組をOpenCVが提供するcvFindExtrinsicCameraParams2関数に代入することにより、カメラの外部パラメータ行列が求まり、カメラの位置・姿勢の推定を行うことができる。その後、OpenGLの描画機能を用いて仮想オブジェクトを描画する。

以上により、基準とするマーカの中心点を原点とする相対的な3次元座標と、画面内のマーカの中心点のスクリーン座標の対応から、カメラの位置・姿勢を推定できる。従来のARToolKitの位置・姿勢計算のアルゴリズムを用いないため、4個以上ならばいくつでもマーカを任意の場所に配置できる。また、画面上で認識したマーカのみを用いて位置・姿勢の計算を行うため、仮に歩行者や移動する物体等により1個ないし複数のマーカが一時的に隠れても、画面に4個以上のマーカが映っていれば位置合わせを行うことが可能である。また、位置合わせの精度は個々のマーカの大きさに依存しないため、それぞれのマーカが個別に検出できる大きさであれば屋外であっ

ても巨大なマーカを必要としないこともメリットである。本研究ではマーカを読取るカメラとマーカの距離が10m離れた位置から検出できる大きさとして250×250mmのマーカを使用した。

### 3.3 位置合せ手法の印象評価

開発した複数マーカを用いた位置合わせ手法の有用性を確認することを目的に、本手法を使用した場合、Ota<sup>3)</sup>らの4点マーカ法を使用した場合および1個のマーカを用いた場合の比較実験を行った。この実験ではプラント建設を想定し、工場内の設備の周囲に足場の仮想オブジェクトをARで表示し、その現実感をプラント建設関連技術者を被験者として5段階で印象評価してもらった。また、本研究で開発した複数マーカを用いた位置合わせ手法に基づくARを応用させ、その有用性を検討した。

#### 3.3.1 検証機器

本検証で使用した機器を以下に記す。

- (1) ノートPC：使用したノートPCはソニー株式会社のPCG-51111Nである。主な仕様は、Intel(R)CoreTMi7 CPU M640 (2.80GHz 2.80GHz)、4.00GB RAM、解像度 1366x768 である。使用した OSは Microsoft Windows 7 Professional である。
- (2) Webカメラ：実写映像を取得するカメラとしては、Microsoft社のフルHD 1080p対応800万画素WebカメラLifeCam Studioを使用した。
- (3) 2次元マーカ：本検証では、内部パターンとして小塚ゴシックProのフォントの英数字で各々「A」「B」「C」「D」「E」「F」「G」「J」と描いた250x250mmの正方形マーカを使用した。「H」「I」は上下反転しても同じになってしまうため、今回使用しなかった。また、実環境中でマーカの検出度を上げるために、マーカの周囲には白枠を作成した。

### 3.3.2 検証方法

本研究では、プラント関係の実務者を被験者として、複数マークを用いる手法及び4点マーク法によりプラント模擬装置の周囲に仮想的に建設する構造物の3Dオブジェクトを表示させ、「仮想オブジェクトの表示位置」、「仮想オブジェクトの振動」、「通行者によりマークが隠れた時の仮想オブジェクトの振動や消失」の3項目から表示した仮想オブジェクトの現実感を5段階で評価してもらった。最低点が1で、最高点が5であり、評価点が5に近づくほど、被験者が「良い」あるいは「適切である」と判断したことになる。マークとカメラの間の距離は6mと9mの2パターンで行い、各距離における印象の違いを検証した。検証実験は工場内に設置されたプラント模擬装置に250×250mmの正方形マーク8個を図3.3.1のようにプラントの柱に直接貼り付け、最下部左に位置する「J」マークを基準としてマーク中心点の3次元座標を図3.3.2に示すトータルステーションにて計測した。1点法では「J」マークのみを利用し、4点法では「J」「F」「E」「G」の4つ

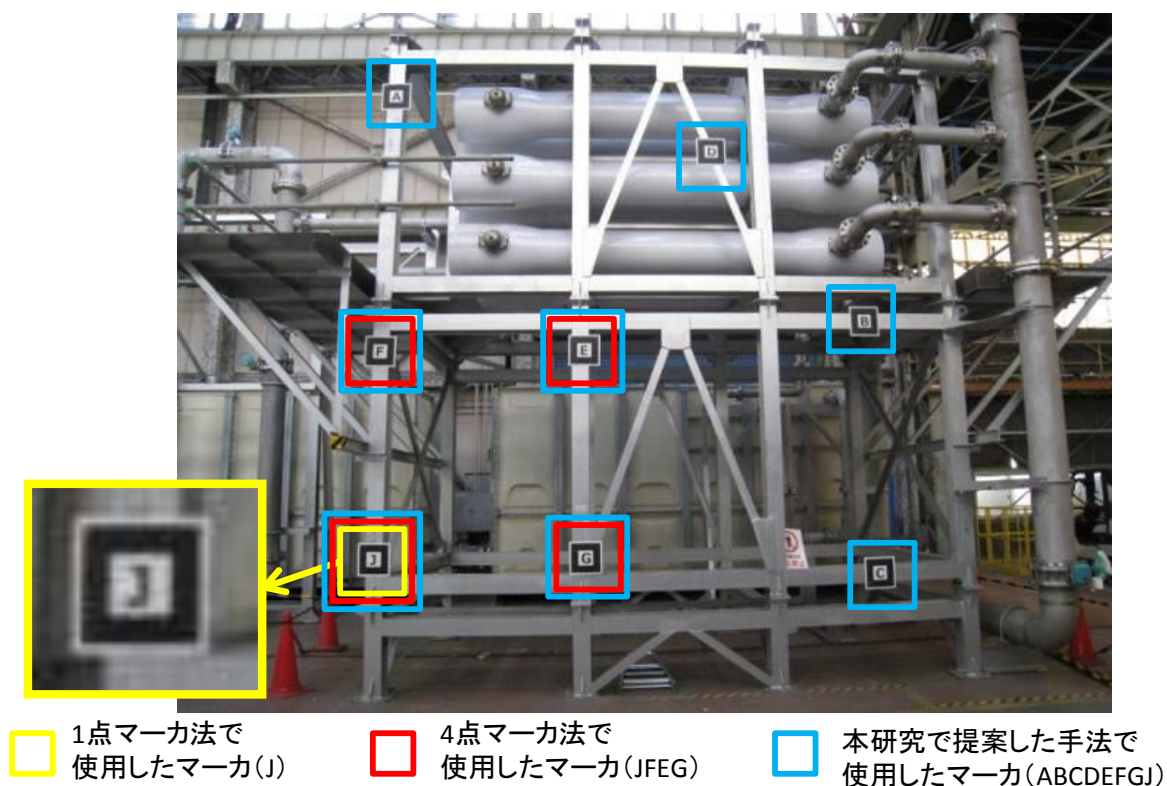


図 3.3.1 プラント模擬装置とマーク設置場所

のマーカを利用し，本研究で提案する複数マーカを用いる方法では全てのマーカから最も精度良く取得できる4つを選択して使用する．取得したマーカ中心点の3次元座標値を図3.3.3に示す．また表示させた仮想オブジェクトを図3.3.4に示す．



図 3.3.2 マーカ測位に使用したトータルステーション

```
double WorldPoints[][3] = {
    {0.0, 0.0, 0.0},           //Jマーカ (基準マーカ)
    {0.0, 1810.0, 0.0},       //Fマーカ
    {1810.0, 1810.0, 0.0},    //Eマーカ
    {1810.0, 0.0, 0.0},      //Gマーカ
    {9.0, 4288.0, 0.0},       //Aマーカ
    {3000.0, 3723.0, 0.0},    //Dマーカ
    {4374.0, 2070.0, 0.0},    //Bマーカ
    {4394.0, -201.0, 0.0}     //Cマーカ
};
```

図 3.3.3 Jマーカを基準とした8個のマーカ中心点の3次元座標値 (単位 : mm)

### 3.3.3 検証結果

3名の被験者の各位置合わせ手法における評価項目ごとの評価点平均値を表3.3.1に示す．またその関係をマーカとカメラの間の距離ごとに図3.3.5，図3.3.6に示す．仮想オブジェクトの表示画面を，各手法毎に図3.3.7，図3.3.8，図3.3.9に示す．



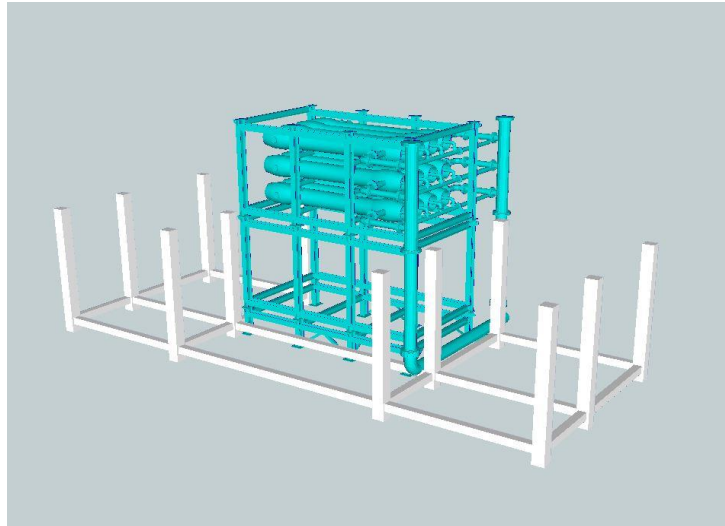


図 3.3.4 プラント周囲に表示させる仮想オブジェクト  
(薄く白い部分：表示する仮想オブジェクト，濃い色の部分：既設プラント)

表 3.3.1 各位置合わせ手法の評価項目ごとの評価得点の平均値

位置合せ 手法	評価項目	評価得点の平均値	
		マーカとカメラ間距離：6m	マーカとカメラ間距離：9m
1 個のマーカ	仮想オブジェクトの表示位置	2	1.33
	仮想オブジェクトの振動	2	1.33
	通行者によりマーカが隠れた時の 仮想オブジェクトの振動や消失	1.33	1
4 点マーカ法	仮想オブジェクトの表示位置	4	3.67
	仮想オブジェクトの振動	3.67	3.67
	通行者によりマーカが隠れた時の 仮想オブジェクトの振動や消失	2.33	1.67
複数マーカを用 いる手法	仮想オブジェクトの表示位置	4.67	4.33
	仮想オブジェクトの振動	4.67	4.33
	通行者によりマーカが隠れた時の 仮想オブジェクトの振動や消失	4.33	4.33

通行者によりマーカが隠れた際の仮想オブジェクトの振る舞いは、1 個のマーカの場合は仮想オブジェクトの位置・姿勢が大きく狂わされて表示され、4 点マーカ法の場合は仮想オブジェクトが消失したが、複数マーカを用いる手法では仮想オブジェクトの描画を安定して行えた。

本検証の結果では、開発した複数マーカを用いる手法は全ての評価項目において4点以上の高い評価を得ることができ、既存の4点マーカ法や1個のマーカを用いるよりも評価得点の平均値がどの評価項目においても高い。

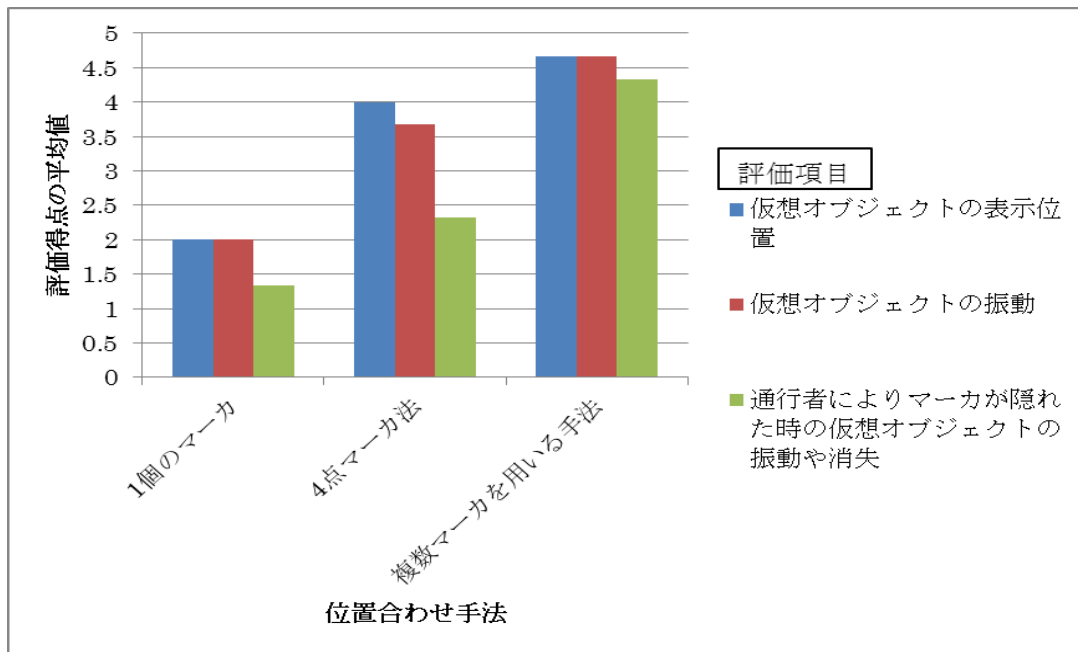


図 3.3.5 各位置合わせ手法の評価項目毎の評価得点の平均値（マーカーとカメラ間距離：6m）

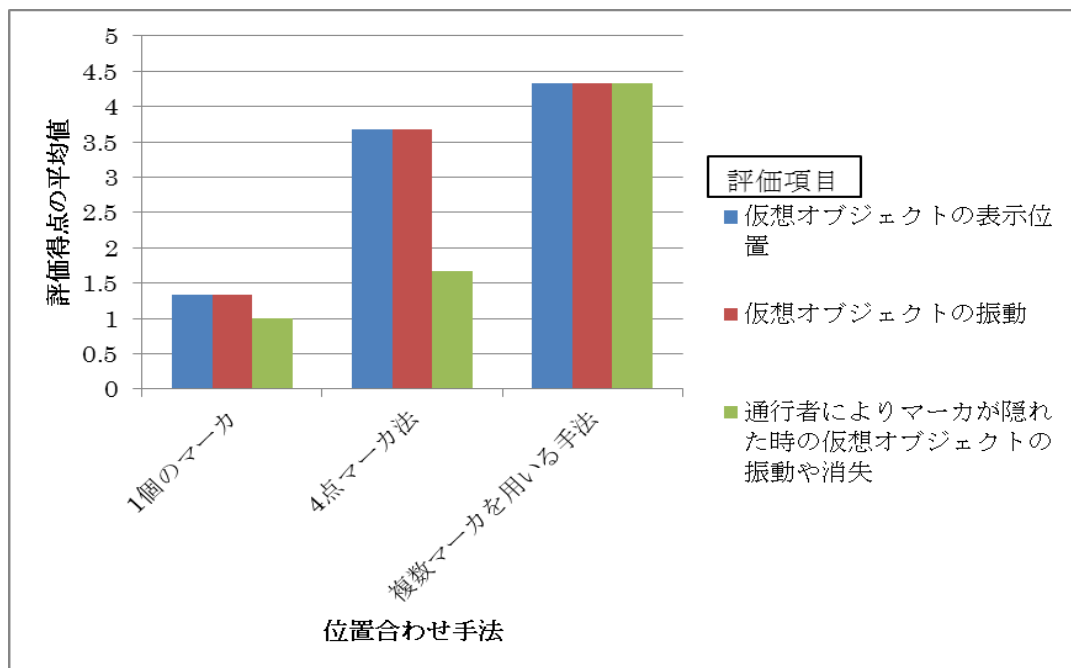


図 3.3.6 各位置合わせ手法の評価項目毎の評価得点の平均値（マーカーとカメラ間距離：9m）

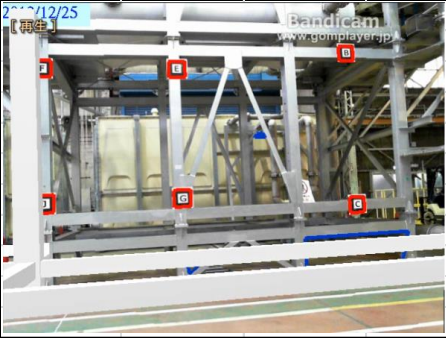
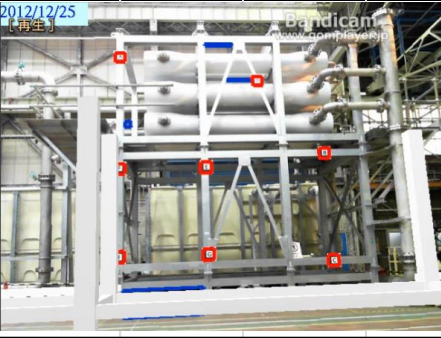

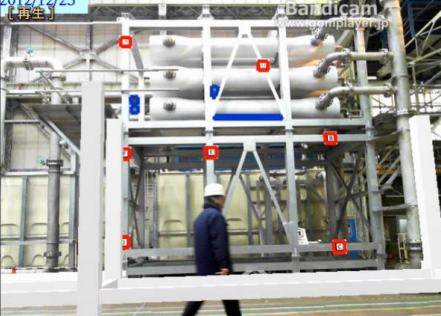
		マーカ-カメラ間距離：6m	マーカ-カメラ間距離：9m
仮想オブジェクトの表示状況	通常		
	通行者によりマーカが隠れた時		

