

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
拡張現実感を用いた
題目： 仮置・運搬作業シミュレーション
システムの開発

指導教員： 下田 宏 准教授

氏名： 青山 周平

提出年月日： 平成23年2月9日(水)

論文要旨

題目：拡張現実感を用いた仮置・運搬作業シミュレーションシステムの開発

エネルギー情報学分野, 青山 周平

要旨：

日本では現在、運転を終えた「ふげん」および「東海発電所」の2基の原子力発電プラントの解体が進められている。原子力発電プラントは放射性物質を取り扱うことから、十分に安全への対策を講じた上で解体される必要がある。

原子力発電プラント内部の特徴として、機器や配管が多数存在し、狭隘な場所が多いことが挙げられる。そのため、ふげんでは解体工程で発生する機器同士の干渉を3DCADと仮想現実感(VR, Virtual Reality)を用いたシステムにより評価している。しかし、評価に用いる3DCADデータは実際の現場の状況とは異なる場合が多いため、正確な評価が難しい。また、プラントは複雑な環境であるため、VRで示された接触箇所の現実空間への対応づけが難しい。

そこで、本研究ではレーザレンジファインダを用いた3次元形状計測および拡張現実感技術(AR, Augmented Reality)を利用した解体機器の干渉を評価するシステムを開発した。これにより、解体作業計画立案者は現状を正しく反映したモデルで干渉を評価でき、接触箇所は現実の映像に重畳表示され示されるため、状況の直観的な理解が可能になる。提案するシステムは2つのサブシステムにより構成される。1つは作業環境の形状を計測し、作業環境および機器の形状モデルを取得するシステムである。もう1つはタブレットPCをキャスト付三脚に固定し、カメラで撮影した画像内に、取得した機器の形状モデルを重畳表示することで、機器の仮置・運搬される様子を把握することができるシステムである。作業環境および機器のモデルの相対位置を計算することにより干渉の有無を評価する。干渉が生じた際には、機器のモデルの接触箇所およびカメラ画像内に映る作業場の接触箇所が着色される。

本研究では、開発したシステムの作業現場での有用性および受容性を評価するため、まず模擬環境においてシステムの基本的な使いやすさを評価し、得られた評価結果を参考に改良を加えたシステムを実際の作業現場でふげんの職員らに使用してもらい評価を行った。評価手法にはヒューリスティック法を用い、アンケートおよびインタビューにより評価した。

模擬環境における評価では、干渉箇所を示す情報提示の仕方や、操作画面設計、重畳表示の精度に関する問題点を結果として抽出し、それを参考にシステムの改良を行った。また、実際の作業環境における評価により、機器の形状モデルを現場に重畳表示することにより、仮置・運搬作業の様子が直感的に理解しやすいことが分かった。また、仮置・運搬作業シミュレーションに用いるモデルとして、実際の解体作業現場を測定することにより得たモデルを用いることが有効であることが分かった。解体機器のモデルをオブジェクトの動きに合わせて移動する方法は直観的で簡単であることが分かったが、一方で、細かい操作指示は出しづらいことが分かった。正確な仮置・運搬作業シミュレーションを行うために、オブジェクトを用いてモデルをより詳細に動かす方法を検討する必要があることが分かった。また、重畳表示された解体機器のモデルが揺れてしまうことにより、誤った干渉の判定がされてしまうことから、トラッキング精度の向上が今後の課題として残った。

目次

| | |
|---|----|
| 第 1 章 序論 | 1 |
| 第 2 章 研究の背景と目的 | 3 |
| 2.1 原子炉廃止措置研究開発センターにおける解体作業の現状と課題 | 3 |
| 2.2 拡張現実感 | 6 |
| 2.3 拡張現実感を用いた作業支援 | 9 |
| 2.4 レーザを用いた 3 次元計測技術 | 9 |
| 2.5 研究の目的 | 13 |
| 第 3 章 仮置・運搬作業シミュレーションシステムの設計と開発 | 14 |
| 3.1 システムの概要 | 14 |
| 3.2 システムの要求仕様 | 14 |
| 3.3 システムの設計 | 16 |
| 3.3.1 モデリングサブシステムの概略設計 | 17 |
| 3.3.2 作業検証サブシステムの概略設計 | 22 |
| 3.4 システムの開発 | 29 |
| 3.4.1 ディスプレイデバイスの選定 | 29 |
| 3.4.2 トラッキング手法の選定 | 32 |
| 3.4.3 開発したモデリングサブシステムの概要 | 35 |
| 3.4.4 開発した作業検証サブシステムの概要 | 42 |
| 第 4 章 模擬環境におけるシステムの評価 | 47 |
| 4.1 評価の目的 | 47 |
| 4.2 評価方法 | 47 |
| 4.2.1 評価環境 | 47 |
| 4.2.2 評価手法 | 49 |
| 4.2.3 評価手順 | 50 |
| 4.2.4 作業シナリオ | 51 |

| | | |
|--------------|--------------------------|-----------|
| 4.2.5 | 評価アンケート | 56 |
| 4.3 | 評価結果 | 56 |
| 4.4 | 問題点とその解決策 | 56 |
| 第 5 章 | 解体作業現場におけるシステムの評価 | 71 |
| 5.1 | 評価の目的 | 71 |
| 5.2 | 評価方法 | 71 |
| 5.2.1 | 評価環境 | 71 |
| 5.2.2 | 評価手法 | 74 |
| 5.2.3 | 評価手順 | 74 |
| 5.2.4 | 作業シナリオ | 74 |
| 5.2.5 | 評価アンケート | 74 |
| 5.3 | 評価結果 | 75 |
| 5.4 | 結果の考察 | 84 |
| 5.4.1 | モデリングサブシステムに関する評価 | 84 |
| 5.4.2 | 作業検証サブシステムに関する評価 | 84 |
| 5.5 | まとめと今後の課題 | 87 |
| 第 6 章 | 結論 | 90 |
| | 謝 辞 | 92 |
| | 参 考 文 献 | 93 |
| 付録 A | 事前説明資料 | 付録 A-1 |
| 付録 B | アンケート用紙 | 付録 B-1 |

目 次

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | 解体作業シミュレーションシステムによる被ばく量の事前評価 ^[2] | 4 |
| 2.2 | 解体作業シミュレーションシステムによる機器の事前干渉評価 ^[2] | 5 |
| 2.3 | 拡張現実感の位置付け ^[5] | 6 |
| 2.4 | 対象物の直感的な理解 | 7 |
| 2.5 | 情報内容の容易な理解 | 8 |
| 2.6 | ワイヤーハーネス作成支援システム ^[6] | 9 |
| 2.7 | 住宅景観シミュレーションシステム画面例 ^[7] | 10 |
| 2.8 | 解体作業支援システム画面例 ^[8] | 10 |
| 2.9 | レーザレンジファインダ ^[9] | 11 |
| 2.10 | 東大寺大仏の計測結果 ^[11] | 12 |
| 2.11 | 統合された東大寺大仏モデル ^[11] | 12 |
| 3.1 | TPCOSS の構成 | 15 |
| 3.2 | 3次元形状計測の概要 | 18 |
| 3.3 | モデリングサブシステムの計測画面イメージ | 19 |
| 3.4 | 計測データの加工手順 | 20 |
| 3.5 | 作業検証サブシステムの概要 | 23 |
| 3.6 | 作業検証サブシステムのインタフェース画面 | 25 |
| 3.7 | モデルの表示・非表示の切り替え | 26 |
| 3.8 | オブジェクトを用いた形状モデルの回転移動 | 26 |
| 3.9 | オブジェクトを用いた形状モデルの平行移動 | 27 |
| 3.10 | スタイラスペンを用いた形状モデルの回転移動 | 28 |
| 3.11 | スタイラスペンを用いた形状モデルの平行移動 | 29 |
| 3.12 | プロジェクション型ディスプレイ | 31 |
| 3.13 | ヘッドマウント型ディスプレイ ^[13] | 32 |
| 3.14 | ハンドヘルド型ディスプレイ | 32 |
| 3.15 | ARToolKit のマーカ ^[18] | 36 |
| 3.16 | 遠近両用マーカ ^[19] | 36 |

| | | |
|------|--------------------------|--------|
| 3.17 | モデリングサブシステムのハードウェア構成 | 37 |
| 3.18 | モデリングサブシステムの全体図 | 38 |
| 3.19 | モデリングサブシステム計測画面 | 40 |
| 3.20 | モデルの統合作業に用いるアプリケーションの画面例 | 41 |
| 3.21 | 作業検証サブシステムのハードウェア構成 | 43 |
| 3.22 | 作業検証サブシステム画面例 | 44 |
| 3.23 | 作業検証サブシステム制御用 PC | 45 |
| | | |
| 4.1 | 模擬評価環境の見取り図 | 48 |
| 4.2 | 評価環境の様子 | 48 |
| 4.3 | サイコロマーカ | 49 |
| 4.4 | 評価環境に貼付したマーカの位置関係 | 50 |
| 4.5 | 評価手順 | 51 |
| 4.6 | 解体機器の形状モデルの例 | 53 |
| 4.7 | 評価の様子 | 54 |
| 4.8 | 仮置作業シミュレーションの様子 | 54 |
| 4.9 | 運搬作業シミュレーションの様子 | 55 |
| 4.10 | 改良したインタフェース画面 | 67 |
| 4.11 | 作業シミュレーション画面の保存例 | 69 |
| | | |
| 5.1 | 純水装置室見取り図 | 72 |
| 5.2 | 評価環境の様子 | 73 |
| 5.3 | 評価環境に貼付したマーカの位置関係 | 73 |
| 5.4 | 評価手順 | 75 |
| 5.5 | 解体機器の形状モデルの例 | 76 |
| 5.6 | 評価の様子 | 77 |
| 5.7 | 仮置作業シミュレーションの様子 | 78 |
| 5.8 | 運搬作業の様子 | 79 |
| | | |
| A.1 | 事前説明資料 (1/10) | 付録 A-1 |
| A.2 | 事前説明資料 (2/10) | 付録 A-1 |
| A.3 | 事前説明資料 (3/10) | 付録 A-2 |
| A.4 | 事前説明資料 (4/10) | 付録 A-2 |
| A.5 | 事前説明資料 (5/10) | 付録 A-2 |

| | |
|-----------------------------|--------|
| A.6 事前説明資料 (6/10) | 付録 A-3 |
| A.7 事前説明資料 (7/10) | 付録 A-3 |
| A.8 事前説明資料 (8/10) | 付録 A-3 |
| A.9 事前説明資料 (9/10) | 付録 A-4 |
| A.10 事前説明資料 (10/10) | 付録 A-4 |
| | |
| B.1 モデリングサブシステムアンケート用紙 | 付録 B-2 |
| B.2 作業検証サブシステムアンケート用紙 (1/4) | 付録 B-3 |
| B.3 作業検証サブシステムアンケート用紙 (2/4) | 付録 B-4 |
| B.4 作業検証サブシステムアンケート用紙 (3/4) | 付録 B-5 |
| B.5 作業検証サブシステムアンケート用紙 (4/4) | 付録 B-6 |

表目次

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | モデリングサブシステムの要求仕様と機能構成の対応 | 17 |
| 3.2 | 作業検証サブシステムの要求仕様と機能構成の対応 | 24 |
| 3.3 | 各ディスプレイの長所 | 30 |
| 3.4 | 各ディスプレイの短所 | 30 |
| 3.5 | 各トラッキング技術の長所 | 33 |
| 3.6 | 各トラッキング技術の短所 | 34 |
| 3.7 | レーザレンジファインダの仕様 | 38 |
| 3.8 | モデリングサブシステムのカメラの仕様 | 39 |
| 3.9 | 電動雲台の仕様 | 39 |
| 3.10 | モデリングサブシステムの制御用 PC の仕様 | 39 |
| 3.11 | 作業検証サブシステムの制御用 PC の仕様 | 43 |
| 3.12 | 作業検証サブシステムのカメラの仕様 | 44 |
| 4.1 | モデリングサブシステムに関する質問項目と要求仕様・機能構成の対応表 | 57 |
| 4.2 | 作業検証サブシステムに関する質問項目と要求仕様・機能構成の対応表 (1/3) | 58 |
| 4.3 | 作業検証サブシステムに関する質問項目と要求仕様・機能構成の対応表 (2/3) | 59 |
| 4.4 | 作業検証サブシステムに関する質問項目と要求仕様・機能構成の対応表 (3/3) | 60 |
| 4.5 | モデリングサブシステムに関する質問項目と評価結果 | 61 |
| 4.6 | 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (1/3) | 62 |
| 4.7 | 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (2/3) | 63 |
| 4.8 | 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (3/3) | 64 |
| 4.9 | 評価者 A のインタビューおよび自由記述による意見 | 65 |
| 4.10 | 評価者 B のインタビューおよび自由記述による意見 | 66 |
| 4.11 | TPCOSS のハードウェアの問題点とその対応 | 67 |
| 4.12 | TPCOSS のインタフェースに関する問題点とその解決策 | 68 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.1 | モデリングサブシステムに関する質問項目と評価結果 | 78 |
| 5.2 | 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (1/3) | 80 |
| 5.3 | 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (2/3) | 81 |
| 5.4 | 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (3/3) | 82 |
| 5.5 | 評価者 A のインタビューおよび自由記述による意見 | 83 |
| 5.6 | 評価者 B のインタビューおよび自由記述による意見 | 83 |
| 5.7 | 評価者 C のインタビューおよび自由記述による意見 | 84 |
| 5.8 | 評価者 D のインタビューおよび自由記述による意見 | 85 |

第 1 章 序論

近年では、エネルギー・地球温暖化問題は人類が共通して直面する難問であり、その対策が急務であることは世界的な共通認識となっている。これを背景に二酸化炭素排出量削減と安定した電力供給が同時に要求される一方、日本は国土面積やその地形的な理由から、風力発電、水力発電、地熱発電などの方法だけでは十分な発電量を得ることができない。そのため、わが国の基幹電源として原子力発電が益々重要視されてきている。原子力発電はほとんど温室効果ガスを排出せずに、安定して莫大なエネルギーを確保できる非常に有用な電源であるが、放射性物質を取り扱うことから、発電プラントの運用には安全性と信頼性の確保が求められる。

一方、老朽化により運転を停止した原子力発電プラントの解体は、事前に綿密な計画を立て、十分安全への対策を講じた上で実施する必要がある。原子力発電プラントは設備機器や配管が非常に多い複雑な環境をしているため、その通路や作業場にも空間的な余裕が無い場合が多い。そのため、設備機器を細断するために床に仮置を行う際や、機器を運搬する際に周囲の環境との関係に注意を払う必要がある。具体的には設備機器が周囲に干渉しないか、設備機器と周囲の間にどれくらいの作業スペースがあるか、などを確認した上で作業計画を作成しなければならない。しかし、このような確認は高度な空間把握能力や豊富な作業経験が必要であり、難しい作業である。前述した安全性と信頼性を確保するためには、解体作業計画を作成する人間とプラントの間に存在するマンマシンインタフェースの改善が必要であると考えられる。

