

エネルギー科学研究科  
エネルギー社会・環境科学専攻修士論文  
3次元再構成モデル作成のための  
題目： 拡張現実感を用いた  
環境撮影支援システムの開発

指導教員： 下田 宏 教授

氏名： 原園 友規

提出年月日： 平成31年2月13日(水)

## 論文要旨

題目：3次元再構成モデル作成のための拡張現実感を用いた環境撮影支援システムの開発

下田研究室, 原園 友規

### 要旨：

近年、深度情報も取得できるRGB-Dカメラの普及や、Structure from Motion(SfM)やSimultaneous Localization And Mapping(SLAM)等の3次元モデル作成技術の発展により、環境の状況を忠実に反映した3次元再構成モデルを容易に作成できるようになった。この3次元再構成モデルは、一般的には手作業で作成されるCADモデルには含まれていないような細かなケーブル等も含まれており、現場の現在の様子を確認する目的等に利用でき、原子力発電プラントの保守・解体作業の様々な場面でも利用可能である。しかし原子力発電プラント内は複雑かつ入り組んでいるため、注意深く撮影したとしても撮影の漏れが生じやすく、作成された3次元再構成モデルに抜け落ちが生じてしまう。また、実際の保守・解体作業に3次元再構成モデルを用いる際には、現場の作業員の方が自ら現場環境を撮影して、3次元再構成モデルを作成する必要があるため、より簡単に環境を撮影可能にする必要がある。

そこで本研究では、3Dスキャニングの知識のないユーザでも、容易に3次元再構成モデルを作成するために必要な撮影を行うことができる、環境撮影支援システムを開発することを目的とする。本システムでは、環境内の未撮影領域や現在のカメラの移動スピード等の現在の撮影状況を、拡張現実感技術を用いてリアルタイムに提示することで撮影を支援する。未撮影領域の検出には、Truncated Signed Distance Function(TSDF)を拡張したアルゴリズムを用いる。また、現在のカメラの移動スピードは撮影された画像の局所自然特徴を用いて計算する。

本研究では、原子力発電プラントの保守・解体作業に従事する作業員に開発したシステムを使用してもらい、システムを評価した。本評価では、評価者は今回開発したシステムと、現在のカメラ映像を単にタブレットPCの画面上に表示する既存システムの2種類のシステムを用いて、原子力発電プラント内の作業環境を撮影した。評価の指標として、撮影対象とする領域の内、それぞれのシステムで撮影できた割合を求め、両システムを比較した。さらに、開発したシステムの問題点の分析のためにアンケート及びインタビュー評価も行った。その結果、本研究で開発した環境撮影支援システムは、既存の撮影システムと比べて撮影の無駄が少なく、3次元再構成モデル作成に有効な画像を効率的に取得できることがわかった。

今後の課題として、未撮影領域の算出アルゴリズムを最適化する等により処理速度を向上させることや、環境を十分撮影できたかを撮影者自らが判断することを容易にするためにインタフェースを改良すること等が挙げられる。

# 目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 研究の背景	3
2.1.1 3次元モデルを利用した保守・解体作業支援	3
2.1.2 既存の3次元再構成モデル作成技術とその課題	5
2.2 研究の目的と意義	8
第 3 章 環境撮影支援システムの開発	11
3.1 システムの目的	11
3.2 システムの要求仕様	12
3.3 システムの概略設計	13
3.4 未撮影領域の検出と提示	19
3.5 カメラと被写体との距離が近い場合の提示	23
3.6 カメラ移動速度の推定と提示	23
3.7 トラッキングに失敗した状態からの復帰	26
3.8 システムの実装	28
3.8.1 ハードウェア構成	28
3.8.2 ソフトウェア構成	31
3.8.3 開発したシステムの動作例	32
第 4 章 環境撮影支援システムの評価	35
4.1 評価の目的	35
4.2 評価方法	35
4.2.1 評価の概要	35
4.2.2 評価を実施した環境	35
4.2.3 システムの評価者	36
4.2.4 評価の流れ	36

4.2.5	撮影率の算出方法 . . . . .	38
4.2.6	アンケート項目とインタビュー . . . . .	42
4.3	評価の結果及び考察 . . . . .	42
4.3.1	撮影率の結果 . . . . .	42
4.3.2	アンケート及びインタビューの結果 . . . . .	45
4.3.3	考察 . . . . .	49
<b>第 5 章 結論</b>		<b>54</b>
謝 辞		56
参 考 文 献		57
付録 A	本研究で用いたマーカレストラッキング手法	付録 A-1
付録 B	本評価実験で用いた資料	付録 B-1

## 目 次

2.1	原子力発電プラント内部の3次元再構成モデルの例	4
2.2	3次元再構成モデルを用いた保守・解体作業支援の例	4
2.3	回転台を用いてスキャンを行う手法の例 <sup>[7]</sup>	5
2.4	レーザースキャナを用いてスキャンを行う手法の例 <sup>[10]</sup>	6
2.5	ロボットを用いてスキャンを行う手法の例 <sup>[11]</sup>	6
2.6	抜け落ちが存在する3次元再構成モデルの例	7
2.7	上羽らの提案システム <sup>[13]</sup>	8
2.8	Andrewらの提案システムの画面例 <sup>[14]</sup>	9
2.9	Andrewらの提案システムで得られた3次元モデル <sup>[15]</sup>	9
2.10	原子力発電プラント内部の環境の例	10
3.1	環境撮影支援システムの概要	11
3.2	color画像とdepth画像の例	13
3.3	撮影時に色情報と深度情報を取得できる領域	14
3.4	ブラーの生じている画像の例	14
3.5	正しく作成された3次元再構成モデルと形が崩れた3次元再構成モデルの例	15
3.6	プロジェクタを用いた提示手法のイメージ図	15
3.7	3次元再構成モデルをリアルタイム表示する提示手法のイメージ図	16
3.8	拡張現実感技術を用いて未撮影領域を重畳表示する提示手法のイメージ図	16
3.9	拡張現実感技術を用いて花瓶等を重畳表示した例	18
3.10	本システムで行う処理の概要	18
3.11	TSDFの概略	20
3.12	TSDFを用いた各ボクセル領域の分類	20
3.13	未撮影領域と既撮影領域の境界の可視化イメージ	21
3.14	ボクセル領域を分類する処理の流れ	24
3.15	境界を球で可視化する際のイメージ図	25
3.16	物体の背後にある球の可視化イメージ	25

3.17	カメラと被写体との距離が近すぎる場合の提示イメージ図	26
3.18	スライダーでカメラ移動速度を提示するイメージ図	27
3.19	スライダーの色の变化	27
3.20	ロストした際に戻るよう指示する提示のイメージ図	28
3.21	本システムの撮影データと提示映像の処理の流れ	29
3.22	RGB-D カメラの外観	29
3.23	システム使用時の様子	30
3.24	システムを実行してカメラを動かした際の画面例	32
3.25	ロストした際の画面例	33
3.26	カメラと被写体との距離が近い場合の画面例	34
4.1	既存システムの使用時の画面	36
4.2	純水装置室の見取り図	37
4.3	純水装置室内部の様子	37
4.4	本評価実験の流れ	39
4.5	三脚に台座を固定しタブレット PC を設置した様子	40
4.6	撮影率の算出方法の概要	41
4.7	評価者毎のトラッキング成功率	44
4.8	評価者毎の撮影率	44
4.9	評価者 a の撮影データから作成した 3 次元再構成モデルの一部	45
B.1	本評価実験で用いた評価実験の説明資料 (1 ページ目)	付録B-2
B.2	本評価実験で用いた評価実験の説明資料 (2 ページ目)	付録B-3
B.3	本評価実験で用いた評価実験の説明資料 (3 ページ目)	付録B-4
B.4	本評価実験で用いた評価実験の説明資料 (4 ページ目)	付録B-5
B.5	本評価実験で用いた評価実験の説明資料 (5 ページ目)	付録B-6
B.6	本評価実験で用いたシステムの操作説明資料 (1-2 ページ)	付録B-7
B.7	本評価実験で用いたシステムの操作説明資料 (3-4 ページ)	付録B-8
B.8	本評価実験で用いたシステムの操作説明資料 (5-6 ページ)	付録B-9
B.9	本評価実験で用いたシステムの操作説明資料 (7-8 ページ)	付録B-10
B.10	本評価実験で用いたシステムの操作説明資料 (9-10 ページ)	付録B-11
B.11	環境撮影支援システムに関するアンケート (項目 (1)-(8))	付録B-12
B.12	環境撮影支援システムに関するアンケート (項目 (9))	付録B-13

B.13 既存の撮影システムに関するアンケート (項目 (1)-(4)) . . . . .	付録B-14
B.14 既存の撮影システムに関するアンケート (項目 (5)) . . . . .	付録B-15

## 表 目 次

3.1	本システムで用いたタブレット PC の仕様 . . . . .	30
3.2	本システムで用いた RGB-D カメラの仕様 <sup>[17]</sup> . . . . .	30
3.3	本システムで用いたルータの仕様 . . . . .	31
3.4	本システムで用いた高性能 PC の仕様 . . . . .	31
3.5	本システムで用いた RGB-D カメラの解像度 . . . . .	31
4.1	評価者と使用したシステムの順番の対応 . . . . .	38
4.2	環境撮影支援システムに関するアンケート項目 . . . . .	42
4.3	既存システムに関するアンケート項目 . . . . .	43
4.4	各撮影試行の撮影枚数と撮影に要した時間 . . . . .	43
4.5	各撮影試行の有効画像数と撮影率 . . . . .	43
4.6	環境撮影支援システムに関するアンケート結果 . . . . .	46
4.7	環境撮影支援システムに関する自由記述欄への回答 . . . . .	46
4.8	評価者 a の環境撮影支援システムに関するアンケート結果及び回答理由	47
4.9	評価者 b の環境撮影支援システムに関するアンケート結果及び回答理由	47
4.10	評価者 c の環境撮影支援システムに関するアンケート結果及び回答理由	48
4.11	評価者 d の環境撮影支援システムに関するアンケート結果及び回答理由	48
4.12	既存システムに関するアンケート結果 . . . . .	49
4.13	既存システムに関する自由記述欄への回答 . . . . .	49
4.14	評価者 a の既存システムに関するアンケート結果及び回答理由 . . . . .	50
4.15	評価者 b の既存システムに関するアンケート結果及び回答理由 . . . . .	50
4.16	評価者 c の既存システムに関するアンケート結果及び回答理由 . . . . .	50
4.17	評価者 d の既存システムに関するアンケート結果及び回答理由 . . . . .	50



# 第 1 章 序論

日本は今まで、エネルギーのベストミックスの観点から、原子力発電を重要なベースロード電源と位置付け、多くの原子力発電プラントを建設してきた。2011年の福島での事故により、国内の全ての原子力発電プラントは運転を停止した。その後、再稼働をしたプラントもあるが、未だ多くの原子力発電プラントは運転を停止したままであり、既に廃炉を決定したプラントもいくつか存在する<sup>[1]</sup>。廃炉が決定した原子力発電プラントは解体作業を行う必要がある。また、稼働中のプラントや運転を停止しているプラントであっても、設備維持のための保守作業が必要である。

原子力発電プラントの保守・解体作業では、重大な事故を防いだり、作業員の被ばく量を低減するため、安全かつ効率的に作業を行う必要がある。そのため、安全性と効率の向上を目的とした作業支援システムの開発が行われている。現場環境の3次元モデルを用いた支援システムは、2次元の図面では理解しづらい作業環境の情報を直観的に伝えることができ、作業時のミスや作業に要する時間が減らすことができるため、保守・解体作業の安全性と効率を向上できると期待されている。

このように、現場環境の3次元モデルは原子力発電プラントの保守・解体作業において有用であると考えられる。近年では、画像だけでなく深度情報も取得できるRGB-Dカメラの普及や、Structure from Motion(SfM)やSimultaneous Localization And Mapping(SLAM)等の撮影データから3次元モデルを作成する技術の発展によって、より手軽に環境の様子を反映(再構成)した3次元再構成モデルが作成できるようになった。撮影データから3次元再構成モデルを作成する際、撮影した箇所しかモデル化されないため、作業環境の撮影を行う際には対象を抜け落ちなく撮影する必要がある。特に、原子力発電プラント内は広域で複雑かつ入り組んでいるため、撮影漏れが生じやすく、作成される3次元再構成モデルに抜け落ちが生じてしまうことがある。RGB-Dカメラを用いて3次元再構成モデルを作成する手法や3次元再構成モデル作成のための撮影を支援する手法はいくつか存在しているが、原子力発電プラントで使用する場合に適した撮影支援手法は開発されていない。

そこで本研究では、抜け落ちのない3次元再構成モデルを作成可能にするための環境撮影支援システムを開発することを目的とする。

本論文は、本章の序論を含め、全5章で構成される。第2章では、本研究の背景と既

存の3次元モデルの作成手法，本研究の目的と意義について述べる．第3章では，開発したシステムの概要について述べる．第4章では，開発したシステムの性能を評価するために実施した評価実験について述べる．第5章では，本研究の結果と今後の課題点について述べる．

## 第 2 章 研究の背景と目的

### 2.1 研究の背景

2.1 節では、3次元モデルを利用した保守・解体作業支援についてと、既存の3次元再構成モデルの作成技術について述べる。

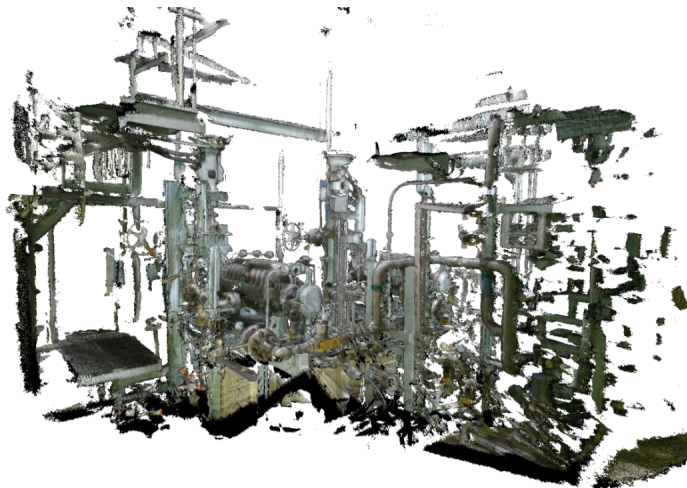
#### 2.1.1 3次元モデルを利用した保守・解体作業支援

原子力発電プラントでは、保守・解体作業を高度化することを目的として、PCを用いたシステムが開発・導入されている。近年では、これまでに蓄積された保守・解体作業に関する技術の体系化を図って、3D-Computer Aided Design (CAD) モデルを用いた保守管理支援システムが開発されている<sup>[2]</sup>。作業環境の3次元モデルを用いることで、紙の設計書等とは異なり、プラント内部の設備の配置や構造を様々な方向から自由に確認できる。また、系統や材質等の情報を3次元モデルの各設備と紐づけることで、視覚的にこれらの情報と設備との関係をユーザに提示でき、直観的に情報を記録・共有できる。しかし、一般的に手作業で作成される3D-CADモデルはケーブルや細かい配管等が含まれておらず、さらに色や見た目に関しては実際の設備を再現していないため、環境の様子を完全には反映していない。

その一方で、近年、ピクセル毎に被計測対象(被写体)までの距離(深度情報)も取得できる、レーザースキャナやRGB-Dカメラ等の機器によって、3次元再構成モデルと呼ばれる、環境の様子を忠実に反映した(再構成した)3次元モデルが作成できるようになった<sup>[3][4]</sup>。この3次元再構成モデルは、レーザースキャナやRGB-Dカメラを用いて撮影された、画像と深度情報から作成される。原子力発電プラント内部を撮影して得られる3次元再構成モデルは、図2.1に示すように、3D-CADモデルには含まれていない細かなケーブル等や経年化による外見の変化まで忠実に反映している、頻繁に設備が更新される場合でも再度撮影を行うことで最新の状況を反映させることができる等の利点がある。このような3次元再構成モデルを一度現場を訪問して作成しておくことで、現場に向かうことなく現場の様子を繰り返し確認できる。これにより、現場の状況確認のために現場に向かう必要がなくなり、作業員の被ばく量や手間を減らすことができる。また、図2.2に示すような、作業環境の3次元再構成モデルの設備上にタ

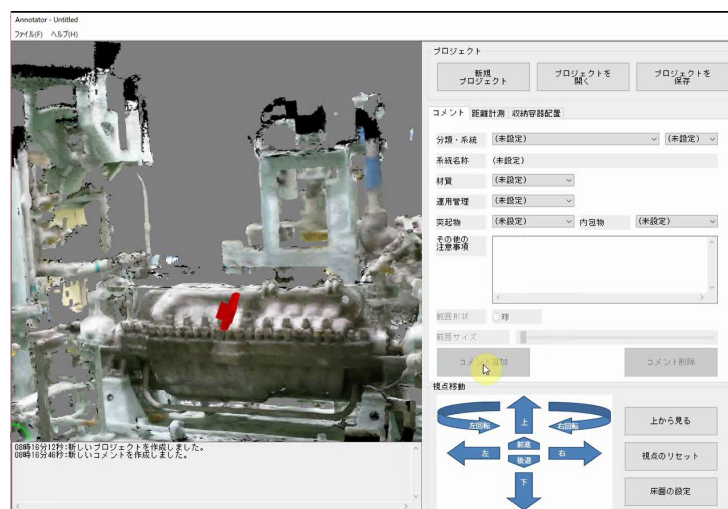
グを用いて情報を付加し、作業時に参照可能にするシステムは、現場での滞在時間の短縮や保守・解体作業時のミスの低減に有効であると期待されている [5]。

以上のように、3次元モデル、特に3次元再構成モデルは原子力発電プラントの保守・解体作業の安全性や効率の向上に有効である。



Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 2.1: 原子力発電プラント内部の3次元再構成モデルの例



Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 2.2: 3次元再構成モデルを用いた保守・解体作業支援の例

## 2.1.2 既存の3次元再構成モデル作成技術とその課題

3次元再構成モデルは、レーザースキャナやカメラを用いて環境を撮影して得られる、複数の画像と深度情報のペアから成る撮影データから作成される。Structure from Motion(SfM)<sup>[6]</sup>等の手法を用いて、各画像を撮影した位置・姿勢を推定し、その撮影した位置・姿勢と画像及び深度情報を用いることで、撮影を行った対象物の再構成を行う。以下では、既存の3次元再構成モデルの作成技術とそれらの課題について述べる。

実世界上の物体を撮影して3次元再構成モデルを作成する技術として、図2.3に示すように対象物を回転台の上に載せ、スキャナが自動的に撮影を行う手法<sup>[7][8]</sup>、図2.4に示すようにレーザースキャナを用いて、スキャナ自体が回転し撮影を行う手法<sup>[9][10]</sup>、図2.5に示すようにロボットやドローン、ハンドヘルドデバイス等を用いてスキャナを動かし撮影を行う手法<sup>[11][12][3][4]</sup>が挙げられる。しかし、それぞれの手法に欠点が存在する。

回転台の上に載せ、スキャナが自動的に撮影を行うものは、回転台に載せることができる大きさの物体しかスキャンできず、本研究で対象とするような、原子力発電プラント内部等の広域な対象はスキャンできない。



図 2.3: 回転台を用いてスキャンを行う手法の例<sup>[7]</sup>

レーザースキャナを用いた手法はデバイスが高価である。また、他の設備の背後に存在する設備を撮影するためには、レーザースキャナを複数箇所配置したり、複数回撮影を行う必要があり、手間やコストがかかってしまう。

自走ロボットにカメラ等を搭載して撮影を行う手法に関しては、装置のコストが高い。また、多くのロボットは移動する床面が平面である必要があり、かつ狭い箇所に入り込んで撮影することが難しい。また、様々な方向や高さから撮影するためには装