図 3.3.7 複数マーカを用いる手法の場合の仮想オブジェクトの表示状況


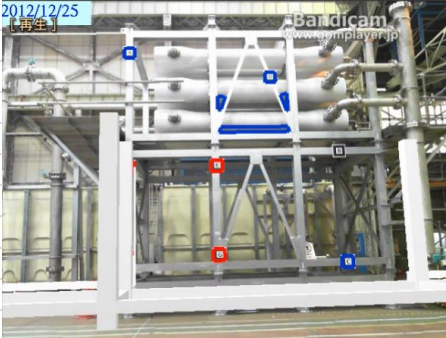

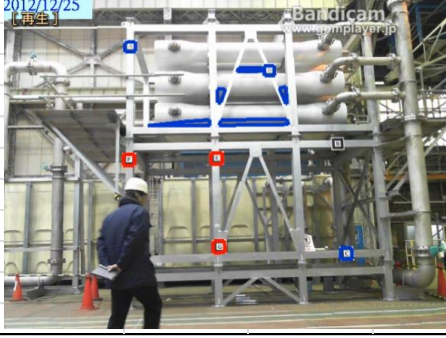
		マーカ-カメラ間距離：6m	マーカ-カメラ間距離：9m
仮想オブジェクトの表示状況	通常		
	通行者によりマーカが隠れた時		

図 3.3.8 4点マーカ法の場合の仮想オブジェクトの表示状況

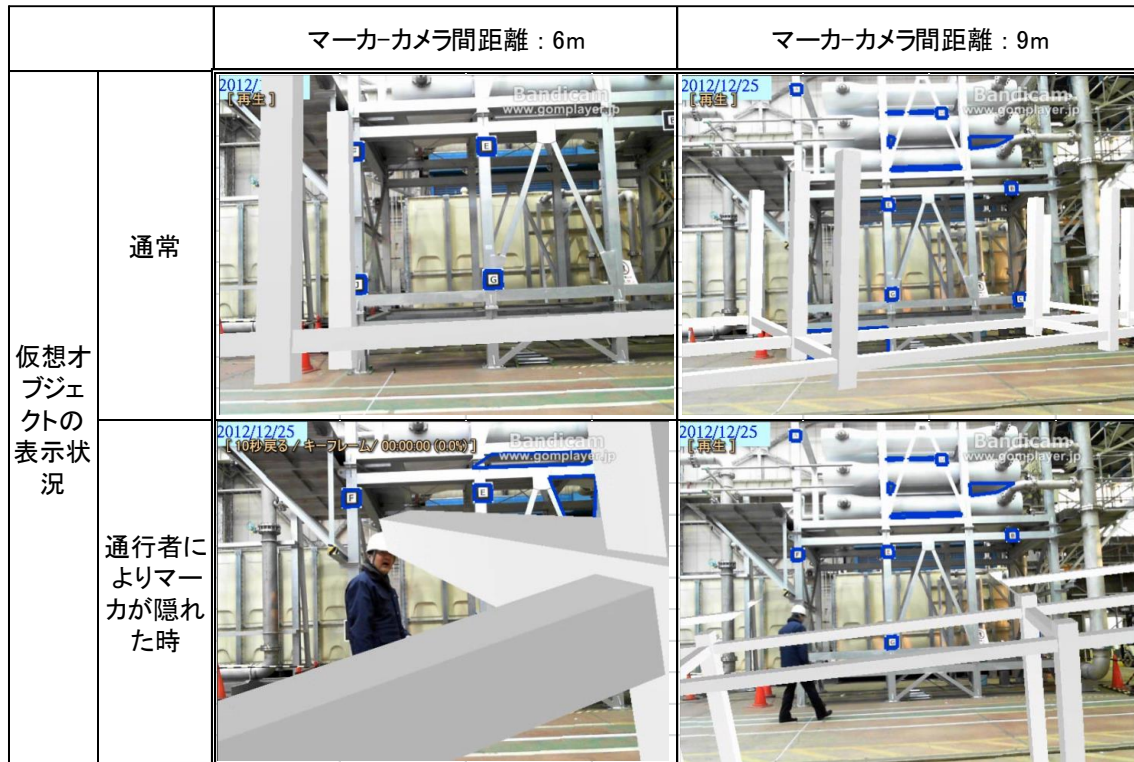


図 3.3.9 1 個のマーカーを用いた場合の仮想オブジェクトの表示状況

「仮想オブジェクトの表示位置のずれ」と「仮想オブジェクトの振動」の2項目について考察を述べる。複数マーカー用いる手法と4点マーカー法においては、マーカーとカメラの間の距離が6mの時と比較すると9mの時、若干の仮想オブジェクトの位置ずれと振動が生じるものの概ね安定した描画を行えることが視認され評価が高かった。それに対して1個のマーカーを用いた場合においては、マーカーとカメラの間の距離が6mの時でも仮想オブジェクトに位置ずれと振動が見られ、マーカーとカメラの間の距離が9mの時は振動が非常に大きく不安定な描画となり、低い評価得点となった。1個のマーカーを用いた場合においてのみ特に仮想オブジェクトの位置ずれと振動が顕著であった原因として、実験場所が薄暗い照明環境であったため、二値化の際にピクセルが誤って取捨されマーカー境界の検出が不安定になる現象が挙げられる。従来の1個のマーカーを用いた手法においては、スクリーンに占めるマーカーの大きさが小さいほどピクセル取捨の誤差の影響が大きくなり採用し難い。複数マーカーを用いる手法と4点マーカー法では、配置した個々のマーカーで直接位置・姿勢を推定するわけではなく、個々のマーカーはスクリーン上のマーカー中心点を検出するためのみ

に使用されるため、誤差の影響は比較的小さいと考えられる。また複数マーカを用いる手法では、8個のマーカが作るスクリーン上の凸多角形の面積が、4点マーカ法の4個のマーカが作るスクリーン上の四角形の面積よりも大きいため、本検証での二値化の際のピクセル取捨による誤差の影響は複数マーカを用いる手法の方が小さい。そのため、複数マーカを用いる手法の方が4点マーカ法よりも安定した仮想オブジェクトの描画を行えたと考えられる。

次に「通行者によりマーカが隠れた際の仮想オブジェクトの振動や消失」について考察する。複数マーカを用いる手法では、スクリーンに4個以上のマーカが検出されていれば位置・姿勢計算を行える。本検証において、通行者がスクリーンに映るマーカを隠した場合でも位置合わせを続行し仮想オブジェクトが描画できることを被験者と共に確認している。そのため複数マーカを用いる手法ではマーカと仮想オブジェクトの間の距離が6m、9mのどちらの場合でも高い評価を得ることができた。一方、4点マーカ法と1個のマーカを用いる方法では、カメラの位置・姿勢推定にARToolKitのアルゴリズムを利用しているため、通行者が登録したマーカを一つでも隠してしまうと位置合わせを行うことは不可能であり仮想オブジェクトが消失する。そのため4点マーカ法、1個のマーカを用いる手法のどちらも低い評価得点となった。しかし、両者とも登録したマーカが隠れると位置合わせが行えないにも関わらず、評価得点には差が見られる。4点マーカ法の評価得点の平均値がマーカとカメラの間の距離が9mの時は0.67点、6mの時は1点、1個のマーカを用いた場合の評価得点の平均値を上回っている。4点マーカ法も1個のマーカを用いた場合も、登録したマーカが隠れた時、仮想オブジェクトが消失することがプログラム上正しい挙動である。しかし通行者がマーカを遮った際、4点マーカ法では仮想オブジェクトが消失したのに対し、1個のマーカを用いた場合においてはスクリーンに映る別のマーカを誤認識し大きく位置・姿勢を狂わせた仮想オブジェクトが表示された。これは、照明環境が悪いためにパターンマッチングによるマーカ識別の精度が落ちたためである。幾何学的整合性が著しく低下した仮想オブジェクトが画面に表示され、これが仮想オブジェクトの消失よりも大きな違和感を被験者に与える

ことになり、4点マーカ法の評価得点が相対的に1個のマーカを用いた場合よりも高くなったと考えられる。

本評価により複数マーカの有効性が確認できた。しかし、本手法の特性や精度を高めるためには更なる検証が必要と考えている。具体的には、複数マーカで同時に認識するマーカの個数の影響、マーカの配置関係や分散度合いの影響、周辺環境の影響による輝度や照度の違い等についての検討があると考えている。

### 3.4 施工現場への試験的応用

#### 3.4.1 施工時の安全対策向け AR システム

建設業において安全管理は最重要項目の一つである。安全専任者は新規構造物の施工作業計画に付随した適切な安全指示書を作成し、漏れなく実行する必要があるが、作業環境が目まぐるしく変化する現場では、安全指示書と現場を見比べながら滞りなく安全対策が施されているかを確認する作業は時間的コストが大きく、見落としによるヒューマンエラーを招きやすい。そこで、本研究で開発した複数マーカを用いた位置合わせ手法の AR を応用させ、施工時の建設プロセスおよび適切な安全対策をカメラを通して得られた画像上に重畳表示することにより、作業空間の安全対策および施工プロセスを確認できるシステムを作成した（図 3.4.1）。

本システムでは、プラント模擬装置の周囲に作業用ステージを建設するという仮の計画を設定しており、作業用ステージの完成までの施工に伴い、必要な仮設足場と安全対策を表示する。仮設足場と作業用ステージの安全対策を表 3.4.1、表 3.4.2 に示す。図 3.4.2 には AR で表示する仮設足場の 3 次元モデルと施工手順及び各手順における安全対策指示例を 1 つのマーカに合せて提示した例を示す。実際にユーザがプログラムを起動しタブレット PC の内蔵カメラ等で設置したマーカと対象構造物を画面に映すと、AR 画面に工期毎の施工に伴う仮設足場や安全対策が重畳される（図 3.4.3、3.4.4）。図 3.4.3 には、施工途中における足場設定時の安全対策指示例を

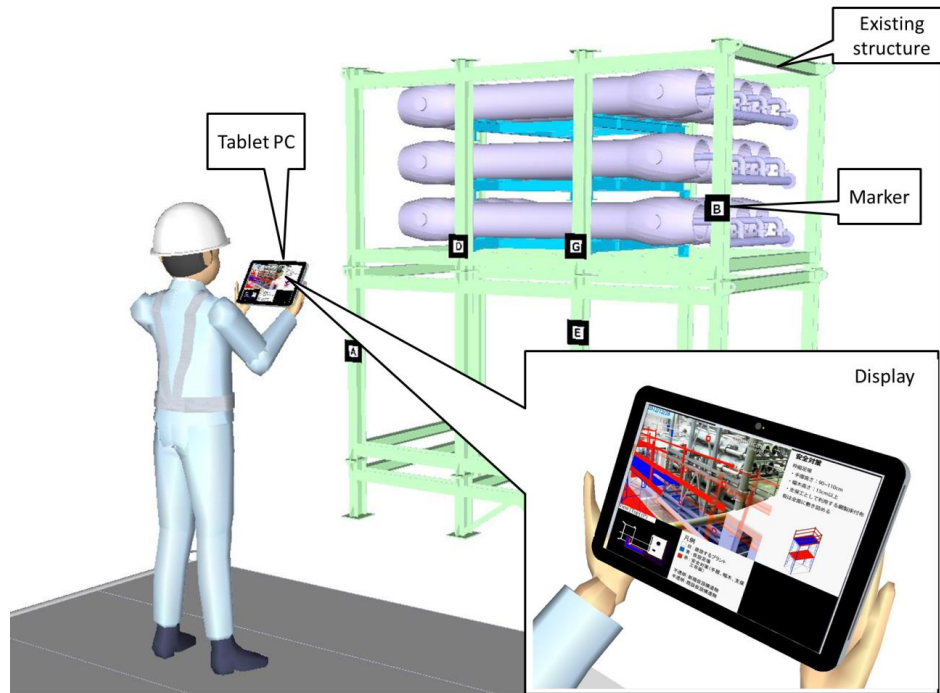


図 3.4.1 1個のマーカを用いた場合の仮想オブジェクトの表示状況

表 3.4.1 仮設足場の安全対策

適用箇所	安全対策	詳細	対象災害
作業床の周囲	手すり	高さ 90~110cm	人の墜落
作業床の周囲	幅木	高さ 15cm 以上	物の落下
支保工箇所	支保工布板	支保工箇所に全面敷き詰める	仮設足場の倒壊

表 3.4.2 建設する作業用ステージの安全対策

適用箇所		安全対策	詳細	対象災害
開口部	直径 or 一辺 1m 未満の開口部	養生用ふた	下面には滑動防止のストッパーを設置 ふたには養生用ふたである事を明記	人の墜落 物の落下
	直径 or 一辺 1m 以上の開口部	手すり	高さ 90~110cm	人の墜落
		幅木	高さ 15cm 以上	物の落下
ステージの周囲		手すり	高さ 90~110cm	人の墜落
		幅木	高さ 15cm 以上	物の落下

示し、図 3.4.4 には足場設置後に開口部の養生に関する安全対策提示例を示した。図 3.4.3 のシステム画面において①の領域が AR 画面、②の領域が工期情報、③の領域が現在の施工状況を把握するための平面図・立面図の切り替え画面、④の領域が安全対策の詳細画面、⑤の領域が AR 画面に表示される仮想オブジェクトの色分けの凡例を表している。画面に表示される仮想オブジェクトは色分けされており、白が建設するプラントの作業用ステージ、青が仮設足場、赤が安全対策を表す。また、表示する仮設足場とその安全対策において、不透明領域が新規に設置する構造物、半透明領域が既設の構造物を表す。