上述した仮置・運搬作業時に必要な確認作業を支援する方法の一つとして、拡張現実感技術 (Augmented Reality, AR) を利用する方法が考えられる。拡張現実感技術とは、カメラで捉えた現実世界の映像にコンピュータで生成した情報を重畳表示する技術であり、直感的に理解しやすい形でユーザに情報提示を行うことができる。本研究では、この拡張現実感技術を用いて解体対象機器の仮置・運搬作業のシミュレーションを行うことのできるシステムを開発し、あるスペースに機器を仮置できるかどうか、またある通路を機器を運搬し通過できるかどうかを直感的に理解できる形で提示することにより、仮置・運搬作業計画の作成を支援する手法を提案する。

本論文は第 1 章の序論を含め第 6 章までの 6 部で構成される。第 2 章では仮置・運搬作業の現状と問題点について述べる。次にこれを背景とした本研究の目的と意義を述

べる。第3章では仮置・運搬作業計画を支援するシステムの設計について述べ、その設計にしたがって試作したシステムについて述べる。第4章では試作したシステムの動作確認をし、システムの改良点を発見するために行った模擬環境における評価について述べる。第5章では実際に解体中の原子力発電プラント内で実施したシステムの評価について述べる。第6章で本研究の結果をまとめ、考察および今後の課題を述べる。

動作確認を実施するとともに、予備的に有用性と受容性を評価し、TPCOSSを実際の解体現場で使用するにあたり必要なシステムの改良点を発見することを目的とする。

第 2 章 研究の背景と目的

本章ではまず、本研究で支援対象とする、仮置・運搬作業の現状とその問題点について述べる。次いで、本研究でシステムを実現する際に利用する技術とこれまでの他研究における応用例について述べる。最後に本研究の目的と意義について述べる。

2.1 原子炉廃止措置研究開発センターにおける解体作業の現状と課題

原子炉廃止措置研究開発センター(以下、ふげん)は、重水減速軽水冷却圧力管型炉であり、1979年3月から運転を開始し、2003年3月に運転を終了した。その後、原子炉の廃止措置技術を開発する研究所として、ふげん運転終了後約10年間を廃止措置に向けた準備期間として廃止措置計画の策定を行っている^[1]。同時に、廃止措置の基本方針の1つに「既存技術の徹底活用による合理的な廃止措置」を目標に掲げ、積極的な廃止措置技術の開発・研究に取り組んでいる。「廃止措置」とは、使い終わった原子力発電プラントから放射能を取り除き、安全に解体することを指し、一般的な化学プラントや発電プラントなどの解体とは区別される。放射能を持たない一般的な化学プラントや発電プラントが解体対象となる場合、火薬を用いた発破解体や、重機によるとり壊し解体が行われる。しかし、原子力発電プラントを解体する際には、放射性機器、構造物等を放射線環境下で安全に撤去し、発生した放射性廃棄物を適切に処理しなければならないため、火薬や重機を用いた大掛かりな解体はできない。また、一般安全対策は勿論、放射性粉じん等の原子炉施設外への放出低減対策及び作業員の被ばく低減対策が求められ、この点で一般的な解体と廃止措置における解体は大きく異なる。したがって、解体作業の安全性の確保や作業員の被ばく量低減、廃棄物発生量の抑制のために、解体手順や工法を熟考した綿密な解体計画を立てる必要がある。しかし、作業員の被ばく量や作業効率など様々な観点から検討し、立案する計画の最適化を図ることは容易ではない。そこで、ふげんでは、安全かつ効率的・合理的な廃止措置の計画立案を目的として、廃止措置エンジニアリング支援システム(DEXUS)の開発を進めている^[2]。DEXUSの一部を例に挙げると、図2.1および図2.2に示すように3DCAD(Computer Aided Design)データベースを利用した人工現実感(Virtual Reality,VR)

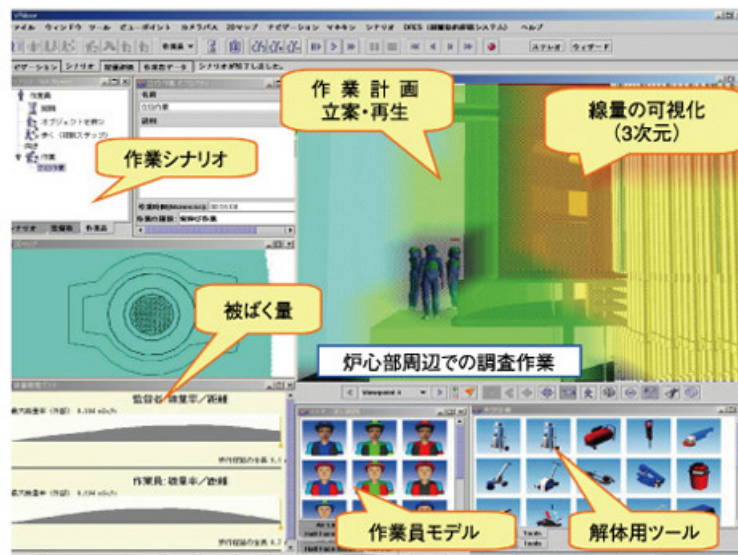


図 2.1: 解体作業シミュレーションシステムによる被ばく量の事前評価 [2]

による解体シミュレーションシステムがある。これらのシステムでは作業員の内部・外部被ばく量の評価や、解体工程で発生する機器同士の干渉を評価している。

原子力発電プラントに多く存在する大型の機器を解体する場合、実際の解体作業現場では機器を十分なスペースのある場所に横倒しして仮置き、その後バンドソーなどを用いて細断する場合が多い。また、近くに十分なスペースが無い場合、最寄の適当な場所まで解体機器を運搬することもある。

このような解体機器の仮置きや運搬作業は、失敗すれば解体作業全体の安全性や作業効率に影響してしまうため、特に綿密な事前計画の作成が重要となる。特に狭隘な作業環境であればあるほど、仮置き・運搬の際の周囲機器との接触事故は起こりやすくなる。また、運搬の際に運び出せると考えていたものが運び出せなくなることも考えられる。

しかし、作業計画を立案する時点において、環境形状が複雑かつ狭隘な空間内で大型の機器を仮置き・運搬する様子を想像し、実行可能性の判断を下すことは困難である。以上の理由から、仮置き・運搬作業の計画立案を支援するシステムが必要である。

しかし、前述した解体作業シミュレーションシステムを用いた機器の干渉評価システムは、以下に述べるような問題がある。

問題 (1) 解体機器と作業環境の間の接触箇所を把握することが難しい

DEXUS の解体機器の干渉シミュレーションでは、干渉が起こった際の解体機器と作

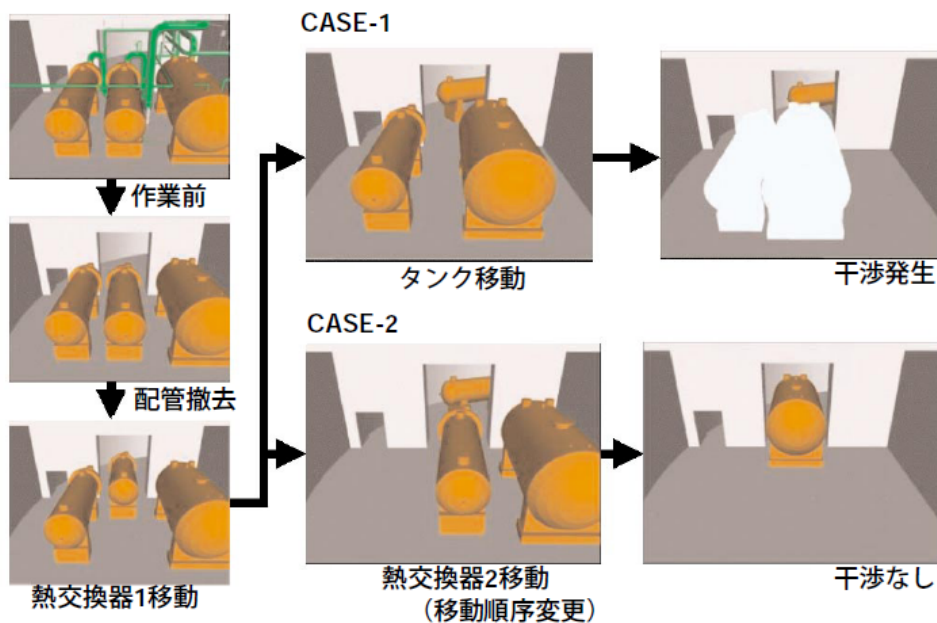


図 2.2: 解体作業シミュレーションシステムによる機器の事前干渉評価 [2]

業環境の接触箇所を詳しく特定することは困難である。また、原子力発電プラントは機器や配管が多数存在する複雑な環境であるため、VRで示された接触箇所が現実空間のどこに該当するのかを判定するのが困難である。そのため解体計画を立てる際は、実際の作業現場において、解体機器を仮置・運搬する作業の様子を見ながら、作業スペースの確認や干渉した箇所について直観的に把握できることが望ましい。これを実現する技術として拡張現実感がある。

問題 (2) 3DCAD データベースが現状を正確に反映していない

現在、データベースに登録されている 3DCAD データは、主要な機器類や、比較的大型の機器の 3DCAD データしか保存されていない。また、作業環境は新たな機器の設置や、機器の撤去などにより変化するが、3DCAD データにそれらの変化が反映されていない場合が多く、その結果データベースに保存されている 3DCAD データは現状を正しく表していない場合が多い。以上の理由から、データベースに存在する 3DCAD と実際の作業環境とは大きく異なっている場合が多く、現在の解体シミュレーションシステムによる機器の干渉判定は正しく行えない場合も多い。上記の問題を解決するにあたり有効と考えられる技術に、レーザを用いた 3次元形状計測がある。

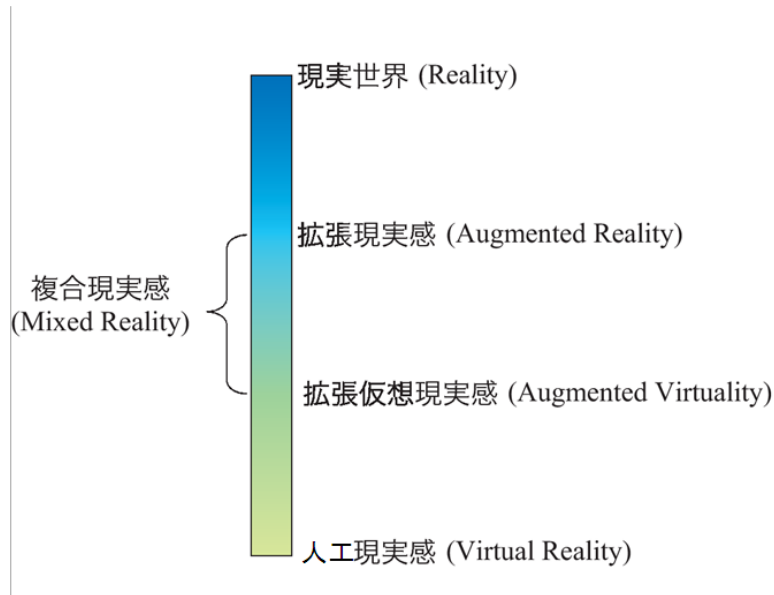


図 2.3: 拡張現実感の位置付け [5]

2.2 拡張現実感

2.1 節で述べた問題 (1) を解決するための有効な手段として、拡張現実感の利用が考えられる [3][4]。拡張現実感 (Augmented Reality, AR) 技術は、現実空間と仮想空間を融合した複合現実感 (Mixed Reality, MR) の一種である。ユーザの視界に、文字や図形などの CG (Computer Graphics) 情報を重ね合わせることで、ユーザが得る現実空間の情報を拡張できる。人工現実感 (Virtual Reality) ではユーザはコンピュータで生成された空間に没入するが、拡張現実感では現実の世界と CG をリアルタイムに融合しており、図 2.3 に示すように人工現実感に比べ、より現実世界に近いインターフェースである [5]。

拡張現実感を用いた情報提示には以下のような特徴がある。

特徴 1 対象物の直観的理解が可能

図 2.4 に示すように、拡張現実感を用いることで、対象物上に直接情報を重畳できるため、ユーザはその情報が示す対象物がどれであるか、どこにあるかを直観的に理解を促すことができる。

特徴 2 情報内容の容易な理解が可能

図 2.5 に示すように、ユーザの視野内に付加して表示する情報は、文字だけでなく矢

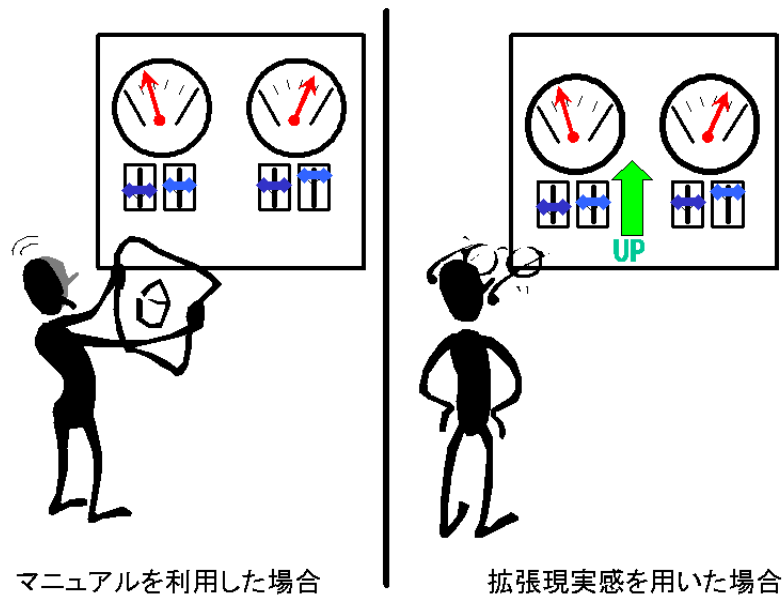


図 2.4: 対象物の直感的な理解

印などを用いて絵で表現できるため。ユーザは付加される情報の内容を容易かつ確実に理解できる。

この拡張現実感を実現するにあたり必要な要素技術として以下の4つがある。

- (1) トラッキング技術
- (2) ディスプレイ技術
- (3) レジストレーション技術
- (4) キャリブレーション技術

これらの4つの要素技術について以下で説明する。

(1) トラッキング技術 拡張現実感とは、カメラで捉えた実世界の映像の中にCGを重畳表示し、あたかもそれが実在するかのようにユーザに情報提示する技術である。このような情報提示をするためには、実世界の映像の視点の移動に伴って、CGもその視点変化に応じた正しい位置に重畳表示される必要がある。そのため、現実世界の映像に映る環境と、カメラの視点との間の相対的な位置関係をリアルタイムに計算しなければならない。この計算技術のことをトラッキング技術と呼ぶ。トラッキングは拡張現実感の主要な技術であり、様々なトラッキング手法がこれまでに研究・開発されている。