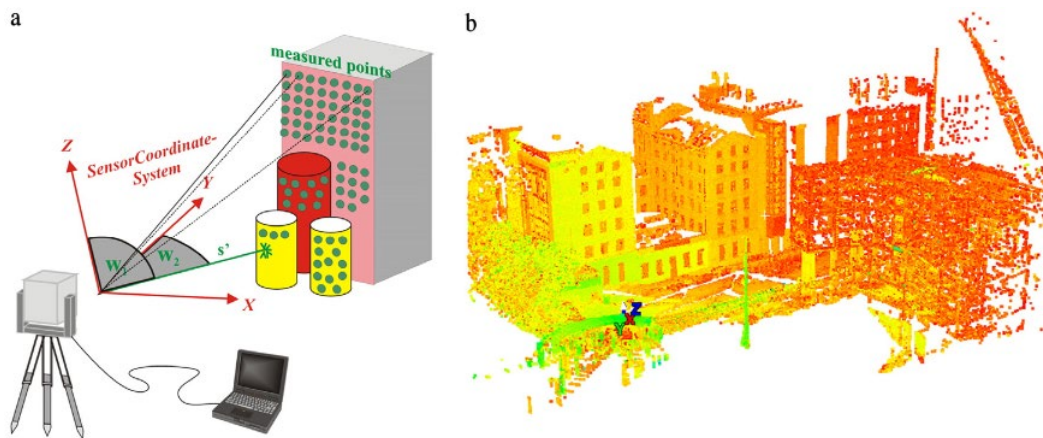


図 2.4: レーザースキャナを用いてスキャンを行う手法の例<sup>[10]</sup>

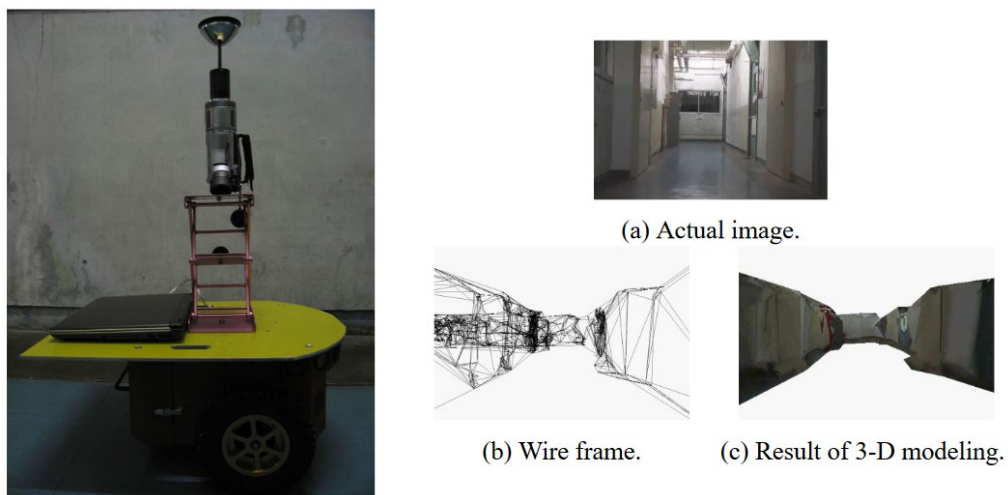


図 2.5: ロボットを用いてスキャンを行う手法の例<sup>[11]</sup>

置に工夫が必要である。そのため、自走ロボットを用いた手法では、原子力発電プラントのような複雑かつ入り組んでいる環境を抜け落ちなく撮影することは難しい。

ドローンを用いた手法は、ドローンによって生じる風によって、環境内の放射化された粉塵が環境中に舞ってしまう可能性がある。また、使用時にドローンと作業員が接触する可能性があり、安全性の確保が別途必要になるため、原子力発電プラント内での撮影には適していない。

ユーザがハンドヘルドデバイスを用いて撮影を行う手法に関しては、ユーザが自由にカメラを動かして撮影を行うことができる。しかし、抜け落ち無く撮影を行うためには、まだ撮影できていない部分(未撮影領域)をユーザ自身が推測しながら撮影を行う必要がある。未撮影領域が残ったまま撮影を終了してモデル化を行った場合、図2.6に示すように穴の開いた、抜け落ちのある3次元再構成モデルになってしまう可能性がある。この課題に対して上羽らは図2.7に示すような、未撮影領域を推定するアルゴリズムを用いたナビゲーション型の3D スキャニングシステムを提案している<sup>[13]</sup>。このシステムは、撮影対象領域内を一定の立方体領域に分割し、各立方体領域が未撮影領域であるかを推定し、未撮影領域をユーザに提示する。これによって、様々な形状の撮影対象に対して容易かつ素早いスキャニングを実現している。しかし、この手法は小さい物体を対象としており、原子力発電プラント内部のような広域な環境を撮影する場合には適用できない。

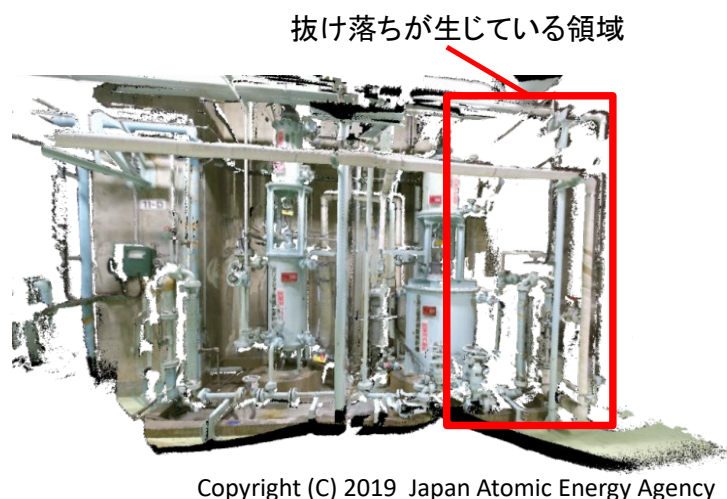


図 2.6: 抜け落ちが存在する 3次元再構成モデルの例

また、Andrew らは広域な屋内環境に対して、図2.8に示すように撮影時に未撮影領域を推定しユーザに提示することによって、効率的に撮影できるようにするモデリン

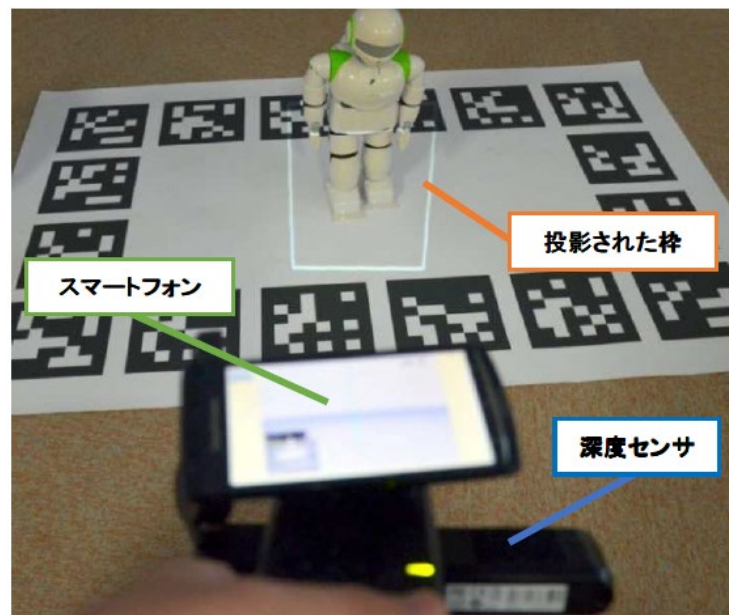


図 2.7: 上羽らの提案システム [13]

グナビゲーションシステムを提案している [14][15]。このシステムは、既に行ったことのある箇所や既に探索した領域等を 2 次元マップを用いてディスプレイ上に表示することで、次にどこに行き撮影すべきかをユーザに提示する。これによって、図 2.9 に示すような VR 上で確認可能な 3 次元モデルを作成するための効率的な撮影を実現している。しかし、この手法は高さ方向に関するナビゲーションを行っておらず、高い所や足元に存在する配管等の設備を撮影し損ねる可能性がある。また 2 次元マップからでは、未撮影領域の詳細な 3 次元位置を理解することは難しいと考えられる。原子力発電プラント内部は図 2.10 に示すように複雑かつ入り組んでいるため、撮影を行った際には、未撮影領域が細かく点在すると予想される。そのため、未撮影領域の詳細な 3 次元位置が把握できていないと、抜け落ちの無い撮影を行うことができないと考えられる。

## 2.2 研究の目的と意義

本研究では、原子力発電プラントのような広域かつ入り組んだ環境の 3 次元再構成モデル作成を行う際、3D スキャニングに関する専門知識を有していない人が使用しても隅々まで抜け落ち無く撮影できる、環境撮影支援システムを開発することを目的とする。具体的には、環境を撮影する際、未撮影領域等の現在の状況をユーザにリアル





図 2.8: Andrew らの提案システムの画面例 [14]

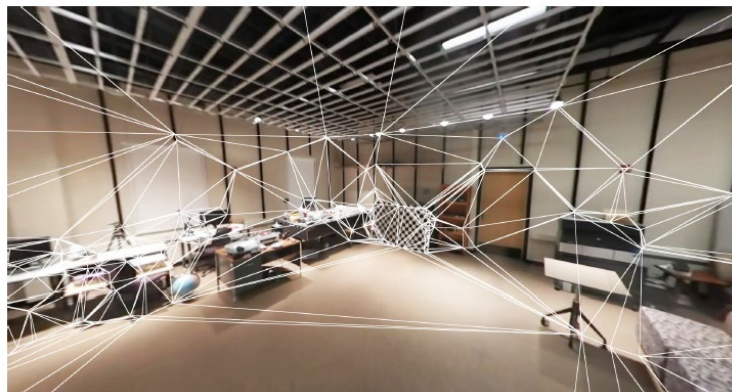


図 2.9: Andrew らの提案システムで得られた 3 次元モデル [15]



Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 2.10: 原子力発電プラント内部の環境の例

タイムに提示することで撮影を支援する。ただし、本研究は撮影の支援のみを対象とし、撮影して得られたデータから3次元再構成モデルを作成する際には既存の手法を用いることとする。

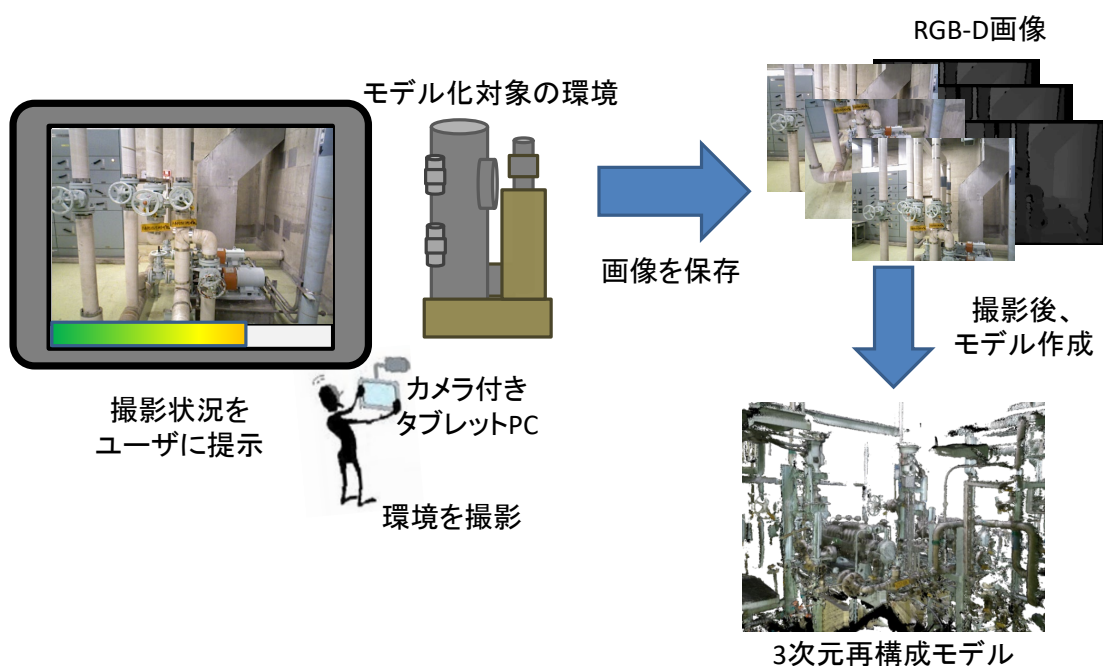
2.1節で述べたように、リアルタイムに未撮影領域を提示して3Dスキャンを支援する研究や、広域な環境を撮影し3次元再構成モデルを作成する研究は複数存在している。しかし、プラント内部の様な複雑かつ入り組んでいる広域な環境に対して、リアルタイムに未撮影領域のナビゲーションを行う撮影支援手法に関する研究はされていない。本研究で開発したシステムを使用することで、3Dスキャンの専門知識がない人でも容易に抜け落ちの無い3次元再構成モデルが作成できるようになる。また、その作成された3次元再構成モデルを様々な保守・解体作業に利用することで、作業の更なる安全性や効率を向上できると期待される。

## 第 3 章 環境撮影支援システムの開発

本章では、本研究で提案する環境撮影支援システムについて述べる。本システムの目的・要求仕様・概略設計について述べた後、ユーザに提示する撮影状況の計算と可視化方法について述べ、最後に実装したシステムについて述べる。

### 3.1 システムの目的

本システムは、3D スキャニングに関する専門知識を持たないユーザでも、広域で複雑な環境を容易に抜け落ちなく撮影できるようにすることを目的とする。本システムでは、ユーザに未撮影領域やカメラの移動速度等の現在の撮影状況を提示することで撮影を支援する。本システムの概略を図 3.1 に示す。ただし、本研究では、撮影して得られた RGB-D 画像から 3次元再構成モデルを作成する処理は既存手法を使用する。



Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 3.1: 環境撮影支援システムの概要

## 3.2 システムの要求仕様

環境を撮影する手法は様々なものが存在しているが、2.1.2項で述べたように、多くの手法は原子力発電プラント内部を撮影するには適していない。そのため、環境内の入り組んだ箇所も撮影できる、ユーザが小型のRGB-Dカメラを手を持って環境を撮影する手法を本システムでは採用する。この手法を用いることで、配管等の設備が入り組んでいる箇所も様々な位置・方向から撮影できる。

2.1節で述べたように、3次元再構成モデルはレーザースキャナやRGB-Dカメラ等によって取得される、図3.2に示すような色情報と深度情報から作成される。しかし、環境をある一方向のみから撮影した場合、物体の背後に隠れている領域(オクルージョン領域)は撮影されず、それらの領域の色情報・深度情報が得られない。その結果、一部が抜け落ちた3次元再構成モデルになってしまう。原子力発電プラント内部は複雑かつ入り組んでいるため、どこが撮影されていない領域(以下、未撮影領域)であるかを常に把握しながら撮影することは困難である。また図3.3に示すように、色情報とは異なり、RGB-Dカメラの深度センサによって得られる深度情報の

距離には範囲制限がある。そのため、このことを知らないユーザが、近すぎたり遠すぎたりする位置から環境を撮影した場合についても、深度情報が取得できず抜け落ちのある3次元再構成モデルになってしまう。特に、普段の生活で使用する携帯電話等に搭載されている、色のみを取得するカメラとは異なり、被写体との距離が近すぎる場合には適切に撮影できない、という点は初めて使うユーザには理解しづらい。そのため、撮影位置が被写体から近すぎる場合にはユーザに近すぎることを知らせる必要がある。

また、本研究によって得られる3次元再構成モデルは、原子力発電プラントにおける保守・解体作業に用いることを想定している。そのため、得られる3次元再構成モデルは、現場の様子が確認できるものである必要がある。3次元再構成モデルを作成する際、カメラを高速に動かしてしまい、図3.4に示すような手ブレ(ブラー)が生じている画像が含まれていると、撮影した位置の推定が正しく行えず、図3.5に示すような形の崩れた3次元再構成モデルになってしまう。そのため撮影を行う際には、適切な速度を保ちながらカメラを動かす必要がある。適切な速度をユーザが理解するためには、現在の速度が許容できる速度に対してどの程度であるかを提示する必要がある。そのため本システムでは、現在のカメラの移動速度と許容できる速度の上限を提示する。

以上の点より、本システムでは撮影状況として、以下の3つの情報をユーザに提示

することとした。

- 未撮影領域
- カメラと被写体との距離が近いかどうか
- 現在のカメラの移動速度と許容できる速度の上限



color画像



depth画像

Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 3.2: color 画像と depth 画像の例

### 3.3 システムの概略設計

3.2節で述べた、未撮影領域等の現在の撮影状況をユーザに提示するにあたり、いくつかの提示方法が候補として考えられる。例えば、図3.6に示すような、環境の複数箇所にプロジェクタを配置し、環境内の未撮影領域に光を照射して提示する手法、図3.7に示すような、リアルタイムに3次元再構成モデルを作成し、その時点での3次元再構成モデルをタブレットPCの画面上に表示する手法、図3.8に示すような、拡張現実感 (Augmented Reality; AR) 技術を用いてタブレットPCに表示されたカメラ映像上に未撮影領域を重畳表示する手法等が考えられる。

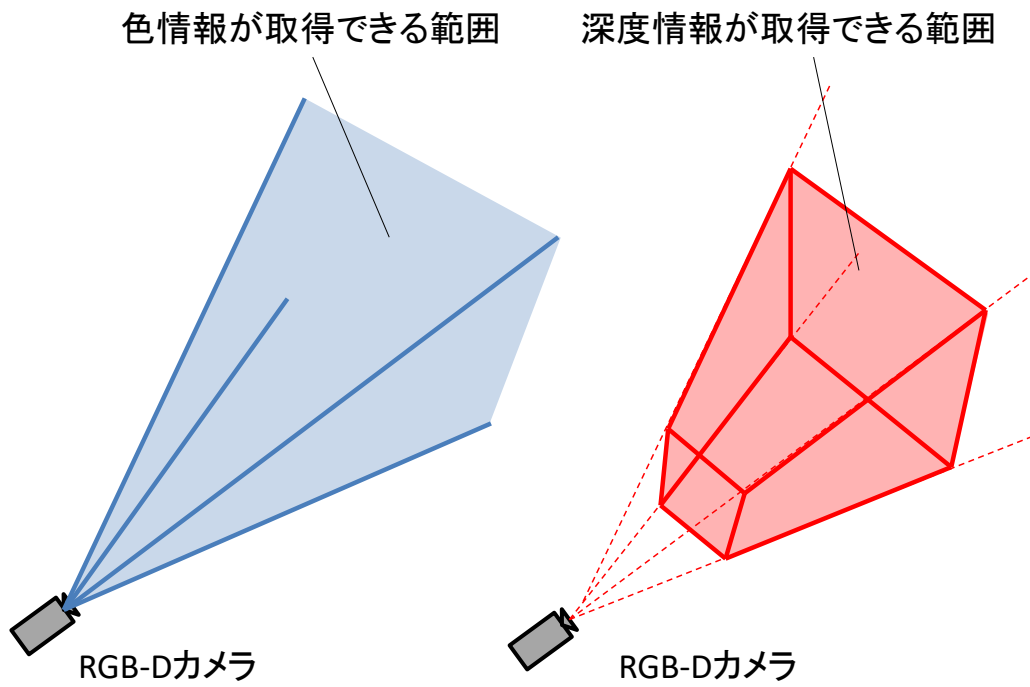
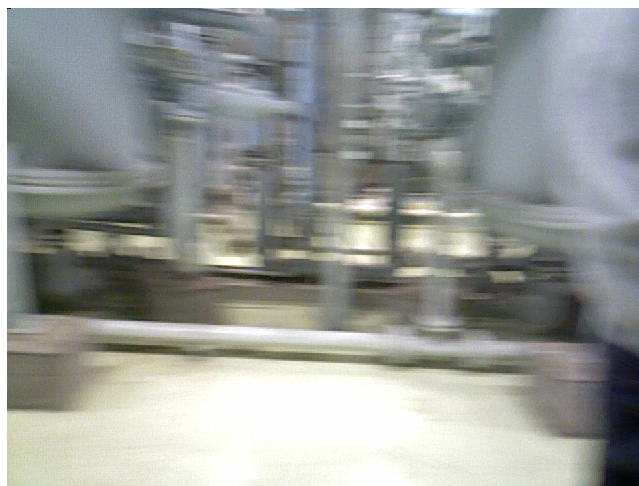
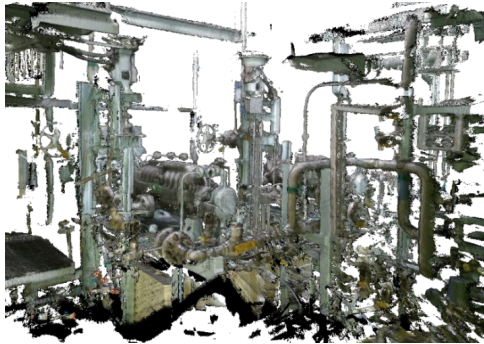


図 3.3: 撮影時に色情報と深度情報を取得できる領域

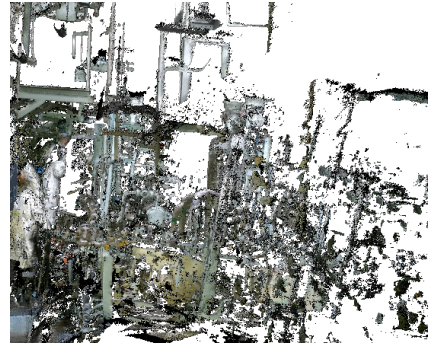


Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 3.4: ブラーの生じている画像の例



カメラを動かすスピードに注意して撮影した再構成モデル



カメラを動かすスピードに注意せず撮影した再構成モデル

Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 3.5: 正しく作成された 3 次元再構成モデルと形が崩れた 3 次元再構成モデルの例