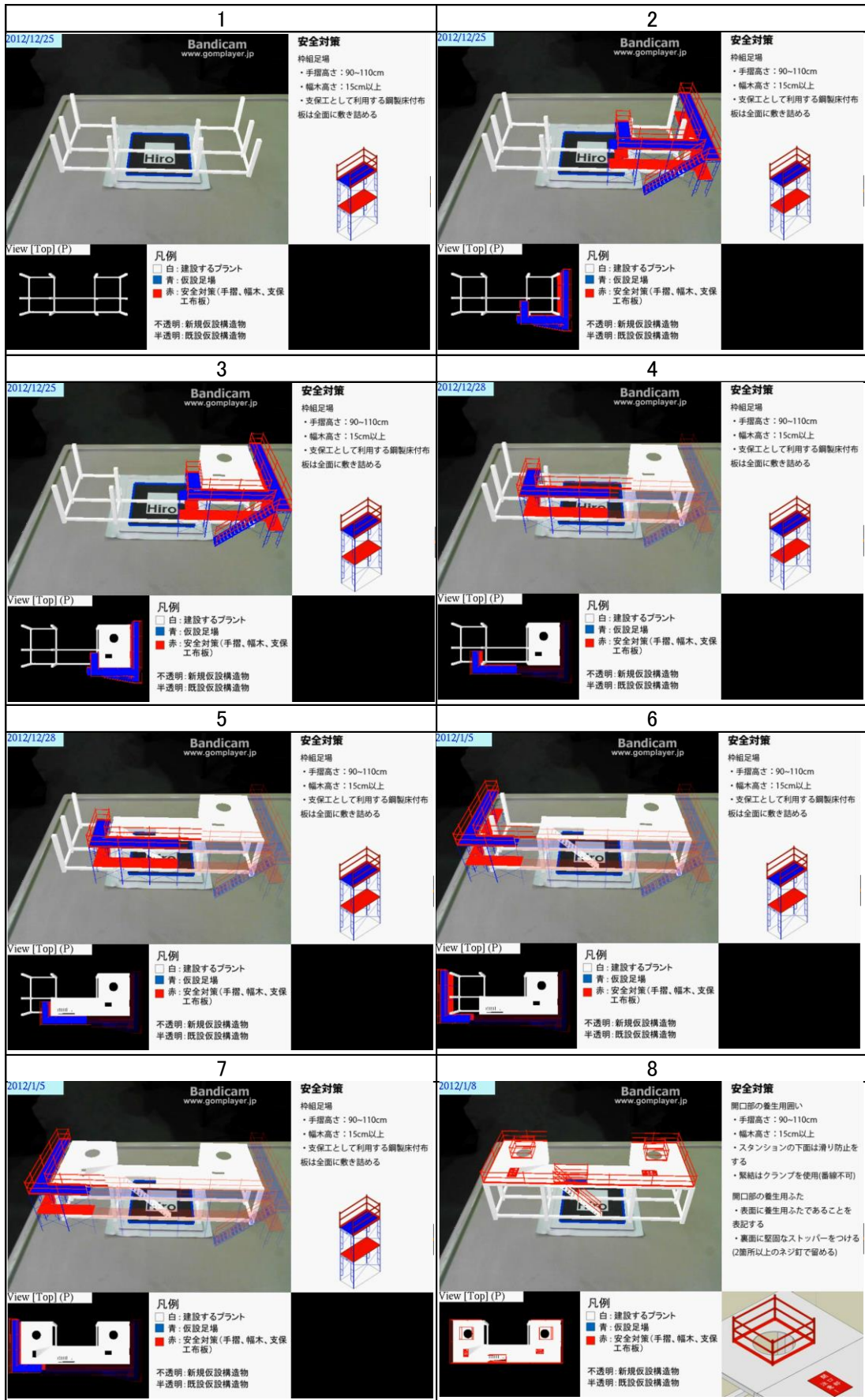


図 3.4.2 作業用建設ステージ作成手順と安全対策指示例

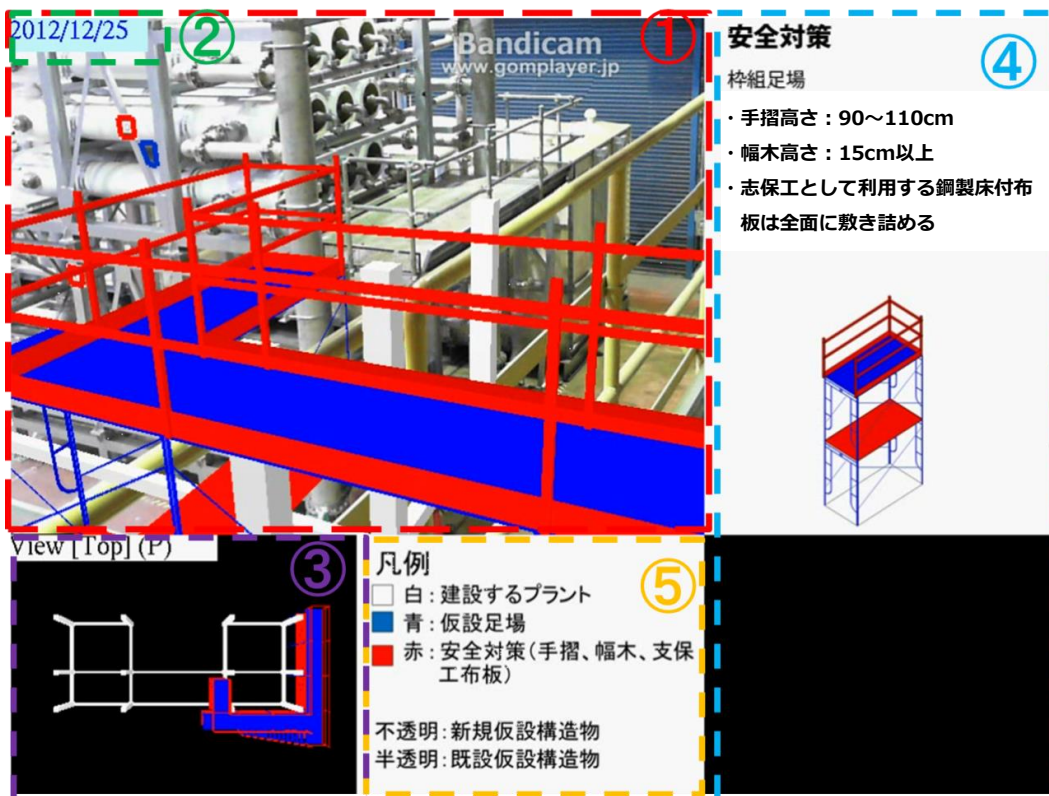


図 3.4.3 作成した AR システムの画面（足場設定時における安全対策指示例）

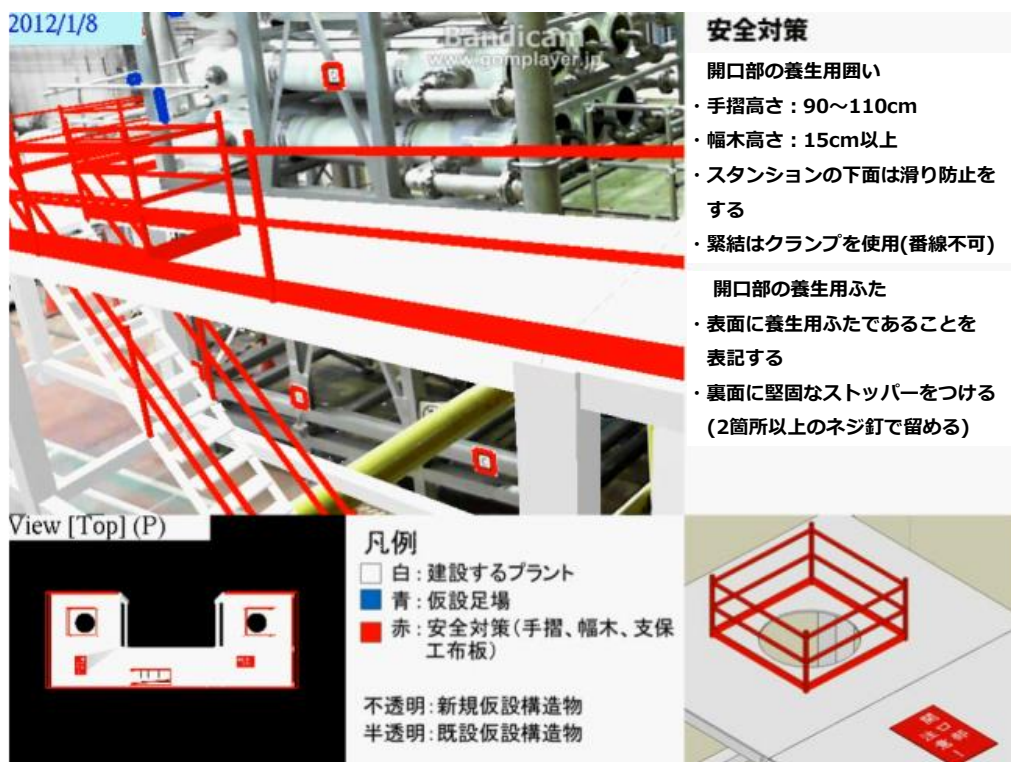


図 3.4.4 作成した AR システムの画面（開口部養生時における安全対策指示例）

### 3.4.2 システムの稼動実験と評価

本システムにより、施工前に実施すべき安全対策を実機を前にして確認する事が可能となった。そこで、プラント実務者3名に被験者になってもらい、本システムが提示する実画像に合わせて注意事項を提示する内容や実画像に足場などの仮想情報が重畳して表示される事の有効性、現場で運用する際の課題等について意見をヒアリングするという方法で確認した。表3.4.3に被験者の属性について記し、表3.4.4に被験者から得た主なコメントを記す。被験者1、被験者3からのコメントにあるように、データやシステムを作りこめばより実用的なシステムとなるとの意見を得られ、工程情報や進捗情報等と合せてAR表示する事でより実用性が高まるとのアイデアを得た。また、被験者2からは、建設作業現場に本研究で開発した位置合わせ手法を導入する上での課題についてのコメントを得た。本研究で開発した位置合わせ手法は同一平面上であれば任意の位置にマーカを設置することが可能であり、既存の4点マーカ法等と比較するとマーカ設置場所の制約が低減されている。しかし、任意位置であっても、同一平面上の広い範囲にマーカを設

表 3.4.3 被験者属性

項目	年齢（年代）	職種	現場経験年数
被験者1	30代	施工関連技術者	5年
被験者2	40代	施工関連技術者	10年
被験者3	50代	現場監督経験者	20年

表 3.4.4 各被験者の主なコメント

被験者1	実際の工程情報（計画と実績）とリンクさせて、任意のパーツや進捗情報等がAR表示されるとより実用的である。
被験者2	建設時には、マーカ設置が段取り作業として必要になるため、これらの作業を如何に効率化するかが実用化には重要である。
被験者3	基本コンセプトは良い。今後の細やかなデータの作り込みに期待する。

置することはやはり時間と労力のかかる作業であった。複数のマーカが同一平面上になくとも位置合わせを行うことを可能にすることも今後検討して行きたい。

また、今回のように施工前の安全対策として構造物全体に対して俯瞰して計画をする場合には複数のマーカを今回の実験で比較したように 6m 以上離れて利用することで有効に AR を利用できるが、作業の内容によってはもっと近づいた状態での指示が有効な場合もあると考える。その場合は、より小さなマーカで同様の位置合わせが出来る事が望ましい。施工の場合は全体を広く俯瞰して検討する事と、もう少し範囲が限定された作業領域において作業指示を出したり、注意事項等が表示される事が有効になる。これらをシームレスに連携させる方法も今後の課題である。

### 3.5 まとめ

本章では、土木・建設分野等の大規模構造物への AR 適用を目的に、複数の人工マーカを利用した位置合わせ手法を開発した。建設作業現場は作業員や資材の往来が非常に多く、また施工中は周辺環境が目まぐるしく変化する。このような環境下で複数マーカを用いた手法の有効性の検証を行い、以下の結論を得た。

4点マーカ法では、4個のマーカを全て検出する必要があるため、人や物の往来の激しい場所では安定した仮想オブジェクトの描画が行えない。特徴点と既知の構造物の点を一致させる手法では、複数画像間の特徴点を対応付けることが困難であり、人や物の往来によりトラッキングに大きな乱れが生じる可能性が高い。これらに比べ、複数マーカを用いた本手法は、4点以上のマーカがスクリーン上で認識されていれば、作業員や資材の往来によりマーカの幾つかは隠れても安定して位置合わせを続行することができた。本手法は、プラント実務者による印象評価においても従来法に比較して高い評価結果が得られた。今後は本手法の特性やより精度を高めるためのマーカの個数や配置、周辺環境の影響等についても検証を進めたいと考える。

施工現場への試験的応用として、プラント建設時の足場設置等の安全対策を AR を用いて可視化するシステムを構築して評価し、以下の結論を得た。

施工時における最重要管理項目である安全については、確実に実行すべき事が多々あるが、作業環境が日々、変化する現場では、足場等の安全対策を滞りなく確認する事に多大な労力を要し、見落としによるヒューマンエラーが生じる可能性がある。本研究で作成したシステムを携帯性に優れたタブレット端末に実装すれば、作業前や作業中、作業後に、タブレット端末のカメラ映像に規定された安全対策を重畳表示させる事が出来ると考えられる。プラント模擬装置を用いた仮の作業を想定し、安全対策を可視化した結果、実務者の被験者からはデータやシステムを作り込めば、より実用的なシステムとなるとの意見を得られた。

施工現場での実運用を想定した場合、本手法で用いるマーカの設置は、任意位置であっても、同一平面上の広い範囲に多数設置する必要がある、これらの段取りを如何に効率化するか、また構造物全体を広く捉えて検討する方法と作業範囲を限定し、より詳細な作業指示等を提示するためのARの方法とのシームレスな連携も実用化に向けた課題である。

## 参考文献

- 1) 廣瀬亮, 斉藤英雄: 頂点追跡に基づく AR のためのマーカレス位置合わせ手法, 情報処理学会研究報告, No.2005-CVIM-150, pp.103-110, 2005
- 2) Jiang, B., Neumann, U. : Extendible Tracking by Line Auto-Calibration, IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, pp.97-103, 2001
- 3) Ota, N., Yabuki, N. and Fukuda, T. : Development of an accurate positioning method for augmented reality using multiple markers, Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, pp.4-7, 2010
- 4) OpenCV<<http://opencv.jp/>>, (入手 2013.1.10)
- 5) OpenGL<<http://www.opengl.org/>>, (入手 2013.1.10)

## 第4章 画像特徴点を利用した拡張現実感技術のプラント運転作業支援への応用

### 4.1 概要

本章では、プラント運転時におけるヒューマンエラーの防止を目的に、画像特徴点を利用した拡張現実感技術を用いたプラント運転支援システムについて記し、浄水場の運転業務への適用と共に開発システムの有効性評価を行った結果について述べる。まず、4.2 でプラント運転作業支援の方法について述べ、4.3 では画像特徴点を利用した位置合わせ手法について記述する。4.4 では画像特徴点を利用した AR 応用プラント運転支援システムについて述べ、4.5 で本システムの有効性を評価した結果について記述する。

### 4.2 プラント運転作業支援

プラント施工時やオペレーション時の事故防止やヒューマンエラーの防止は、近年の熟練技術者の減少と共に重要な問題として認識されている<sup>1)</sup>。これらの課題に対し、拡張現実感 (AR) 技術の活用が試みられている<sup>2)3)4)</sup>。具体的にはプラントの施工時や運転時に作業者を支援する手段として、現実空間内の適切な場所に適切なタイミングで作業指示や作業手順等のデジタル情報を重畳させる事を検討している。産業向けの実用化システムとしては溶接支援<sup>5)</sup>やカメラ画像と3次元CADモデルを重畳表示するシステム<sup>6)</sup>等がある。

一方、小松原<sup>7)</sup>によればヒューマンエラーの要因には取り違いや思い違いなどの判断の錯誤や記憶の失念、知識不足、手抜きなどが挙げられている。これらの要因の一部は作業実施の前や後、もしくは作業実施の瞬間に必要な情報が不足する事に起因する部分があると述べられている。AR技術により作業に必要となる情報を順次補足する事は、人間の思考に働きかける事になり、適切な場所と適切なタイミングで情報提供する事が出来れば様々な気づきを与える事が可能となる。人間が自分の意思でマニュアルを参照する以上の効果が得られ、ヒューマンエラーの発生要因の一部を排除できる可能性があると考えられる。

## (1) ARを応用するプラント運転作業の範囲

図4.2.1にプラント運転作業支援にARを応用した状況を模式的に示す。本研究ではプラント運転作業の中でもAR 技術を応用する場所は中央制御室での運転ではなく、実際の機械を前にした運転や点検業務とした。具体的な操作や点検の内容は指定のメータを読み取ったり、バルブを開閉したり、スイッチを入れたり、レバーを操作したりという人間が中心に行う作業を対象としている。

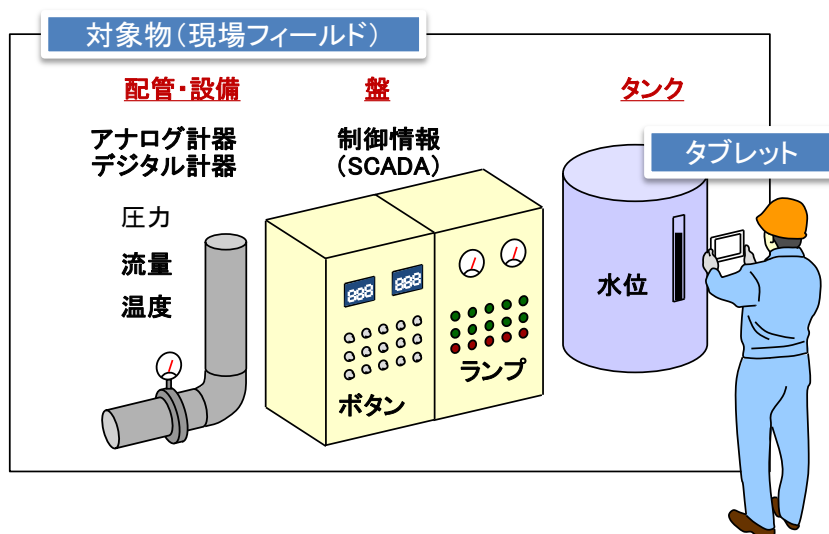


図 4.2.1 プラント運転作業支援概要

## (2) ARシステムが具備すべき条件

本研究では、コンピュータが上述したメータ、バルブ、レバーやスイッチ等の位置を認識し、その上に適正な順番や作業内容等の情報が作業者に分かるように重畳表示させる事とした。また、現場での作業を想定した場合、両手が自由になる HMD (Head Mounted Display) の使用も考えられるが、現時点でのシステムの普及レベルや点検業務には点検結果の入力手段も兼ねることから、本研究ではタブレット端末を採用する事とした。

## 4.3 画像特徴点を利用した位置合せ手法

### 4.3.1 マーカレストラッキング手法



AR技術では、カメラによって現実世界を撮影した画像上の適切な位置にデジタル情報を付加するため、カメラの位置と姿勢を推定する技術（トラッキング技術）が重要となる<sup>8)</sup>。プラントのオペレーション段階では、周辺環境の変化は施工時に比べて少なく、また、人の往来も少ないことから、我々は画像特徴点を用いる手法の適用性が高いと考え、ここではプラント運転作業を対象に、マーカレス位置合わせ手法<sup>9)</sup>の一つである画像特徴点を利用したAR手法による支援システムを開発し、その実用化を目指す事とした。しかし、実際には後述するトラッキング時間の削減の為に必要最低限のマーカを利用するシステムとした。

多くのARシステムは3次元空間を対象としている。これは、カメラの位置が様々な視点に移動するためである。しかし、設備の点検や運転作業の位置は操作性やメータの視認性等から操作位置は毎回同じような場所となる。複数の操作が様々な位置を変えて実施されるが、ある作業単位で考えるとバルブを開ける、メータを読む等の一連の操作を固定の位置から確認して操作する事が多いと考えられる。そこで本研究では、はじめに操作位置を固定する事によって、作業領域や作業範囲を固定し、その作業範囲を近似的に平面とみなして処理する事とした。作業範囲を平面で捕らえる事から、ARを実現するためのトラッキング手法には2次元の平面画像を利用している。

本研究で使用するトラッキング技術は、佐川<sup>10)</sup>らと協力し、比較的高速処理が可能なLucas-Kanade (LK) 法<sup>11)</sup>を採用した。LK法はトラッキング対象となるテンプレート画像を用いて、その特徴点を抽出して画像の移動を追跡する技術である。トラッキング対象のテンプレート画像上の位置 $p = (x,y)^t$ における画素値を $T(p)$ 、カメラから入力された画像上の座標 $p$ における画素値を $I(p)$ とした場合、式(1)に示す評価関数 $J$ を最小化する最適化問題を解くことにより、テンプレート画像とカメラ画像の対応関係を表す変換関数（ワーブ関数） $W(p;H)$ を求める手法である。

$$J = \min_H \sum_p |I(W(p;H)) - T(p)|^2 \quad (1)$$

式(1)におけるワープ関数  $W(p; H)$  は、座標  $p$  とベクトル  $H$  をパラメータとする関数であり、テンプレート画像上の任意の位置  $p$  をカメラ画像上の対応する位置  $W(p; H)$  に変換する関数となる。本関数を利用する事でテンプレート画像上の物体を追跡する事が可能となる。

具体的には設備の運転や点検を行う際の作業位置から撮影した作業領域の画像をテンプレート画像として用意する。複数個所に移動して作業を行う場合には、複数のテンプレート画像を準備する。次に各テンプレート画像上に写っているバルブやメータ等の操作対象の位置と大きさを登録する。次にカメラの付いたタブレット端末を作業位置（テンプレート画像を取得した位置に近い所）にてかざす事で、上記トラッキング技術によってカメラ画像上の操作位置を追跡する事ができる。

図4.3.1に設備を模擬した装置のテンプレート画像及びタブレット端末のカメラで捉えた設備の状況を示す。本図に示すように、操作の対象物（図中丸印で示した範囲）をテンプレート画像と比較して検知する事になるが、現実には、このような設備で作業する場合、作業領域全体を平面としてトラッキングを行うと追跡精度が落ちる事が確認できた。これは、幾つかの操作対象は3次元的な奥行きを持っているため、図4.3.1中の四角の破線枠内に示すように、ある角度から見ると操作対象とフレームが接してしまったり、背景が大きく異なってしまったり、比較