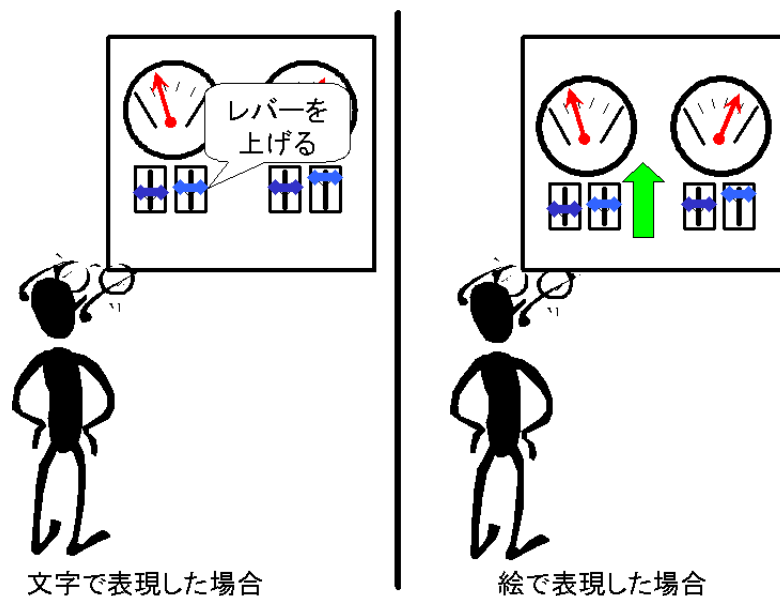


図 2.5: 情報内容の容易な理解

(2) ディスプレイ技術 ディスプレイ技術は、実世界の映像にCGを重畳表示した映像をユーザに提示する技術である。映像提示手法には様々なものが提案されているが、大きく分類すると、プロジェクション型デバイスによる提示、PDA(Personal Data Assistance)やタブレットPCなどのハンドヘルドデバイスによる提示、ヘッドマウントディスプレイ(Head Mounted Display,HMD)による提示に大別される。

(3) レジストレーション技術 レジストレーション技術は、トラッキングにより計算されたカメラの視点と実世界映像内の環境との相対位置関係をもとに、CGを現実空間の適当な場所に表示するための表示位置合わせ技術である。

(4) キャリブレーション技術 キャリブレーション技術は、正確なレジストレーションおよびトラッキングを実現するための事前調整をする技術である。具体的には、カメラレンズの歪みや焦点距離の評価、HMDのディスプレイとユーザの目の位置関係の評価などを行い、その評価値に合わせてシステムの動作を補正することをいう。

以上が拡張現実感の要素技術である。同技術を用いたシステムを開発するには、システムの使用環境や状況に適した手法を選定することが重要である。

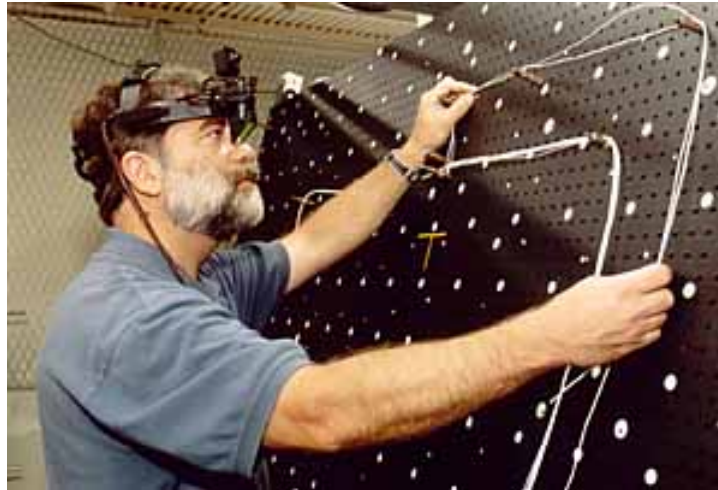


図 2.6: ワイヤーハーネス作成支援システム^[6]

2.3 拡張現実感を用いた作業支援

2.2 節で述べた拡張現実感の特徴を利用した作業支援の例を紹介する。

情報の指し示す対象の直観的な理解を利用し、作業効率の向上を図った拡張現実感を用いた作業支援の例の1つとして、ボーイング社の航空機ワイヤーハーネス作成支援システムが挙げられる^[6]。作業支援の様子を図 2.6 に示す。航空機の電子機器配線ハーネスを配線する際に、配線すべきハーネスの位置や種類を付加情報として HMD を通してユーザが見る現実世界の視界に重畳表示している。

また、情報内容の直観的な理解を支援するシステムの例としては、図 2.7 に示すように、家屋の CG モデルをユーザが HMD を通して見る現実世界の景色に重畳表示することで、住宅景観の把握を支援するシステムがある^[7]。

また、図 2.8 に示す例では、原子力発電プラント内において解体作業を行っている作業員の視野に解体対象である機器の 3DCAD モデルを重畳表示することにより、解体対象箇所および解体禁止箇所を直観的に把握させることを支援している^[8]。

2.4 レーザを用いた 3 次元計測技術

計測対象物の構造の特徴を数量化して、立体形状を把握する技術の1つとしてレーザを用いた 3 次元計測技術がある。レーザを、距離を測定したい点に向けて照射し、Time-of-Flight (光の伝播時間) 測定によって測定点までの距離を算出する。この操作を 3 次的に高密度で行うことで、測定対象の形状を反映した測定点の集まり (点群)

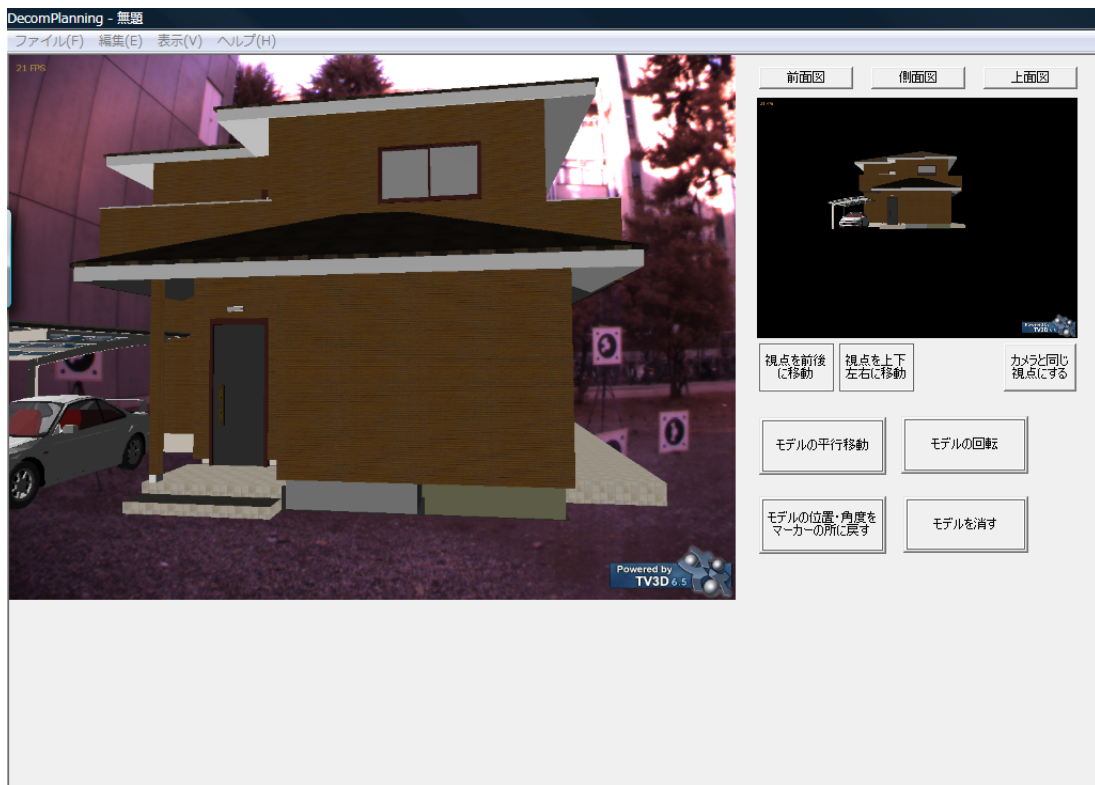


図 2.7: 住宅景観シミュレーションシステム画面例 [7]

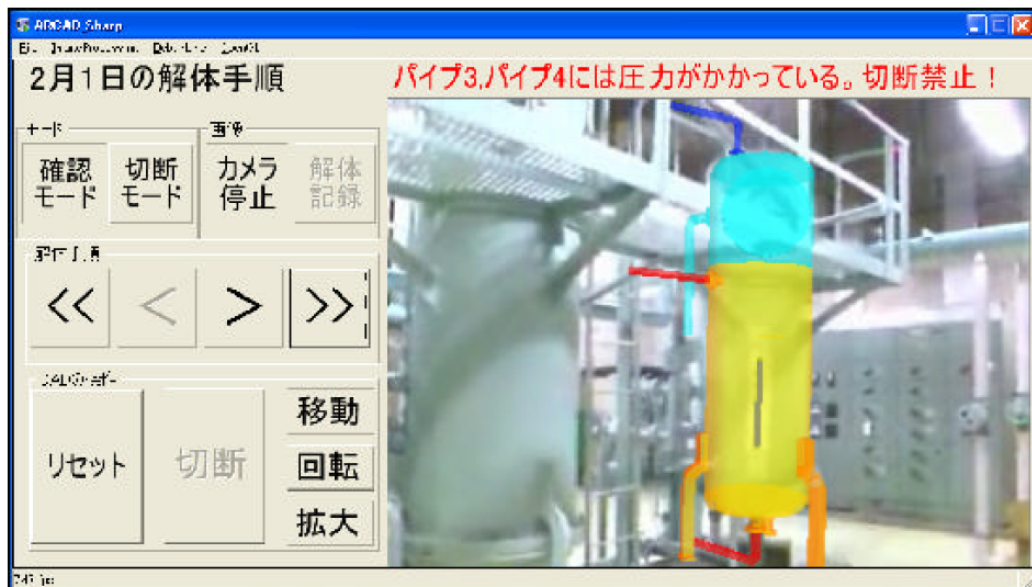


図 2.8: 解体作業支援システム画面例 [8]



図 2.9: レーザレンジファインダ^[9]

を得ることができる。このようにレーザを用いて距離計測する装置をレーザレンジファインダという^[9]。

このレーザレンジファインダを応用した例の1つとして、文化財をCG復元するプロジェクトがある^[10]。考古学や教育などの観点から、失われた文化財の復元は重要である。しかし、現実にはそのような文化財を復元することは必要となる時間や費用を考慮すると現実的ではない。そのため、CGによる文化財の復元が広く試みられているが、3DCADを用いた3次元モデルを作成するには、高度な専門知識と技術が必要であり、その上専門の技術者でもモデルの作成には長い時間を要する。また、3DCADによって作成されたモデルは写実性に欠ける、複雑な表面形状の正確なモデル化は困難であるなどの問題点もある。そこでこれらの問題を解決するため、レーザレンジファインダによるレーザを用いた3次元形状計測の利用が近年行われている。大石らは、長距離用のレーザレンジファインダを用いることにより、奈良東大寺の大仏のCGにより復元している^[11]。レーザレンジファインダによる計測は、その計測方式の特性上、1回の計測で物体のある1側面の表面形状しか得ることができない。そのため、物体の完全なモデルを得るために異なる方向から複数回計測を行い、さらにそれらの計測データの位置を合わせ1つに統合する必要がある。奈良の大仏を異なる2方向から測定した結果を図2.10に示す。また、さらに複数回の測定を行い、全ての結果の位置合わせを行い、計測結果を統合して得られたモデルを図2.11に示す。

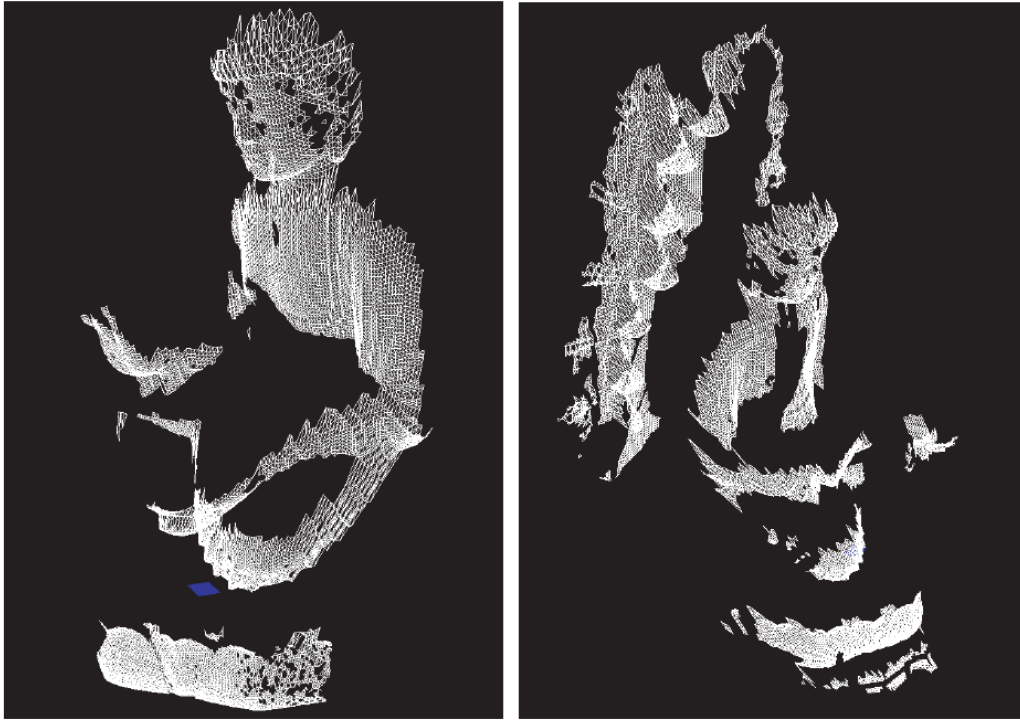


図 2.10: 東大寺大仏の計測結果^[11]

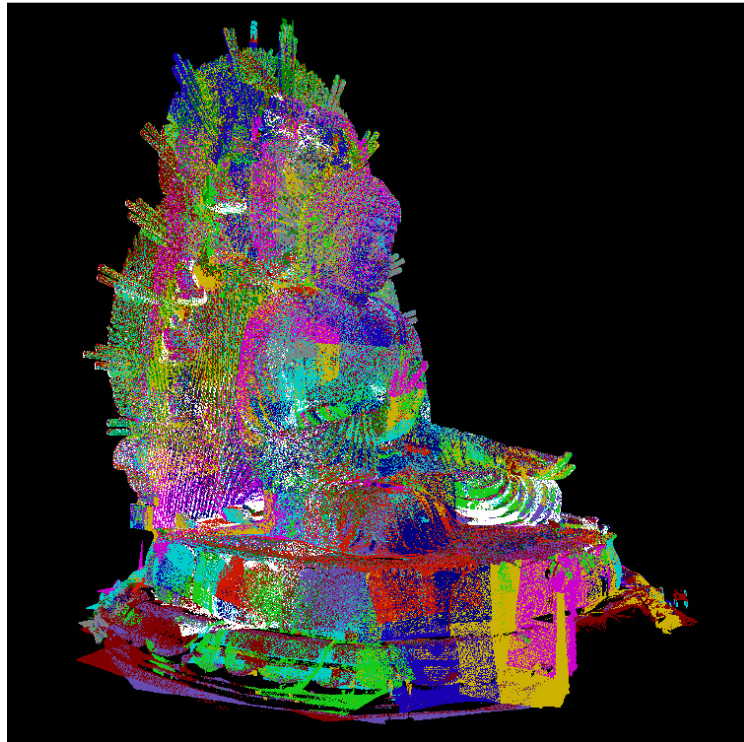


図 2.11: 統合された東大寺大仏モデル^[11]