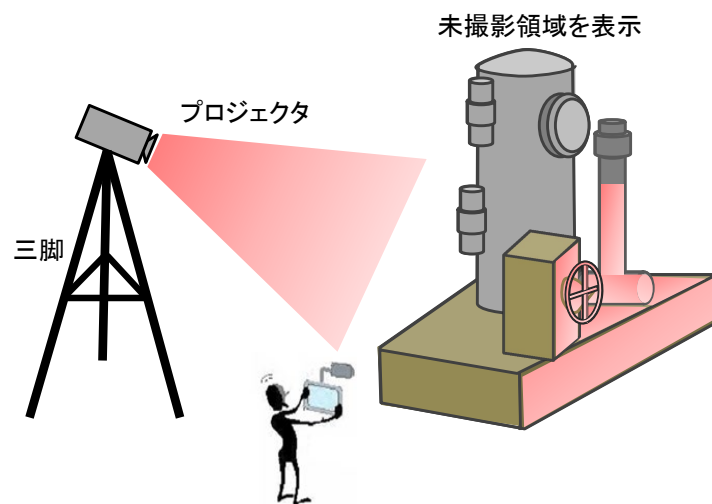
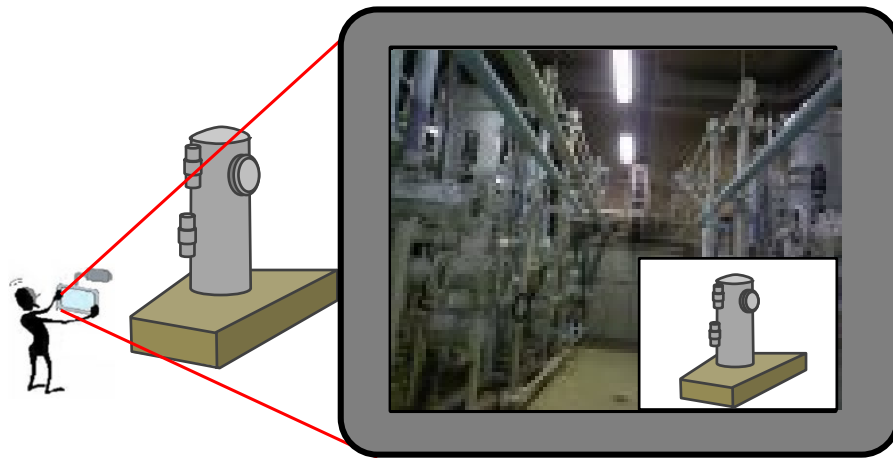


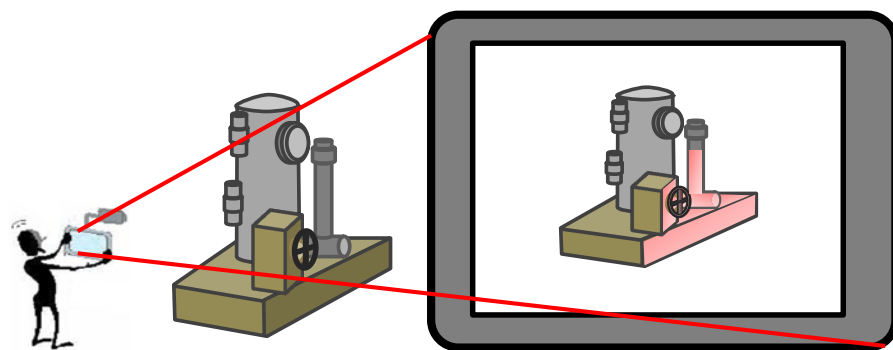
図 3.6: プロジェクタを用いた提示手法のイメージ図



現時点での3次元再構成モデルを表示

Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 3.7: 3次元再構成モデルをリアルタイム表示する提示手法のイメージ図



拡張現実感技術を用いて  
未撮影領域を重畳表示

図 3.8: 拡張現実感技術を用いて未撮影領域を重畳表示する提示手法のイメージ図



プロジェクタを配置して現実空間の未撮影領域に光を照射することでユーザに提示する手法は、環境の未撮影領域自体を光で強調表示するため、ユーザが直観的に未撮影領域の位置を理解できる。しかし、事前に複数のプロジェクタを環境の隅々まで照射できるような位置に配置する必要があるため、手間が掛かる。特に、原子力発電プラント内のような複雑かつ入り組んでいる環境では撮影の度にどこに配置すべきか検討する必要があり、初めて使うユーザには難しい。また、未撮影領域そのものの上に光を照射してユーザに知らせる方法は、その未撮影領域が他の物体の影に位置する場合などに、ユーザが気付きにくいという問題もある。

タブレット PC の画面上に現時点での 3 次元再構成モデルを表示する手法は、今回のような広域な環境を対象とした場合、3 次元再構成モデルの作成に時間が掛かってしまうため、リアルタイムで作成、提示することは難しい。また表示された 3 次元再構成モデルから未撮影領域を見つける際には、作成されたモデルと現実空間の様子を見比べて判断する必要がある。その際、撮影を行いながら、タッチ操作等でモデルを確認する視点を変更するのは難しい。また、周囲の視点からでは、モデルの入り組んだ箇所が存在している細かな抜け落ちを確認するのは難しい。

拡張現実感技術を用いた手法は、撮影しているカメラ映像の上に未撮影領域を位置を合わせて重畳表示して提示できるため、直観的に未撮影領域の位置を理解できる。また、未撮影領域が他の物体の影に位置する場合でも、拡張現実感を用いれば、ユーザが気付きやすい形で提示できる。技術的な実現可能性の観点からも、装置の設置等の、拡張現実感技術を使用する際に複雑で手間のかかる事前作業を必要としない手法も近年発展しており、ユーザが事前準備無しに使用できるようになった。よって本システムでは拡張現実感技術を用いた手法を採用する。

拡張現実感技術とは、現実空間にコンピュータで生成した情報を付加し、ユーザに様々な情報を提示する技術である。拡張現実感技術の例を図 3.9 に示す。図 3.9 では、現実には存在しない花瓶や椅子等の CG を、実在する机の位置に合わせて重畳表示しており、あたかも花瓶や椅子が存在しているかのように見せている。

本システムでは、提示すべき現在の撮影状況を RGB-D カメラで撮影した color 画像に拡張現実感技術を用いて重畳表示を行いユーザに提示する。本システムで行う処理の概要を図 3.10 に示す。提示する撮影状況の検出と可視化の方法については次節以降に述べる。

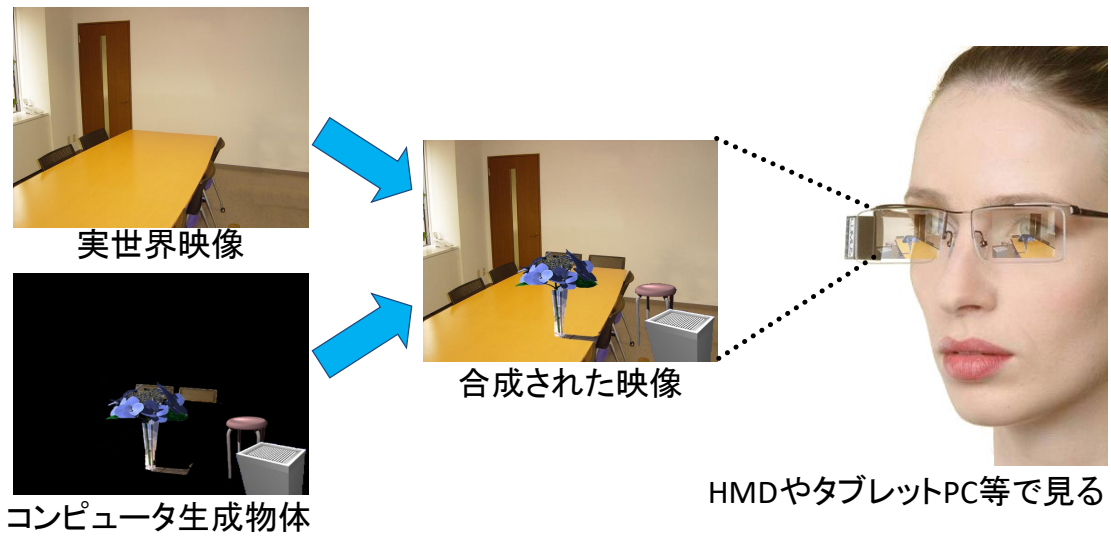


図 3.9: 拡張現実感技術を用いて花瓶等を重畳表示した例

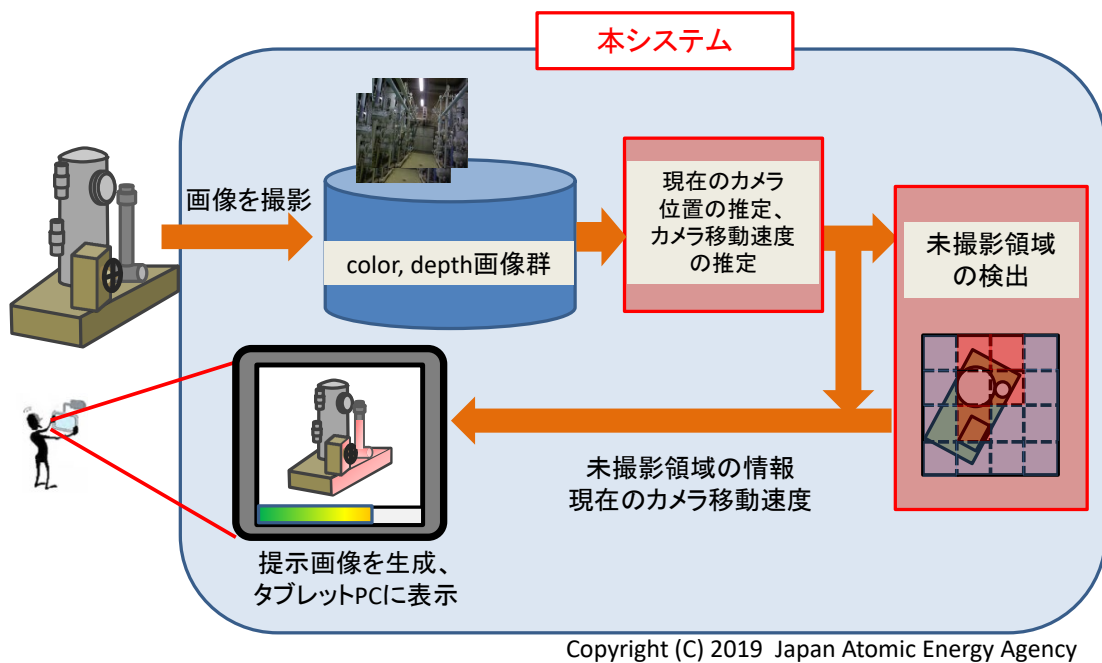


図 3.10: 本システムで行う処理の概要

### 3.4 未撮影領域の検出と提示

撮影環境時にリアルタイムに未撮影領域を検出するために、本研究ではTSDF(Truncated Signed Distance Function)<sup>[16]</sup>を拡張したアルゴリズムを用いる。TSDFとは3次元再構成モデルを作成する際に用いられるアルゴリズムの一つで、複数の視点から取得された深度情報から撮影環境の3次元深度マップを作成するアルゴリズムであり、深度情報や視点位置の推測結果に含まれるノイズに対して頑健であるという特徴を持つ。TSDFでは、図3.11に示すように撮影環境を一定サイズの立方体(ボクセル)領域に分割し、撮影して得られた深度情報を基にして、ボクセルから一番近い物体表面との距離を計算して各ボクセルに格納する(ただし、ボクセルに格納される値には上限が設けられ、上限より大きな値は切り捨て(Truncated)られる)。物体の外部に位置するボクセルには正の値が、床の下や壁の奥、物体の内部等に位置するボクセルには負の値が格納される。また、一度も撮影されていないボクセルには初期値(多くの場合、負の大きな値)が格納される。このとき、 $i+1$ 番目のフレームでボクセル $x$ に格納される値 $D_{i+1}(x)$ は、次式に示すように、 $i$ 番目のフレームでボクセル $x$ に格納されていた値 $D_i(x)$ 、 $i+1$ 番目のフレームでのボクセル $x$ から一番近い物体との距離 $d_{i+1}(x)$ を用いて重み付けされた値で更新される<sup>[16]</sup>。

$$D_{i+1}(x) = \frac{W_i(x)D_i(x) + w_{i+1}(x)d_{i+1}(x)}{W_i(x) + w_{i+1}(x)} \quad (3.1)$$

上式のボクセル $x$ の過去のフレームに対する重み付け係数 $W_i(x)$ と新規のフレームに対する重み付け係数 $w_{i+1}(x)$ の関係は次式で表される。また、重み付け係数の初期値は0で、多くの場合、 $w_{i+1}(x) = 1$ である。

$$W_{i+1}(x) = W_i(x) + w_{i+1}(x) \quad (3.2)$$

撮影位置に応じた各ボクセルの値の更新を、毎フレーム撮影するごとに繰り返す。負の値が格納されたボクセルと正の値が格納されたボクセルの境界が、物体の表面であると期待されるため、図3.12に示すように、値が0となる境界面を求めることにより、3次元再構成モデルを作成できる。

上で述べたように、TSDFでは物体の外部に位置するボクセルには正の値が、床の下や壁の奥、物体の内部等に位置するボクセルには負の値が格納されるが、正の値が格納されるボクセルは、一度でも物体表面とカメラの間に位置したことがあるボクセルであり、これはすなわち、正の値が格納されている領域は既に撮影され、かつ物体が

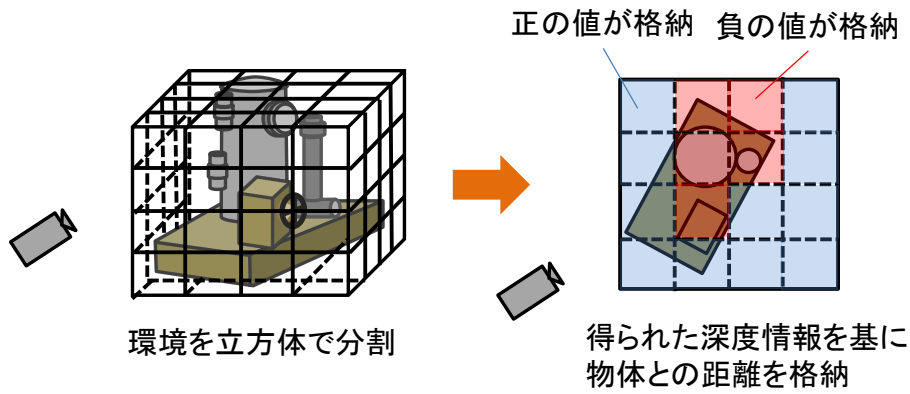


図 3.11: TSDF の概略

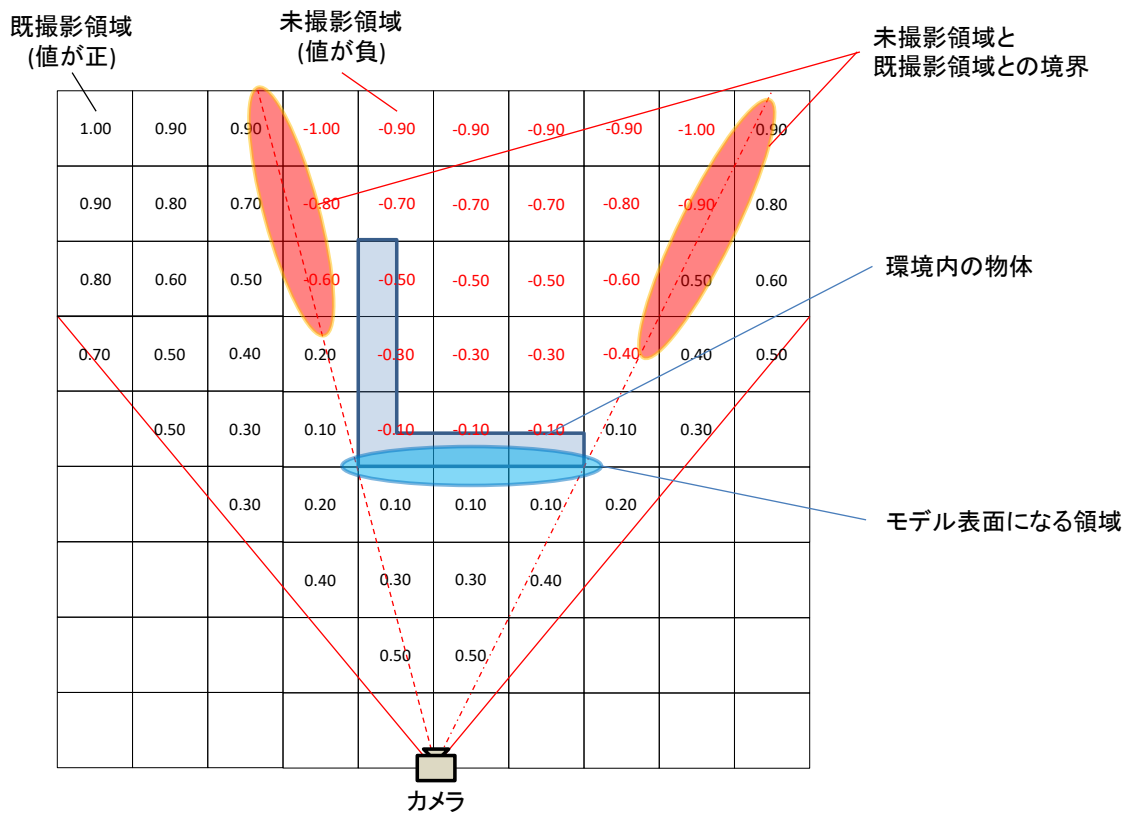


図 3.12: TSDF を用いた各ボクセル領域の分類

存在しない領域であることを意味する。このことから、負の値が格納されている領域と値が一度も更新されていない領域、すなわち格納された値が非正である領域が、未撮影領域であることがわかる。しかし、これらすべてが本システムで提示すべき未撮影領域ではない。この非正であるボクセルの中には、床の下や壁の奥等の、撮影しようとしても撮影できない領域も含まれている。本システムでは、このような撮影できない領域は、ユーザの混乱を防ぐため表示しない設計にする。また、本システムでは未撮影領域を検出しユーザに提示するが、撮影を開始した直後は周辺の領域のほぼ全てが未撮影領域となるため、未撮影領域全てを拡張現実感技術を用いてそのまま可視化すると画面が煩雑になってしまうと考えられる。特に本システムでは、撮影対象とする領域の範囲を事前に設定しないため、未撮影領域が無制限まで存在している。そこで本研究では、未撮影領域を撮影する際、未撮影領域と既撮影領域との境界部分から撮影されていくことに着目し、図 3.13 に示すように、未撮影領域と既撮影領域との境界部分のみを可視化することにより、画面が煩雑になることを抑制する。これにより、未撮影領域の中で、どの領域から撮影をするべきかが、ユーザにとってわかりやすくなると期待される。

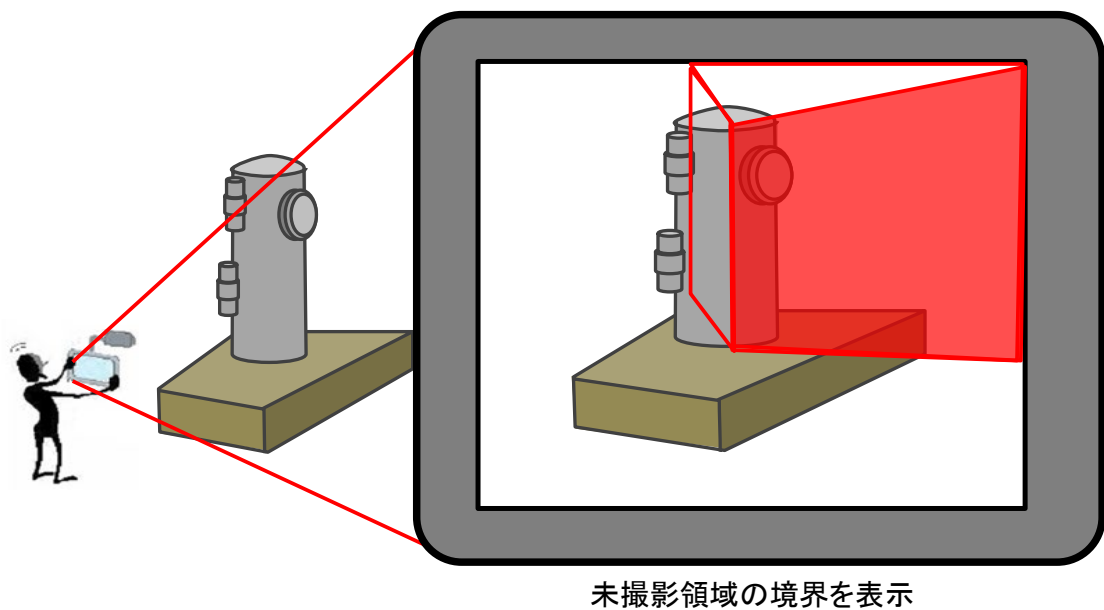


図 3.13: 未撮影領域と既撮影領域の境界の可視化イメージ

以下では、未撮影領域と既撮影領域との境界部分を検出するアルゴリズムの詳細と提示方法について述べる。

本システムではボクセルの値と隣接ボクセルとの値の絶対値から、各ボクセル領域

を以下の4種類に分類する.