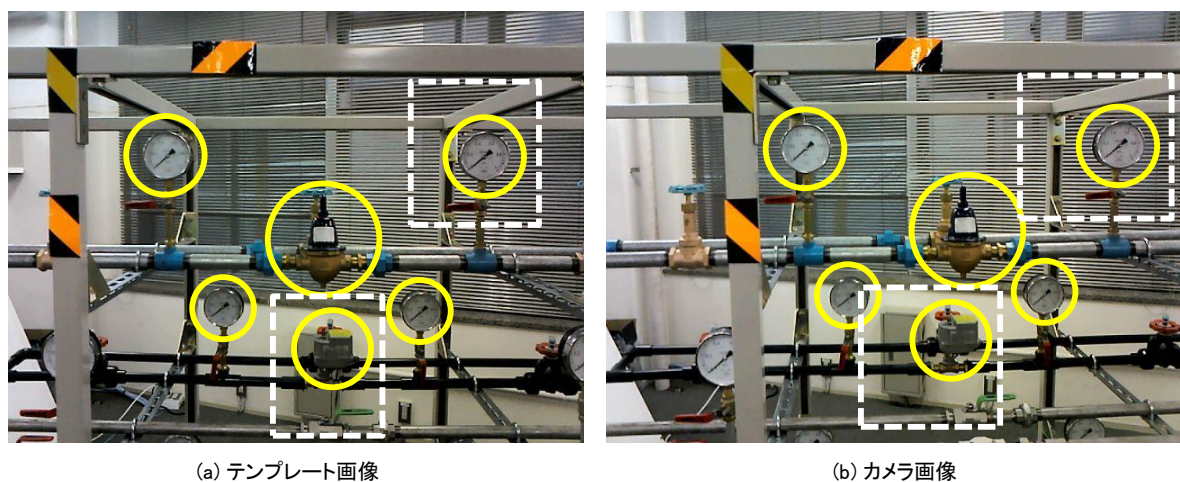


図 4.3.1 テンプレート画像とタブレットカメラの画像

的小さい移動でもカメラのずれに対する影響が出てしまう事がわかった。なお、図4.3.1中の左端に見えるメータやバルブも明らかに見え方が違っているが、こちらのメータやバルブは作業範囲外の対象物であり、操作をする場合には別なテンプレート画像で処理する位置となっている。

このようなカメラ撮影画像のずれの問題に対応するために、テンプレート画像上に設定した操作対象の位置に基づいて、その枠内の画像のみ（図4.3.1中の丸枠）を切り出し、この切り出した画像をトラッキング用のテンプレート画像とした。指針の向き等、わずかに違いはあるが、全体画像をテンプレートにする方法に比べ、多少の3次元的な奥行きのある対象物に対しても操作位置をトラッキングする事が可能となった。

当初、マーカレスを目指していたが、マーカレスでは初期位置を指定しないとトラッキングに数分の時間が掛かってしまう事が判り、実用化を目指すために、本研究では運転に影響しない範囲で必要最低限のマーカを利用する事とし、作業の認識範囲（それぞれのテンプレートを持つ）毎に1つマーカを設置し、それぞれのマーカを利用してカメラ画像の初期位置を指定してトラッキング処理を行う手法とした。

## 4.4 AR 応用プラント運転支援システム

### 4.4.1 システム概要

前述したトラッキング手法を用い設備の操作・点検を支援する方法を検討した。図4.4.1に本ARシステムの実施フローを示す。まず、図4.4.1(a)にテンプレートの設定フローを示す。作業実施位置を指定し、それぞれの場所での背景画像を取得する。この背景画像上に操作対象となる対象物を丸印で登録し、この丸印内の特徴点とマーカからの位置をテンプレート画像として記憶する。作業を行う際に作業場所が幾つかにまたがる場合、図4.4.1(a)のフローにて作業場所毎に別のテンプレート画像を用意し、その上の操作対象を定義する。次に図4.4.1(b)には作業を実施する際の対象物の認識フローを示す。作業者はタブレット端末の背面にあるカメラを用いてターゲット位置を合わせると前述したトラッキング技術にて初期位置を認識してそれぞれの対

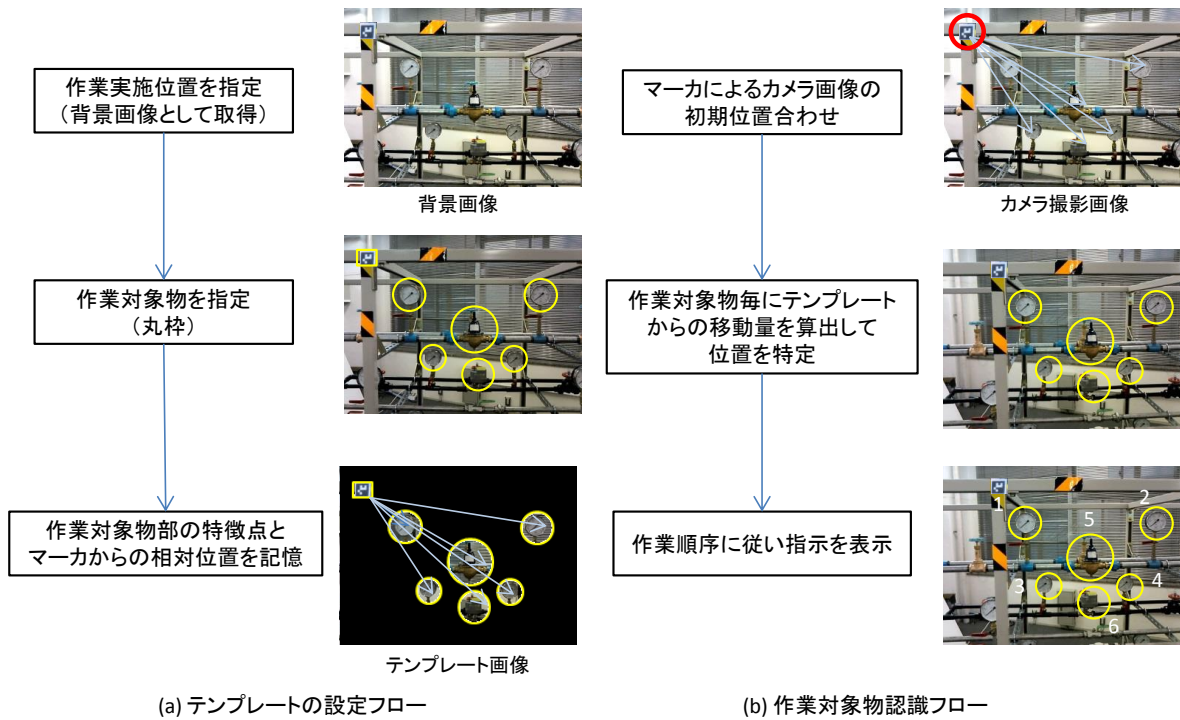


図 4.4.1 AR システム実施フロー

象物を認識する。最後に作業の順番に従って、それぞれの操作対象物に関連した情報を重畳表示させる。

図4.4.2にはシステムを利用している状況を示す。あらかじめ指定した作業順序に従い、操作対象物が明確化され、画面左上には操作内容や操作時の注意事項等、任意のテキスト文を登録でき、作業の意味や振動や音を確認する等の指示を出す事ができる。作業実施後にはOKボタンを押す事で次の操作対象に指示が変化する。これらを一連の作業手順で指示を出す事で、操作ミスを起こさないように支援する。

また、本システムでは一連の作業を実施する際に、操作対象の画像が確認時に保存されるようにし、保存した画像は図 4.4.3 に示すような点検結果報告書として一覧表示及びテキストデータとして出力する事を可能とした。本一覧から操作の順番に誤りが無いか、入力誤りが無いか等の確認ができる。



図 4.4.2 設備運転支援システムの利用状況

### 点検結果報告書

作業手順	確認対象	確認結果	確認時刻	写真
バルブ切替操作1 注意事項	コズノト1_1	OK	20140107 133710	
メータ確認手順1	メータ1_1	0.23	20140107 133728	
メータ確認手順2	メータ2_1	0	20140107 133737	
バルブ切替手順1	mV4/バルブ(開)_1	OK	20140107 133756	
バルブ切替手順2	mV3/バルブ_1	OK	20140107 133819	
冷却水確認手順2	冷却水バルブ2(開)_1	OK	20140107 133830	

図 4.4.3 AR システム実施フロー

## 4.4.2 実務適用に向けた高速処理方法の検討

### (1) 適用対象

本システムを適用する対象作業はプラント操業時の重要な設備ラインの切り替え業務とした。重要機器類は複数台設置されている事が多く、これらを定期的に切り替えて利用する。このような設備は多くのプラントに存在している。また、切り替え作業は週単位や月単位、または緊急時に実施される作業であり、重要な作業でありながら、毎日のルーチンワークでは無いため、その実施間隔が広いほど、作業手順の忘れや操作ミス等を発生しやすいと考える。

実際の浄水場の現場にて月に1回程度の発生頻度で、かつ操作ミスが事業の損失に繋がるような重要作業となる薬品ポンプの切り替え作業を対象に本システムの有効性を評価する事とした。図 4.4.4 に、本ポンプ切り替えで操作を行う操作盤と薬品注入ポンプ全体写真を示す。薬品注入ポンプは設備の延命化や故障時などに対応できるよう1系および2系の同一ポンプが2つあり、毎月の月初めに切替を行う。操作盤では、ポンプの電源のON/OFFを行い、ポンプ側では水を流すためのバルブの開閉作業を行う。また、本作業は月に1度の作業であるが複数人の作業者が適宜行っているため、作業者によっては半年に1回のペースになる事もある。本作業による操作ミスは、配管内に薬品が残って凝固してしまい、ポンプの故障等につながる事がある。そのため、未習熟によって引き起こるヒューマンエラーが懸念されていた。

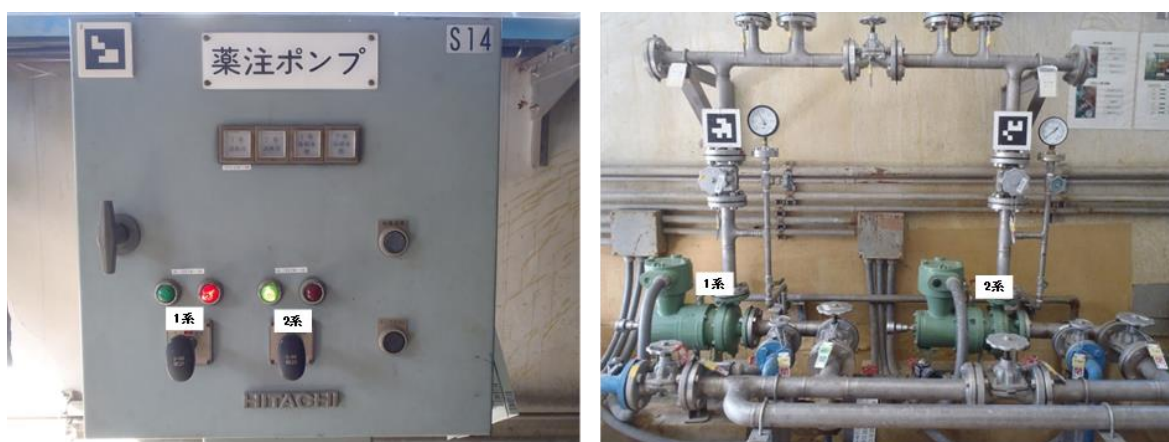


図 4.4.4 AR システム実施フロー

## (2) システム改良

本システムを実現場にて実際に実務者に操作してもらいながら問題点や要望を抽出し、改良を加える事で実務で活用できるシステムを目指した。抽出した問題点は主に操作性に関わるものとして、トラッキング方法と操作手順の表示方法、その他幾つかの機能追加の要望が挙げられた。以下、それぞれについて改良した内容を示す。

### 1) トラッキング方法の改良

最も問題となったのがトラッキングに掛かる時間であった。そこで、トラッキング時間を短縮するための改良を行った。特に、影響していたのはテンプレート画像とカメラ画像の初期位置を合わせる時間であった。これに対応するため、作業者が自分の意思でカメラ位置をセットしやすいように設備側のマーカ位置に目印を表示し、そこにカメラ位置を合わせる方法とした。ARマーカをIDとしてテンプレート画像の呼び出しとARマーカを目印として作業者が意識してテンプレート画像の位置合わせを行う事で画像の初期位置を高速で与えられるようになった(図4.4.5)。しかし、一度位置合わせをしても、バルブ操作等の実操作を行う際には、タブレットを離して操作を行う為、次の作業を確認する為に、その都度タブレットカメラでARマーカを捕らえて再認識するという行為が必要になってしまう。また、カメラ画像が手振れによってぶれてしまい、一度認識しても再認識が必要になる事も発生し、実務で利用するには毎回位置合わせをする手間が煩わしいという問題が発生した。

これに対応するため、本研究ではテンプレート画像を認識し、操作位置のトラッキングが出来た時点でカメラ画像を静止画としてキャプチャし、その画像上に操作手順に関連する各ステップ毎の作業情報を順番に重畳表示する事とした。元々、あるひとまとまりの作業毎にテンプレート画像を設定しているので、各ステップの中でバルブやメータ等の個々の作業でのトラッキングは不要となりカメラ位置合わせ時間の短縮が図れた。



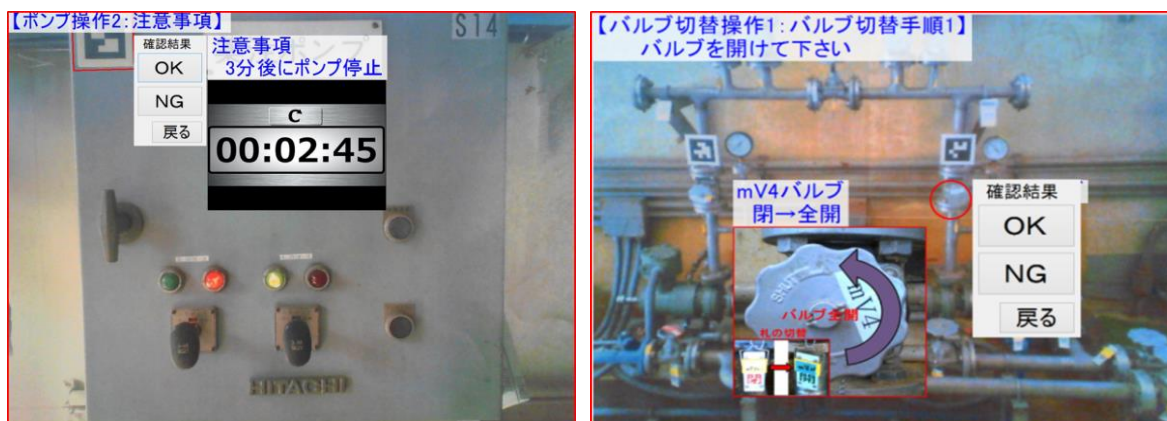
図 4.4.5 AR マーカによる初期位置合わせ

また、トラッキングを正しく行うためにはテンプレート画像と実機の差異が少ない事が必要であり、マーカや画像特徴点に利用しているメータやバルブの汚れ等についても定期的なメンテナンスが必要と考える。

## 2) 操作手順の表示方法の改善

操作手順の表示に関して作業手順や注意事項を単なるテキスト表示だけでなく、バルブの開閉方向や注意事項を写真や動画にて表示できるようにした。図 4.4.6 にはバルブ操作方法をビジュアル化して重畳表示させた例を示す。作業の中にはバルブを回して一定時間放水する等の手順もあるが、これには図 4.4.6 (a) に示すように指定された時間をカウントするタイマーの動画を表示し、動画が終わるまで放水するような指示が出来るようにした。図 4.4.6 (b) の例では作業者が指示された操作対象(バルブ)を AR システムの画面上で選択すると、バルブの画像を拡大表示すると共に、バルブの操作方向(矢印)をビジュアルに提示できるようにした。





(a) タイマー動画表示例

(b) バルブ操作方法のビジュアル化例

図 4.4.6 AR システム実施フロー

### 3) その他の追加機能

作業者からは作業がどこまで進んだかを確認できるようにしたいとの要望があった。これに対し、本システムは図 4.4.3 に示した点検結果報告書が作業が完了した場所までデータが入るようにしており、この報告書を表示する画面を確認する事で作業がどこまで進んだかを認識できるようにした。また、一連の操作を行った時刻が都度記録されているため、時刻データを利用すれば、作業時間の確認が可能となる。図 4.4.7 に AR システムを利用した数名の実務者のポンプ切替操作時間の分析例を示す。本システムを利用しないで作業を行った場合の時間を経験者にヒアリングした所、操作を記憶していれば 5 分程度、紙のマニュアルを参照しながらであれば 8 分程度という事であった。図 4.4.7 に示す結果には、それぞれの時間が作業そのものの時間だけでなく、AR システムの操作への慣れの時間等も含まれているが、これらを継続して取得する事でシステムへの習熟度を確認したり、どの作業で手間が掛かっているか、また、どのような作業で熟練者との操作時間に差が生じるか等の比較も可能になり、本システムがヒューマンエラーの削減と共に作業分析への応用も可能になると考えている。