2.5 研究の目的

本研究では、拡張現実感によりユーザに直観的な情報提示が可能であるという点と、レーザレンジファインダを用いた3次元形状計測により、現在の環境の形状を反映した3次元形状モデルが取得可能であるという点に注目し、これらを用いた仮置・運搬作業シミュレーションシステムの開発を行い、開発したシステムの解体作業現場での適用可能性を評価することを目的とする。拡張現実感を用いた作業支援システムは、先行研究が数多く存在するが、原子力発電プラントの解体作業に対して拡張現実感を用い支援した研究の前例はまだ少ない。一部プラント解体作業に拡張現実感を利用した研究例として、機器を解体する際の解体箇所および解体禁止箇所を拡張現実感により提示する解体手法や、解体作業時に必要な足場の配置を拡張現実感により重畳表示し、作業環境の状況を把握させるシステムが開発されている。しかし、足場を組むより前の計画段階初期において、部屋の中に存在する機器の解体順序などを決定するために必要な仮置・運搬作業の実行可能性の評価を拡張現実感を用いて直観的に行うことに注目した研究は見当たらない。本研究により得られた知見は、今後可視化・解体シミュレーション技術など、解体作業支援システムを開発していく際の設計の指針の一つになると考えられる。

第 3 章 仮置・運搬作業シミュレーションシステムの設計と開発

本章では、第 2 章で述べた現在の解体作業における課題をもとに策定した仮置・運搬作業シミュレーションシステムの概要および要求仕様と機能構成について述べる。次いで、仮置・運搬作業シミュレーションシステムを構成する 2 つのサブシステムの概略設計について述べ、最後に開発したシステムについて述べる。

3.1 システムの概要

第 2 章で述べたように、安全で効率的な解体作業計画を作成するためには、拡張現実感により現場に重畳表示された解体機器の形状モデルを移動し仮置・運搬作業をシミュレーションをし、作業時の様子を直観的に把握することが有効であると考えられる。その際、解体機器が周囲環境に干渉することなく仮置・運搬を行えるかどうかを判断できなければならない。このような干渉の有無を正しく検知するためには、作業環境の正確な形状情報を取得する必要がある。以上の理由から、仮置・運搬作業シミュレーションシステムは図 3.1 に示すように作業環境の形状情報を取得するモデリングサブシステムおよび、取得した形状情報から接触の有無を計算でき、同時に仮置・運搬作業の状況の確認ができる作業検証サブシステムの 2 つのサブシステムにより構成する。以下、本システムを TPCOSS(Temporary Placement and Conveyance Operation Simulation System) と呼ぶ。

3.2 システムの要求仕様

本研究では、TPCOSS を開発し導入することにより以下の 2 つを実現することを目標としている。

- 解体機器の仮置・運搬作業シミュレーションが現場で実施できること
- 作業シミュレーションの結果を記録・参照できること

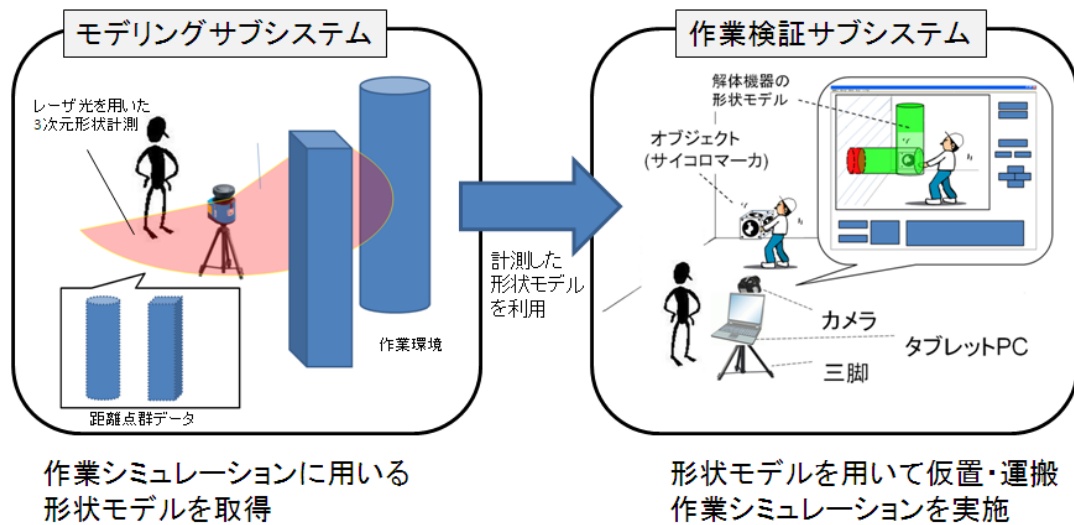


図 3.1: TPCOSS の構成

以上の目標を実現するために、本システムの要求仕様を以下のように定める。

(A) 作業現場において、解体機器の形状モデルが参照できること

仮置・運搬作業の様子を分かりやすく把握できるようにするために、解体機器の形状モデルが現場で可視化できることが望ましい。そこで本システムでは、カメラで捉えた現場の映像に解体機器の形状モデルを重ね合わせて表示できる必要がある。

(B) 解体機器の形状モデルを自由に移動できること

仮置・運搬作業のシミュレーションを行うため、また、仮置・運搬の仕方を様々な検討するために、現場で可視化した解体機器の形状モデルの位置や方向を自由に変えられる必要がある。

(C) 解体機器の形状モデルが周囲の環境に接触した箇所が把握できること

仮置・運搬作業時に解体機器と作業環境の間に干渉が生じた場合、どの部分が干渉を起こしたのかを把握し、それを解消しなければならない。そこで、解体機器の形状モデルが周囲の環境に接触したときに、その箇所を把握できる必要がある。

(D) 必要に応じて仮置・運搬作業の様子を記録し、再び参照できること

接触が起こりやすいと考えられ、仮置・運搬作業に注意を要すると考えられる箇所については、作業の様子を何度もよく確認する必要がある。また、作業記録を現場以外の場所でも参照でき、他の作業員も作業状況を把握できることが望ましい。そのためには必要に応じて作業シミュレーションの状況を記録でき、またそれを後に再び参照できる必要がある。

(E) 作業シミュレーションに用いる環境および解体機器の形状モデルが取得できること

作業環境は、機器の配置変更や新設備の導入などにより変化する。仮置・運搬作業を正確にシミュレーションするためには、古いデータではなく作業場の現状を反映した最新の形状モデルのデータを用いることが必要である。そこで、作業現場において、その場でモデルを得るための計測を行える必要がある。

(F) システムの設置に広い場所を必要とせず、現場に容易に持ち込みできること

原子力発電プラント内には多くの機器が設置されており、狭隘な場所が多い。そこで、本提案システムはできる限り小型でコンパクトに設置でき、また運搬も容易にできる必要がある。

(G) 使用方法がすぐに習得できること

システムの操作方法があまりに複雑であると、現場作業員に受け入れられにくい可能性がある。また、仮置・運搬作業の模擬の精度に影響することも考えられる。そのため、本システムのインターフェースは分かりやすく単純である必要がある。

3.3 システムの設計

本研究では、3.2節で述べた要求仕様を満たすため、提案システムを以下の2つのサブシステムより構成する。

(1) モデリングサブシステム

(2) 作業検証サブシステム

以下に各サブシステムの概略設計を述べる。また、モデリングサブシステム、作業検証サブシステム共に、要求仕様の(F)を満たすために、システムは可能な限り小型で軽量の機器を用いて構成する。また、両サブシステム共に要求仕様の(G)を満たすため、操作インターフェースは単純で分かりやすいものを目指す。

表 3.1: モデリングサブシステムの要求仕様と機能構成の対応

| 要求仕様 | 機能構成 |
|---|--|
| (E) 作業シミュレーションに用いる環境および解体機器の形状モデルが取得できること | (i) レーザレンジファインダを用いて距離計測を行う機能 |
| | (ii) 計測データの位置合わせ、加工を行いシミュレーション実施に必要な形状モデルを得る機能 |

3.3.1 モデリングサブシステムの概略設計

モデリングサブシステムは、図 3.2 に示すように解体作業計画時において最新の作業環境の形状を取得し、そのデータを用いて作業シミュレーションに必要な作業環境および解体機器の形状モデルを作成するシステムである。そのために必要な機能としては以下の 2 つが挙げられる。また、モデリングサブシステムを実装することにより、TPCOSS は要求仕様の (E) を満たす。

- (i) レーザレンジファインダを用いて距離計測を行う機能
- (ii) 計測データの位置合わせ、加工を行いシミュレーション実施に必要な形状モデルを得る機能

また、要求仕様と機能構成の対応は表 3.1 のようになる。

以下、両機能の概略設計を述べる。

(i) レーザレンジファインダを用いて距離計測を行う機能 モデリングサブシステムの計測画面のイメージを図 3.3 に示す。仮置・運搬作業のシミュレーションを正確に行うためには、形状モデルが表す周辺機器の数や配置が現状と正確に一致する必要がある。そこで、現状を忠実に反映した解体機器の形状モデルを作成するため、レーザレンジファインダを用いた 3 次元計測により、作業環境の形状を測定する機能を機能 (i) として実装する。この 3 次元形状計測により、作業シミュレーションに用いる正確な形状モデルを取得できる。レーザレンジファインダの制御には PC が必要である。本研究では、プラント内での使用を想定しているため、小型のノート PC を用いる。また、距離計測時にはレーザレンジファインダを固定しておく必要があるため、三脚を台とし

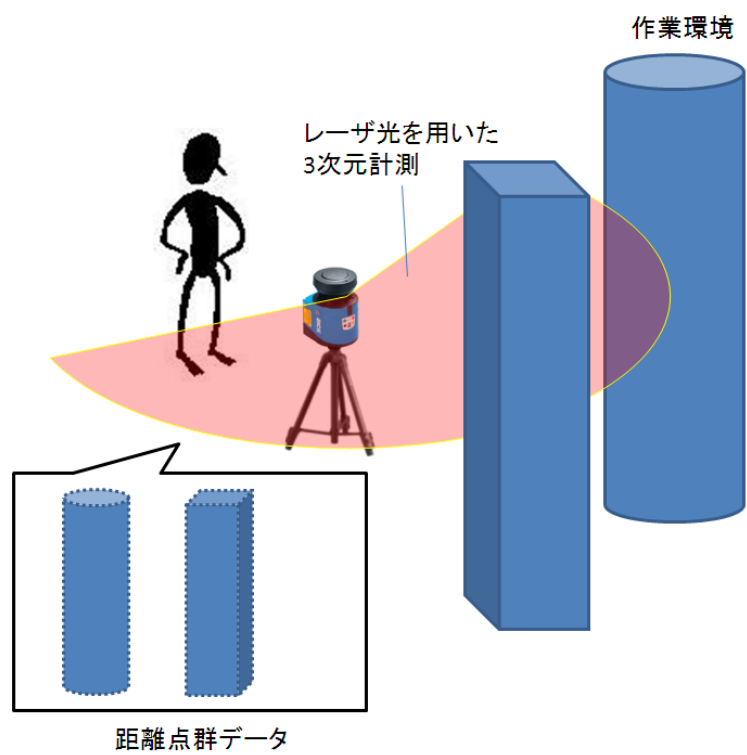


図 3.2: 3次元形状計測の概要

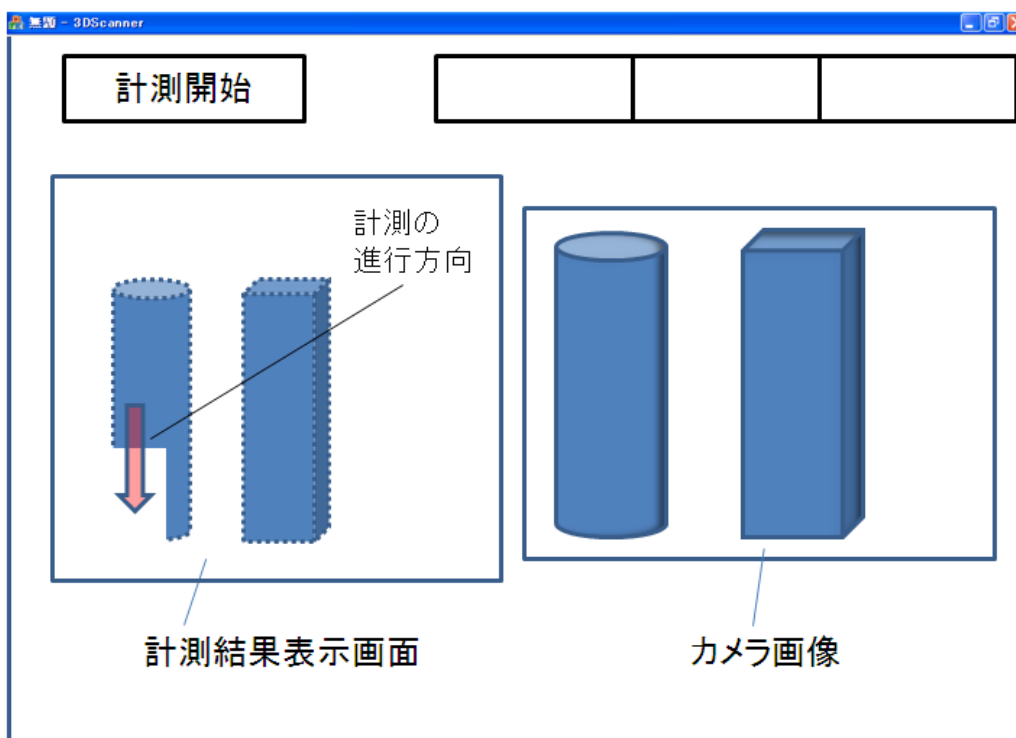


図 3.3: モデリングサブシステムの計測画面イメージ

て用いる。また、3.1 節で紹介した作業検証サブシステムで形状モデルを用いる際、形状モデルが何の機器の形状モデルかをユーザに分かりやすく示せるように、レーザレンジファインダに小型カメラを取り付け、解体機器の色情報を取得する。これにより、測定で得られた結果は各々の点が 3 次元座標とその点の色を情報として持つ、多数の距離点の集まり（距離点群）として表される。また、事前に 3 次元位置・方向を計測しておいた人工マーカ (3.4.2 項参照) をカメラで認識した後に計測を行うことにより、人工マーカで設定した座標系を基準にした点群の出力を得ることができる。以上より、モデリングサブシステムはレーザレンジファインダ、カメラ、三脚および制御用 PC を組み合わせて構成される。ただし、本サブシステムを用いて 1 回の計測により得られる結果はある 1 方向から見た形状情報しか含んでおらず、完全な形状モデルをえるためには、複数の地点より角度を変え計測を行った上で、それらの結果を 1 つにまとめる必要がある。

(ii) 計測データの位置合わせ、加工を行い形状モデルを得る機能 機能 (i) により得られた複数の形状情報は、1 つに統合する必要がある。また、得られた作業環境の形状モデルから、仮置や運搬を行う解体機器の形状モデル部分のみを抜き出す操作が必要に