- 既撮影領域
- 未撮影領域と既撮影領域との境界となっている未撮影領域
- モデル化した際にモデル表面となる未撮影領域
- 上記以外の未撮影領域

分類を行う際の処理の流れを図3.14に示す. 撮影によって深度情報が取得されTSDFで各ボクセルの値を更新する毎に, 各ボクセルの値を順次確認していく. 全ボクセルの内, 正の値が格納されているボクセルを対象に, そのボクセルに面で隣接している6つのボクセルの値の正負を確認する. ここで, 隣接しているボクセルの中で値が正であるボクセルを既撮影領域として分類する. 次に, 隣接するボクセルの値が負であるとき, その隣接ボクセルとの差の絶対値を計算し, 閾値との大小を確認する. 閾値は, モデル化した際にモデル表面にならず穴が開いてしまう値である, ボクセルの1辺の長さの $2\sqrt{3}$ 倍とした. 差の絶対値が閾値よりも大きい場合はその隣接ボクセルを未撮影領域と既撮影領域との境界となっている領域, 閾値よりも小さい場合はモデル化した際にモデル表面となる領域と分類する. そして, すべてのボクセルの処理を終了した際にまだ分類されていないボクセルを未撮影領域と分類する. 本システムでは, 撮影して得られた深度情報のノイズによって, 過去に既撮影領域と分類されたボクセル領域が未撮影領域と分類されるのを防ぐために, (3.1)式で $D_i(x)$ が正の時に $D_{i+1}(x)$ が負となるような更新を行わないようにする.

上で述べた処理によって得られた, 未撮影領域と既撮影領域との境界を画面上に表示する際, 図3.13に示すように平面として表示すると, 境界となっているボクセルがユーザの視点から見て多重に重なっている場合に, そのボクセル同士の前後関係が理解しづらい. また, 平面として表示すると, カメラ視線がその画面上に位置した場合にその平面が視認しづらくなってしまう. そのため本システムでは, 可視化の際, 図3.15に示すように, その境界と分類された各ボクセルの, 画面上の対応した位置に球を重畳表示する. 球を描画することで, 重畳表示された球の大きさから, 球同士の前後関係を認識できるようになると期待される. また, 球と現実空間の設備や壁との前後関係も認識できるようにするために, 現実空間上の物体の背後に存在する球は図3.16に示すように半透明で表示する. 球が物体の背後に存在するかどうかは, カメラ位置

から球との距離と、depth 画像から得られる対応ピクセルのカメラ位置から被写体の距離との大小で判別する。

### 3.5 カメラと被写体との距離が近い場合の提示

カメラと被写体との距離の判定には、撮影して得られる depth 画像を用いる。depth 画像には各ピクセル毎に被写体との距離が格納されている。本システムでは、画像上のピクセルを等間隔にサンプリングし、距離が閾値  $l_1$  以下のピクセルの割合が閾値  $l_2$  を超えた場合、図 3.17 に示すように、画面下部に被写体とカメラとの距離が近すぎる旨をユーザに提示し、距離をとるよう注意する。

### 3.6 カメラ移動速度の推定と提示

カメラの移動速度を推定する方法には、慣性センサを用いる方法等、様々な方法が考えられるが、本研究では、システムのハードウェアを簡略化するために、撮影して得られる color 画像と depth 画像のみを用いて推定する。環境内には自然特徴点と呼ばれる、環境に存在する配管等の設備の角の点や輝度の変化が大きい点が存在している。本システムでは、この環境内の自然特徴を用いてカメラの移動速度を推定する。

以下、本システムでカメラの移動速度を推定する方法について述べる。まず、撮影して得られた color 画像から自然特徴点を抽出し、前フレームで抽出された自然特徴点と特徴点マッチングを行う。次に、特徴点マッチングによってペアと認識された特徴点同士の画像上でのピクセルの座標の差(移動量)を計算し、過去5フレーム分の移動量の平均を求めて、本システムで表示するカメラ移動速度とする。

本システムでは、このカメラ移動速度を、図 3.18 に示すようにスライダーを用いてユーザに提示する。スライダーを用いることで、ゲージの右端を許容できる速度の上限としたときに、現在の速度が許容値と比べてどの程度の割合であるかを直観的に理解できるようになると期待できる。本システムでは、事前調査で撮影を行った際に許容できたおよその速度を上限値とし、その上限値に対する現在のカメラ移動速度の割合をスライダーで表示する。また、その割合に応じて、ユーザが移動速度をどのように変化させるべきかを理解しやすくするために、値に応じてスライダーの色を緑、黄、赤と変化させて表示する。本システムでは、現在のカメラ移動速度が上限値の6割未満の場合は緑色、6割以上8割未満の場合は黄色、8割以上の場合には赤色で

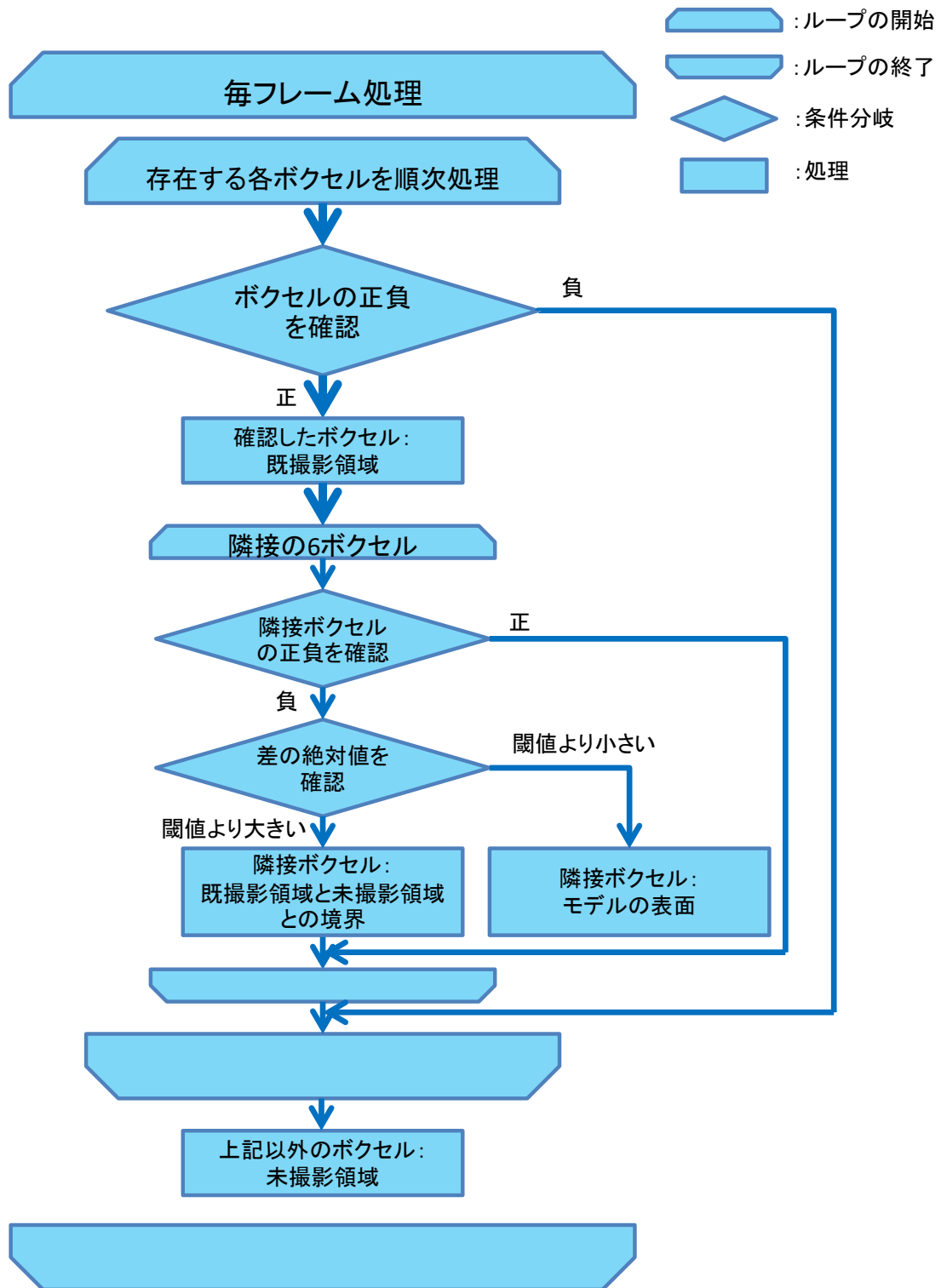


図 3.14: ボクセル領域を分類する処理の流れ



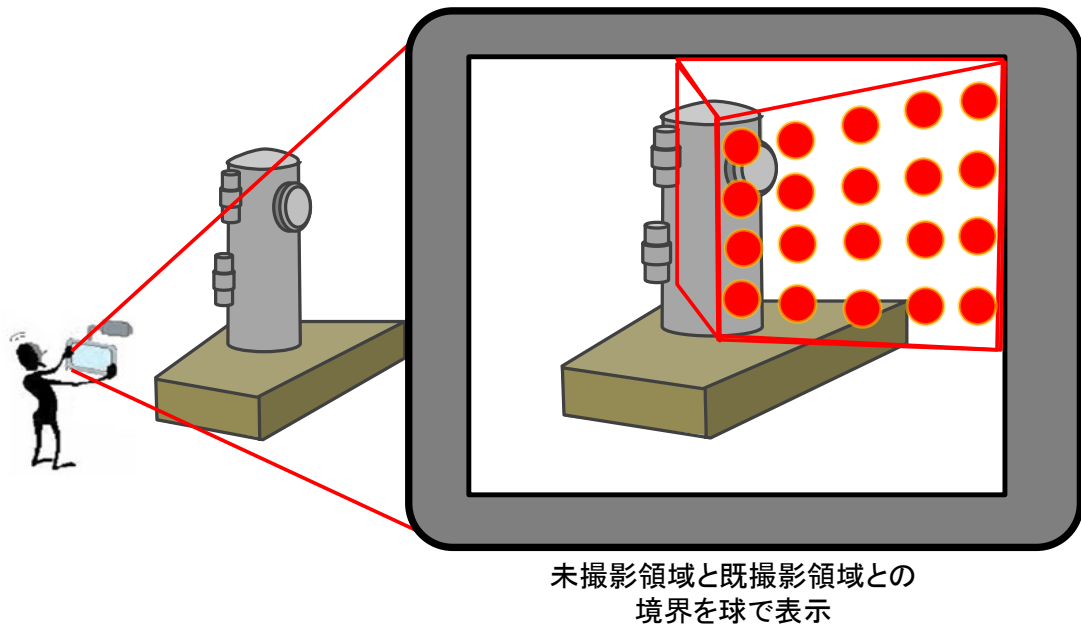


図 3.15: 境界を球で可視化する際のイメージ図

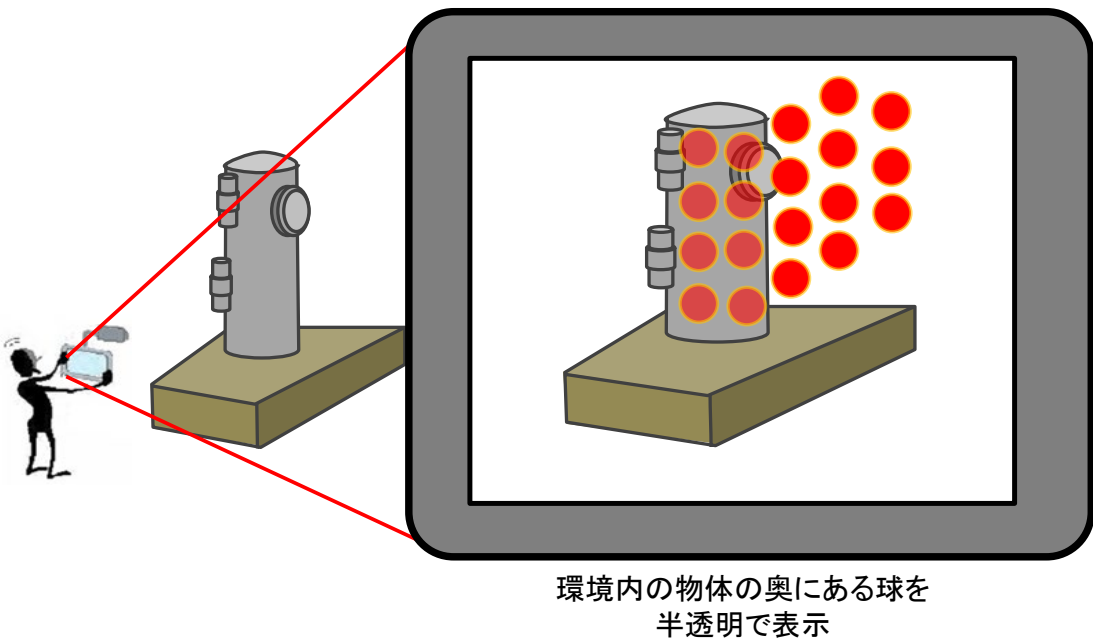


図 3.16: 物体の背後にある球の可視化イメージ

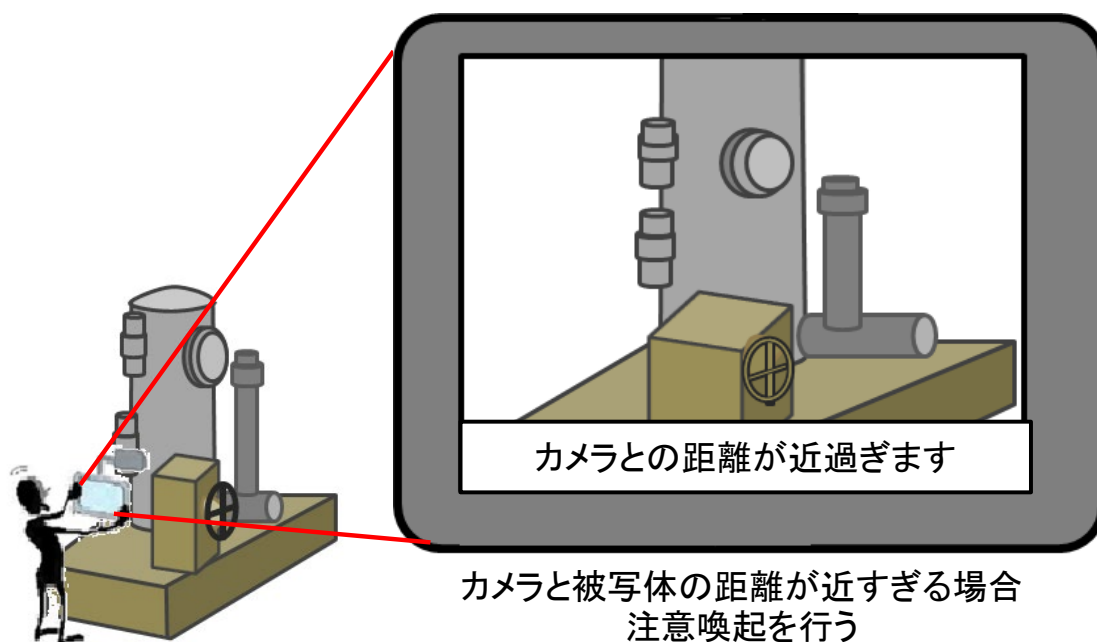


図 3.17: カメラと被写体との距離が近すぎる場合の提示イメージ図

表示する。それぞれスライドバーが緑色，黄色，赤色となっている例を図 3.19 に示す。

### 3.7 トラッキングに失敗した状態からの復帰

拡張現実感技術を利用する際のカメラ姿勢の推定(トラッキング)には，ジャイロセンサや加速度センサ等の慣性センサを用いた手法や，磁気センサを用いた手法，GPSを用いた手法，カメラ等のビジョンセンサを用いた手法等が挙げられる。本システムではトラッキング手法として，原子力発電プラント内部で利用でき，かつユーザの事前作業を必要としない，RGB-D カメラで撮影した画像から環境に存在する自然特徴を認識しトラッキングを行う，マーカレストラッキングを採用した。トラッキング手法の詳細については付録 A で述べる。拡張現実感技術を利用する場合，トラッキングに失敗(ロスト)すると画像の正しい位置に重畳表示を行うことができない。再度トラッキングを成功した状態に復帰(リローカリゼーション)させるためには，既に撮影したことのある(トラッキングが成功している)位置に戻って撮影を再開する必要がある。そのため本システムでは，ロストした場合，図 3.20 に示すように，球やスライドバーを表示する代わりに画面下部に過去にトラッキングに成功した画像を 4 枚提示し，提示した画像を撮影した位置まで戻ってもらう旨をユーザに提示する。

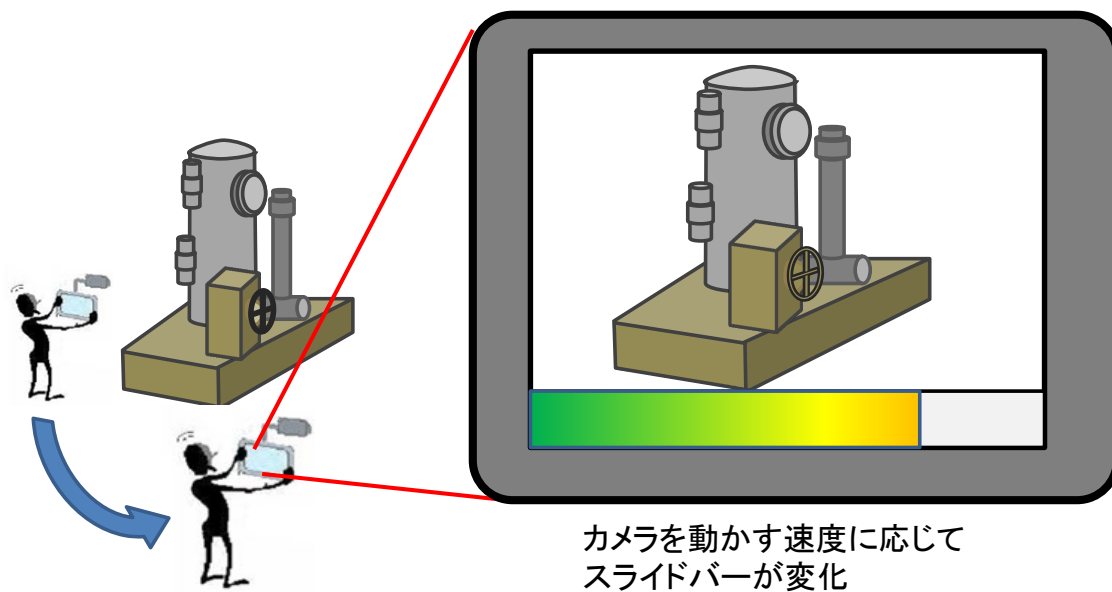
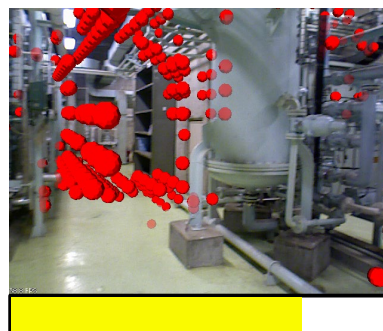