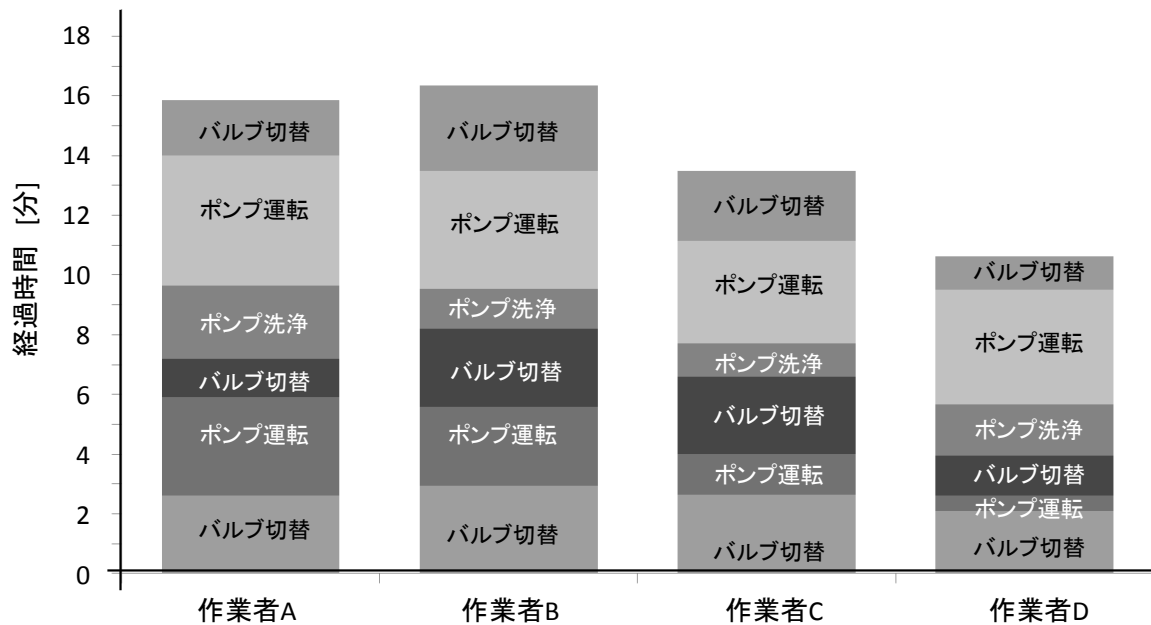


図 4.4.7 ポンプ切替操作時間の分析例

## 4.5 システムの有効性評価

### 4.5.1 検証方法

本研究では、これまでの改良を踏まえて、実際の浄水場で設備の運転・保守作業に携わる実務者9名による検証を行った。検証方法はAR応用設備運転支援システムを利用して実施した運転作業に対して、それぞれの被験者が「ヒューマンエラー防止」「作業の習熟支援」「作業の改善」「作業品質の向上」「作業効率の向上」の5項目に対し、AR応用設備運転支援システムが貢献していると感じるか、貢献できる可能性があるかという観点で5段階のアンケート評価を行った。表4.5.1にアンケートを実施した実務者情報を示す。年齢は30代～60代、役職には設備の運転員か現場の責任者かを示す。現場経験年数は1.5年から40年と大きな幅があった。また、それぞれの個人的な見解となるが本人のITリテラシーについても自己評価を記入してもらった。まずは業務に携わる様々な条件の人にARシステムにどれだけの可能性があるかを評価頂いた。またアンケート結果の背景が分かるように、どうしてそのような結果としたかヒアリングも行い、被験者の意見を吸い上げる事とした。

表 4.5.1 アンケートを実施した実務者情報

実務者情報	A	B	C	D	E	F	G	H	I
年齢(年代)	30代	30代	40代	40代	50代	50代	50代	60代	60代
職種	運転員	責任者	運転員	運転員	運転員	運転員	運転員	運転員	責任者
現場経験年数	7年	14年	2.5年	25年	1.5年	2.5年	10年	9年	40年
ITリテラシー (本人主観)	低い	低い	低い	低い	高い	高い	低い	低い	低い

表4.5.2には評価項目とアンケートの内容を示す。被験者には各項目について貢献度が大変高い・大変有効であるを5点、貢献度が高い・有効であるを4点、現状と変わらないを3点、現状より貢献度が低い・有効でないを2点、現状より貢献度が大変低い・大変有効でないの1点までの5段階で評価を行った。本研究では現状と変わらないとなる中間点の3点よりも被験者9人の平均点が高ければ、少なくとも本システムは従来に比べて各評価項目に貢献している、有効であると判断する事とした。

表 4.5.2 アンケートによる評価項目

評価項目	質問内容	評価*
ヒューマンエラー防止	本システムは操作ミスを防ぐのに有効だと思いますか？	1 2 3 4 5
作業の習熟支援	本システムは操作手順を覚えるのに有効だと思いますか？	1 2 3 4 5
作業の改善	作業結果を活用する事で作業改善に繋がると思いますか？	1 2 3 4 5
作業品質の向上	作業結果として画像と時間が記録される事で作業品質が向上されると思いますか？	1 2 3 4 5
作業効率の向上	本システムを利用する事で作業のスピードが速くなる(効率が良くなる)と思いますか？	1 2 3 4 5

\*評価 1: 現状の方法より貢献度は大変低い・大変有効ではない

評価 2: 現状の方法より貢献度は低い・有効ではない

評価 3: 現状の方法と同等

評価 4: 現状の方法より貢献度は高い・有効である

評価 5: 現状の方法より貢献度は大変高い・大変有効である

#### 4.5.2 評価結果

図 4.5.1 にアンケート評価結果を示す。5 項目の内 4 項目については 3 点以上の評価結果が得られた。特に「ヒューマンエラーの防止」については平均点が 4 点以上と最も高く、本研究で開発した AR システムがヒューマンエラー防止には有効である事がわかった。しかし「作業の効率」については平均 2.6 点となった。やはり、全ての操作手順をタブレットを利用して適宜確認するという事で、確認時間が増える分、作業効率の面では従来よりも時間が掛かるとの評価であった。

表 4.5.1 にアンケートと共にヒアリングした主なコメントを提示する。

本システムは、今回対象とした作業のように作業ミスが重大な事故や損失に繋がるような作業を行う際には「ヒューマンエラー防止」に貢献できるという点では有効であったと考える。また、実務利用者からは継続して活用したいとの評価を得られると共に、作業指示の工夫や熟練技術者との作業時間のベンチマーク等により、更なる有効活用の可能性があるとの前向きな意見も得られた。一方でシステムの機能不足やコンテンツの不備が原因で高得点を得られなかった項目があったと考える。

「作業の習熟支援」に関しては AR による作業指示に頼ってしまい、操作の意味を考えなくなってしまう事への懸念が述べられた。これには突発的な処理に対して応用が利かなくなる等の問

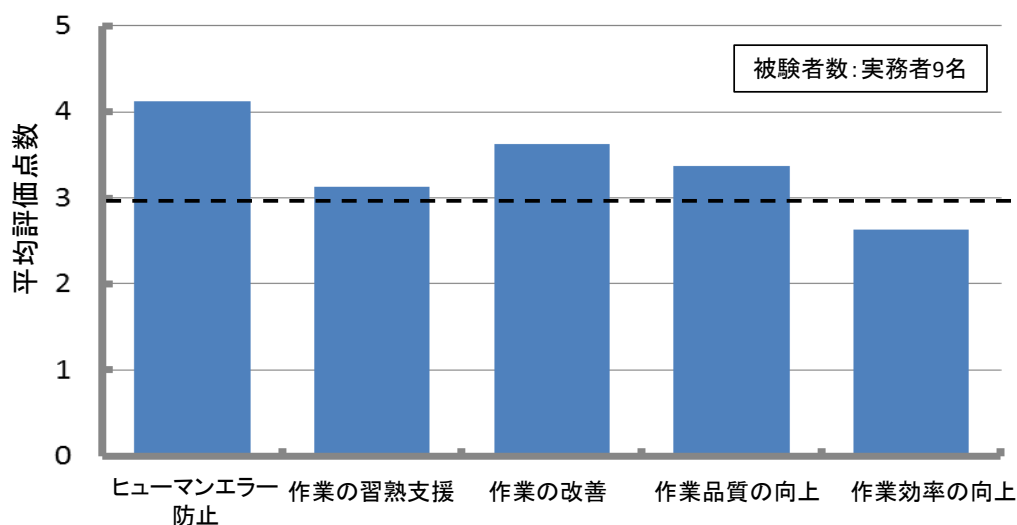


図 4.5.1 アンケート評価結果

表 4.5.1 主なコメント

評価項目	主なコメント
ヒューマンエラー防止	既に理解している作業でも手順が確認できるため良い。 事前確認も出来るため操作を間違えない。 従来よりも確実性が増す。 1人で作業をする場合心強い。
作業の習熟支援	画面を見て自分の考えを確認できるところが良い。 操作画像が理解を助け、初心者には特に有効。 機械的に操作を覚えてしまうと <b>応用が利かなくなる</b> 心配がある。
作業の改善	作業毎の時間がわかるため、自分がどこで躓いているか考えるきっかけとなる。 熟練技術者とのベンチマークがあると良い。
作業品質の向上	写真や作業時刻が記録されるのは良い。 端末を利用した記録にはなるが <b>確実に操作を行ったかまでは証明できない</b> 。
作業効率の向上	<b>最初のマーカ位置合わせがまだ遅い</b> 次の作業を考えながら、端末の指示を確認できるのは良い。

題が提議されており再考の余地がある。このような突発事項に対する応用力を育成するためには作業員の教育という観点でのコンテンツが必要と考える。作業指示と共に作業の意味や注意事項、熟練者の知識などを一緒に提示したり、また、場合によっては作業指示ではなく、突発事故を想定した訓練コンテンツ等を組み込み、ランダムにそれらを発生させ、作業者の対応を評価する等の作業の習熟に向けたコンテンツを充実する事で改善が図れると考える。

「作業の改善」についても同様に、図 4.4.7 に示したような分析の他、蓄積したデータに基づき、特に時間が掛かっている作業をコンピュータが自動的に抽出して提示するような機能を加えたりする事で改善が図れると考える。

「作業品質の向上」については本システムを用いて写真と一緒に作業履歴を記録できる利点が挙げられたが、一方でこれらの記録が本当に作業指示に従って正しく実施されたものであるか証明出来ないとの意見があった。これに関しては次章で取上げるが、AR が作業指示を出すと共に、作業者の実施した内容をコンピュータが認識し、実施した内容をダブルチェックするような仕組みが有効であり、将来にむけて機械と作業者が共存しながらより最適な運転を行うことが可能となる意味のある機能と考える。

「作業効率の向上」については、実証を踏まえて色々と改良を加えたが、まだARの技術的な位置合わせ時間の改善が必要との事が分かった。特に今回はARシステムの様々な可能性を同時に検証しており、現状のような操作マニュアル的な使い方では熟練者にとっては既知の内容についても都度指示が出るので効率が悪くなるとの意見であった。位置合わせという行為自体が従来の操作には無いものであるため、究極的には作業者は自身が意識して位置合わせをするのではなく、作業者自身の視線上に自動的に情報が重畳されてくるようになるまでの抜本的な改善が必要と考える。ここで改めて作業効率を向上させるためのコンテンツという視点で考えれば、はじめにどのような機能によって作業効率が向上するかの分析も必要と考える。「作業の品質の向上」で述べたようなダブルチェック機能を使い、熟練者がいつものように作業を行っても、常にコンピュータが実施内容をチェックしている事で不具合発生による後戻り等が無くなり、トータルとして生産性の向上につながる可能性はあると考える。また、画像特徴点による位置合わせスピードがコンピュータ処理能力の向上と共に改善され、今回使用したマーカによる初期位置あわせ等を意識する事なく対象物を認識できれば、よりインタラクティブに様々な情報が提示されるようになり、確認作業が効率化できる可能性がある。例えば似たような配管が錯綜するような場所で操作対象や保守対象を仮想の矢印で指示したり、プラントの制御システムの情報と連動させ、オペレーション作業を実施した結果、本来は見えない配管の中の流体の状態を仮想情報として可視化したり、ダクト内の風量の状態がどう変化しているかがオペレーション操作と同時に、実際の場所にて即座に確認する事が出来る。このようなインタラクティブなコンテンツを思考する事でARならではのメリットが生かされ、作業効率の向上にも貢献できるシステムが開発できると考えている。

今後は本考察で掲げた課題の解決、現場での実運用を重ねた上での改善と共に、ARシステムのメリットを活用した有効なコンテンツの提案、開発を進めて行きたい。

## 4.6 まとめ

本章では、プラントのオペレーション支援としてARを応用した作業支援システムの開発とその実用化に向けたシステム改良を行い以下の結論を得た。

- ・ オペレーション作業時の作業範囲を固定し、その作業範囲を近似的に平面とみなした2次元のトラッキング手法を開発し、タブレット端末にて実装した。
- ・ トラッキング時間を短縮するために、必要最低限のARマーカを使用し、あえてリアルタイムにトラッキングする方法をやめ、キャプチャ画像を利用して作業手順を提示する等の改良をする事で、実運用可能なARシステムを提供した。
- ・ 実務者9名によるアンケート評価を行い、「ヒューマンエラー防止」に関しては本システムは有効であり、「作業の習熟支援」「作業の改善」「作業品質の向上」についてはまだまだ改善の余地があり、「作業効率の向上」については今回の機能では有効で無い事が確認できた。
- ・ 実運用する事で技術に頼りすぎる事への懸念や確実に指示通りの作業を実施したかの証明が必要との新たな課題を見出す事が出来た。
- ・ 「作業効率の向上」にはAR技術におけるトラッキング手法の抜本的な改善が必要であると共に、作業効率の向上に寄与できる機能の分析、開発が必要である。

本研究では現時点でARの実用化を目指し、既存の技術で実務で活用できるシステムを目指した。マーカレスを目指したがトラッキング処理時間の関係で初期位置合せを行うための必要最低限のARマーカを採用した。また運用時にはリアルタイムのトラッキングでは無くキャプチャ画像を活用した。アンケート評価では「ヒューマンエラーの防止」には有効であるとの回答が得られ、作業効率を犠牲にしても確実な操作が求められるような作業には適用できる見通しが得られた。その他の評価結果からまだまだ改善の余地はあるもののAR技術を実業において活用するために一歩前進したと考える。社会インフラの重要な設備となる各種プラントの運転業務はミスが許されない作業も多く、熟練者が減少する将来に向け、今回検討したようなヒューマンエラーの削減や技術伝承に寄与するシステムの要求は高まると考える。

## 参考文献

- 1) 黒田勲：「信じられないミス」はなぜ起こる-ヒューマン・ファクターの条件-, 中災防新書, 2001.
- 2) 矢吹信喜：VR, MR, AR の基礎と建設分野への適用について, JACIC 情報, Vol.26, No.3, pp.5-16, 2011.
- 3) 神原誠之：特集 拡張現実感(AR) 基礎 1:拡張現実感(Augmented Reality:AR)概論, 情報処理, Vol.51, No4, pp.367-372, 2010.
- 4) P.Georgel : Is there a Reality in Industrial Augmented Reality?, Proceedings of 10<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2011, pp.201-210, 2011.
- 5) F.Echtler, F.Sturm, K.Kindermann, G.Klinker, J.Stilla, J.Trilk, H.Najafi : The Intelligent Welding Gun:Augemented Reality for Experimental Vehicle Construction, Chapter 17 Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing, Ong S.K and Nee A.Y.C eds, Springer Verlag, pp.333-360, 2003.
- 6) P.Georgel, P.Schroeder, N.Navab : Navigation Tools for Viewing Augmented CAD Models, IEEE CG&A, 29(6), pp.65-73, 2009.
- 7) 小松原明哲：ヒューマンエラー, 丸善株式会社, 2003.
- 8) Kuo, C., Jeng, T. and Yang, I. : An invisible head marker tracking system for indoor mobile augmented reality, *Automation in Construction*, Vol.33, pp.104-115, 2013.
- 9) 亀田能成：マーカレス AR, 映像情報メディア学会誌, Vol.66, No.1, pp.45-51, 2012.
- 10) 佐川浩彦, 浦野雄大, 栗原恒弥：2次元トラッキングに基づく簡易 AR による作業支援システムの開発, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2013 論文集, pp.843-848, 2013.
- 11) Baker, S. and Matthews, I. : Lucas-Kanade 20 years on, A unifying framework, *International Journal of Computer Vision*, Vol.56, No3, pp.221-255, 2004.



## 第5章 メータ自動読取り機能の拡張現実感技術を利用したプラント運転作業支援システムへの応用

### 5.1 概要

本章では、AR で提示した作業指示に対し、指示通りの作業を実施したかを確認する事でヒューマンエラーを削減する方法について述べる。まず、アナログメータの読取り作業を対象に作業者が入力した値とシステムが自動認識により読取った計器の値と比較する方法について検討を行った。5.2 でこれまで開発してきた AR を応用したプラント運転支援システムを利用したメータ読取り作業における課題について述べ、5.3 で作業によるメータ読取り値とシステムが自動認識にて読取った値との比較方法について記述する。5.4 ではメータの自動読取り実験により本システムの有効性を評価した結果について記述する。

### 5.2 AR応用プラント運転支援システムの課題

第4章にて、ヒューマンエラーを防止するために AR を応用したプラント運転支援システムについて記載した。運転や点検作業において、メータ等の計器の値やランプの状態を確認し、その結果を記録する必要があるが、作業者は値を読み間違えたり、入力ミスする可能性がある。そこで AR で提示した指示に対し、指示通りの作業を実施したかの証明が出来れば本システムの有効性は高まる。ヒューマンエラーを防止する方法として、作業の手順を提示するだけでなく、作業者が値を読取り、入力した計器の値と、別途システムが自動的に読み取った値との比較を行い、両者の差異が大きい場合は警告を発するというような仕組みを導入する方法が考えられる。

新しいプラントでは最新のデジタルメータ等を利用すれば数値を計算機に転送するようなことも可能であるが、社会インフラの数は多く、また古いプラントも多く、すべてをそのような新型メータに変えるのはコストが掛かり過ぎ、現実的とは言い難い。従って、既存のアナログメータ等も含めて対応できる手法が望まれる。

そこで本研究では、ヒューマンエラー防止機能の一つとして、設備運転作業におけるメータ読み取り作業を対象として、AR で作業指示を行い、更に作業指示に従い作業者が実施したメータ確認及びメータ値の入力行為が正しいかを判別する仕組みを考案し、検討する事とした。

本章で対象とするプラント運転作業支援システムは第4章と同様に水処理プラント等で実施される運転や点検業務に対し、作業者に的確な作業指示を提示するシステム<sup>1)</sup>である。作業指示に従い、メータを読み取ったり、バルブを開閉したり、スイッチを入れたり、レバーを操作したりという人間が中心に行う作業を対象としている。これらのプラント運転作業を支援するAR システムは、コンピュータが上述したメータ、バルブ、レバーやスイッチ等の位置を認識し、その上に適正な順番や作業内容等の情報が作業者に分かるように重畳表示させる。タブレット端末背面のカメラにより作業対象を撮影すると、実施すべき作業内容と作業対象が画面上にリアルタイムに重畳表示される。重畳表示の例を図5.2.1に示す。図5.2.1において、①は作業内容、②及び③は作業を実施すべき作業対象であり、図5.2.1では緑色の円によって2つのメータが作業対象になっている事が示されている。