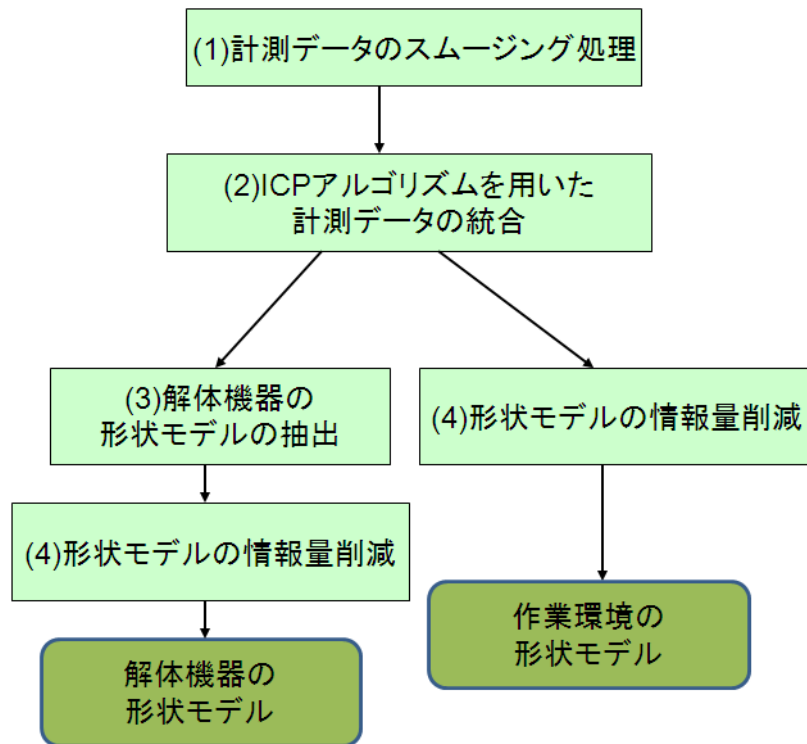


図 3.4: 計測データの加工手順

なる。さらに、作業シミュレーションを行う際、形状モデルの重畳表示が遅延することなくリアルタイムで表示されるためにはCPUの計算負荷を軽減する必要がある。そのため、形状モデルの形状を大きく変えることなく、データ量を削減する必要がある。

以上の処理をする機能を機能(ii)としてモデリングサブシステムに実装する。

機能(ii)で行う処理を以下に示す。また、解体機器の形状モデルおよび作業環境の形状モデルを取得するまでの、データの加工手順を図3.4に示す。以下に示す計測データの加工には、ある程度の専門性を要求される。全ての現場作業員が本システムを扱えるようにするため、これらの計測データの加工は将来的に自動化することを想定している。

- (1) 計測データのスムージング処理
- (2) ICP アルゴリズムを用いた計測データの統合
- (3) 解体機器の形状モデルの抽出
- (4) 形状モデルの情報量削減

(1) 計測データのスムージング処理 スムージング処理とは、3次元座標を持った点群により形成される、物体の形状を表す曲面を平滑化する処理のことである。レーザレンジファインダにより計測された点群の位置情報には偶然誤差が含まれるため、点群により形成される曲面は滑らかにならないことが多い。スムージングを施すことにより、ポリゴン数を増やすことなく形状表面を滑らかにできる。この操作は次で述べるICPアルゴリズムを用いた形状情報の統合をより正確に行うために必要である。

(2) ICPアルゴリズムを用いた計測データの統合 レーザレンジファインダにより得られた複数の形状情報の重ね合わせにはICP(Iterative Closest Point) アルゴリズム^[12]が一般的に広く用いられている。異なる位置に設置されたレーザレンジファインダの計測結果は、異なった座標系により表されているため、2つの結果を1つに合わせるためには、2つの結果を同一の座標系で表す必要がある。そこで、2つの形状の重複して計測された部分を一致させるように回転・平行移動成分を推定し座標変換を施すことにより、2つの座標系を同一にする。計算の簡略化のため、実際は一方の形状を固定し、もう一方の形状を回転・平行移動する。このとき、固定する形状を「モデル形状」、座標変換を施す形状を「データ形状」と呼ぶことにする。両形状の重なりあっている部分において、データ形状上のある点 \vec{x} に対して、モデル形状上に対応する対応点 \vec{y} が存在し、領域全体の点に対してこれらの対応点間で定義される対応点間距離を最小化するように回転・平行移動成分を推定する。回転行列を R 、平行移動ベクトルを T と置くと、データ形状上の点 \vec{x}_i とそれに対応するモデル形状上の点 \vec{y}_i の総距離は次のように定義できる。

$$f(R, \vec{T}) = \sum_i \|R\vec{x}_i + \vec{T} - \vec{y}_i\|^2 \quad (3.1)$$

両形状を一致させるためには、この $f(R, \vec{T})$ を最小化する R および T を求めればよい。ただし、ICPアルゴリズムは互いのモデルの初期位置によっては局所解に陥りやすいという欠点があるため、モデルの初期位置を手動で合わせられる機能が必要である。

(3) 解体機器の形状モデルの抽出 仮置・運搬作業シミュレーションをするためには、解体機器のみを含んだ形状モデルが必要となる。しかし、機能(i)で実現する機能を用いた計測では、解体機器と環境が1つの計測結果としてまとめて得られるため、解体機器の形状モデルのみを切り出す必要がある。本提案システムでは、3次元形状計測に

より作業環境全体の形状モデルを取得した後、仮置・運搬作業の対象となる解体機器の形状モデルを作業環境全体の形状モデルから切り取ることで取得する。

(4) 形状モデルの情報量削減 重ね合わせを行った形状情報データを作業検証サブシステムで用いる、接触を検知することのできる形状モデルとして取り扱うために、本システムでは各距離点同士を線で結び、三角形のメッシュを作成することにより形状情報をポリゴンデータとして扱う。しかし、このポリゴンの数が多すぎると、作業シミュレーションをする際にCPUにかかる計算負荷が大きくなりすぎてしまうため、形状モデルの形状を大きく変えることなく、ポリゴンの数を減らす必要がある。

3.3.2 作業検証サブシステムの概略設計

作業検証サブシステムの概要を図 3.5 に示す。また、作業検証サブシステムのインタフェース画面のイメージを図 3.6 に示す。作業検証サブシステムは三脚、タブレット PC およびカメラから構成され、カメラでオブジェクトを捉えることにより、カメラ画面に映るオブジェクト上に解体機器の形状モデルを重畳表示する機能をもつ。また、解体機器の形状モデルとオブジェクトの動きは連動しており、オブジェクトを平行・回転移動するとそれに追従して解体機器の形状モデルも同方向に平行・回転移動されるため、比較的難しいとされる 3 次元的な解体機器の形状モデルの操作を直観的にできる。また、解体機器の形状モデルが周囲の作業環境に接触した際には接触箇所を赤色に着色することにより接触箇所を容易に理解できる。したがって、タブレット PC を参照する作業員はカメラ画面で解体機器の形状モデルと周囲作業環境の間に接触が無いことを確認しながら、オブジェクトを持つ作業員にオブジェクトの移動指示を出し、解体機器の形状モデルを仮置したり、運搬することにより作業の様子を直観的に理解することができる。また、インタフェース画面上の各種操作ボタンにより、シミュレーション状況の記録や、オブジェクトの移動で大まかな位置を指定した後の形状モデルの姿勢を微調整できる。この作業検証サブシステムを実装することにより、TPCOSS は要求仕様の (A)(B)(C)(D) を満たす。これらの要求仕様を満たすために本サブシステムは以下の 8 つの機能により構成される。

- (iii) 解体機器の形状モデルをカメラ画像に重畳表示する機能
- (iv) 解体機器の形状モデルの表示/非表示を切り替える機能
- (v) 解体機器の形状モデルを実世界オブジェクトの位置姿勢情報をもとに表示する機能

- (vi) スタイラスペンを用いて解体機器の形状モデルを回転・平行移動させる機能
- (vii) 解体機器の形状モデルが作業環境に接触した際に互いの接触箇所に着色する機能
- (viii) 着色された色を着色される前の状態に戻す機能
- (ix) 解体機器の形状モデルの位置方向を記録する機能
- (x) 記録を元に解体機器の形状モデルの重畳表示を再現する機能

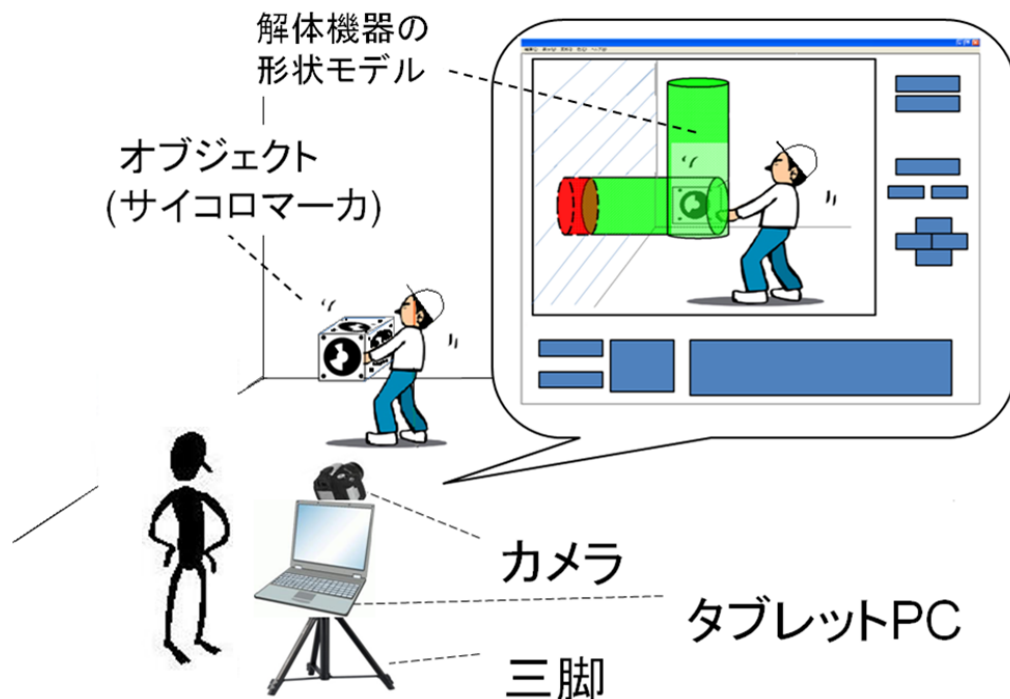


図 3.5: 作業検証サブシステムの概要

また、本サブシステムの要求仕様と機能構成の対応を表 3.2 に示す。

- (iii) 解体機器の形状モデルをカメラ画像に重畳表示する機能

仮置・運搬作業の様子を分かりやすく把握できるようにするために、解体機器の形状モデルが現場で可視化できることが望ましい。拡張現実感を用いることにより、この機能を実現する。

表 3.2: 作業検証サブシステムの要求仕様と機能構成の対応

| 要求仕様 | 機能構成 |
|-------------------------------------|--|
| (A) 作業現場において、解体機器の形状モデルが参照できること | (iii) 解体機器の形状モデルをカメラ画像に重畳表示する機能 |
| | (iv) 解体機器の形状モデルの表示/非表示を切り替える機能 |
| (B) 解体機器の形状モデルを自由に移動できること | (v) 解体機器の形状モデルを実世界オブジェクトの位置姿勢情報をもとに表示する機能 |
| | (vi) スタイラスペンを用いて解体機器の形状モデルを回転・平行移動させる機能 |
| (C) 解体機器の形状モデルが周囲の環境に接触した箇所が把握できること | (vii) 解体機器の形状モデルが作業環境に接触した際に互いの接触箇所に着色する機能 |
| | (viii) 着色された色を着色される前の状態に戻す機能 |
| (D) 必要に応じて仮置・運搬作業の様子を記録し、再び参照できること | (ix) 解体機器の形状モデルの位置方向を記録する機能 |
| | (x) 記録を元に解体機器の形状モデルの重畳表示を再現する機能 |

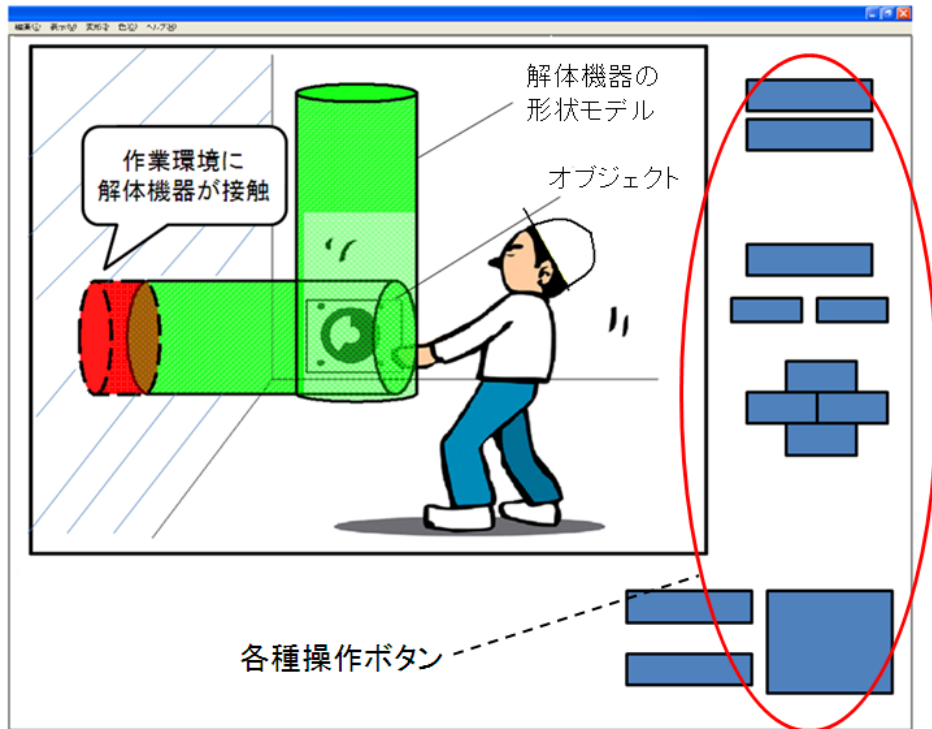


図 3.6: 作業検証サブシステムのインタフェース画面

(iv) 解体機器の形状モデルの表示/非表示を切り替える機能

作業環境の確認を容易にするために、必要に応じてカメラ画像に重畳表示する形状モデルの表示・非表示を切り替えられることが望ましい。図 3.7 に示すように、インタフェース画面上にモデル表示・非表示を切り替えるボタンを設けることで実現する。

(v) 解体機器の形状モデルを実世界オブジェクトの位置姿勢情報をもとに表示する機能
 仮置や運搬の仕方を様々に検討できるようにするために、作業シミュレーションに用いる解体機器の形状モデルは、自由かつ直感的に動かせることが望ましい。そのため、本システムでは立方体などの実世界オブジェクトの動きに解体機器の形状モデルの動きを連動させることにより、直感的でわかりやすいモデルの移動を実現する。オブジェクトを用いた形状モデルの回転移動および平行移動のイメージ図を図 3.8 および図 3.9 に示す。実際に作業検証サブシステムを使用する際には、オブジェクトを持ち運ぶ作業員と PC を扱い、形状モデルの重畳表示された画面を参照する作業員の 2 名によりシステムを使用し、PC を扱う作業員の指示に従い、もう一人がオブジェクトを移動させる。本研究ではオブジェクトとして立方体の 6 面に、3.4 節で後述する人工マーカを貼りつけたサイコロマーカを用いる。