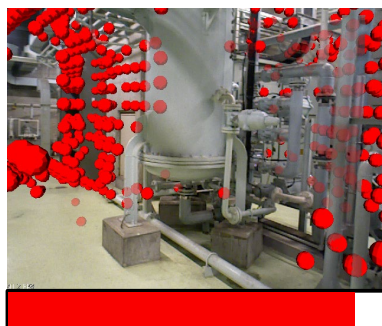
図 3.18: スライダーでカメラ移動速度を提示するイメージ図



スライダーの色が緑色の場合



スライダーの色が黄色の場合



スライダーの色が赤色の場合

Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 3.19: スライダーの色の变化

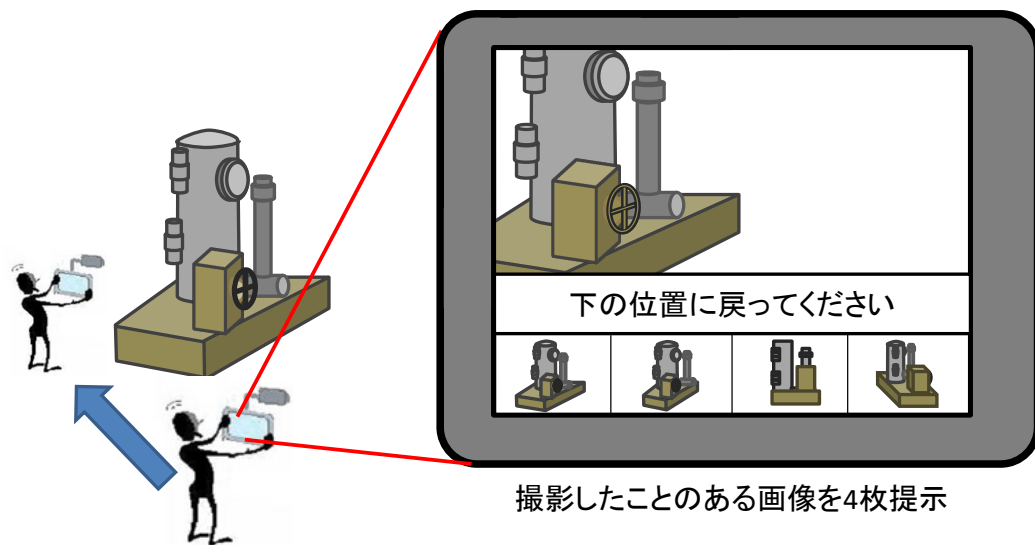


図 3.20: ロストした際に戻るよう指示する提示のイメージ図

## 3.8 システムの実装

### 3.8.1 ハードウェア構成

本システムでは、作業員が自由に移動することを可能にするために、作業員が持つデバイスを小型化することを意図して、タブレット PC に取り付けられた RGB-D カメラで撮影を行い、タブレット PC の画面上に撮影状況を提示する。しかし、タブレット PC の性能ではリアルタイムに未撮影領域の検出等の処理を行うことができない。そのため、本システムでは、図 3.21 に示すように、無線通信を用いて color 画像と depth 画像を別途用意した高性能 PC に転送し、そこで撮影状況の計算や提示画像を生成し、その結果を再び無線通信を用いてタブレット PC に返送して表示する形とする。

タブレット PC から color 画像と depth 画像を受信した高性能 PC では、現在のカメラ位置の推定とカメラの移動スピードを計算する。次に、受信した depth 画像と推定したカメラ位置を用いて、未撮影領域を検出する。最後に、拡張現実感技術を用いてタブレット PC の画面上に表示する提示画像を生成し、タブレット PC に送信する。

本システムで用いた RGB-D カメラの外観を図 3.22 に示す。タブレット PC を持ってシステムを使用した様子を図 3.23 に示す。使用したタブレット PC、RGB-D カメラ、ルータ、高性能 PC の仕様を表 3.1～表 3.4 に示す<sup>[17]</sup>。また、本システムで用いた RGB-D カメラの解像度を表 3.5 に示す。RGB-D カメラのキャリブレーションパラメータは、GML Camera Calibration<sup>[18]</sup> を利用して取得した。

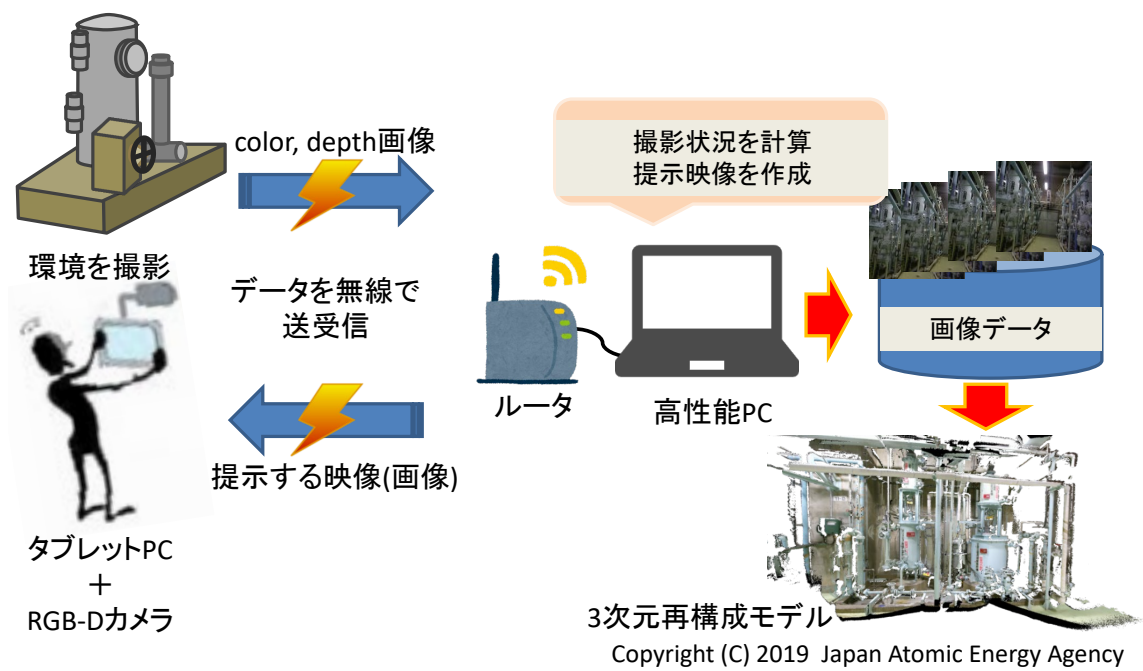
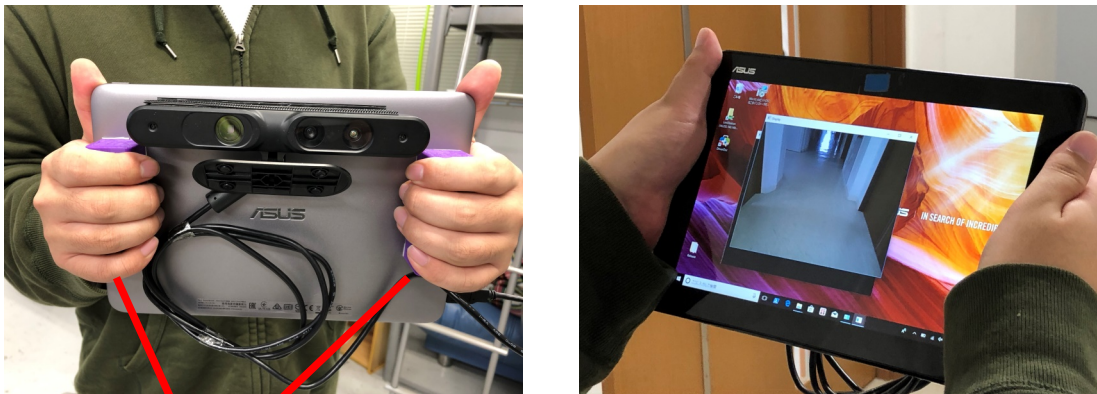


図 3.21: 本システムの撮影データと提示映像の処理の流れ



図 3.22: RGB-D カメラの外観



握りやすいように取っ手を取り付け

図 3.23: システム使用時の様子

表 3.1: 本システムで用いたタブレット PC の仕様

OS	Windows 10 Home 64bit
CPU	Intel(R) Atom x5-Z8350 (1.44GHz)
RAM	4GB
大きさ	縦 17.5 × 横 26.0 × 幅 0.9cm
画面サイズ	10.1inch
重さ	1.08kg

表 3.2: 本システムで用いた RGB-D カメラの仕様<sup>[17]</sup>

製品名	ASUS XTion Pro Live
color 画像解像度	SXGA 1280 × 1024 ピクセル
depth 画像解像度	VGA 640 × 480 ピクセル (30fps), QVGA 320 × 240 ピクセル (60fps)
深度計測手法	Structured Light
深度測定範囲	0.8~3.5m
FOV	水平 58 度, 垂直 45 度, 対角 70 度
大きさ	縦 3.5 × 横 18.0 × 幅 5.0cm
重さ	約 160g

表 3.3: 本システムで用いたルータの仕様

製品名	Buffalo WSR-A2533DHP2-CB
無線 LAN 通信規格	IEEE 802.11ac(約 433.3Mbps)
有線 LAN 通信規格	イーサネット (約 1.0Gbps)

表 3.4: 本システムで用いた高性能 PC の仕様

OS	Windows 10 Home 64bit
CPU	Intel(R) Core i7-8750H (2.20GHz)
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB
RAM	16GB

表 3.5: 本システムで用いた RGB-D カメラの解像度

color 画像解像度	640 × 480 ピクセル (30fps)
depth 画像解像度	640 × 480 ピクセル (30fps)

### 3.8.2 ソフトウェア構成

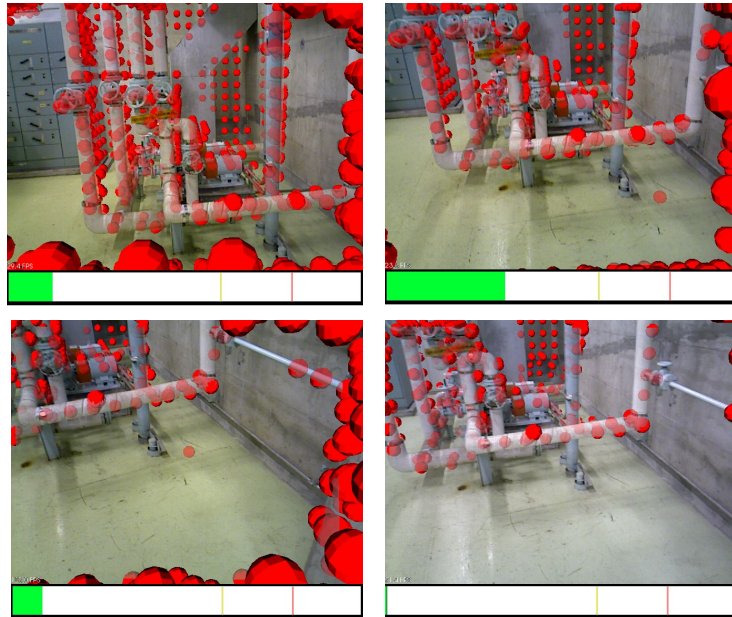
ソフトウェアは Microsoft 社 VisualStudio2017 を用いて開発し、開発言語は C++ を用いた。RGB-D カメラからの color 画像と depth 画像の取得には OpenNI2<sup>[19]</sup> を用いた。TSDF を求めるアルゴリズムの実装には OpenChisel<sup>[20]</sup> を用いた。カメラ移動スピードの検出のための特徴点は、GPU を利用し、AKAZE<sup>[21]</sup> を用いて抽出した。提示画像の生成には、Point Cloud Library(PCL)<sup>[22]</sup> と OpenCV3.4.3<sup>[23]</sup> を用いた。

カメラと被写体との距離の判定では、 $l_1 = 10$ ,  $l_2 = 0.7$  とし、25 ピクセル毎にサンプリングした。

タブレット PC と高性能 PC 間での color 画像と depth 画像、提示画像の通信には boost<sup>[24]</sup> に含まれている asio を用いた。RGB-D カメラで撮影した color 画像と depth 画像をタブレット PC から高性能 PC に送信する際には、color 画像と depth 画像の Raw イメージを送信した。また、高性能 PC で未撮影領域等の推定を行い得られた提示画像をタブレット PC に送信する際には、タブレット PC での処理の負担や通信するデータ量を極力減らすために、提示画像をタブレット PC の画面サイズに合わせて拡大し jpeg 圧縮した後に送信した。

### 3.8.3 開発したシステムの動作例

システムを実行した際の画面例を図3.24～図3.26に示す。図3.24に示すように、ユーザが移動しながら撮影するに従って、表示されている球の数や表示されている場所が変わり、撮影によって未撮影領域が更新されていく様子や、カメラを動かす速度に応じてスライダーの表示が変化していることがわかる。また、ロストした際やカメラと被写体との距離が近い場合には図3.25、図3.26に示すように、それぞれ画面上に指示を出し、ユーザに適切な動作を行うよう促す。



Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 3.24: システムを実行してカメラを動かした際の画面例





Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 3.25: ロストした際の画面例



カメラとの距離が近すぎます

Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 3.26: カメラと被写体との距離が近い場合の画面例

## 第 4 章 環境撮影支援システムの評価

本章では，本研究で開発した環境撮影支援システムの性能を，システムを用いて撮影して得た画像と，アンケート及びインタビューにより評価した実験について述べる．まず評価の目的を述べ，次に評価の概要，方法，そして結果と考察を述べる．

### 4.1 評価の目的

本研究で開発した環境撮影支援システムを使用することで，複雑で入り組んでいる環境である原子力発電プラント内を，どの程度抜け落ちなく撮影できるかを評価することを目的とする．

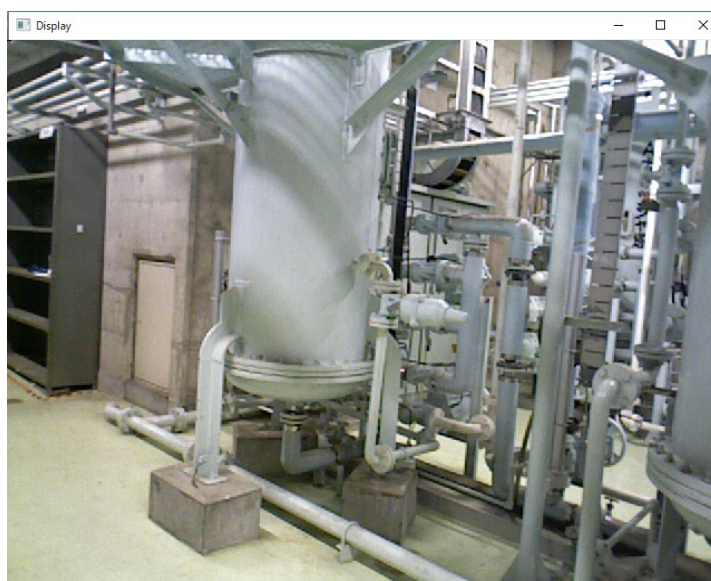
### 4.2 評価方法

#### 4.2.1 評価の概要

本評価実験では，原子力発電プラントの保守・解体作業に従事している作業員に，予め設定した作業環境に対して，既存システムと本研究で開発した環境撮影支援システムの 2 種類のシステムを用いて撮影してもらい，得られた撮影データを用いて作業環境の撮影率を測定した．ここで既存システムは，図 4.1 に示すように現在のカメラ映像を単にタブレット PC の画面上に表示するシステムとした．また，撮影率とは予め設定した作業環境全体に対する，撮影した領域の割合である．撮影率の具体的な求め方については 4.2.5 項で述べる．各システムの使用後，評価者にアンケートとインタビューに答えてもらうことにより，各システムの問題点を分析・比較した．

#### 4.2.2 評価を実施した環境

本評価実験は，日本原子力研究開発機構 新型転換炉原型炉 (ふげん) の純水装置室内で実施した．純水装置室の見取り図を図 4.2 に示す．ふげんは平成 15 年 3 月に運転を停止しており，現在は廃炉に向けて廃止措置が行われている．純水装置室は，図 4.3 に示すようにタンクや配管等の設備が密集して配置されており，通路も入り組んでいる



Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 4.1: 既存システムの使用時の画面

ため、カメラを用いて撮影する際に、抜け落ちが生じやすい環境であり、本評価実験の実施場所として適していると考えられる。

### 4.2.3 システムの評価者

本評価実験の評価者は、ふげんの職員4名(評価者 a, b, c, d)とした。

### 4.2.4 評価の流れ

図 4.4 に本評価実験の流れを、表 4.1 に各評価者と使用したシステムの順番を示す。まず、評価者に対して本評価実験の目的、流れ等を資料を用いて説明した。説明に用いた資料を付録 B に示す。この際、評価者に実験の協力を確認する同意書に署名してもらった。

次に、付録 B に示した、2種類のシステムの操作方法についての説明資料を評価者自身が十分理解したと思うまで読んでもらった。この際、質問がある場合は実験者が回答した。その後、それぞれ5分程度、両システムの操作を練習した。練習では、評価者に図 4.2 の青色で示した領域を撮影するよう指示し、評価者が十分操作に慣れたと感じるまで、それぞれのシステムを使用してもらった。練習の際、実験者は適切な撮

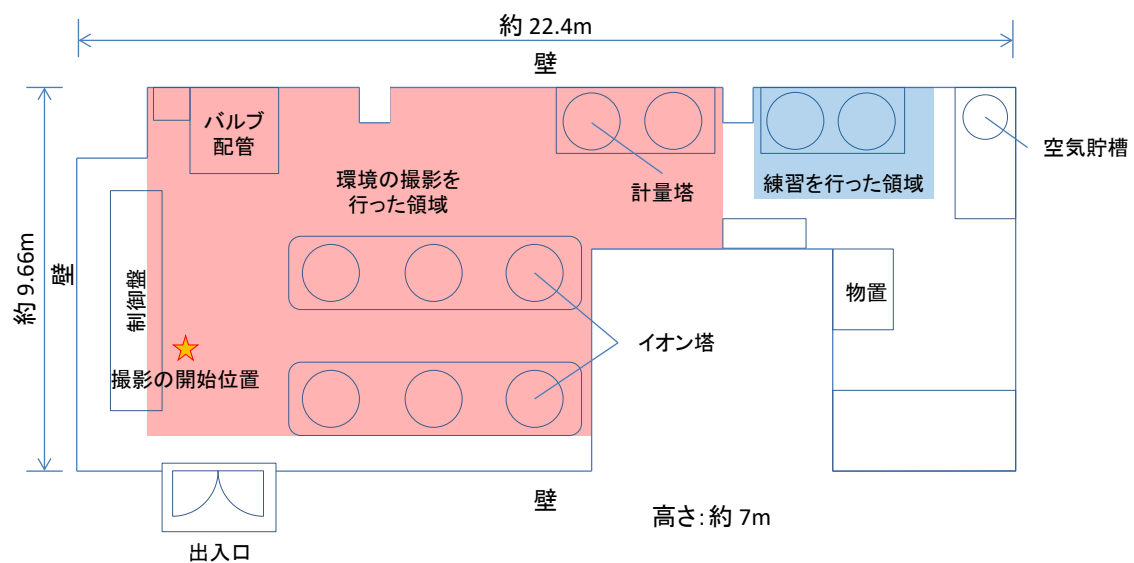
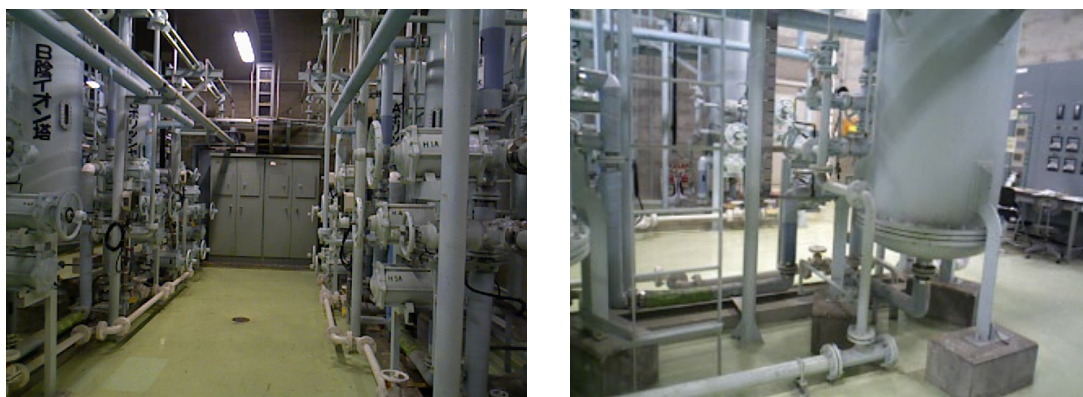


図 4.2: 純水装置室の見取り図



Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 4.3: 純水装置室内の様子

影方法として、以下の2点を評価者に説明した。

- カメラをゆっくりと動かして撮影すること
- 被写体に近づきすぎないようにすること

次に、評価者に2種類のシステムの内、片方のシステムを使用して図4.2の赤色に示した箇所をできる限り隅々まで撮影してもらった。全ての撮影で、評価者は図4.2に示す星印の箇所で図4.5に示すようにシステムを固定した状態から撮影を開始した。評価者が十分に撮影をしたと感じた場合、実験者に撮影を終了する旨を伝えて撮影を終了した。

環境の撮影の後、評価者に使用したシステムに関するアンケートに回答してもらった。アンケートの回答の後、各アンケート項目の回答理由についてインタビューした。

その後、もう一方のシステムを用いて同じ箇所を撮影してもらった。こちらも先程と同様に、撮影の後、使用したシステムに関するアンケートに回答してもらい、各アンケート項目の回答理由についてインタビューした。

以上を評価者1人ずつに対して実施した。

表 4.1: 評価者と使用したシステムの順番の対応

評価者	1回目	2回目
a	既存システム	環境撮影支援システム
b	環境撮影支援システム	既存システム
c	既存システム	環境撮影支援システム
d	環境撮影支援システム	既存システム