作業者は、画面上に緑色の円や作業手順が重畳表示された作業指示に従って確認結果を入力し

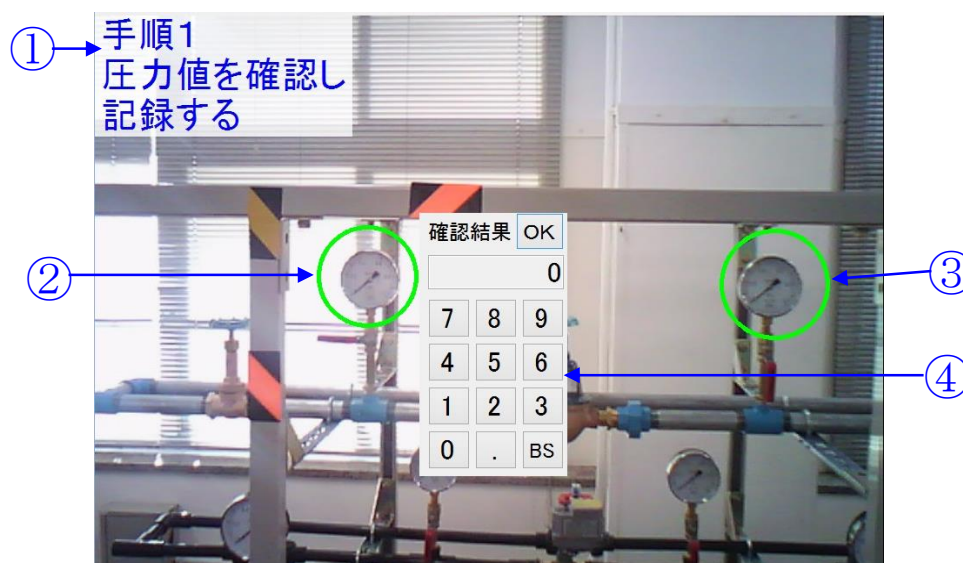


図 5.2.1 作業手順と作業箇所との重畳表示例

てゆく。図 5.2.1 の④は、②の作業対象をタッチパネルとしてタップした際に表示される入力パネルである。②は圧力計であり、圧力計の値を入力する設定にしてあるため、④に示す数値入力パネルが表示されている。作業対象がランプの場合は点灯・消灯の入力、スイッチの場合は ON・OFF の入力というように、確認結果の入力方法は作業に関する情報を登録する際に選択できるようになっている。必要な作業対象に関する確認結果を入力し終わると、自動的に次の作業内容と作業対象が表示される。

この時、メータ等の計器が示す値をコンピュータが読取り、作業者が入力した値と比較したり、点灯したランプの状態を検知したり、スイッチの向きを検知できれば、人間が実施した内容と作業指示の内容を比較できると考える。本研究では、まずアナログメータを対象に、AR システムに応用する方法について検討する事とした。画像処理によりアナログメータの値を読み取る技術は伊藤ら<sup>2)</sup> 藤田ら<sup>3)</sup> などによって研究が行われている。これらの研究では、メータを撮影するカメラをメータの近くに設置し、必要なパラメータの設定・登録を行い、カメラを固定した状態でメータ値の読み取りを行う方法が検討されている。伊藤ら<sup>2)</sup> の研究では振動などによるカメラのずれを想定した補正手法を導入しているが、基本的にはカメラは固定であり、AR のようにカメラ位置が大きく動く事に関する記述は見当たらない。

### 5.3 メータ認識方法の検討

プラント設備で使用される計測器のアナログメータとしては、外形は円形や四角形があるが、指針はある点を中心に回転するもの、縦型のフロート式メータ、指針が複数あるもの、複数のメータが載っているもの等、様々なタイプがある。本研究では圧力計や温度計などによく見られる指針が一つで、ある点を中心に回転して値を指示するタイプのメータを対象とした。更にこのようなタイプのメータの中には常に針が振動しているような場合もあるが、値が一意に特定できる場合に限定した。まずは、このようなメータの確認作業時に AR システムで入力した値が正しく入力されているかをコンピュータ側が確認できるメータ画像読取り方式を検討する事とした。

検討にあたり、まずメータ画像読取りプログラムを作成し、これを AR で利用する際の改良案を考察する事とした。作成したメータ画像読取りプログラムでは、読取り対象となるメータの画像およびメータの指針や可動範囲等の情報をメータ・テンプレートとして格納しておく方法を採用し、読取り時には、対象となるメータが撮影された入力画像とメータ・テンプレート中の情報とに基づいてメータ値の読取りを行う。

図 5.3.1 にメータ・テンプレートに登録された情報を可視化した例を示す。

(1) 基準メータ画像 (図 5.3.1 ①)

読取り対象とするメータを正面から撮影した画像である。後述のメータ指針可動領域はこの画像を基準として設定を行う。

(2) 指針の回転中心 (図 5.3.1 ②)

指針が回転する際の中心位置の基準メータ画像上における位置座標である。

(3) メータ指針可動領域 (図 5.3.1 ③)

基準メータ画像上で指針が移動する範囲の内、指針検出を行う際に対象とする扇形の領域 (図 5.3.1③) を表す情報である。指針の回転方向の上限 (図 5.3.1③-1) と下限 (図 5.3.1 ③-2) を、下方方向を 0 度とした右回りの角度として登録する。例えば図 5.3.1 に示すメータ

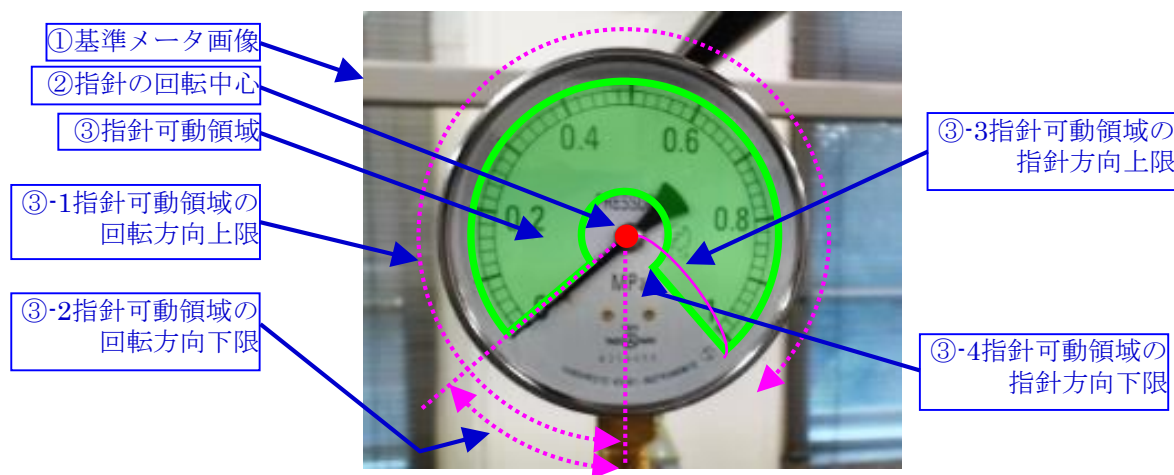


図 5.3.1 メータ・テンプレートに登録された情報の例

では、上限は 315 度、下限は 45 度となる。更に、指針方向における範囲も登録する。具体的には、内枠の半径の長さを基準として、対象とする指針方向の範囲の上限 (図 5.3.1③-3) と下限 (図 5.3.1③-4) の割合を指定する。

次にメータ読取り方法を具体的に説明する。まず、基準メータ画像平面上に投影した入力画像から指針を探索し、その角度を求める。投影した画像上において、指針はメータ・テンプレート中に登録した指針可動領域内を回転中心周りに回転すると想定できる。そこでまず、指針可動領域の画像を、指針の回転中心を原点として、指針の回転角度を横軸、回転中心から外側に向かう方向を縦軸とする画像に極座標変換する。極座標変換を行った指針可動領域の画像 (以下、極座標画像) を図 5.3.2(a) に示す。

極座標画像上において、指針は縦軸方向に長い領域 (図 5.3.2 (a) では黒い領域) として表されるため、指針に対応する領域を極座標画像の横軸方向に探索することにより、指針の角度を求めることができる。通常のメータでは読取りを容易にするために、指針と指針可動領域のコントラストは高いと考えられる。これは画像上では、指針と指針可動領域の境界におけるエッジが強く検出されることに相当するため、エッジ画像を用いた。入力画像からのエッジ検出には Canny アルゴリズム<sup>4)</sup>を用いた。また、指針は縦軸方向に連続した画像であるため、水平エッジ (横軸方向への微分演算で得られるエッジ) が縦軸方向に連続的に検出されると期待できる。文字などにおいても同様のエッジは検出されるが、指針の方がより長くエッジが検出されると考えられる

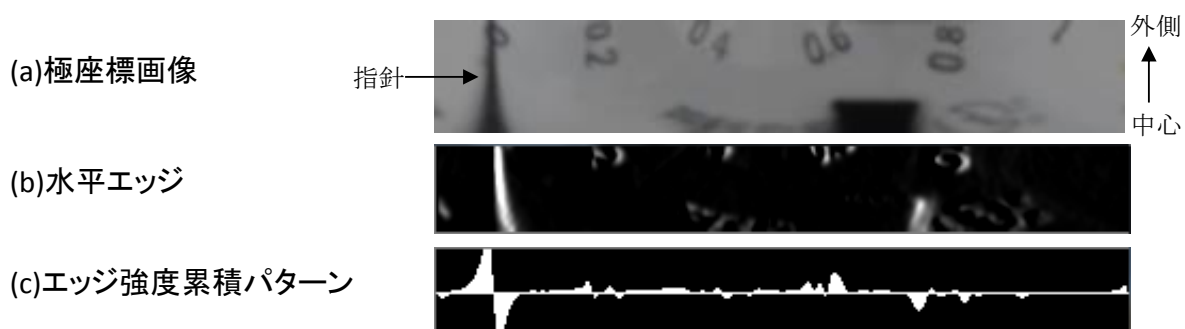


図 5.3.2 メータ指針可動領域の極座標画像，水平エッジ抽出結果，及びエッジ強度累積パターン

ため、両者は区別可能と考えられる。そこで、以下のステップにより指針の角度を求める。

(1) 指針可動領域の極座標画像上における水平エッジ抽出

横軸方向への微分演算を行う Sobel フィルタ<sup>5)</sup> を座標画像に適用し、水平エッジ強度を求める。図 5.3.2 (a) の極座標画像から水平エッジ抽出を行った結果を図 5.3.2 (b) に示す。図 5.3.2 (b) ではエッジ強度が高い程、より白く描かれており、指針と背景の境界においてエッジ強度が大きいことが分かる。

(2) 抽出した水平エッジ強度の縦軸方向への加算

(1) で求めた水平エッジ強度を極座標画像の縦軸方向に加算したエッジ強度累積パターンを求める。図 5.3.2 (b) から求めたエッジ強度累積パターンを図 5.3.2 (c) に示す。Sobel フィルタは一階微分を行うため、指針の箇所でもエッジ強度の符号が反転している。

(3) エッジ強度累積値パターンによる指針角度の検出

図 5.3.2 (c) から分かるように、文字などの箇所でもエッジ強度の累積値が大きくなるが指針の箇所よりは小さいため、以下のようにして指針の角度を求める。

(i) エッジ強度累積パターン上で、エッジ強度の零交差位置（符号が反転している位置）と、その前後におけるエッジ強度の絶対値の最大を求める。

(ii) 前後のエッジ強度が最も大きい零交差位置に対応する角度を指針の角度とする。

次にメータ可動領域の開始及び終了角度から、指針が示すメータ値を算出する。この計算には、メータ・テンプレートに登録された目盛り領域に対するメータ値の情報をを用い、以下のように登録して利用した。

$T_s$  : メータ可動領域の開始角度に対するメータ値

$T_e$  : メータ可動領域の終了角度に対するメータ値

また、入力画像から取得された情報を以下の通りとする。

$\theta$  : 指針の角度

$\Phi_s$  : メータ可動領域の開始角度

$\phi_e$ : メータ可動領域の終了角度

以上の情報から、メータ値  $V$  は式 (4.1) により求める事ができる。

$$V = (T_e - T_s) \frac{\theta - \phi_s}{\phi_e - \phi_s} + T_s \quad (4.1)$$

なお、式 (4.1) は目盛りが線形に配置されている場合の計算式であり、非線形の場合は、指針の角度とメータの関係を表す関数に基づいて計算を行う。

## 5.4 メータ画像読取り実験

### 5.4.1 実験方法

#### (1) 実験条件

本実験で使用したカメラの仕様、及び実験環境に関する情報を以下に記す。

- 1) カメラ：メータ読み取りに利用するカメラにはBUFFALO社のフルHD（1920×1080pixels）対応500万画素のWebカメラBSW50KM02BKを使用した。
- 2) メータ：実験に利用したアナログメータには指針を持つシンワ測定（株）の丸型温度計S-1で直径が106mmのものを使用した。
- 3) 実験場所：一般的な事務室の屋内環境にて、周辺環境（埃や周辺設備の陰）、外光（順光や逆光）等の影響が少ない条件で実施した。実環境では周辺環境の条件によって影響を受ける可能性はあると考える。

#### (2) 実験装置

5.2で記したARシステムで作業指示を行い、作業者が記録したメータ読み取り値に対し、ARシステムがカメラで同時にメータを捕らえて、コンピュータが自動的にメータ値を読取り、作業者が設定した値と比較する事で作業者の入力ミスを防ぐ事を想定した場合、ARシステムで捉えるメータ画像は従来<sup>2)</sup>のように常に固定でメータを読取る方法ではなく、カメラが作業者に伴い動く事になる。そこでカメラが動く事を想定し、5.3で作成したプログラムを用いて図5.4.1に示すような実験装置で読取り実験を行った。図5.4.2には実験装置におけるメータとカ

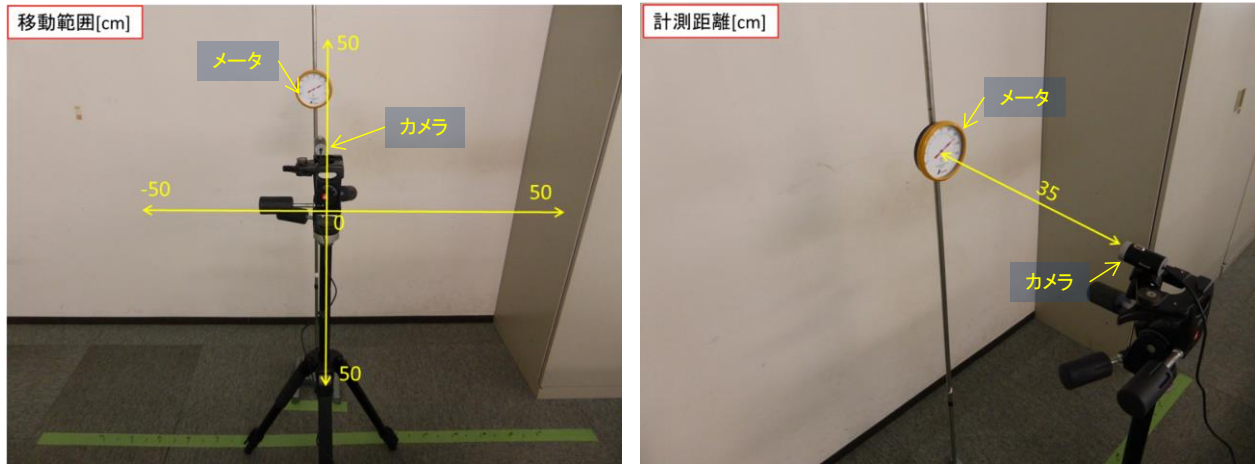


図 5.4.1 メータ読取り実験装置概要

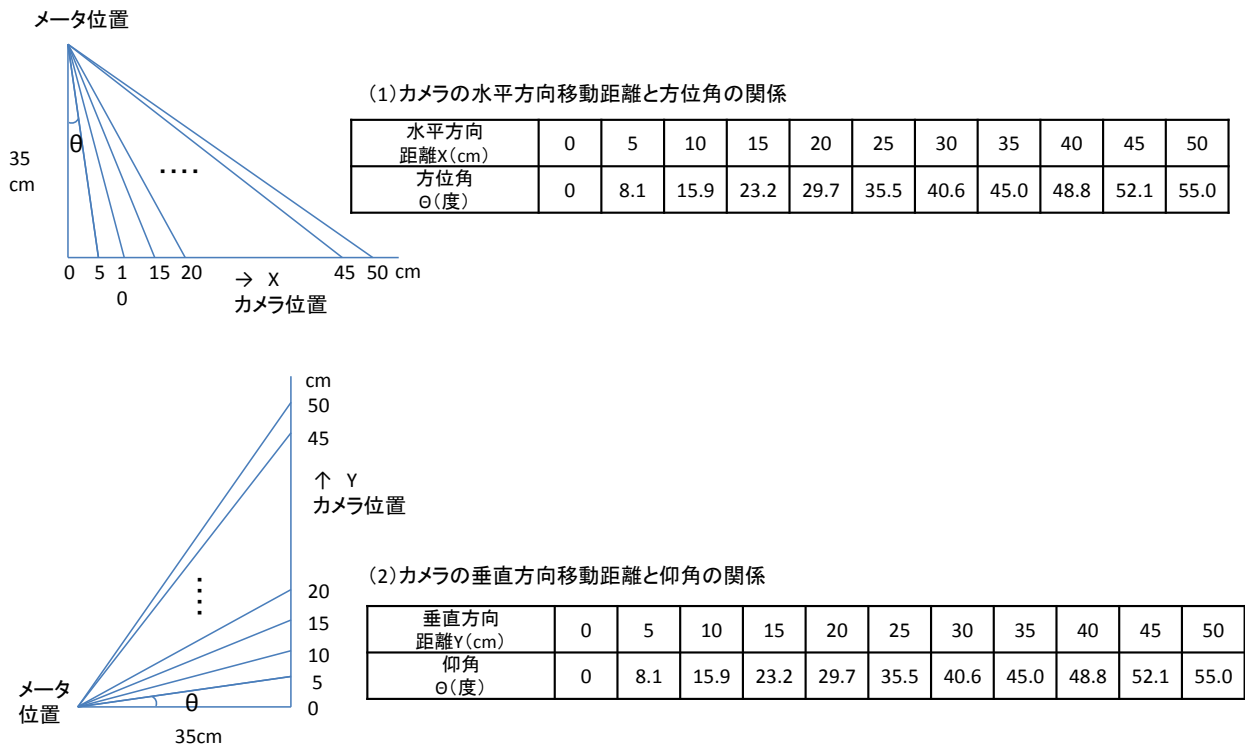


図 5.4.2 メータ読取り実験方法（メータとカメラの位置関係）

カメラの位置関係を示す。対象となるメータを中心に水平方向（左右）、垂直方向（上下）にカメラを移動させ、カメラレンズは常にメータ中心を撮影するようにして調節してメータ読取りを実施した。カメラとメータの距離は35cmとしたが、これは正面から撮影した状況で確実にメータを読取れる距離とし、この時のメータ部の画像は図5.4.3に示すようにメータの実サイズが106×106mmに対し、画像解像度は307×307pixelsであった。