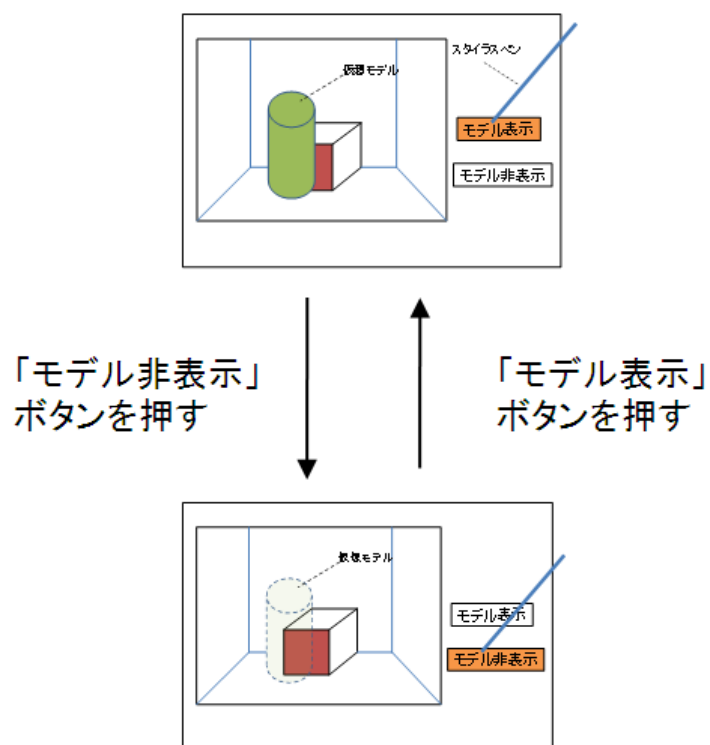


図 3.7: モデルの表示・非表示の切り替え

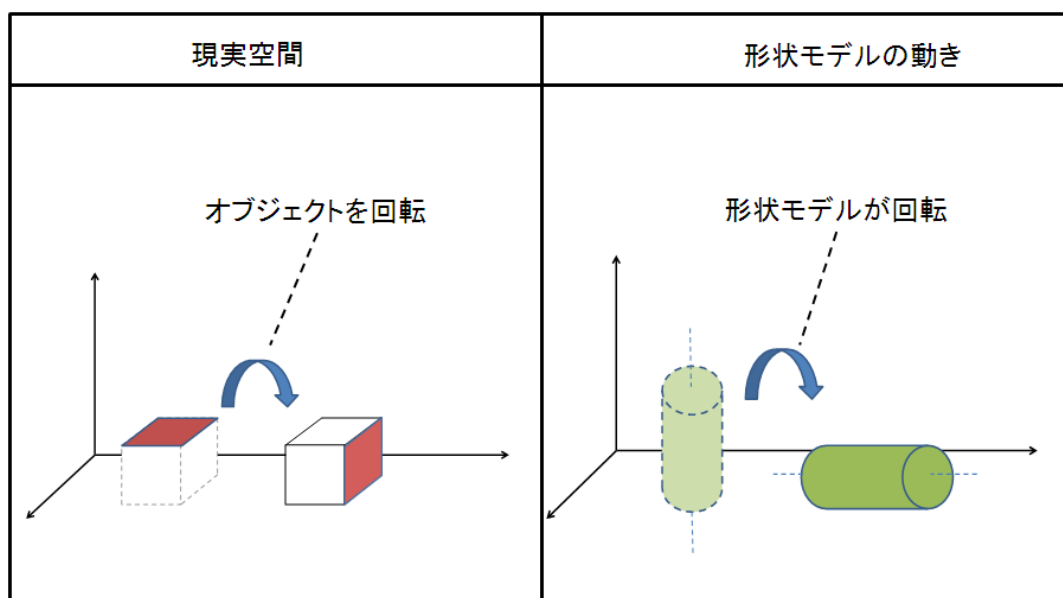


図 3.8: オブジェクトを用いた形状モデルの回転移動

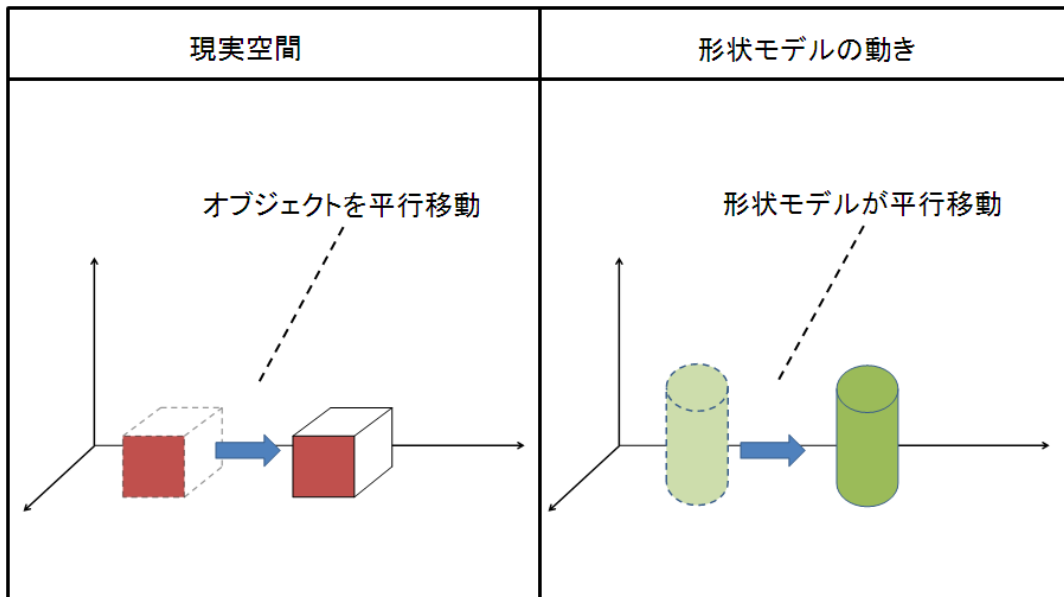


図 3.9: オブジェクトを用いた形状モデルの平行移動

(vi) スタイラスペンを用いて解体機器の形状モデルを回転・平行移動させる機能

スタイラスペンを用いた解体機器の形状モデルの回転・平行移動のイメージを図 3.10 および図 3.11 に示す。解体機器の形状モデルを直観的に操作するためには、実世界オブジェクトを用いオブジェクトの動きと形状モデルの動きを連動させる操作インターフェースが有効と考えられるが、それだけではオブジェクトを操作する人間の手の届かない位置やオブジェクトを置けない位置に解体機器の形状モデルを表示したい場合に対応できない。そのため、画面上でスタイラスペンを用いてモデルをドラッグすることでモデルを回転・平行移動させる機能を実装する。また、一定量の平行移動を行いたい場合のために、画面上の矢印ボタンをクリックすることによりその方向に一定距離モデルを移動する機能も実装する。

(vii) 解体機器の形状モデルが作業環境に接触した際に互いの接触箇所に着色する機能
仮置・運搬作業時に解体機器と作業環境の間に干渉が生じた場合、どの部分が干渉を起こしたのかを把握し、それを解消しなければならない。接触があった箇所をユーザに分かりやすく知らせるために、環境および解体機器の形状モデルの接触が起こった箇所を赤色で着色する機能を実装する。

形状モデルをタッチし、回転させたい方向へドラッグ

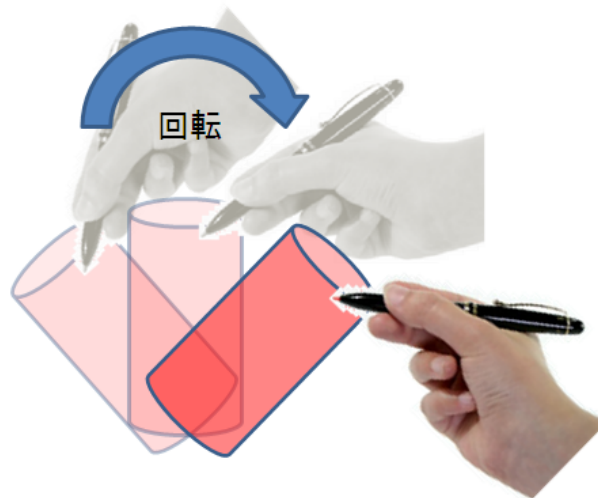


図 3.10: スタイラスペンを用いた形状モデルの回転移動

(viii) 着色された色を着色される前の状態に戻す機能

(vii) の機能により着色された箇所が増えすぎた場合や、同じ箇所の接触の有無をくり返し確かめたい場合などのために、着色されたモデルの赤色を消し、もとのモデルの色に戻す機能を実装する。

(ix) 解体機器の形状モデルの位置方向を記録する機能

仮置・運搬の際に接触が起こりやすい箇所を後でくり返し確認したい場合や、他の作業員と作業状況を共有したい場合などには現在行っている作業シミュレーションの様子を記録しておけることが望ましい。そのため、画面上のボタンをクリックすることにより、現在の作業状況を記録できる機能を実装する。具体的には、記録時の解体機器の形状モデルの位置および方向を記録し、後に再び拡張現実感を用いて作業の様子を参照できる機能を実装する。

(x) 記録を元に解体機器の形状モデルの重畳表示を再現する機能

保存した記録は後に再び参照できなければならない。インタフェース画面内のボタンをクリックすることにより、記録参照モードへ移行し、記録しておいた解体機器の形状モデルの位置および姿勢情報をもとに解体機器の形状モデルの重畳表示を再現する機能を実装する。

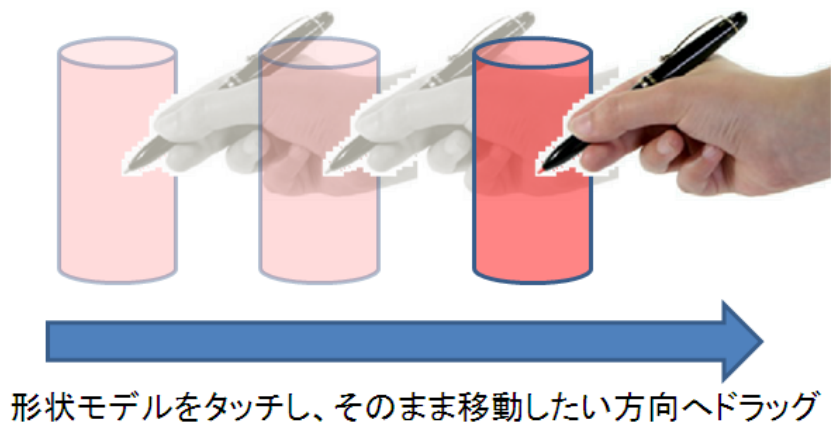


図 3.11: スタイラスペンを用いた形状モデルの平行移動

3.4 システムの開発

まず、作業検証サブシステムを使用する際に用いるディスプレイデバイスおよびトラッキング手法の選定を行う。次に、3.3節で述べた設計に従って開発したシステムについて述べる。

3.4.1 ディスプレイデバイスの選定

拡張現実感技術を使用する際の情報提示デバイスは以下の3つに大別される。

- プロジェクション型ディスプレイ
- ヘッドマウント型ディスプレイ
- ハンドヘルド型ディスプレイ

各ディスプレイの長所を表 3.3 に、短所を表 3.4 にまとめる。

プロジェクション型ディスプレイは、プロジェクタを用いて実環境にCGを直接投影する手法である。これにはプロジェクタを環境中に固定するタイプと図 3.12 のようにユーザが装着するタイプがあり、投影面に直接映像を投影することにより、多人数で情報が参照できる、高い没入感を得ることができるなどの利点がある。しかし、プロジェクタと投影面の間に手などの障害物が存在すると、プロジェクタに映る映像が

表 3.3: 各ディスプレイの長所

| ディスプレイ | 長所 |
|-----------------|---|
| プロジェクション型ディスプレイ | 同時に多人数で情報を参照できる |
| | 高い没入感を得られる |
| ヘッドマウント型ディスプレイ | ディスプレイがユーザの視界の多くを占め、広く見えるために没入感が高い |
| | ユーザの両手が自由になる |
| ハンドヘルド型ディスプレイ | 携帯性に優れている |
| | 画面を出力するだけでなく、スタイラスペンやボタン操作による入力を受け付けることができる |

表 3.4: 各ディスプレイの短所

| ディスプレイ | 短所 |
|-----------------|-------------------------------|
| プロジェクション型ディスプレイ | 重量感、装着感が作業の邪魔になる |
| | 投影面とプロジェクタの間に障害物があると映像が欠けてしまう |
| ヘッドマウント型ディスプレイ | ディスプレイを装着した本人しか情報を参照できない |
| | 視野角が狭い。 |
| ハンドヘルド型ディスプレイ | 使用時に手が塞がってしまう |
| | ディスプレイが大きなものほど重量も重くなる |



図 3.12: プロジェクション型ディスプレイ

欠けてしまう欠点がある。また、映像の投影面が平面である必要がある。したがって、作業員が頻繁に移動をくり返す上、機器が多く平面を確保することが難しいプラント内での使用には適していないといえる。また、ユーザがプロジェクタを装着する場合、プロジェクタの重量感や装着感は作業の邪魔となる。

ヘッドマウント型ディスプレイとは、図 3.13 のように頭に装着するタイプのディスプレイである^[13]。ディスプレイがユーザの視界の多くを占める形になり、ユーザは高い没入感を得ることができる。また、ユーザの両手が自由に使えるという特徴を持つ。しかし、ユーザ装着するタイプのプロジェクション型ディスプレイ同様、その重量感や装着感が作業を阻害する要因になると考えられる。また、ビデオ型 HMD は一般的に視野角が狭いため、機器や配管が多く、構造の複雑なプラント内で使用することは危険である。光学シースルー型ディスプレイは、ユーザの視野を制限しないが、装着する度にキャリブレーションする必要があり、効率的ではない。したがって、ヘッドマウント型ディスプレイのプラント内での使用は有効ではないと考えられる。

ハンドヘルド型ディスプレイは、PDA や図 3.14 のようなノート PC などの比較的小さなディスプレイデバイスのことを指す。特徴として携帯性に優れている、ユーザの視界を妨げない、比較的軽量などが挙げられる。また、近年タッチパネル式の操作インターフェースを持った機種が多く発売されている。スタイラスペンを用いて画面に情報入力が行える、紙とペンに似たインターフェースを持つ。また、1つのディスプレイを複数人数で同時に参照することが可能であり、作業現場における作業員同士の情報共有に適しているといえる。ただ、ディスプレイを大きくするとデバイスそのものの重量が増えてしまうといった難点もある。しかし、三脚台を用いることでこの問題は解決することができ、ユーザはデバイスを持つ必要が無くなるので、負担なくシステム



図 3.13: ヘッドマウント型ディスプレイ [13]



図 3.14: ハンドヘルド型ディスプレイ

を使うことが可能である。したがって、本研究では、作業員同士での情報共有に適切な大きさのディスプレイを持ち、システム操作を直観的に行えるデバイスとして、タブレットPCを用いる。