#### 4.2.5 撮影率の算出方法

本評価実験では、システムを用いて環境を撮影した際にどの程度漏れなく撮影できていたかを表す指標として、撮影率  $\alpha_i$ (%) を以下の式で定義する。

$$\alpha_i = \frac{V_{c_i}}{V_a} \times 100 \quad (4.1)$$

ここで、 $V_{c_i}$  は  $i$  回目の撮影で撮影された領域に含まれるボクセル数、 $V_a$  は撮影対象の領域全体に含まれるボクセル数である。

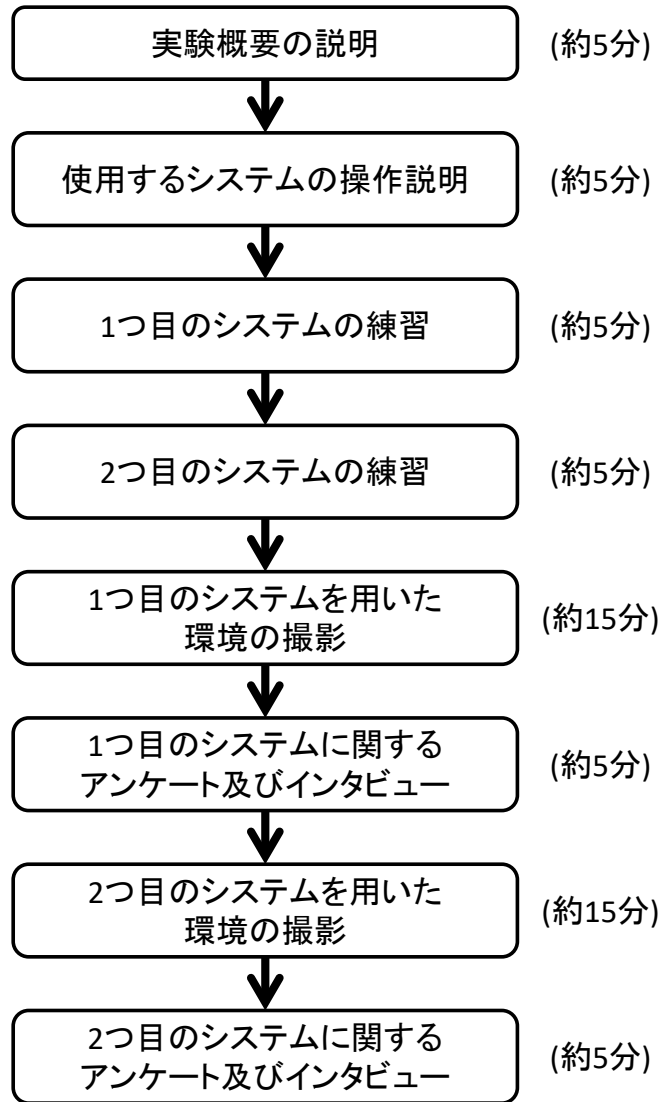


図 4.4: 本評価実験の流れ



図 4.5: 三脚に台座を固定しタブレット PC を設置した様子

本評価実験では，撮影対象の領域全体のボクセル数の算出に，今回撮影した全撮影データを集めて1つの撮影データにしたもの(以下，真値データ)を用いた．一方，各評価者が撮影した撮影データを評価データと呼ぶ．撮影率の算出方法の概要を図4.6に示す．まず本評価実験で撮影して得たすべての画像(真値データ，各評価データに含まれているすべての画像)をトラッキングする．トラッキングには付録Aに示す方法を用いる．各評価データ，真値データ，それぞれでトラッキングを行い，トラッキングできなかった画像は破棄する．次に，全てのデータのカメラ座標系を統一させるため，真値データの座標系を用いて，再度各評価データをトラッキングする．ここでトラッキングを行った画像数を各評価データの有効画像数とする．次に，各画像と推定された各カメラ姿勢を用いて，真値データと各評価データそれぞれの3次元点群を作成する．その後，撮影環境を50mm立方のボクセル領域に分割し，各画像の撮影位置と得られた3次元点群との間に存在する，カメラの視野内のボクセル領域及び3次元点群の存在している領域を撮影された領域とする．これを各データのすべての撮影された画像に対して行い，撮影された領域と判定されたボクセル領域の総数を  $V_a$  及び  $V_{c_i}$  とする．



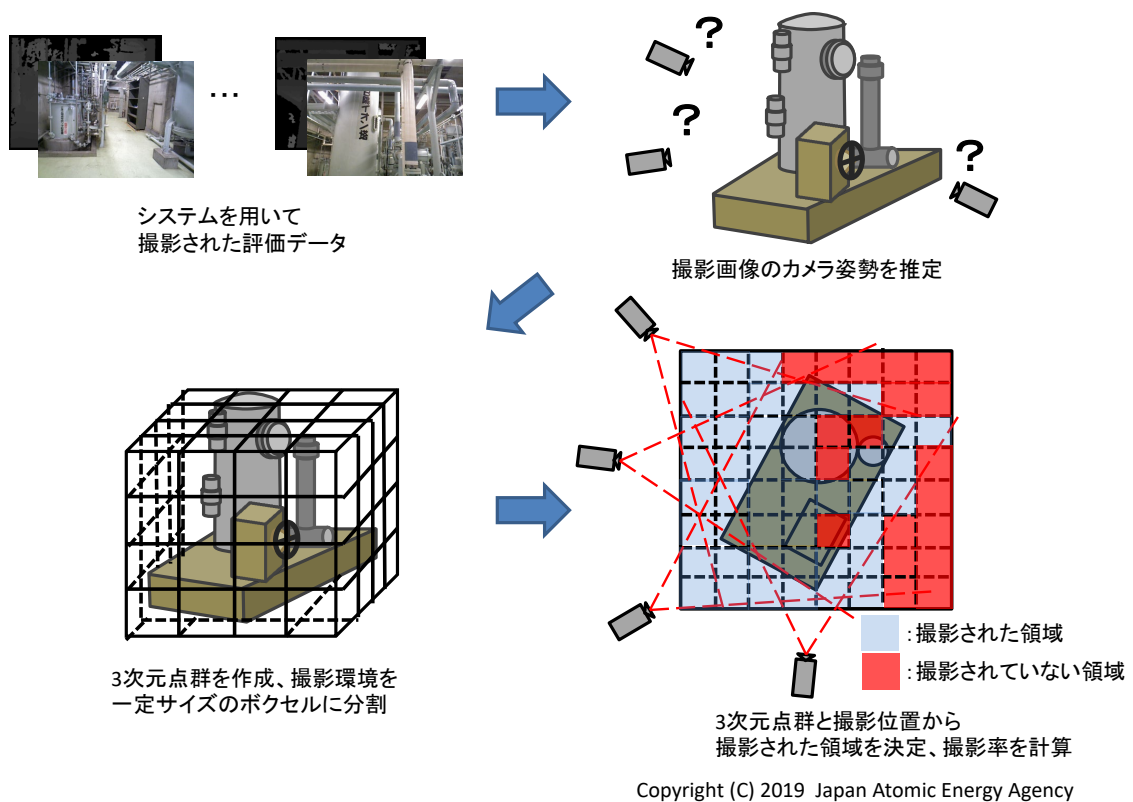


図 4.6: 撮影率の算出方法の概要

## 4.2.6 アンケート項目とインタビュー

今回開発した環境撮影支援システムが3.2節で述べた要求仕様を満たしているかを評価するため、実装した機能の問題点を抽出するために、環境撮影支援システムに関するアンケートを実施した。評価者には各アンケート項目に対して、「そう思わない」、「あまりそう思わない」、「どちらでもない」、「ややそう思う」、「そう思う」の5段階で回答してもらった。表4.2に本評価実験で用いた環境撮影支援システムに関するアンケート項目を、図B.11、図B.12に本評価実験で用いたアンケート用紙を示す。また、環境撮影支援システムと既存システムとの使いやすさを比較するために、環境撮影支援システムと同様に既存システムに関するアンケートを実施した。表4.3に既存システムに関するアンケート項目を、図B.13、図B.14に本評価実験で用いたアンケート用紙を示す。これら2つのアンケートには最後に自由記述の項目を設け、各システムに対する意見や疑問点を記述してもらった。インタビューでは、それぞれのシステム对各アンケート項目に対して、なぜ、そのように答えたのか、回答の理由を尋ねた。

表 4.2: 環境撮影支援システムに関するアンケート項目

番号	アンケート項目
(X)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた
(X)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた
(X)-3	カメラを動かす適切なスピードを容易に理解できた
(X)-4	ゲージバーの色を緑色に保ちながら撮影を行うことは簡単だった
(X)-5	指示された場所に容易に戻ることができた
(X)-6	機器は負担にならない重さである
(X)-7	初めて使う人でも簡単に使用できる
(X)-8	システムを使った際の画面の応答は速やかであった

## 4.3 評価の結果及び考察

### 4.3.1 撮影率の結果

各撮影試行での撮影画像数、撮影に要した時間、平均フレームレート(撮影画像数/撮影に要した時間)を表4.4に示す。撮影率を算出する際に、真値データ作成に用いた

表 4.3: 既存システムに関するアンケート項目

番号	アンケート項目
(Y)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた
(Y)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた
(Y)-3	機器は負担にならない重さである
(Y)-4	初めて使う人でも簡単に使用できる

表 4.4: 各撮影試行の撮影枚数と撮影に要した時間

評価者	使用システム	撮影画像数 (枚)	撮影に要した時間 (秒)	平均フレームレート (fps)
評価者 a	環境撮影支援システム	8,442	1,945	4.34
	既存システム	5,911	659	8.97
評価者 b	環境撮影支援システム	3,442	836	4.12
	既存システム	4,523	515	8.78
評価者 c	環境撮影支援システム	1,996	416	4.80
	既存システム	1,975	225	8.78
評価者 d	環境撮影支援システム	7,208	1,816	3.97
	既存システム	11,595	1,304	8.89

表 4.5: 各撮影試行の有効画像数と撮影率

評価者	使用システム	撮影画像数 (枚)	有効画像数 (枚)	トラッキング成功率 (%)	撮影率 (%)
評価者 a	環境撮影支援システム	8,442	5,771	68.4	68.4
	既存システム	5,911	1,052	17.8	19.3
評価者 b	環境撮影支援システム	3,442	2,871	83.4	41.9
	既存システム	4,523	2,332	51.6	36.4
評価者 c	環境撮影支援システム	1,996	1,923	96.3	33.6
	既存システム	1,975	803	40.7	18.0
評価者 d	環境撮影支援システム	7,208	6,755	93.7	55.5
	既存システム	11,595	8,894	76.7	68.8

画像数は41,157枚であった。表 4.5 に各撮影試行での撮影画像数，有効画像数，有効画像数/撮影画像数で示されるトラッキング成功率，撮影率を示す。図 4.7 に各撮影試行でのトラッキング成功率，図 4.8 に各撮影試行での撮影率をグラフで示す。また，撮影して得られた画像を用いて作成した3次元再構成モデルの例として，評価者 a が取得した RGB-D 画像から作成した3次元再構成モデルの一部を図 4.9 に示す。なお，RGB-D 画像からの3次元再構成モデルの作成には，OpenChisel<sup>[20]</sup> を用いた。

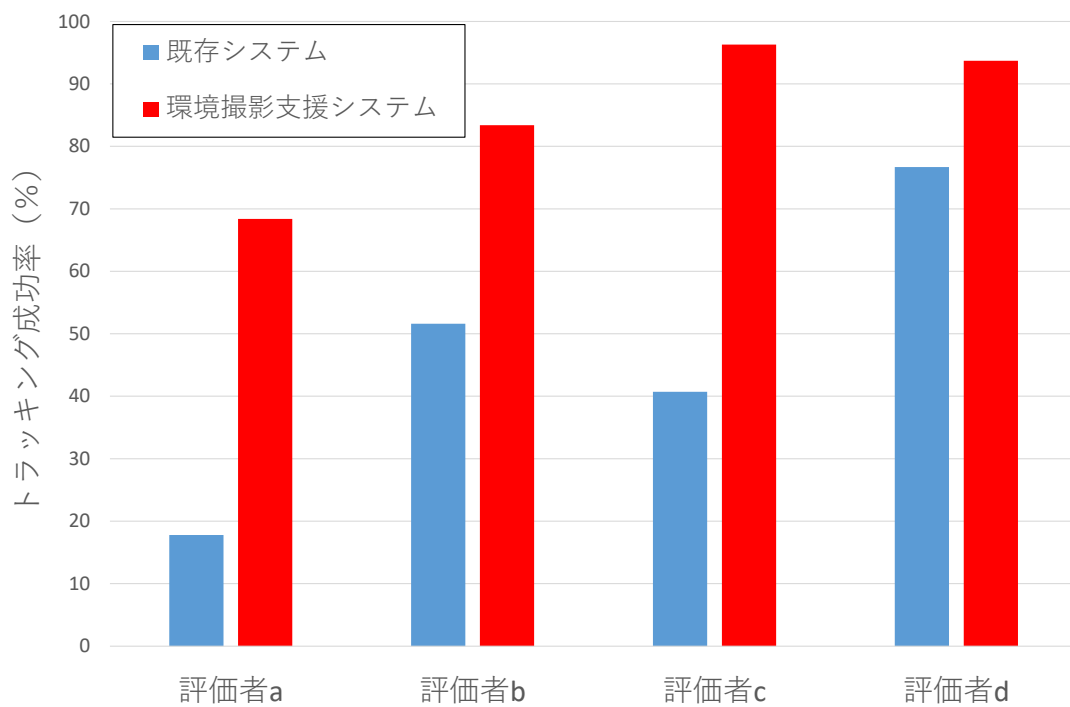


図 4.7: 評価者毎のトラッキング成功率

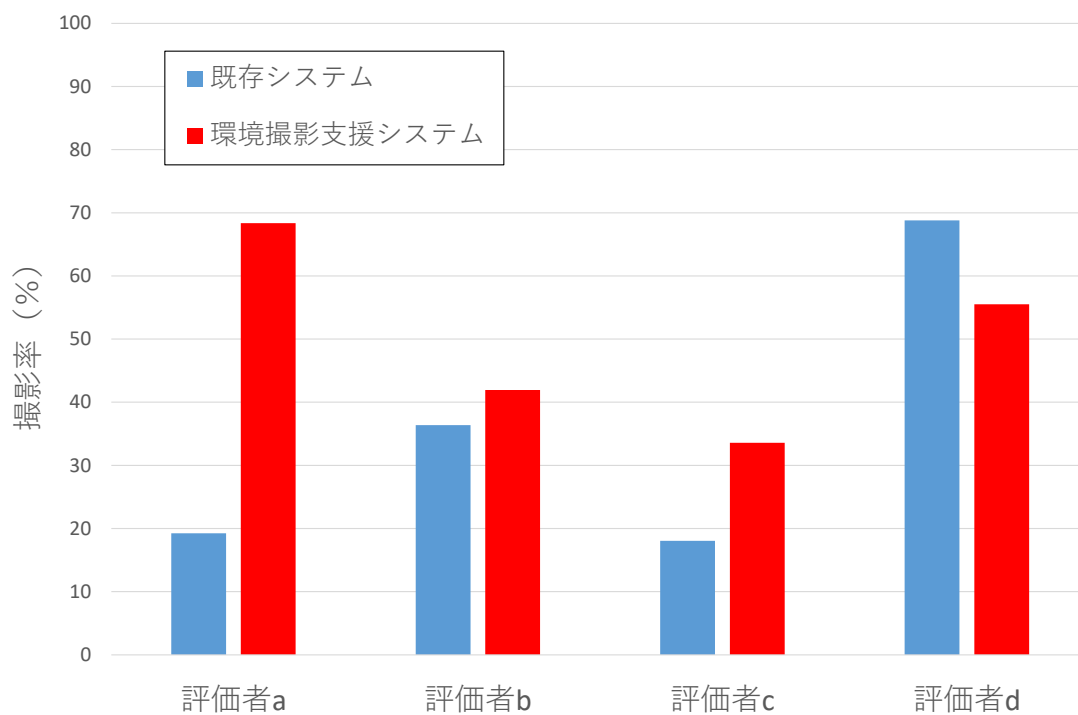


図 4.8: 評価者毎の撮影率



Copyright (C) 2019 Japan Atomic Energy Agency

図 4.9: 評価者 a の撮影データから作成した 3次元再構成モデルの一部

### 4.3.2 アンケート及びインタビューの結果

環境撮影支援システムに関する全評価者のアンケート結果を表 4.6 に、自由記述欄への回答を表 4.7 に示す。また、評価者 a~d の各アンケート項目に対する評点と回答理由を表 4.8~表 4.11 に示す。既存システムに関する全評価者のアンケート結果を表 4.12 に、自由記述欄への回答を表 4.13 に示す。また、評価者 a~d の各アンケート項目に対する評点と回答理由を表 4.14~表 4.17 に示す。

表 4.6: 環境撮影支援システムに関するアンケート結果

番号	アンケート項目	評価者 a	評価者 b	評価者 c	評価者 d
(X)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた	5	5	5	4
(X)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた	4	4	3	2
(X)-3	カメラを動かす適切なスピードを容易に理解できた	5	4	4	3
(X)-4	ゲージバーの色を緑色に保ちながら撮影を行うことは簡単だった	5	3	2	4
(X)-5	「下の場所に戻ってください」という表示が出た際、指示された場所に容易に戻ることができた	2	5	2	1
(X)-6	機器は負担にならない重さである	3	2	3	1
(X)-7	初めて使う人でも簡単に使用できる	4	5	3	3
(X)-8	システムを使った際の画面の応答は速やかであった	4	4	3	1

表 4.7: 環境撮影支援システムに関する自由記述欄への回答

評価者	その他の意見
評価者 a	<p>システム使用時にすぐに「下の場所まで戻ってください」の表示が出てしまう。</p> <p>別の場所に早く移動したいときにゆっくり動く必要があるのは面倒。現場設備の裏側にある球の色を別色の半透明とかにするとわかりやすいかもしれない。</p> <p>撮影時に指示された領域外にある未撮影領域も表示されていると混乱する。</p> <p>ヘルメットにカメラを固定するのもいいかもしれない。</p>
評価者 b	特になし
評価者 c	<p>スマートフォン程度のサイズの端末で利用可能にしてほしい。</p> <p>モデル化された結果がわからないのでどの程度撮影が上手くてきているのかがわからない。</p>
評価者 d	<p>音の提示など視覚以外の情報があると良い。</p> <p>画面が小さい。</p> <p>撮影されている範囲が明確に画面表示されている方がいい。</p>

表 4.8: 評価者 a の環境撮影支援システムに関するアンケート結果及び回答理由

番号	アンケート項目	評点	回答の理由
(X)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた	5	球を消すという目標があるから
(X)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた	4	残る球があるから、タイミングは微妙
(X)-3	カメラを動かす適切なスピードを容易に理解できた	5	速すぎるとゲージバーが変わるので理解できる
(X)-4	ゲージバーの色を緑色に保ちながら撮影を行うことは簡単だった	5	同上
(X)-5	「下の場所に戻ってください」という表示が出た際、指示された場所に容易に戻ることができた	2	よく表示された、かつ戻りづらかった
(X)-6	機器は負担にならない重さである	3	既存の撮影システムと同じ、こちらの方が時間かかるから負担が増えるかもしれない
(X)-7	初めて使う人でも簡単に使用できる	4	大丈夫だと思う
(X)-8	システムを使った際の画面の応答は速やかであった	4	「元の位置に戻ってください」の表示が出ている際に少し動作がかくつく

表 4.9: 評価者 b の環境撮影支援システムに関するアンケート結果及び回答理由

番号	アンケート項目	評点	回答の理由
(X)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた	5	球が消えていくのが確認できたから
(X)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた	4	同上
(X)-3	カメラを動かす適切なスピードを容易に理解できた	4	どう動かしたらどうスライドバーが変化するか理解できたから
(X)-4	ゲージバーの色を緑色に保ちながら撮影を行うことは簡単だった	3	カメラと撮影対象の距離が近いとき、スライドバーの変化が激しいから難しい
(X)-5	「下の場所に戻ってください」という表示が出た際、指示された場所に容易に戻ることができた	5	どこに戻ったらいいか簡単に分かるから
(X)-6	機器は負担にならない重さである	2	若干腕が重くなった。 タブレット PC を首にかけて使用すると良いかもしれない
(X)-7	初めて使う人でも簡単に使用できる	5	撮影するのは簡単だが、良いモデルが作成できる撮影データになるかどうかは別
(X)-8	システムを使った際の画面の応答は速やかであった	4	処理落ちはなかった。 滑らかに球が消えていった

表 4.10: 評価者 c の環境撮影支援システムに関するアンケート結果及び回答理由

番号	アンケート項目	評点	回答の理由
(X)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた	5	球の表示に従って撮影できるから.
(X)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた	3	球が減っているが, 作成されたモデルを確認していないからどちらでもない.
(X)-3	カメラを動かす適切なスピードを容易に理解できた	4	スライドバーがあったので, ゆっくり動かさないといけないのがわかった.
(X)-4	ゲージバーの色を緑色に保ちながら撮影を行うことは簡単だった	2	ゆっくり動けば OK だが, 振り返って撮影した時に「下の場所まで戻ってください」と表示されるから簡単ではない.
(X)-5	「下の場所に戻ってください」という表示が出た際, 指示された場所に容易に戻ることができた	2	次の場所に移動しているのに戻るのが心理的に不安. 狭陰部の撮影が難しい.
(X)-6	機器は負担にならない重さである	3	長時間使用すると負担がかかる.
(X)-7	初めて使う人でも簡単に使用できる	3	撮影はできる. 作成されるモデルを確認していないので結果はわからない.
(X)-8	システムを使った際の画面の応答は速やかであった	3	速いと思う. ただそれによって素早く移動すると「下の場所まで戻ってください」と表示されてしまう.