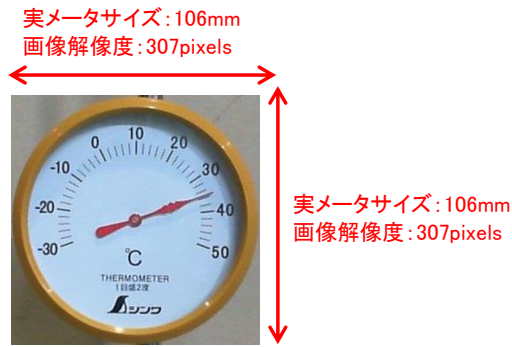


図 5. 4. 3 メータ画像及び解像度

(3) 実験手順

本実験では、図5. 4. 4に示すようにテンプレート画像を固定したままカメラを移動した際の読取り可能範囲とARに応用する事を想定してカメラの動きに合わせてテンプレート画像をカメラ画像に合せて変更した場合での読取り可能範囲を比較した。

1) テンプレート画像固定による読取り

基準メータ画像として正面からメータを読取り、それをテンプレート画像として固定してメータ読取り試験を実施した。正面から読取った値は精度は高く、これを真値として、カメラ位置を水平及び垂直方向に±50cmの範囲で5cm毎に移動させ、都度、静止状態で読取りを行い各点での誤差を確認した。今回使用したメータの目盛り間隔は1目盛りが2度で

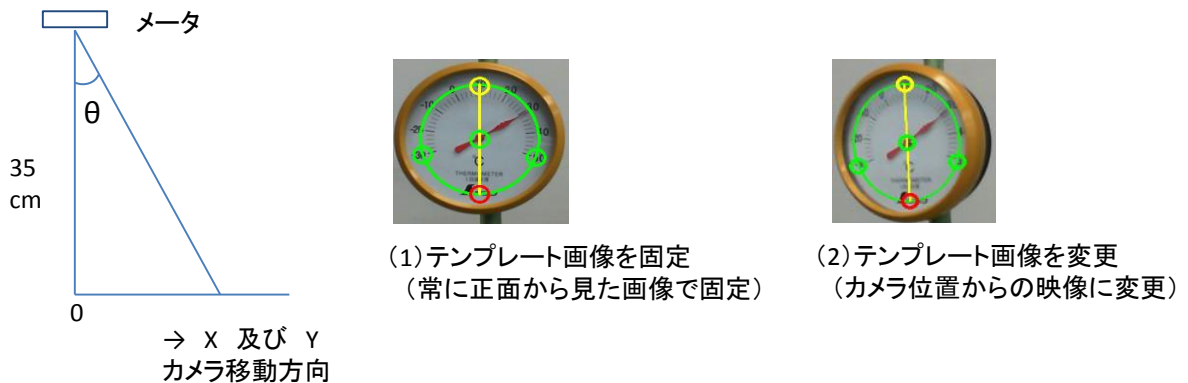


図 5. 4. 4 メータテンプレート画像の設定方法

あるため、この1目盛り分の2度を分解能として、真値±1度の範囲は正確に値が読取れたものと判断した。

## 2) テンプレート画像を変更させて読取り

次にカメラを動かす毎にテンプレート画像を基準画像からゆがませて（正面からの画像はメータが円であるが、カメラの位置がずれば楕円になる）設定し、(1)と同様の読取り試験を実施した。テンプレート画像の変更方法としては、今回はマニュアルにてカメラ画像から楕円の画像を取得して実験を行った。テンプレート画像の変更を実装するに当たっては、メータの外装等の形状をエッジ処理にて求め、正面から取得した場合の形状と斜めから見た際の形状の比較からゆがみの度合いを求める事によって変換が可能になると考えるが今回の研究では検討範囲外とした。

## 5.4.2 実験結果

### (1) テンプレート画像固定による読取り

表 5.4.1 にテンプレート画像固定による読取り結果を示す。図 5.4.5 には水平方向にカメラを移動した際の移動距離と読取り誤差の絶対値をグラフ化した図を示す。また図 5.4.6 には垂直方向にカメラを移動し際の移動距離と読取り誤差の絶対値をグラフ化した図を示す。本結果より、正面からのテンプレートのみでメータ読取りを行った場合、カメラ位置が水平、垂直方向共にに±10cm 程度動いただけで±1度以上の誤差が出てしまう事が確認できた。

これはカメラの位置が正面からずれるほど、カメラ画像とメータの読取り範囲を抽出するために使うテンプレート画像に相違が発生し、メータの読取り範囲に不整合が発生してしまうためである。水平方向、垂直方向での誤差の違いはメータ指針の向きと照明との関係によるメータ枠等の影の影響が出たものと考えられる。

本結果より、テンプレート画像を正面からの画像に固定した場合、AR のように作業者が多

少なりとも動きながらメータを読取る場合には自動読取りによる誤差が発生してしまい正確な計測は不可能と判断した。

## (2) テンプレート画像を変更させて読み取り

表 5.4.2 にテンプレート画像を変更させた時の読取り結果を示す。図 5.4.7 には水平方向にカメラを移動した際の移動距離と読取り誤差の絶対値をグラフ化した図を示す。また図 5.4.8 には垂直方向にカメラを移動し際の移動距離と読取り誤差の絶対値をグラフ化した図を示す。全ての範囲でメータ分解能の±1 度以下にはなっていないものの、±2 度までの誤差は出ていない事が判った。本結果からテンプレート画像を変更させて読取る方法は(1)のテンプレート画像を固定した方法に比べ、精度良く計測できる事が判った。

メータを読取る際のカメラ画像に関して、カメラ位置を水平方向で 10cm と 40cm ずらした時の比較を図 5.4.9 に示す。10cm 程度のカメラ位置のずれは既存の AR 作業支援システムでは十分に起き得る範囲であるが、40cm では作業者が見ても読みにくいという事が判るのでこれ以下で使用するよう指示する事は可能と考える。つまりカメラ位置が 40 cm 以下の範囲であれば、テンプレート画像を補正するような方法を利用すれば、AR システムへの応用として、人間が確認して入力した値とのエラーチェックとして利用するのであれば十分に活用できると考える。

表 5.4.1 テンプレート画像固定による読取り誤差（青色は誤差が±1度以内） 単位：度

カメラ位置	距離	0cm	5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm	35cm	40cm	45cm	50cm
	角度	0°	8.1°	15.9°	23.2°	29.7°	35.5°	40.6°	45.0°	48.8°	52.1°	55.0°
水平方向	左方向	0.0	0.0	-0.4	-1.1	-1.5	-2.2	-1.8	-2.6	-2.6	-4.0	-24.6
	右方向	0.0	1.5	1.8	0.7	-0.7	11.0	12.1	-31.0	-29.5	-28.4	-16.5
垂直方向	上方向	0.0	-0.6	-0.6	2.8	2.8	1.6	3.9	3.9	3.9	2.0	4.3
	下方向	0.0	0.8	0.4	1.6	2.3	1.6	1.6	3.5	1.6	1.9	-

■ : 読取り精度高い

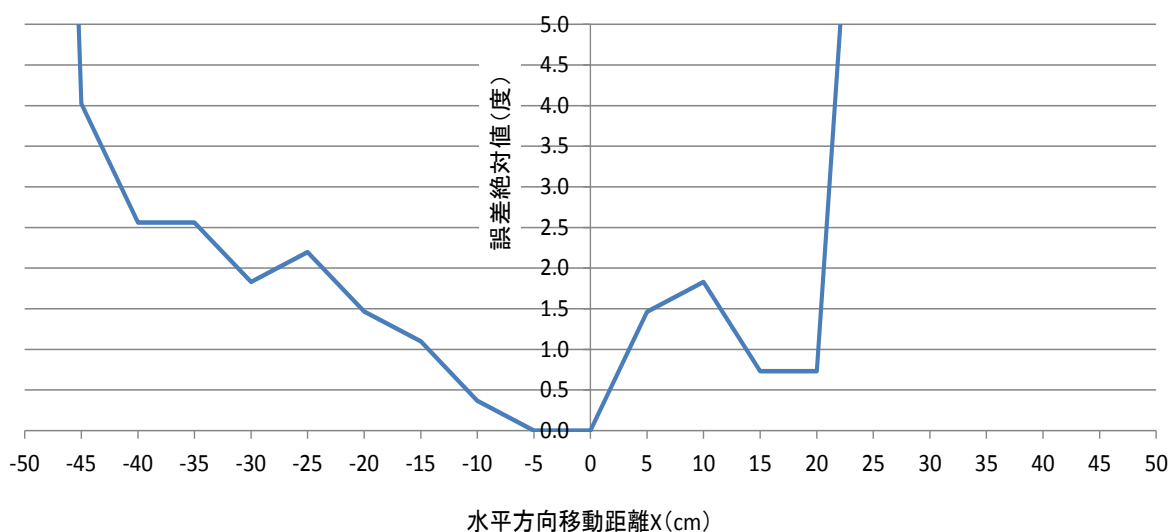


図 5.4.5 水平方向カメラ移動距離と読取り誤差（絶対値）の関係（テンプレート固定）

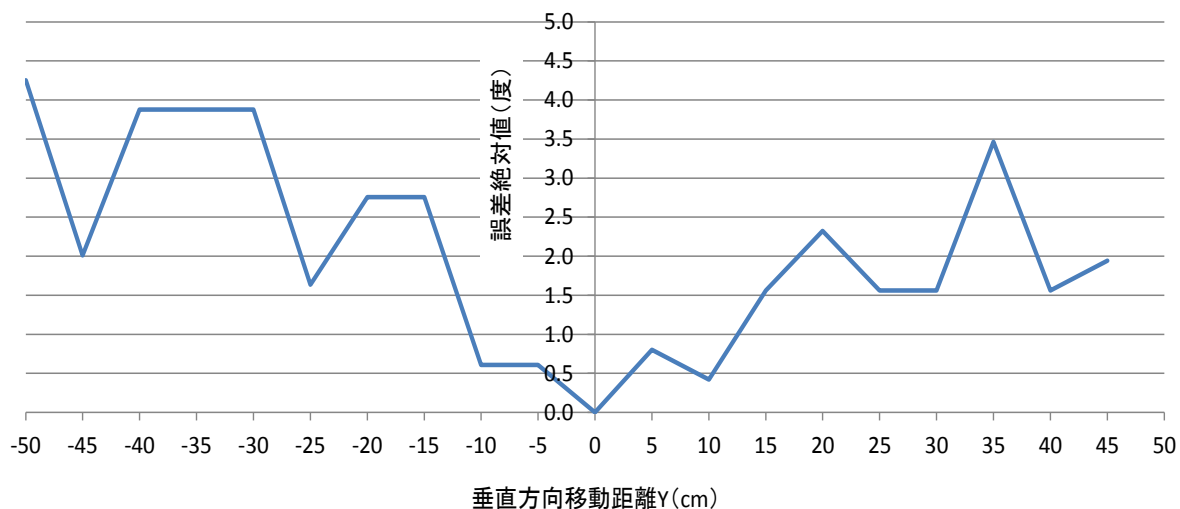


図 5.4.6 垂直方向カメラ移動距離と読取り誤差（絶対値）の関係（テンプレート固定）

表 5.4.2 テンプレート画像変更した時の読取り誤差（青部は誤差が±1度以内） 単位：度

カメラ位置	距離	0cm	5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm	35cm	40cm	45cm	50cm
	角度	0°	8.1°	15.9°	23.2°	29.7°	35.5°	40.6°	45.0°	48.8°	52.1°	55.0°
水平方向	左方向	0.0	1.0	1.1	1.1	0.6	0.2	1.0	0.0	0.6	-1.1	0.1
	右方向	0.0	0.8	-0.8	-0.8	-1.0	-0.8	-0.6	-1.2	-0.9	-0.2	-2.0
垂直方向	上方向	0.0	0.9	0.3	1.2	1.3	1.4	0.9	0.1	0.9	-0.2	-
	下方向	0.0	-0.4	-0.8	-1.6	-1.5	-0.20	-1.9	-0.7	-0.3	-	-