3.4.2 トラッキング手法の選定

トラッキング技術は大別すると、自然特徴点法、慣性センサ法、GPS法、磁気センサ法、超音波センサ法、人工マーカ法に分類される^[14]。各トラッキング手法の長所を

表 3.5 に、短所を表 3.6 に示す。

自然特徴点を利用したトラッキングは、3次元位置が既知の自然特徴点(直線や角などの特徴的な点)をカメラで撮影することによりカメラと自然特徴点の間の相対的な位置関係を計算する^[15]。自然特徴点法によるトラッキングの特徴として、環境中に特に機器を設置する必要がない、広範囲で使用できるなどの利点がある。一方、計算が複雑でCPUへの負荷が高い、特徴点が変化する環境では使用できないなどの問題がある。

慣性センサによるトラッキング手法では、加速度センサおよびジャイロセンサを用いる。加速度センサは微小時間ごとのユーザの位置の変化を計測でき、またジャイロセンサはユーザの姿勢や向きの変化を計測できる。両センサの計測結果を用いることで、ユーザの動きを追跡することができユーザの位置・姿勢を推定できる。ただし、この計測より計算できるのは単位時間あたりの相対的な位置・姿勢の変化であり、絶対的な位置・姿勢座標を得るために、別のトラッキング手法を用いてユーザの位置姿勢の初期値を得る必要がある。また、時間経過による誤差の蓄積が大きいという問題点もある。

GPSによるトラッキングは、GPS衛星からの電波信号を受信し経度・緯度情報を得る手法である^[16]。しかし、電波状況により、GPSの誤差は数十cm以上になることもある。また、GPS信号を受信できない屋内では使用できない。

表 3.5: 各トラッキング技術の長所

| トラッキング手法 | 長所 |
|----------|--|
| 自然特徴点 | 環境に存在する自然特徴点を利用するため、周囲に機器を設置する必要がない |
| 慣性センサ | ユーザの動きを直接計測するため、環境に手を加える必要がない 計算負荷が低くリアルタイム性が高い |
| GPS | 比較的高精度のトラッキングが可能 屋外であればどこでも使用できる |
| 磁気センサ | 安定した地場内では比較的精度が高い |
| 超音波センサ | 比較的広い範囲で高精度のトラッキングが可能 |
| 人工マーカ | 高精度で安定したトラッキングが可能である 必要機材や道具が安価に準備できる |

磁気センサはトランスミッタから発生する磁気をセンサで検出することによって、6自由度で位置・姿勢角を計測する^[17]。安定した磁場内では比較的精度が高いが、トランスミッタが発生させる磁場内ではしか利用できないため、狭い範囲ではしか利用できない。また、金属や電子機器など磁場を乱す要因があると計測結果に誤差が生じやすい。

超音波センサによるトラッキングでは、送波器から超音波を対象物に向け発信し、その反射波を受波器で受信することで、発信から受信までに要した時間から対象物の有無や対象物までの距離を検出する。また、送波器と受波器間を通過する物体によって生じる超音波の減衰もしくは遮断を検出することにより対象物の有無を検出するタイプもある。ただし、周囲の環境が安定しない状況においては、安定した計測は難しい。また、これらのトラッキング手法は環境に新たに機器を設置する必要がある。

人工マーカによるトラッキングでは、あらかじめ3次元座標を計測した人工マーカを環境内に貼付しておく。このマーカをカメラで撮影し、得られた画像を解析し得られたマーカの画像内の2次元位置と実際のマーカの3次元位置情報をもとに、カメラの位置方向を計測する手法である。比較的精度・安定性が高い手法であり、マーカを複数用いることでより精度や安定性を高める手法も開発されている。拡張性に優れて

表 3.6: 各トラッキング技術の短所

| トラッキング手法 | 短所 |
|----------|--|
| 自然特徴点 | ノイズの影響を避けるために複雑な計算が必要になるため、計算負荷が高い |
| | 精度を上げるためには高解像度の画像処理が必要になる |
| 慣性センサ | 時間経過とともに蓄積する誤差が大きい |
| | 相対的な位置姿勢情報しか計算できないため、絶対的な位置姿勢情報を計算するには別のトラッキング手法が必要になる |
| GPS | 電波が届かないため屋内環境では使用できない |
| 磁気センサ | 環境内に新たに機器を設置する必要がある |
| | トランスミッタの発する磁場内ではしか利用できない |
| 超音波センサ | 環境内に新たに機器を設置する必要がある |
| | 周囲の環境に影響を受けやすい |
| 人工マーカ | 多数の人工マーカを使用環境に貼付する必要がある |
| | 精度を上げるためには高解像度の画像処理が必要になる |

おり、マーカを新たに環境内に貼付し、そのマーカの位置姿勢を計測することにより、拡張現実感技術の使用できる領域を増やすことができる。安価に実現できるが、カメラがマーカを捉えていなければならないため、多数のマーカを環境に貼付けなければならないという問題がある。

本研究では、原子力発電プラント内の作業環境でシステムを使用することを想定しているため、GPSによるトラッキングを行うことはできず、新たに機器を設置する必要のある超音波センサによるトラッキングも不適當である。本研究では、解体機器の仮置・運搬作業シミュレーションを行うため、比較的広い範囲において安定性の高いトラッキングが求められる。したがって、使用範囲の狭い磁気センサによるトラッキングも適していない。また、作業シミュレーションは比較的長時間におよぶことから、慣性センサによるトラッキングも適當ではない。

したがって、本研究では、特殊な装置を必要とせず、拡張性と安定性に優れた人工マーカを用いたトラッキングを利用する。人工マーカを用いたトラッキングでは、図 3.15 に示す加藤らが開発した ARToolKit^[18] を利用した正方形マーカを利用することが多い。しかし、カメラ画像内である程度の大きさでマーカが撮影されなければマーカの特徴点を抽出できないため、小さいマーカを用いる場合はカメラと正方形マーカの距離がある程度近く、正方形マーカが遠距離にある場合は正方形マーカを大きくする必要がある。一方、人工マーカには正方形マーカの他に遠近両用マーカ^[19]がある。遠近両用マーカを用いる手法では、カメラとマーカの距離が近い場合には 4 隅にある小円の中心を特徴点として利用し、カメラとマーカの距離が遠い場合には複数枚の円形マーカの大円の中心を特徴点として利用することにより、遠距離および近距離の両方の場合に対してトラッキングを行うことができる。仮置・運搬作業シミュレーション中は、作業環境内の広い範囲を移動するため、本研究では遠近両用マーカを用いたトラッキング手法を用いる。また、マーカの位置と方向は楊らの開発したマーカの 3 次元位置自動計測システム (MAMS:Marker Auto-Measurement System) を用いて計測する^[20]。

3.4.3 開発したモデリングサブシステムの概要

3.3.1 項で述べた設計をもとに開発したモデリングサブシステムの概要を示す。ハードウェア構成を図 3.17、システムの全体図を図 3.18 に示す。また、レーザレンジファインダ、カメラ、電動雲台、制御用 PC の仕様を表 3.7 から表 3.10 に示し、計測に用いるアプリケーションの画面例を図 3.19 に示す。また、モデリングサブシステムは Microsoft

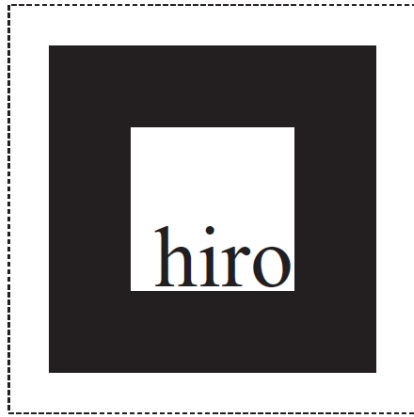


図 3.15: ARToolKit のマーカ [18]

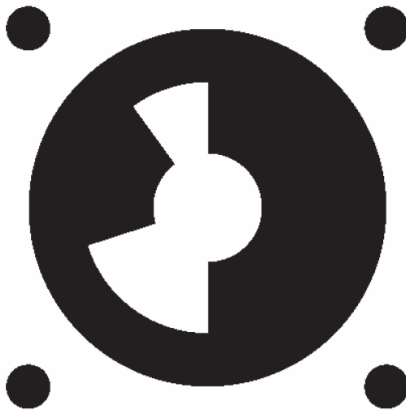


図 3.16: 遠近両用マーカ [19]

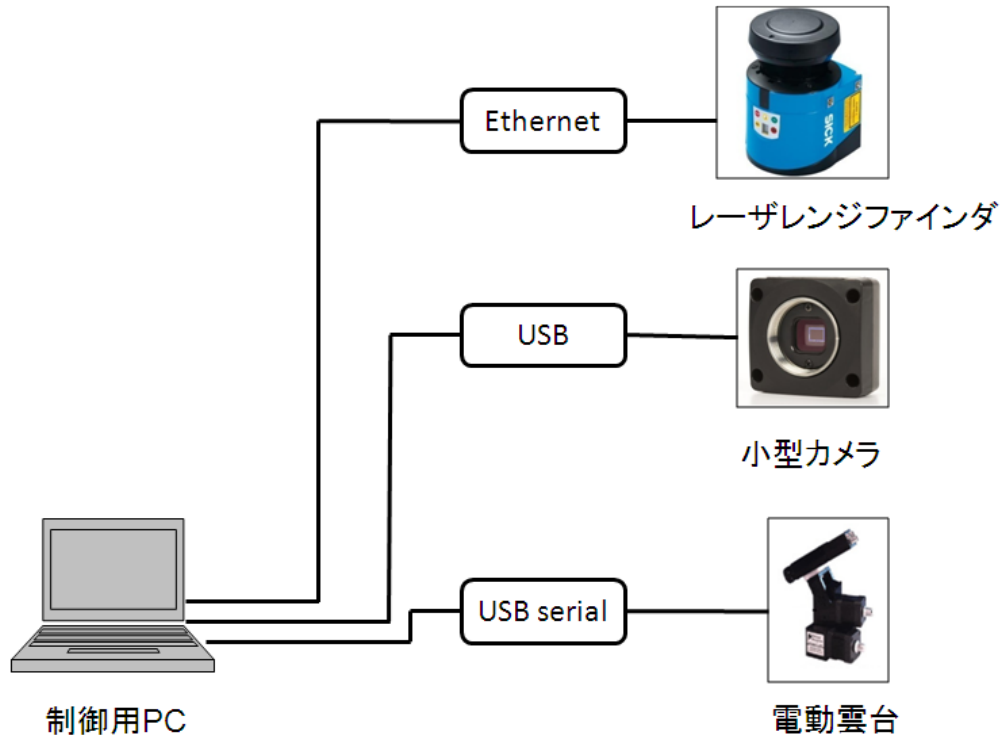


図 3.17: モデリングサブシステムのハードウェア構成

Visual Studio 2008 を用いて作成し、開発言語は C++ を用いた。

以下、開発したモデリングサブシステムの各機能について説明する。

(i) レーザレンジファインダを用いて距離計測を行う機能

- (1) 計測開始：クリックすることにより 3 次元形状計測を開始する。
- (2) 計測中止：クリックすることにより 3 次元形状計測を中止する。
- (3) 計測結果表示切り替え：(7) の計測結果表示画面の表示をカメラ画像/距離点群画像に切り替える。
- (4) マーカを認識：カメラ画像中に人工マーカが含まれていた場合にそれを認識し、人工マーカを基準とした座標系で計測結果を出力するよう変更する。
- (5) 認識結果を消去：(4) の操作による人工マーカの認識結果を消去する。
- (6) マーカ認識状況：(4) の操作により人工マーカを認識できたか否かを表示する。



図 3.18: モデリングサブシステムの全体図

表 3.7: レーザレンジファインダの仕様

| | |
|---------|----------------------------|
| メーカー・型名 | SICK LMS100-10000 |
| 測定精度 | ± 30 mm |
| 角度分解能 | 0.25 ° |
| 測定範囲 | 270 ° |
| レーザ波長 | 905nm |
| 最大測定距離 | 20 m |
| 寸法 | 幅 102 × 奥行 106 x 高さ 162 mm |
| 重量 | 約 1.1kg |

表 3.8: モデリングサブシステムのカメラの仕様

| | |
|-----------|-------------------------------|
| メーカー・型名 | Chameleon CMLN-132S2C |
| 画像素子 | 1/3 インチ EXview HAD CCD ICX445 |
| 解像度 | 1296 × 964 1.3 メガピクセル |
| インタフェース | USB2.0 |
| 最大フレームレート | 18 fps |
| レンズの焦点距離 | 4.146 mm |

表 3.9: 電動雲台の仕様

| | |
|---------|--------------------------------|
| メーカー・型名 | Directed Perception PTU-D46-17 |
| 対加重量 | 2.72kg |
| 角度分解能 | 0.051428 ° |
| 最高速度 | 300 °/秒 |

表 3.10: モデリングサブシステムの制御用 PC の仕様

| | |
|---------|---|
| メーカー・型名 | lenovo ThinkPad X61(7764B4J) |
| CPU | インテル Core2 Duo プロセッサ L7500 1.60GHz |
| メインメモリ | 1GB |
| ビデオメモリ | 最大 251MB |
| ディスプレイ | 12.1V 型 Super Wide Viewing Angle FFS XGA 液晶 |
| OS | WindowsXP Professional SP2 |
| 寸法 | 幅 274 × 奥行 244 × 高さ 27 ~ 33mm |
| 重量 | 1.85kg |



図 3.19: モデリングサブシステム計測画面

- (7) 計測結果表示画面：3次元形状計測により得られた距離点群、またはカメラから得た画像情報を表示する。
- (8) カメラ画像表示画面：解体機器の形状モデルに使用する色情報を取得するためのカメラが捉えた映像を表示する。
- (9) カメラチルト角制御バー：電動雲台のチルト角を操作することにより、カメラの姿勢を制御する。
- (10) カメラパン角制御バー：電動雲台のパン角を操作することにより、カメラの姿勢を制御する。
- (11) カメラゲイン調整バー：カメラ映像のゲイン値を調整する。

(ii) 計測データの位置合わせ、加工を行い適当な形状モデルを得る機能 1回の形状計測により得られた結果は、1方向から見た計測結果であり、全体の形状モデルを得るには複数の地点より3次元形状計測を行い、計測結果を1つに統合する必要がある。図 3.20 に形状計測結果の統合を行うソフトウェアのインタフェース画面を示す。