表 4.11: 評価者 d の環境撮影支援システムに関するアンケート結果及び回答理由

番号	アンケート項目	評点	回答の理由
(X)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた	4	なるべくくまなく撮影できた.
(X)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた	2	判断基準がないからどこまで撮影したらいいかわからない. 撮影率を表示してほしい.
(X)-3	カメラを動かす適切なスピードを容易に理解できた	3	ある程度動かしているうちにわかってきたから.
(X)-4	ゲージバーの色を緑色に保ちながら撮影を行うことは簡単だった	4	大体の目印になった. だが同時に見るのは難しい.
(X)-5	「下の場所に戻ってください」という表示が出た際, 指示された場所に容易に戻ることができた	1	目が悪い人は画像の提示が小さくてわからない.
(X)-6	機器は負担にならない重さである	1	少し重い. 作業を行う場所を考慮して撮影範囲を決めた方がいい.
(X)-7	初めて使う人でも簡単に使用できる	3	使用方法を聞けば理解できる.
(X)-8	システムを使った際の画面の応答は速やかであった	1	遅い.



表 4.12: 既存システムに関するアンケート結果

番号	アンケート項目	評価者 a	評価者 b	評価者 c	評価者 d
(Y)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた	2	2	4	3
(Y)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた	1	2	3	4
(Y)-3	機器は負担にならない重さである	3	2	2	1
(Y)-4	初めて使う人でも簡単に使用できる	4	5	2	4

表 4.13: 既存システムに関する自由記述欄への回答

評価者	その他の意見
評価者 a	重さを考えると、カメラをヘルメットに固定する方法も候補にある。
評価者 b	未撮影領域や終了のタイミングを意識しなくても十分なモデルが取得できるのであればその方法が最善である。
評価者 c	撮影終了の判断が難しい。 設備の系統や配管の繋がりがわかるようになると良い。 タンクや配管の細かな形よりも全体の様子がわかる方がいいと思う。
評価者 d	どれだけ撮影されている(データとして保存されている)のかがわからない。 事前情報や練習がなく、初めて使う場合はどう撮影したらいいかわからないはず。 情報量が少ないため、現在撮影されている範囲がわからない。

### 4.3.3 考察

表 4.4 から、全ての評価者で、環境撮影支援システムの方が撮影に要した時間が長くなっていることがわかる。これは、環境撮影支援システムでは、カメラを速く動かすとスライドバーの色が緑色から黄色や赤色になってしまうため、カメラをゆっくりと動かして撮影を行うようになり、結果として同じ範囲の撮影に要する時間が長くなってしまったことが原因であると考えられる。また、環境撮影支援システムでは、トラッキングに失敗し撮影状況の重畳表示が行えない場合、図 3.25 に示すような提示を行い、過去にトラッキングに成功した位置まで戻ってもらう必要があるのも原因の一つであると考えられる。表 4.6 の (X)-5 「下の場所に戻ってください」という表示が出た際、指示された場所に容易に戻ることができた」、(X)-8 「システムを使った際の画面の応答は速やかであった」の結果や表 4.11 や表 4.8 のインタビューで「応答が遅い」、「下の場所に戻ってください」の表示がよく表示され、かつ戻りづらかった」との意見が得

表 4.14: 評価者 a の既存システムに関するアンケート結果及び回答理由

番号	アンケート項目	評点	回答の理由
(Y)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた	2	別に表示がないからビデオ撮影と同じ感じ, 多少は意識したが実感がないため諦めてしまう.
(Y)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた	1	上と同じでよくわからない.
(Y)-3	機器は負担にならない重さである	3	1 回の撮影なら影響ない重さ. 人にもよるが, 連続して撮影を行うとしんどいかもしれない.
(Y)-4	初めて使う人でも簡単に使用できる	4	撮るのは簡単だが, どう撮るべきかは難しい.

表 4.15: 評価者 b の既存システムに関するアンケート結果及び回答理由

番号	アンケート項目	評点	回答の理由
(Y)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた	2	どこまで撮ったらいいかわからない.
(Y)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた	2	どこまで撮れているかわからない.
(Y)-3	機器は負担にならない重さである	2	若干重たい.
(Y)-4	初めて使う人でも簡単に使用できる	5	撮影するだけなら簡単.

表 4.16: 評価者 c の既存システムに関するアンケート結果及び回答理由

番号	アンケート項目	評点	回答の理由
(Y)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた	4	意識しながら撮影できた.
(Y)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた	3	判断できない. 難しくも簡単でもない.
(Y)-3	機器は負担にならない重さである	2	長時間の使用だと負担がかかる. 撮影できているかわからない. タブレット PC を手で保持するのに負荷がかかる.
(Y)-4	初めて使う人でも簡単に使用できる	2	どこまで撮影したらいいのかわからない. モデルの使用目的によって変わると思う.

表 4.17: 評価者 d の既存システムに関するアンケート結果及び回答理由

番号	アンケート項目	評点	回答の理由
(Y)-1	環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた	3	先に環境撮影支援システムを使用した ので意識しながらできた.
(Y)-2	撮影を終了するタイミングが容易に判断できた	4	先に環境撮影支援システムを使用した ので, どこからスタートしてどこまで撮ったら 終了かわかった.
(Y)-3	機器は負担にならない重さである	1	重いが使っているうちに慣れてきた.
(Y)-4	初めて使う人でも簡単に使用できる	4	大体できるが情報量 (提示) がないので使い こなすのは難しい. 操作は簡単.

られたことから、システムの応答やトラッキングに失敗した際にすべき動作が難しかったため、撮影に要する時間が長くなったと考えられる。トラッキングは、直前フレームからの移動量が大きくなればなるほど失敗しやすくなる。そのため、フレームレートが高ければ高くなるほど直前フレームからの移動量が小さくなり、トラッキングが成功しやすくなると考えられる。今後はトラッキングや未撮影領域等のアルゴリズムを最適化し処理速度を向上させ、フレームレートを上げる必要がある。また、トラッキングに失敗した際の画面下部に提示していた画像について、「目が悪い人は画像の提示が小さくてわからない」との意見が得られた。今後は、提示している画像がよりわかりやすいようにインタフェースを改良する必要がある。

トラッキング成功率に関しては、すべての評価者で、環境撮影支援システムが既存システムを上回った。特に、評価者 b では、既存システムの方が撮影画像数が多かったが、有効画像数は環境撮影支援システムの方が上回った。評価者 d に関しても、トラッキングが成功した有効画像数は既存システムが環境撮影支援システムを上回ったが、トラッキング成功率は環境撮影支援システムの方が高かった。トラッキングが失敗した時点からトラッキングに復帰するまでの間の画像は、モデル作成に使うことができないため、撮影したと思っていた領域が撮影されていない状況が発生する。また、既存システムではカメラの移動スピード等の、トラッキングが成功する画像を撮影するための情報の提示がないため、ユーザが環境全体を撮影したと思ってもトラッキングに成功しておらず、実際に 3次元再構成モデルを作成する際に有効な画像は少なくなったと考えられる。また、表 4.6 の (X)-3「カメラを動かすスピードを容易に理解できた」の結果からも、情報の提示によって撮影に適したスピードを理解できたことがわかる。(X)-4「ゲージバーの色を緑色に保ちながら撮影を行うことは簡単だった」では評価者 b, c の評点が低かったが、表 4.9 で、「カメラと撮影対象の距離が近いときにスライドバーの変化が激しいから難しい」との意見が得られたことから、環境撮影支援システムではカメラの移動スピードの計算に、撮影した画像の自然特徴点の移動量を用いたことが原因であると考えられる。被写体とカメラとの距離が近い場合は遠い場合と比べて、自然特徴点の移動量が大きくなってしまい、スライドバーの変化も急激になってしまう。今後は、カメラの移動スピードの計算にジャイロセンサや加速度センサ等を用いることで解決できると考えられる。

撮影率は、評価者 a, b, c において、環境撮影支援システムの方が高い結果となった。評価者 d は慎重に撮影する人であり、撮影状況が提示されない既存システムでは、入念に隅々までゆっくり撮影し、その結果既存システムを用いた際の撮影枚数が環境

撮影支援システムでの撮影枚数を大幅に上回り、既存システムの方が広い範囲をモデル化できたと考えられる。

以上の結果から、人によって効果の差はあるものの、概ね環境撮影支援システムを用いることで、より無駄なく、モデル化する際に有効な画像を取得できたと考えられる。

次に、表 4.6, 表 4.12 の、環境撮影支援システムに関するアンケート項目と既存システムに関するアンケート項目で共通している項目 ((X)-1, (Y)-1「環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた」、(X)-2, (Y)-2「撮影を終了するタイミングが容易に判断できた」、(X)-6, (Y)-3「機器は負担にならない重さである」、(X)-7, (Y)-4「初めて使う人でも簡単に使用できる」) に関して、アンケート結果を比較し、環境撮影支援システムに優位性があるか評価する。

(X)-1, (Y)-1「環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた」では、全ての評価者で環境撮影支援システムの方が高評価で、かつ環境撮影支援システムでは評価者 3 名が 5, 1 名が 4 であったことから、未撮影領域を表示するインタフェースは既存システムと比べて優れており、未撮影領域を意識しながら撮影してもらうことに成功していたことがわかった。また、既存システムでは、「未撮影領域の表示がないためどこまで撮影すればよいかわからない」との意見があった一方で、環境撮影支援システムでは、「球を消すという目標があり、球を消すように撮影すればいいとわかったから」との意見がインタビューで得られた。既存システムの自由記述欄にも、「撮影に関する情報量が少なく、どの範囲が現在撮影できているかがわからない」との意見があったことから、環境を撮影する際に、未撮影領域を表示するインタフェースが効果的であったと言える。

(X)-2, (Y)-2「撮影を終了するタイミングが容易に判断できた」では、評価者 2 名が環境撮影支援システムの方が高評価、1 名が両システムで同じ値であり、1 名が既存システムの方が高評価であった。表 4.14, 表 4.15 で既存システムは、「撮影できている実感が沸かないからわからない」、「どこまで撮影できているかわからない」との意見が得られた。評価者 d は既存システムの方が高評価であったが、表 4.17 で、「先に環境撮影支援システムに使用していたからどこまで撮影したら終了かわかった」という意見が得られた。これらの結果から、環境撮影支援システムの方が撮影終了のタイミングの把握において少し優位性があると考えられる。しかし、表 4.8, 表 4.7, 表 4.11 の環境撮影支援システムに関する自由記述欄やインタビューで、「画面上に残る球もあるのでタイミングは微妙」、「撮影時に指示された範囲外の球も表示されていて混乱する」、「撮影率を表示してほしい」との意見が得られており、環境撮影支援システムにも問題

点があることがわかった。今後は未撮影領域検出アルゴリズムの性能の向上や、現在の撮影率や未撮影領域が多く存在している領域の場所や方向を提示する、等の情報を追加で提示し、撮影終了の判断を今までよりも容易にする必要がある。

(X)-6, (Y)-3「機器は負担にならない重さである」では、評価者3名は両システムで同じ評価結果であった。また、もう1名も環境撮影支援システムで3、既存システムで2であり、総じて両システム間で同様な結果であったと言える。撮影の所要時間は両システムで異なっていたが、使用した撮影機器は両システムで同じであり、妥当な結果であったと考えられ、システムを使用した際の負荷に関してはどちらにも優位性がないと考えられる。ただ、表4.10で「長時間使用すると負荷がかかる」等の意見が得られたことから、より機材を軽量にする必要や短時間で撮影を終了できるようにする必要があると考えられる。短時間で撮影を終了できるようにするための工夫としては、上でも述べたような、トラッキングや未撮影領域等の処理に要する計算量をできる限り小さくし、フレームレートを上げることが挙げられる。また、表4.7, 表4.9で得られた意見のように、スマートフォン等のより小型なデバイスで利用可能にしたり、タブレットPCを首からかけられるようにすることで、システム使用時の負担を減らすことができると考えられる。

(X)-7, (Y)-4「初めて使う人でも簡単に使用できる」では、評価者2名が両システムで同じ値、1名が環境撮影支援システムで3、既存システムで2、1名が環境撮影支援システムで3、既存システムで4といった評価結果であり、システムの操作の簡単さに関しても、どちらにも優位性がないと考えられる。しかし、表4.9, 表4.10で「操作自体は簡単だが、作成されたモデルを確認できないので結果はわからない」、「モデル化された結果がわからないので、どの程度撮影が上手くできているかがわからない」等の意見が得られたことから、撮影終了時に、その場で簡易的に3次元再構成モデルを作成しユーザに提示することで、システム全体の有効性が向上すると考えられる。

## 第 5 章 結論

本研究では、原子力発電プラントのような広域かつ入り組んだ環境の 3 次元再構成モデルを作成する際に、3D スキャニングに関する専門知識を有していない人が使用しても抜け落ちなく環境を撮影できるようにすることを目指した、環境撮影支援システムを開発した。また、原子力発電プラントの解体作業に従事する評価者 4 名に開発したシステムを原子力発電プラント内で使用してもらい、撮影された画像と、アンケート及びインタビューでシステムの性能を評価した。

第 2 章では、本研究の背景として、3 次元モデルを用いた原子力発電プラントの保守・解体作業支援が有効であると期待されていることと、既存の 3 次元再構成モデル作成技術とその問題点を述べた。そして、本研究の目的が未撮影領域等の現在の撮影状況をユーザにリアルタイムに提示することで撮影を支援する、環境撮影支援システムを開発することであると述べた。

第 3 章では、環境撮影支援システムの開発について述べた。まず、システムの目的について述べ、次にシステムの要求仕様、システムの概略設計について述べた。そして、撮影状況の計算とユーザへの提示方法について述べ、最後にシステムの実装に使用したハードウェアとソフトウェアについて述べた後、開発したシステムの動作例について述べた。

第 4 章では、本システムを原子力発電プラントの解体作業に従事している作業員に使用してもらった評価実験について述べた。

今回実施した評価の結果から、本研究で開発した環境撮影支援システムは、既存の撮影システムと比べて撮影の無駄が少なく 3 次元再構成モデル作成に有効な画像を取得できることがわかった。また、未撮影領域をユーザに提示するインタフェースが環境の撮影において有用であることがわかった。ただし、未撮影領域を求めるアルゴリズムの計算量が多く、画面更新速度が十分ではないため、応答が遅かったりトラッキングに失敗したりすることがあること、撮影終了の判断が難しいこと、機材が重いためシステムを長時間使用するとユーザに負荷がかかることもわかった。そのため、未撮影領域の算出アルゴリズムを最適化するなどにより処理速度を高速化することや、環境を十分に撮影できたかを撮影者自らが判断することを容易にするためのインタフェースの改良、ハードウェアの軽量化等のユーザの負担を軽減するための工夫が今後の課

題として考えられる。

## 謝 辞

本研究を進めていくにあたり、研究の方針や評価方法について、適切かつ多角的なご指導を頂きました、下田宏教授に深く感謝致します。

システムの設計・開発、プログラミングの指導、出張や実験の引率、論文や学会発表の指導等、多くのご指導を頂きました、石井裕剛准教授に深く感謝致します。

システムの評価の実施のために様々なご協力を頂きました、日本原子力研究開発機構の香田有哉様に深く感謝致します。また、評価に参加して頂き、今後の研究活動に関する貴重なご意見を頂きました、ふげんの職員の方々に深く感謝致します。

同じ研究グループとして、ミーティングへの参加や、システムの評価の手伝い等、様々な協力をしてくれた、エネルギー科学研究科修士1回生の三木直也君に深く感謝します。

また、忙しい中、論文執筆のサポートをしてくれた、エネルギー科学研究科修士1回生の田村太一君、東山豊大君に深く感謝します。

事務手続き等、本当に多くのご支援をして頂きました、普照郁美秘書に深く感謝致します。

最後に、研究のみならず、これまで様々な面で研究生活をご支援して頂きました、研究室のすべての方々、及び修了生の方々に心より感謝致します。



## 参考文献

- [1] 経済産業省 資源エネルギー庁: 原子力発電所の現状, [http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/001/pdf/001\\_02\\_001.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf), Accessed February 13, (2019).
- [2] 日本原子力研究開発機構: 運転管理技術の高度化, <https://www.jaea.go.jp/04/fugen/about/dbase/maintenance/mainte003.html>, Accessed February 13, (2019).
- [3] Olaf Kahler, Victor Adrian Prisacariu, Carl Yuheng Ren, Xin Sun, Philip Torr, David Murray: Very High Frame Rate Volumetric Integration of Depth Images on Mobile Devices, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **21**(11), pp.1241-1250(2015).
- [4] Richard Newcombe, Shahram Izadi, Otmar Hilliges, David Molyneaux, David Kim, Andrew Davison, Pushmeet Kohli, Jamie Shotton, Steve Hodges, Andrew Fitzgibbon: KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking, *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, (2011).
- [5] Yuki Harazono, Taro Kimura, Hirotake Ishii, Hiroshi Shimoda, Yuya Kouda: Development of an Information Reference System using Reconstruction Models of Nuclear Power Plants, *Nuclear Engineering and Technology*, **50**(4), pp.606-612(2018).
- [6] Carlo Tomasi, Takeo Kanade: Shape and Motion from Image Streams under Orthography: a Factorization Method, *International Journal of Computer Vision*, **9**(2), pp.137-154(1992).
- [7] EinScan, <https://einscan.net/>, Accessed February 13, (2019).
- [8] EORA3D, <https://www.eora3d.com/>, Accessed February 13, (2019).
- [9] Xuehan Xiong, Antonio Adan, Burcu Akinci, Daniel Huber: Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data, *Automation in Construction*, **31**, pp.325-337(2013).

- [10] Pingbo Tang, Daniel Huber, Burcu Akinci, Robert Lipman, Alan Lytle: Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques, *Automation in Construction*, **19**(7), pp.829-843(2010).
- [11] 山下 淳, 原田 知明, 金子 透: 全方位カメラ搭載移動ロボットによる Structure from Motion を用いた 3 次元環境モデリング, *日本機械学会論文集 C*, **73**(726), pp.512-519(2007).
- [12] Fabio Remondino, Luigi Barazzetti, Francesco Nex, Marco Scaioni: UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling-Current Status and Future Perspectives, *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics*, (2011).
- [13] 上羽 優貴, 酒田 信親, 西田 正吾: 効率の良い計測のためのナビゲーションを実現するタイトなボクセル領域制限に基づく 3D インタラクティブスキャニング, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **19**(3), pp.339-347(2014).
- [14] Daniel Andersen, Voicu Popescu: An AR-Guided System for Fast Image-Based Modeling of Indoor Scenes, *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces*, (2018).
- [15] Daniel Andersen, Voicu Popescu: HMD-Guided Image-Based Modeling and Rendering of Indoor Scenes, *Proceedings of the 15th EuroVR International Conference*, (2018).
- [16] Brian Curless, Marc Levoy: A volumetric method for building complex models from range images, *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp.303-312(1996).
- [17] XTion PRO Live, [https://www.asus.com/3D-Sensor/Xtion\\_PRO\\_LIVE/specifications/](https://www.asus.com/3D-Sensor/Xtion_PRO_LIVE/specifications/), Accessed February 13, (2019).
- [18] GML C++ CameraCalibration Toolbox, <http://graphics.cs.msu.ru/en/research/projects/3dreconstruction/cppcalibration>, Accessed February 13, (2019).

- [19] OpenNI2, <https://structure.io/openni>, Accessed February 13, (2019).
- [20] Matthew Klingensmith, Ivan Dryanovski, Siddhartha S. Srinivasa, Jizhong Xiao: Chisel: Real Time Large Scale 3D Reconstruction Onboard a Mobile Device using Spatially Hashed Signed Distance Fields, Robotics: Science and Systems, (2015).
- [21] Pablo Fernandez Alcantarilla, Jesus Nuevo, Adrien Bartoli: Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces, In British Machine Vision Conference, (2013).
- [22] Point Cloud Library, <https://pointclouds.org>, Accessed February 13, (2019).
- [23] OpenCV library, <https://opencv.org>, Accessed February 13, (2019).
- [24] Boost C++ Libraries, <https://www.boost.org>, Accessed February 13, (2019).
- [25] David G. Lowe: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, International Journal of Computer Vision, **60**(2), pp.91-110(2004).
- [26] Ben Glocker, Jamie Shotton, Antonio Criminisi, Shahram Izadi: Real-Time RGB-D Camera Relocalization, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, **1**(4), pp.173-179(2013).
- [27] Ben Glocker, Jamie Shotton, Antonio Criminisi, Shahram Izadi: Real-Time RGB-D Camera Relocalization via Randomized Ferns for Keyframe Encoding, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **21**(5), pp.571-583(2015).
- [28] Vincent Lepetit, Francesc Moreno-Noguer, Pascal Fua: EPnP: An Accurate  $O(n)$  Solution to the PnP Problem, International Journal of Computer Vision, **81**(2), pp.155-166(2009).
- [29] Martin A. Fischler, Robert C. Bolles: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of the ACM, **24**(6), pp.381-395(1981).