■ :読取り精度高い

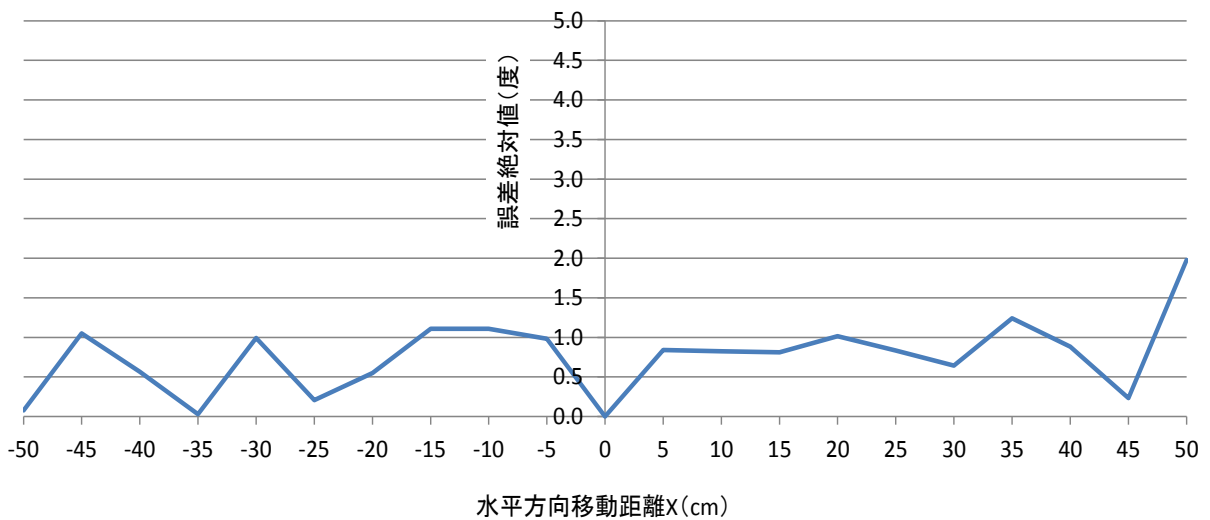


図 5.4.7 水平方向カメラ移動距離と読取り誤差（絶対値）の関係（テンプレート変更）

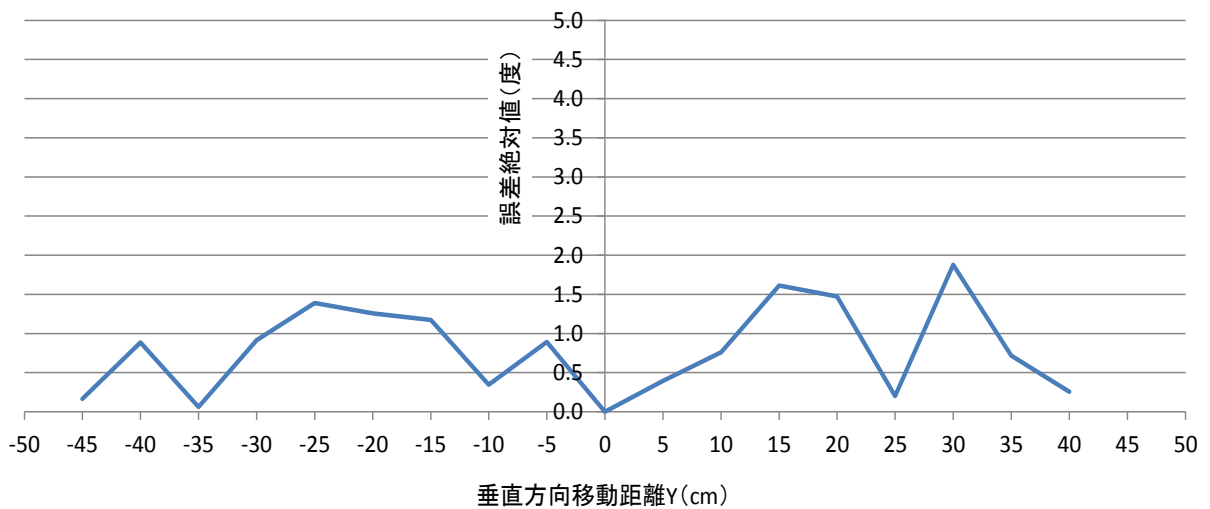


図 5.4.8 垂直方向カメラ移動距離と読取り誤差（絶対値）の関係（テンプレート変更）



(a)カメラを10cm右に動かした位置から見た画像



(b)カメラを40cm右に動かした位置から見た画像

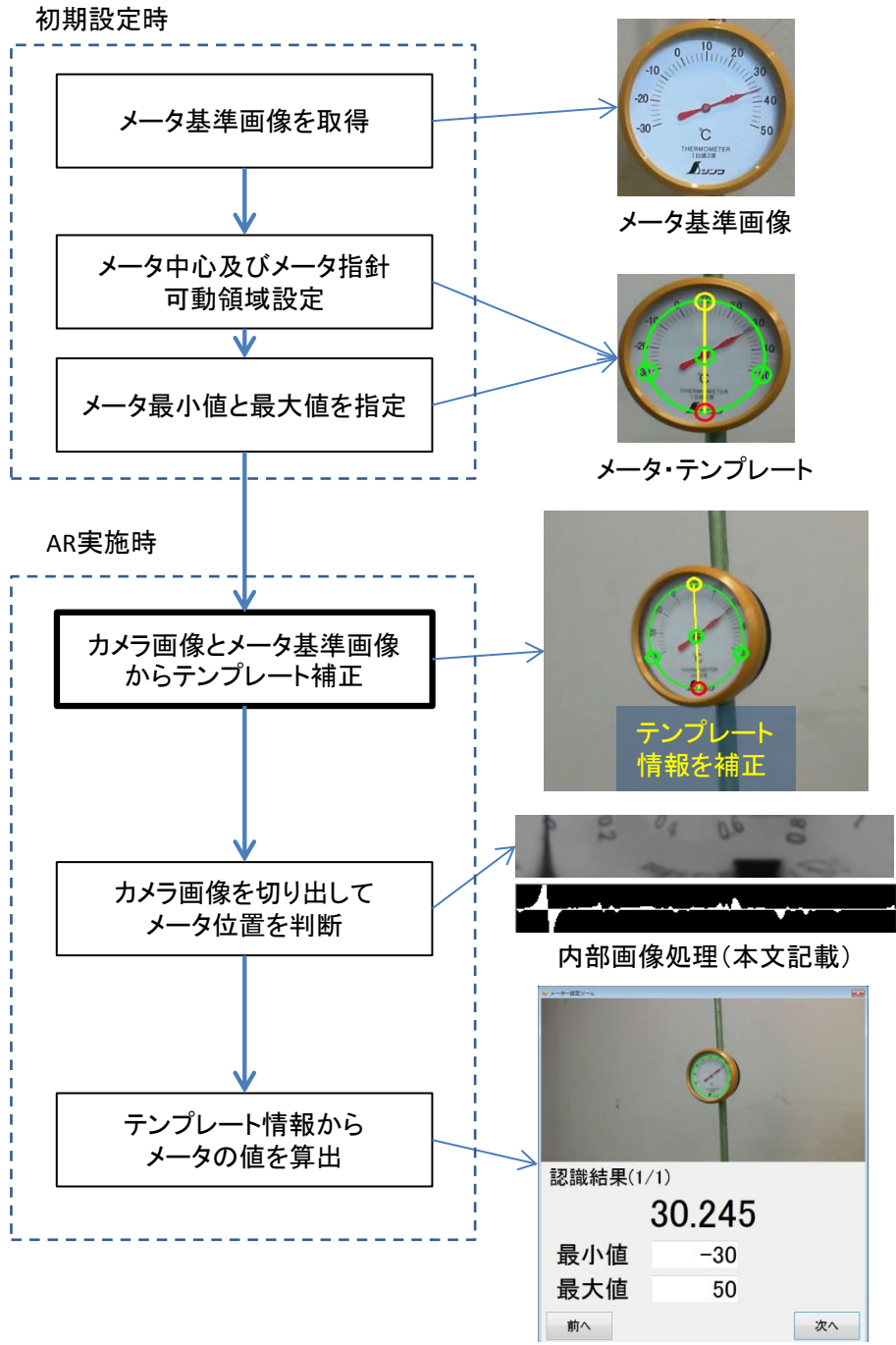
図 5.4.9 メータ読取り時のカメラ画像例

## 5.5 プラント運転支援システムへの応用

5.4 で示した実験の結果から，AR のように人間の視点に合わせてメータを読取るような場合，カメラの位置が動く事によって変化する画像に合わせてテンプレート画像を変換して追従すれば，本研究で利用したメータ読取りアルゴリズムでも AR に応用できる可能性がある事がわかった．従って，AR 作業支援システムに応用する際のメータ読取り方法は図 5.5.1 に示すフローで実施できると考える．

### (1) 初期設定時

本研究で評価した  $307 \times 307$  pixels と同等以上の解像度のメータ画像を取得し，これを基準画像として，基準画像上で図 5.3.1 に示したメータ指針の稼動中心をメータ中心，メータが稼動する範囲をメータ指針可動領域として設定する．次に可動領域の最小値と最大値を設定する．図 5.5.1 に示したメータ基準画像では最小値が  $-30$  度，最大値が  $50$  度となる．これをメータ・テンプレートとする．



\*対象とするメータはある点を中心に回転して値を指示する指針を有し、計測時には指針が停止し、一意に値が特定できるもの

図 5.5.1 AR システムに応用する際のメータ\* 読取り方法

## (2) AR 実施時

実際に AR で利用する際には Tablet 端末や HMD (Head Mount Display) 等, ユーザインタフェースとなる機器が保有するカメラを経由して, そこにあるメータ画像を取得し, 取得したメータ画像と初期設定時に設定したメータ・テンプレート画像からリアルタイムに取得している画像とメータ・テンプレート情報のずれを検知してメータ・テンプレート情報を補正する必要がある. ここが, 本研究で使用したメータの自動読取り方式を AR に応用するための重要な処理ポイントとなる. 次に補正されたメータ・テンプレート情報に合わせてリアルタイムでカメラから取得しているメータ画像を切り出し, 5.3 で示したエッジ処理によってメータの指針の位置を算出し, 更に, メータ・テンプレート情報に設定したメータ稼動範囲と, その最小値 (-30 度), 最大値 (50 度) の値の間隔から, 式(4.1)によってメータ値を算出する.

## 5.6 まとめ

本章では, AR 応用の作業支援システムにおける作業員のヒューマンエラー防止機能の一つとして, 作業員が入力したメータ値をシステムが捕らえたメータ画像から自動的に読取った値と比較する事で, 差異がある場合に警告するような機能の方法について検討した. 従来のようなメータを読取るカメラ条件を常に固定するような方法ではなく, AR システムに採用する事を前提に, 人間のカメラ視線のように常に正面を捉える事なく, 作業位置によってメータ読取り角度が変わるような場合を想定し, その影響具合を実験により確認した. その結果, 以下の手順によるメータ読取りを行えば, AR システムとしてコンピュータが自動的メータ値を読取れる可能性がある事を確認できた.

- (1) テンプレートマッチングによるメータ検出
- (2) カメラ画像とテンプレート情報のずれ量補正
- (3) エッジ処理によるメータ位置読取り
- (4) テンプレート情報からメータ値算出



また、点検時に作業者が AR システムを利用した指示により入力した値と本機能を利用して自動算出したメータ値とを比較して、差があった場合には入力ミスの可能性があると警告を出す機能を既開発済みのシステムに組み込めば AR による作業指示と更に、指示に基づき実施された行為の確認という、これまで重要な作業では二人の作業でダブルチェックしていたようなプラント運転や点検作業に応用できる可能性があると考えます。

今後は自動読取りを可能とするメータの範囲の拡大、メータのみならず、様々な作業におけるコンピュータの自動判定機能を開発して行きたい。また、それらの機能を 4 章で提案したシステムに適宜組み込み、実務と合わせた有効性の検討も必要と考えている。

## 参考文献

- 1) 羽鳥文雄, 矢吹信喜, 浦野雄大, 瀧隼人: 画像特徴点を利用した拡張現実感技術のプラント運転作業支援への応用, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.70, No.2, pp.50-59, 2014.
- 2) 伊藤憲彦, 猪毛尾壮一郎, 下川洋: アナログメータのデジタル画像を用いた自動読み取り手法, 電力中央研究所報告, 研究報告 R04020, pp.1-19, 2005.
- 3) 藤田悠介, 浜本義彦: 画像処理によるアナログメータ自動読み取り, 電気学会論文誌 C, Vol.129, No.5, pp.901-908, 2009.
- 4) John Canny : A Computational Approach To Edge Detection, IEEE Transactions and Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6), pp.679-698, 1986.
- 5) 白井良明, 谷内田正彦: パターン情報処理 (新コンピュータサイエンス講座), オーム社, 1998.

## 第6章 結論

### 6.1 結論

本研究では、プラントの施工や運転作業を支援する新しい仕組みとして、拡張現実感技術(AR)の活用について検討を行い、それぞれ施工や運転・保守を支援するアプリケーションの開発とその有効性を評価した。

第1章は序論であり、プラント建設やプラントの運転・保守における課題を整理し、拡張現実感技術によって支援する対象及び目的を述べた。建設分野は製造業など他の産業に比べると生産性が低い。また建設産業だけでなくプラント運転や保守に携わるエンジニアにおいては、少子高齢化による熟練技術者の不足が課題となっており、これらの課題を解決する手段として最新のIT技術の活用が期待されている。これらの課題に対応するため、非熟練作業者の支援システムとしてAR技術の応用を検討する事とした。

第2章では、ARに関する要素技術とそれらの技術動向、及びARを建設分野やプラントの運転・保守に応用した事例について調査を行った。特に、高額なセンサや機材を必要とせず、カメラを利用したARが普及しはじめており、カメラからの画像に基づくARについて検討する事とした。

第3章から第5章ではプラント建設や運転・保守を支援するARシステム等の具体的なアプリケーションの開発について述べている。

第3章では大規模構造物を取り扱う建設現場にて安全管理に必要な情報を監督者や作業者に提示する仕組みについて検討した。特に建設現場において最も重要な安全管理に関わる情報を確実に伝えたり、気付かせたりする仕組みがあれば非熟練者でも熟練者と同様のチェックが可能になると考える。このためには大規模構造物に足場情報等を3次元的に表示させる、ARの位置合わせ手法の開発が必要である。状況が刻々と変化する建設現場の大規模空間に複数のマーカを設置し、カメラが捕らえられるマーカを組合せて大空間での座標系を計算する方法を提示した。また、

施工現場への試験的応用として、プラント建設時の足場設置等の安全対策を AR によって可視化するシステムを構築し、その有効性を確認した。

第 4 章ではプラント運転・保守作業における事故やヒューマンエラーの防止に寄与する AR システムについて検討した。プラント運転・保守作業は建設時に比べれば、対象物は大きくても人間が操作する範囲は限られる。より効率的で実務に適用可能な運用方法として沢山のマーカを必要としない、画像特徴点情報を用いた位置合わせを利用した運転支援システムを開発した。開発したシステムを水処理プラントの実現場に適用し、9 名の被験者のアンケート調査から本システムが作業者のヒューマンエラー防止に貢献できる事を確認した。

第 5 章では AR で提示した指示に対し、作業者が実行した内容をカメラ画像を通じてコンピュータが判断し、指示した内容が正しく行われたかどうかチェックするシステムについて検討した。単に正しい作業手順を AR にて提示するだけでなく、作業実施結果についても正しさを自動的にチェック出来れば、更なるヒューマンエラーの削減に貢献できる。全ての作業に対応するのは難しいため、まずはアナログメータの読取り作業において AR システムにてメータを認識し、そのメータ値をコンピュータが自動認識する方法を提案した。

タブレット端末やメガネ型ディスプレイ等、IT が作業を支援する仕組みが加速度的に進化しつつある。AR はこれらの新型デバイスとの組合せにより、新しいヒューマンインタフェース技術として定着する事が期待されている。本研究では建設分野とプラントの運転・保守分野を対象に、如何にしてこの AR 技術を活用出来るか検討をしたものである。特に、産業分野に適用するためには、取り扱う対象物と空間の情報が大きくなるという問題とその為の解決策、情報活用の有効性の検証が必要であり、その為の方法論や検証を提示出来たと考える。

## 6.2 今後の課題

今回、プラントの建設・施工、運転・保守における AR の応用として幾つかのプロトタイプシステムをベースに実務者評価等を行なった。AR の有効性は確認でき、活用への道筋は開けたと

考えるが、個々には位置合わせ技術の要素技術レベルでの精度や環境条件による影響確認など、基礎的な課題についても深堀してゆく必要があると考える。

プラント建設分野は BIM の普及と共に 3D-CAD データが整備され、新規プラント建設では様々な属性情報を保持した三次元モデルが設計段階で準備されるようになる。建設現場ではタブレット端末で 3D-CAD を確認する事は既に当たり前になりつつあり、この先には実空間内に 3D-CAD を重畳させる要求は必ず出てくると考える。現実空間と仮想空間の位置合わせには何らかの仕掛けが必要であり、今回、複数マーカを組合せて実施する方法を提示した。但しこれらマーカを設置する手間や最終的には取り外す必要もあり、これらを如何に効率よく実施するかを検討してゆく必要がある。例えば、躯体の一部にあらかじめマーキングをしておく事やバルブや機器等、プラントを構成する部品そのものを位置合わせに利用するマーカとして認識できればマーカを後から追加したり取り外しする事が不要となり、より効果的と考える。

プラント運転・保守作業を対象にして検討した AR の研究からは、AR による情報が提示されるスピードが問題になる事が分かった。ミス防止するためには作業スピードを落しても問題無いような作業には活用出来るが効率を重視する場合には改善が必要である。作業者が意識せずとも、作業内容を予測し、必要な情報をタイムリーに提示出来る仕組みの検討が必要である。但し、全ての作業が AR によって提示されるがまま実施するような作業者になってしまうのではロボットが作業するのと同じであり、熟練度を上げるためには操作の重要性や運転ミスを検知出来るような教育も兼ねた情報提示等を考慮してゆく事も重要であると考えられる。

メータの自動読取りに関する研究は、アナログメータに関しては実現性が確認出来た。しかし、メータ以外にもスイッチのオンオフやバルブの開閉等、自動判断すべき作業範囲を広げてゆく必要がある。スイッチのオンオフについてはオンオフに伴うランプを検知すればよい。バルブについてはレバー式であればレバーの位置や向きが利用できる。ハンドル式のバルブは開閉の状態が見た目では判断が出来ないため、AR との組合せが不向きであり何らかの工夫が必要となる。今

後、これら作業に伴う状態変化を何をもって判断するかを整理し、どのように AR で検知するか  
の検討、更にそれらを AR システムとして実装してゆく必要がある。

これらをすべて一人で遂行するのは困難であるが、より多くの研究者と協力し、本分野の技術  
発展に貢献して行きたい。産業界は今、IT 技術による新たな革新的時期を迎えつつある。IoT  
(Internet of Things) と呼ばれる事もあるが、社会インフラを構成する設備や産業設備、そこ  
で働く作業員等、あらゆるものがネットに繋がり、そこから集められた様々な情報（ビッグデー  
タ）を人工知能 (AI:Artificial Intelligence) によって解析する事でコンピュータが最適な答  
えを導き出す。人工知能はロボットとの組合せにより人間の作業領域を凌駕するとも言われてい  
るが、筆者は当面は共存してゆくものだと考える。このような人工知能と人間の共存には AR 技  
術が欠かせないものになると思う。人工知能が判断した結果を、AR によって、人間の感覚（現  
時点では視覚が中心だが、聴覚などその他の感覚に仮想情報を重ねる事も AR の一部である）に  
重疊的に提示する事で、より効果的なシステムが開発できると考える。将来は、これら人工知能  
との組合せも含めた研究につなげて行きたい。

## 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あります。矢吹先生には，本研究を実施する機会を与えて頂くと共に，国内及び国際学会での論文投稿や発表でのご指導を含め，研究への取組み方，研究者としての心得などを含め終始暖かいご指導とご鞭撻を賜りました。ここに心から深く感謝申し上げます。また，大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻，澤木昌典教授，同，福田知弘准教授には，ご多忙にも関わらず，本論文及び論文発表会において幅広い知見からのご指導と共に貴重なご意見を頂きました。先生方のご指導に対し厚く御礼申し上げます。

私は平成3年に当時の日立プラント建設株式会社（現：株式会社日立製作所）に入社し，プラント施工現場の合理化や効率化に関する研究開発に従事してまいりました。平成20年頃に，当時の上司でありました吉村康史氏を通じて矢吹先生にお会いし，当時研究していましたRFID（Radio Frequency Identification）を施工管理に応用するシステムに関して，ISARC2009（International Symposium on Automation and Robotics in Construction）国際学会への参加や土木学会で発表する経験をしました。その頃から一貫してIT技術の活用で施工を合理化，効率化する事に使命を感じ，社会人，企業人としてより実用的なシステムを目指して開発業務を行ってまいりました。その流れの中で，平成23年頃に矢吹先生の研究等を通じてコンピュータと作業者を繋ぐ新しいヒューマンインタフェース技術としてのARに出会い，これを是非とも自分の開発に取込みたいと考えていた所，平成24年に矢吹先生からお声が掛かり大規模構造物へのARの応用に関する研究をさせて頂く機会を得る事が出来ました。

社内においては入社以来，原子力プラント建設プロジェクトを通じ，施工管理やプロジェクト管理，現場監督ノウハウ等について一からご指導頂いた江幡伸一氏のご協力，プラント運転・保守支援システムの開発においては藤本明弘氏，野口良広氏，岡田臣由氏らに水処理プラントの実証現場の提供，実証へのご協力を頂きました。開発メンバでは日立製作所研究所の佐川浩彦氏，

実証試験においては所属する松戸開発センタの坪倉徹哉氏，浦野雄大氏，瀧隼人氏，更に AR を事業として推進する立場からのご助言を戸井田滋氏に頂きました。また，本研究をご理解頂き社会人留学制度によって大学への入学をご許可頂いた上司の都築浩一氏，吉田忍氏他，ここには書ききれない程，多くの方々にご協力いただきながら研究を遂行する事が出来ました。本論文は本当に多くの皆様のご指導，ご協力を得てはじめてまとめることが出来たものであり，全ての方々に心から深く感謝申し上げます。

最後になりましたが，これまで私の仕事をかけながら支え，応援してくれた家族にも感謝の気持ちを示し，本論文の結びと致します。

平成 29 年 1 月

羽鳥 文雄