# 付録 A 本研究で用いたマーカレストラッキング 手法

本付録では、環境撮影支援システム及び評価実験で撮影率を求める際に用いた、マーカレストラッキング手法の詳細について述べる。環境撮影支援システム及び評価実験で撮影率を求める際、AKAZEで認識される自然特徴点を利用したマーカレストラッキング手法を用いた。特徴点ベースのマーカレストラッキングでは、カメラから得られる画像を読み込み、それまでに読み込まれた画像との間の相対的なカメラ姿勢を求めることで、特定の座標系を基準としたカメラ姿勢を順次推定していく。このとき基準となる座標系をワールド座標系と呼ぶ。

トラッキング処理では、RGB-Dカメラで撮影し取得した color 画像と depth 画像を順に読み込み、以下に示す処理を行う。まず、新しく読み込まれた color 画像と depth 画像を  $I_{C_c}$ ,  $I_{C_d}$ , またそのペアを  $I_C$  とする。次に、 $I_{C_c}$  の画像局所特徴を計算し、 $I_{C_d}$  の深度情報を用いて、 $I_C$  に存在する自然特徴点のカメラ座標系における 3次元座標を計算する。このとき、対象とする自然特徴点に対応した  $I_{C_d}$  のピクセルに深度情報が欠損している場合には、その特徴点を除外する。 $I_C$  が最初に読み込まれた画像の場合は、 $I_C$  撮影時のカメラ姿勢をワールド座標系と定め、画像局所特徴、カメラ姿勢、自然特徴点のカメラ座標系における 3次元座標をデータベースに保存して次の画像の処理に進む。最初に読み込まれた画像でない場合、データベースに保存されている全画像の中で、 $I_C$  との類似度が最も高い画像  $I_P$  を読み込む。2つの画像の類似度は、Randomized Fern<sup>[26][27]</sup> を用いて各画像を符号化し、Brock Hamming Distance(BrockHD) を用いて計算される。次に、 $I_C$  と読み込んだ画像  $I_P$  の特徴点マッチングを行う。 $I_{P_c}$  の画像局所特徴を計算し、 $I_{C_c}$  の 1つの特徴点と  $I_{P_c}$  の全ての特徴点との特徴量間のハミング距離を計算する。その後、Nearest Neighbor Distance Ratio(NNDR)を利用して特徴点の誤対応を排除する手法<sup>[25]</sup>に従って、計算したハミング距離を小さい順にソートし、1番目、2番目に小さな距離をそれぞれ  $d_1$ ,  $d_2$  とし、次式を満たす場合は、その値をとった2点を対応付ける。

$$d_1 < 0.7d_2 \quad (\text{A.1})$$

$I_P$  の特徴点を対応付ける処理を  $I_C$  の全ての特徴点に対して行った後、同様に  $I_C$  の特徴点を  $I_P$  の特徴点と対応付ける処理を行う。その後、行った2通りの対応付けが一致している特徴点の対応を最終的なマッチング結果とする。マッチングを行う際、類似度の高い画像のペアはカメラ姿勢の差が小さいと考えられるため、正しく対応付けられている特徴点の組はそれぞれの画像上で近い位置に存在していると考えられる。そのため、対応付けられた特徴点のそれぞれの画像上での2次元座標が閾値  $th_1$  よりも離れている特徴点の組は、誤対応である可能性が高いため、マッチング結果の特徴点の組から除外する。また、得られた特徴点の組の数が少ない場合、Perspective-n-Point(PnP)問題を解いて  $I_P$  取得時のカメラ姿勢を基準とした  $I_C$  取得時のカメラ姿勢を推定する<sup>[28]</sup> 際に、推定されるカメラ姿勢の誤差が大きくなる可能性がある。そのため、最終的に得られた特徴点の組の数が閾値  $th_2$  未満だった場合はマッチング失敗と判定し、次に類似度が高い画像を  $I_P$  として再度読み込み、同様に特徴点マッチングを行う。繰り返し特徴点マッチングを行い、データベースに保存されている画像のうち  $k$  枚とのマッチングに失敗した場合、トラッキング失敗と判定され、 $I_C$  を破棄し次の画像を  $I_C$  として同様の処理を行う。対応付けられた特徴点の組の数が  $th_2$  以上の場合は、RANSAC<sup>[29]</sup> を用いて誤対応を排除しながら PnP 問題を解くことで、 $I_P$  取得時のカメラ姿勢を基準とした  $I_C$  取得時のカメラ姿勢を推定する<sup>[28]</sup>。最後に、 $I_C$  と  $I_P$  の類似度が閾値  $th_3$  以上  $th_4$  以下の場合、 $I_C$  の画像局所特徴、カメラ姿勢、自然特徴点のカメラ座標系における3次元座標をデータベースに追加、保存する。

本システム及び本評価実験では、画像局所特徴の計算に AKAZE<sup>[21]</sup> を用いた。また、Randomized Fern の Fern 数は一般的に使われている 500 とする。画像の符号化の前に適用するガウシアンフィルタの  $\sigma$  は 2.5 とする。閾値  $th_1 \sim th_3$  は、 $th_1 = 100$ ,  $th_2 = 50$ ,  $th_3 = 0.05$  とした。 $th_4$ ,  $k$  に関しては、システム実行時の処理速度を極力速くするため、本システムでは  $th_4 = 0.6$ ,  $k = 30$ , 本評価実験の撮影率の算出では  $th_4 = 0.65$ ,  $k = 50$  とした。

## 付録 B 本評価実験で用いた資料

付録 B では，本評価実験で用いた各資料を図 B.1～図 B.14 に示す．

## 実験説明資料 1

### 「3次元モデル作成のための環境撮影支援システムの性能評価に関する実験」のご協力をお願い

京都大学大学院エネルギー科学研究科  
エネルギー情報学分野  
緊急時連絡先：080-6144-5053（原園）

#### はじめに

この度は実験の参加者としてご協力頂き、誠にありがとうございます。実験に先立ち、実験に関する説明、諸注意とお願いがございますので、本資料の内容を熟読した上で、ご理解とご協力をお願い致します。全ての内容について確認した上で実験にご協力して頂ける場合は、同意書に署名をして頂きます。

#### 実験の目的

環境撮影支援システム 2 種(以下、システム A、システム B)の性能を評価することを目的とする。

#### 実験の手順

本実験は、(1)実験概要の説明（約 5 分）、(2)システム A、システム B の概要説明及び操作の練習（約 10 分）、(3)1 つ目のシステム(システム A もしくはシステム B)を用いた環境の撮影(約 5 分)、(4)1 つ目のシステムに関するアンケート 及びインタビュー(約 20 分)、(5)2 つ目のシステム(システム A もしくはシステム B)を用いた環境の撮影(約 5 分)、(6)2 つ目のシステムに関するアンケート 及びインタビュー(約 20 分)、の 6 区分に分かれています。各区分の詳細は下記の通りです。

##### (1) 実験概要の説明

実験説明資料 1(本資料)の内容を確認し、それを踏まえて実験にご協力して頂ける場合は同意書に署名をして頂きます。実験説明資料には主に実験の概要や実験中の諸注意などについて記述しております。

##### (2) システム A、システム B の概要説明及び操作の練習

本実験では、環境の 3 次元モデル作成のための、環境撮影を行うシステム 2 種類(システム A、システム B)を使用して頂きます。システム A、システム B の概要と使用方法、画面説明が実験説明資料 2 に記載されています。この資料を読んで頂いた後、両システムの操作練習を行って頂きます。

##### (3) 1 つ目のシステム(システム A もしくはシステム B)を用いた環境の撮影

システム A もしくはシステム B を使用して、こちらが指定した撮影対象に対して、環境の撮影を行って頂きます。

##### (4) 1 つ目のシステムに関するアンケート及びインタビュー

(3)での環境の撮影を行った後、使用したシステムに関するアンケートに回答して頂きます。またアンケート回答後に、アンケートの回答内容、その他のご意見などについて質問させていただきます。

##### (5) 2 つ目のシステム(システム A もしくはシステム B)を用いた環境の撮影

システム A とシステム B の内、(3)での環境の撮影で使用しなかったシステムを使用して、こちらが指定した撮影対象に対して、環境の撮影を行って頂きます。

図 B.1: 本評価実験で用いた評価実験の説明資料(1 ページ目)

#### (6) 2つ目のシステムに関するアンケート及びインタビュー

(5)での環境の撮影を行った後、使用したシステムに関するアンケートに回答して頂きます。また、アンケート回答後に、アンケートの回答内容、その他のご意見などについて質問させていただきます。

#### 実験によって生じる危険について

- ◆ 実験ではタブレット PC を手に持ち、タブレット PC に表示された映像を見ながら環境を撮影してもらうため、周囲への不注意によって環境内の設備との接触や転倒を起こす可能性があります。そのため、頭上や足元の接触を起こしやすい箇所に設備が配置されておらず、かつ移動しやすい領域を撮影対象に設定するとともに、撮影時には実験者が注意喚起します。

#### 実験の中止について

- ◆ 実験は途中であっても、実験参加者の意思でいつでも中止することができます。その場合、実験参加者に不利益が生じることはありません。

#### データの取り扱いについて

- ◆ この実験で得られたデータは、研究用としてのみ用いられます。
- ◆ 実験の結果を論文などに掲載し発表する場合は、参加者の氏名や、個人が特定される情報が公開されることは一切ありません。
- ◆ 実験参加者の個人情報、実験データとは切り離して扱われます。また、個人情報は、流出することのないよう厳密に管理され、研究上の必要性が消失した場合には、すみやかに廃棄します。

#### この実験に関する問い合わせ

- ◆ 実験開始後あるいは終了後、あなたに万一不利益が生じたときあなたが判断されたときは、その内容を下記に直接ご連絡ください。
- ◆ 実験内容や結果について、ご不明な点や詳しく知りたいことがございましたら、下記にご連絡ください。

#### 問い合わせ先

京都大学大学院エネルギー科学研究科  
エネルギー社会・環境科学専攻  
エネルギー情報学研究室  
〒606-8501 京都市左京区吉田本町  
電話：075-753-5613  
shimoda@energy.kyoto-u.ac.jp  
研究責任者： 下田 宏

#### 同意書に関して

- ◆ 説明を受けた上で実験に協力して頂ける方には、書類に確認の署名をして頂きます。これは、実験参加者の方に実験の内容をきちんと説明し、同意を頂いた上で実験をするという手続きを、私たちが確実にを行うためのものです。署名により、何らかの拘束が生じることは一切ありませんので、ご協力をお願い申し上げます。
- ◆ 同意書はこの書類の 2 ページ先になります。また、同意書の内容は次ページの同意書（控え）と書かれた紙面と同様になります。説明した内容の確認となりますので、同意書（控え）を書かれたページを含む本書類は、実験終了時にお持ち帰り下さい。

日 付 平成 年 月 日

実験説明者 \_\_\_\_\_ (署名)

研究責任者 \_\_\_\_\_ 下田 宏

図 B.2: 本評価実験で用いた評価実験の説明資料 (2 ページ目)



## 同意書(控え)

私は、「3次元モデル作成のための環境撮影支援システムの性能評価に関する実験」について、目的・方法・予測される問題等について説明者より説明文書を用いて十分な説明を受け、以下の項目を理解しました。

- 研究の目的、方法、あらゆる危険性とそれに対する対応について。
- 私が自らの自由意志でいつでも実験を中止することができること。
- 私がいかなる時点において実験の参加の拒否をしても何ら不利益を被らないこと。
- 研究協力に同意した場合であっても、随時これを撤回できること。
- 記録された個人情報は、外部に漏洩しないよう厳密に管理されること。

そこで自らの自由意志により、上記実験の参加者として協力することを同意します。

日付 \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

住所 \_\_\_\_\_

電話番号 \_\_\_\_\_

ご署名 \_\_\_\_\_

研究責任者： 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
エネルギー社会・環境科学専攻  
下田 宏

※この書類は、実験参加者が受けた実験説明の内容と、署名をした同意書の文面を、実験参加者側が確認するためのものです。実験終了後、お持ち帰り下さい。

※提出いただいた同意書は、日付記載日から10年間保存されます。

図 B.3: 本評価実験で用いた評価実験の説明資料(3ページ目)

京都大学大学院エネルギー科学研究科  
エネルギー社会・環境科学専攻 下田 宏 殿

## 同意書

私は、「3次元モデル作成のための環境撮影支援システムの性能評価に関する実験」について、目的・方法・予測される問題等について説明者より説明文書を用いて十分な説明を受け、以下の項目を理解しました。

- 研究の目的、方法、あらゆる危険性とそれに対する対応について。
- 私が自らの自由意志でいつでも実験を中止することができること。
- 私がいかなる時点において実験の参加の拒否をしても何ら不利益を被らないこと。
- 研究協力に同意した場合であっても、随時これを撤回できること。
- 記録された個人情報は、外部に漏洩しないよう厳密に管理されること。

そこで自らの自由意志により、上記実験の参加者として協力することを同意します。

日付 \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

住所 \_\_\_\_\_

電話番号 \_\_\_\_\_

ご署名 \_\_\_\_\_

研究責任者： 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
エネルギー社会・環境科学専攻  
下田 宏

※ この書類は日付記載日から10年間保存されます。

図 B.4: 本評価実験で用いた評価実験の説明資料(4ページ目)

京都大学大学院エネルギー科学研究科  
エネルギー社会・環境科学専攻 下田 宏 殿

## 同意撤回書

私は、 年 月 日付で同意した「3次元モデル作成のための環境撮影支援システムの性能評価に関する実験」へ協力することについて、同意を撤回いたします。

日付 年 月 日

住所 \_\_\_\_\_

電話番号 \_\_\_\_\_

ご署名 \_\_\_\_\_

研究責任者： 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
エネルギー社会・環境科学専攻  
下田 宏

※ この書類は日付記載日から10年間保存されます。

図 B.5: 本評価実験で用いた評価実験の説明資料 (5 ページ目)

# 実験説明資料 2

## システムの使用方法

1. 本実験の概要
2. システムの概要
3. 機器の使い方
4. システムAの使用方法
5. システム使用時の注意事項
6. システムBの使用方法

1

## 本実験の概要

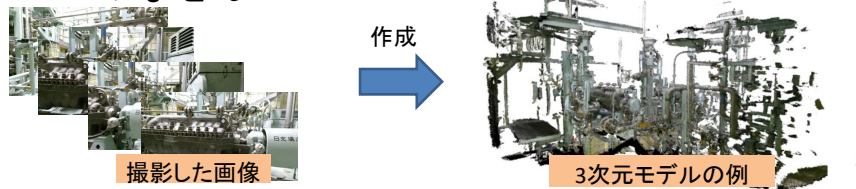
- 本評価実験では、皆様に2種類のシステム (システムAおよびシステムB)を使用して頂きます
- 本資料ではこれら2種類のシステムの使用方法について説明します

2

図 B.6: 本評価実験で用いたシステムの操作説明資料 (1-2 ページ)

## システムの概要

- 本システム(**システムA**、**システムB**)は3次元モデルを作成するための撮影を行うアプリケーションです
  - 撮影した画像からモデルが作成できます
  - 3次元モデルは作業現場の確認に利用可能です
  - 本日は撮影のみであり、モデルの作成までは行いません



## 機器の使い方

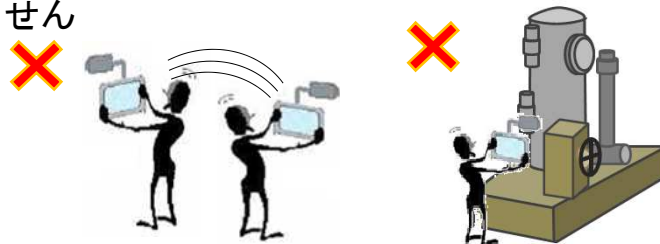
- **システムA**、**システムB**ともに同じハードウェアを使用します
- 機器裏側の持ち手を握るように持って使用して下さい



図 B.7: 本評価実験で用いたシステムの操作説明資料 (3-4 ページ)

## システム使用時の注意点

- ゆっくりとカメラを動かす必要があります
- カメラを対象から約50cm以上離して撮影する必要があります
  - カメラを動かすスピードが速すぎたり、撮影対象との距離が近すぎると正確な3次元モデルが作成できません



5

## システムAの使用方法

- アプリケーションを起動すると、カメラ映像が画面に表示されます
- 指示された環境の隅々まで万遍なく、陰になっている部分も回り込んで撮影してください
- 指示された環境を隅々まで撮影しきれたと思ったら、撮影を終了してください



6

図 B.8: 本評価実験で用いたシステムの操作説明資料 (5-6 ページ)

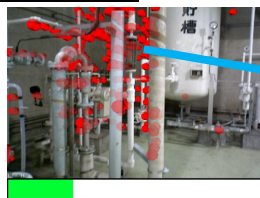
## システムBの使用法

- システムBは、
  - 撮影できていない領域(未撮影領域)
  - カメラを動かすスピードを提示します
- 画面の提示に沿って撮影を行ってください

7

## 表示画面の説明①

- 陰になっていたり、まだ撮影されていない場所は球が表示されます
  - 回り込むようにカメラを動かして球を撮影してください
  - 撮影されると球は消えます
- 十分に環境を撮影して、これ以上、球が消せなくなったと思ったら、撮影を終了してください



表示画面の例

球が表示されている箇所が未撮影領域です  
設備の裏にある未撮影領域は半透明で表示されます

8

図 B.9: 本評価実験で用いたシステムの操作説明資料 (7-8 ページ)

## 表示画面の説明②

- 画面下部には、現在のカメラのスピードがゲージバーで表示されます
- ゲージバーの色が黄色や赤色になった場合は緑色になるように、カメラを動かす速度をゆっくりにしてください

速度に応じてバーの色が緑、黄、赤、と変化します  
赤色の状態のまま撮影を行うと、正確なモデルが作成されません



表示画面の例

9

## 表示画面の説明③

- 下のような画面が表示されることがあります  
– その際は画面下に表示されている、過去に撮影した場所の内のいずれかに戻ってください



表示画面の例

10

図 B.10: 本評価実験で用いたシステムの操作説明資料 (9-10 ページ)



## アンケート用紙(システム B)

システム B に関する以下の項目について、次の 5 段階評価のうち最もあてはまると思うものを、○をつけてお答えください。

1. そう思わない 2. あまりそう思わない 3. どちらでもない 4. ややそう思う 5. そう思う

- |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| (1) 環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた                        | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (2) 撮影を終了するタイミングが容易に判断できた                       | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (3) カメラを動かす適切なスピードを容易に理解できた                     | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (4) ゲージバーの色を緑色に保ちながら撮影を行うことは簡単だった               | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (5) 「下の場所に戻ってください」という表示が出た際、提示された場所に容易に戻ることができた | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (6) 機器は負担にならない重さである                             | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (7) 初めて使う人でも簡単に使用できる                            | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (8) システムを使った際の画面の応答は速やかであった                     | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

(裏のページに続く)



システム B の画面例

図 B.11: 環境撮影支援システムに関するアンケート (項目 (1)-(8))

(9) その他、システムについて意見や不明な点がありましたら、ご記入ください。

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for handwritten input. It occupies the central portion of the page below the question text.

図 B.12: 環境撮影支援システムに関するアンケート (項目 (9))

No. \_\_\_\_\_

### アンケート用紙(システム A)

システム A に関する以下の項目について、次の 5 段階評価のうち最もあてはまると思うものを、○をつけてお答えください。

1. そう思わない 2. あまりそう思わない 3. どちらでもない 4. ややそう思う 5. そう思う

- |                           |   |   |   |   |   |
|---------------------------|---|---|---|---|---|
| (1) 環境の未撮影領域を意識しながら撮影できた  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (2) 撮影を終了するタイミングが容易に判断できた | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (3) 機器は負担にならない重さである       | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (4) 初めて使う人でも簡単に使用できる      | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

(裏のページに続く)



システム A の画面例

図 B.13: 既存の撮影システムに関するアンケート (項目 (1)-(4))

(5) その他、システムについて意見や不明な点がありましたら、ご記入ください。

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for handwritten input of responses to the survey question above it.

図 B.14: 既存の撮影システムに関するアンケート (項目 (5))