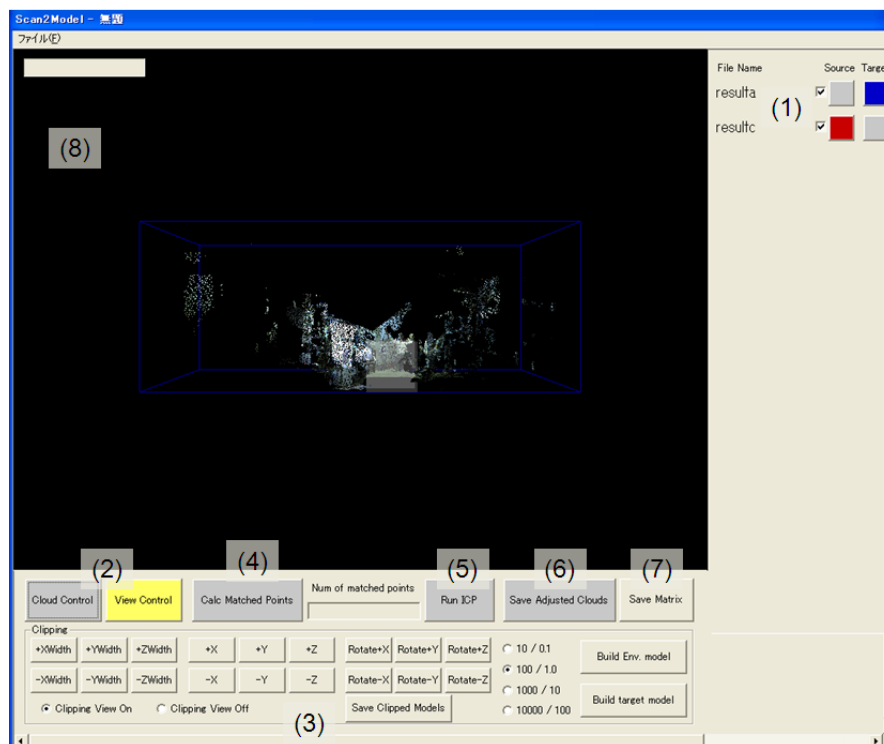


図 3.20: モデルの統合作業に用いるアプリケーションの画面例

- (1) 統合する形状データの対応表示：形状データの統合は2組のデータを1組に重ね合わせるにより行われる。画面上の「Target」欄に色の点灯している形状データが固定され、「Source」欄が点灯している形状データを回転・平行移動させ重ね合わせるにより形状データを統合する。
- (2) 形状データ操作/画面視点操作の切り替え：「Cloud Control」をクリックすることで形状データの移動モードになり、(8)の画面内の形状データをマウスで動かすことができる。これによりICPアルゴリズムにおける各形状データの初期位置を変更できる。また「View Control」をクリックすることにより画面視点の操作モードになり、(8)の画面内でマウスをドラッグすることにより画面の視点操作ができる。
- (3) 形状モデルの切り出し機能：任意の長方形を指定し、長方形内に含まれる形状データを切り出す。各ボタンにより切り出しをする長方形の x,y,z 軸方向の長さおよび各軸周りの回転角度を調整できる。
- (4) 対応点の数を計算：ICPアルゴリズムによる形状データの重ね合わせをする際に、各データ間で重複する点(対応点)の数を計算する。

- (5) ICP アルゴリズムの実行：クリックすることにより ICP アルゴリズムによる形状データの重ね合わせが実行され、各データが統合される。
- (6) 形状データの初期位置の記録：(2) の形状データ操作により変更された形状データの初期位置を記録する。
- (7) ICP による統合結果の記録：統合された形状データが記録される。具体的には、「Source」に対応する形状モデルが「Target」に対応する形状モデルに重ね合わされる際の回転移動量および平行移動量を表した 4×4 の行列が記録される。結果の記録時に、形状データは KIT WARE 社の提供する Visual Tool Kit ライブラリ^[21]に含まれる、Quadricclustering クラスを用いて三角形メッシュ化される。その後、3次元形状を簡略に近似可能な部分については、メッシュを内包する立方体や円柱を手作業で当てはめることにより近似モデルを作成する。その後、Decimation クラスによりメッシュ数を削減する。Decimation クラスでは、任意の頂点について、その頂点と、頂点を除いた際に新たにできる平面との距離を誤差として計算し、この誤差が一定値以下であるときに頂点を削除し、新たな平面を形成することで、頂点の数およびメッシュの数を削減する。
- (8) 形状データ画面：移動される形状データの位置関係が表示される。

3.4.4 開発した作業検証サブシステムの概要

作業検証システムのハードウェア構成および全体図を図 3.21 に示す。

また、作業検証サブシステムの PC とカメラの仕様を表 3.11 および表 3.12 に示し、インタフェース画面例を図 3.22 に示す。また、作業検証サブシステムは Microsoft Visual Studio 2008 を用いて作成し、開発言語は C++ を用いた。仮置・運搬作業シミュレーションに用いる形状モデルの作成は KIT WARE 社の提供する Visual Tool Kit ライブラリを用いた。解体機器の形状モデルと作業環境の接触判定の計算には Bullet Physics Library^[22] の計算機能を使用した。

- (1) 接触箇所の着色を元に戻す 解体機器と作業環境が接触したと判断され赤色に着色された箇所の色を元に戻す。
- (2) モデルの表示・非表示を切り替える 解体機器の形状モデルの表示・非表示を切り替える。形状モデルが表示されている時はボタンは赤色になっており、非表示の時に

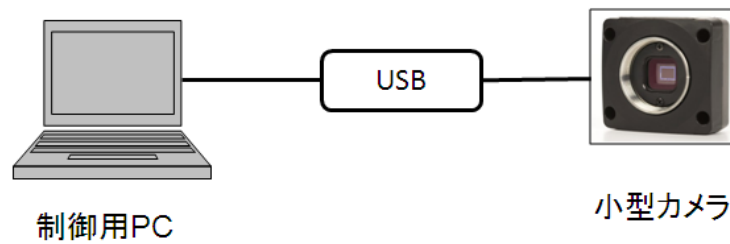


図 3.21: 作業検証サブシステムのハードウェア構成

表 3.11: 作業検証サブシステムの制御用 PC の仕様

| | |
|---------|--|
| メーカー・型名 | Panasonic CF-C1AEAADR |
| CPU | インテル Core i5-520M vPro プロセッサー |
| メインメモリ | 4GB |
| ビデオメモリ | 最大 763MB |
| ディスプレイ | 12.1 型 TFT カラー液晶 WXGA (1280 × 800 ドット) |
| OS | Windows 7 Professional 32 ビット |
| 寸法 | 幅 299.2 mm × 奥行 226.5 mm × 高さ 30.6 mm |
| 重量 | 1.67kg |

表 3.12: 作業検証サブシステムのカメラの仕様

| | |
|-----------|-------------------------------|
| メーカー・型名 | Chameleon CMLN-132S2C |
| 画像素子 | 1/3 インチ EXview HAD CCD ICX445 |
| 解像度 | 1296 × 964 1.3 メガピクセル |
| インタフェース | USB2.0 |
| 最大フレームレート | 18 fps |
| レンズの焦点距離 | 3.0mm |

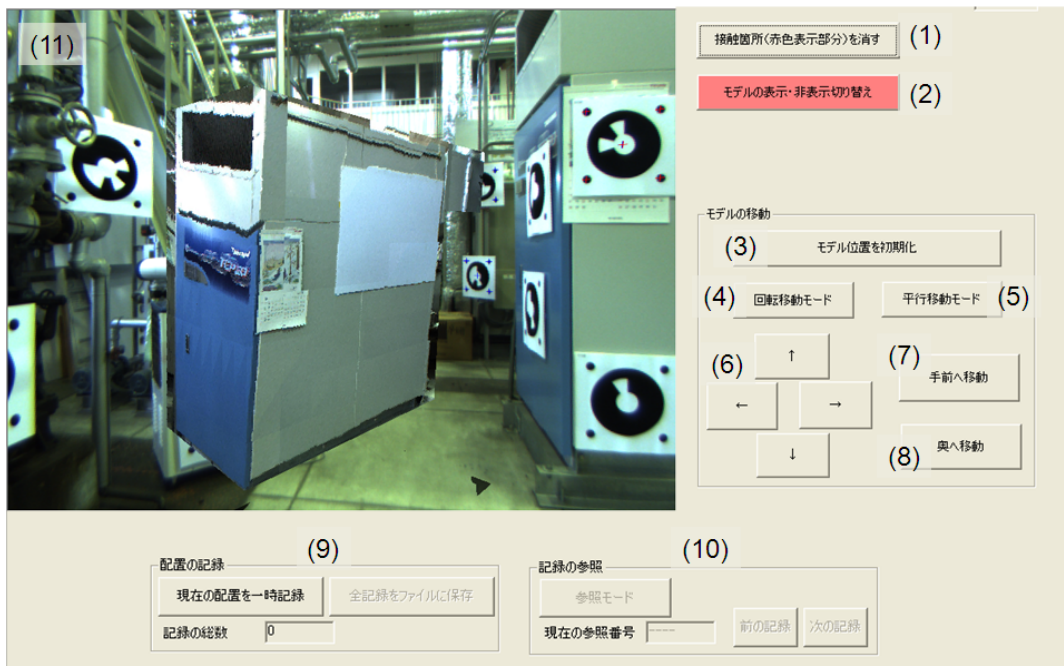


図 3.22: 作業検証サブシステム画面例



図 3.23: 作業検証サブシステム制御用 PC

は灰色 (無着色) になる。

(3) 解体機器の形状モデルの位置を元に戻す 解体機器の形状モデルは (4) から (8) の機能を用いてインタフェース画面上の操作により移動することができるが、その際、オブジェクトの上に重畳表示されていた形状モデルはオブジェクトからずれて重畳表示される。ボタンクリックによりこのずれを修正し、形状モデルの重畳表示をオブジェクトの上に戻す。

(4) 解体機器の形状モデルの回転移動モード クリックすると回転移動モードになり、カメラ画面上の解体機器の形状モデルをスタイラスペンでドラッグすることで回転移動を行うことができる。

(5) 解体機器の形状モデルの平行移動モード クリックすると平行移動モードになり、カメラ画面上の解体機器の形状モデルをスタイラスペンでドラッグすることで平行移動を行うことができる。

- (6) ボタンクリックによる解体機器の形状モデルの平行移動 クリックすることで画面上、右、左、下の各方向に解体機器の形状モデルを 10cm 平行移動する。
- (7) 画面奥側に形状モデルを移動 カメラ画面に対して正面奥方向に解体機器の形状モデルを 10cm 平行移動する。
- (8) 画面手前側に形状モデルを移動 カメラ画面に対して正面手前方向に解体機器の形状モデルを 10cm 平行移動する。
- (9) 現在の形状モデルの位置を記録 現在カメラ画像に映っている解体機器の形状モデルの位置および方向を記録できる。
- (10) 記録の参照モード クリックすると参照モードになり、(9) の機能で保存した記録を選択できるようになる。保存した記録には順番に番号がつけられ、「前の記録」、「次の記録」ボタンをクリックすることにより前、または次の番号の解体機器の形状モデルの位置と方向が再現されてカメラ画面に重畳表示される。
- (11) カメラディスプレイ 作業検証サブシステムに取り付けられたカメラから得られる映像および重畳された形状モデルが表示される。

第 4 章 模擬環境におけるシステムの評価

本章では、原子力発電プラントを想定した模擬環境において行った TPCOSS の評価について述べる。以下、評価の目的とその方法について述べ、次いで得られた評価結果について述べる。また、最後に評価結果から発見されたシステムの問題点について述べ、それを受けて改善したシステムについて述べる。

4.1 評価の目的

本評価は、TPCOSS の動作確認を実施するとともに、予備的に有用性と受容性を評価し、TPCOSS を実際の解体現場で使用するにあたり必要なシステムの改良点を発見することを目的とする。

4.2 評価方法

評価手法および評価手順は 5 章で述べる解体作業現場で行う評価と同じものを用いる。

4.2.1 評価環境

保全区域であるふげんにおいて評価を行うには様々な手続きや許可が必要とされ、アクシデント発生時の対応なども取りにくいいため、本研究ではまず神戸大学海事科学部が所有するマイクロガスタービン発電施設の 1 区画を評価環境とし、TPCOSS を予備的に評価した。TPCOSS は、原子力発電プラント内で使用することを想定している。マイクロガスタービン発電施設は機器配置が複雑であり、配管が多数存在する点や広いスペースを確保しにくい点が原子力発電プラントの解体現場の特徴と共通しているため、模擬環境として適していると考えられる。したがって、この模擬環境下で得られる評価結果をもとに、TPCOSS の実際の現場での使用に向けて改善点を探ることは有効だと考えられる。模擬評価環境の見取り図を図 4.1 に示す。色付けされた楕円は、本評価中に作業シナリオに従って解体機器を仮置した領域を表し、矢印は解体機器を運搬したルートを示す。また、模擬評価環境の様子を図 4.2 に示す。

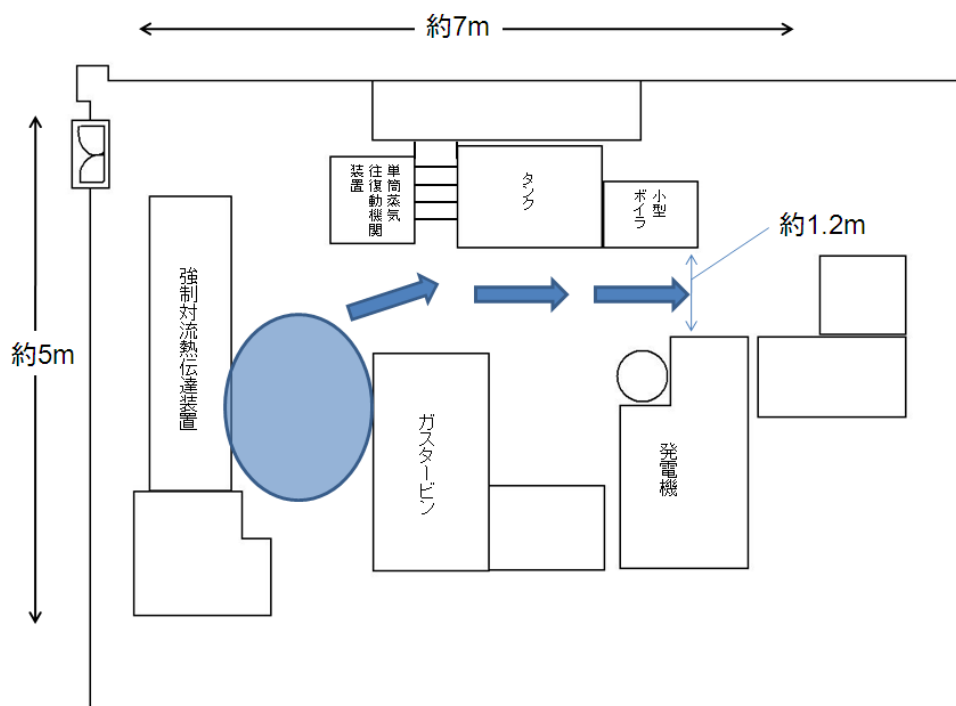


図 4.1: 模擬評価環境の見取り図



図 4.2: 評価環境の様子



図 4.3: サイコロマーカ

本研究では、作業検証サブシステムのカメラの位置を計測するトラッキング用マーカとして1辺405mmの正方形パネルに半径147mmの遠近両用マーカを貼ったものを22枚使用した。また、同様の大きさの円形マーカ6枚を用いて解体機器の形状モデルを操作するための図4.3に示すようなサイコロマーカを作成した。以下に本評価の準備手順を示す。

- (1) 実験環境にトラッキングを行うための遠近両用マーカを貼付ける。評価環境に貼付けたマーカの位置関係を図4.4に示す。
- (2) MAMSを用いてすべてのマーカの位置と方向を計測する。
- (3) MAMSにより得られたマーカの位置情報を作業検証サブシステムに入力する。

4.2.2 評価手法

本評価では、TPCOSSを有用性および受容性の観点からヒューリスティック法^[23]を用いて評価する。ヒューリスティック法とは、システムのプロトタイプを用いながらその使いやすさを評価者の経験および直感により評価する手法である。本手法による評価結果として、システムの問題点や改良点を得ることができる。評価者には、システムが支援対象とする作業の熟練者が望まれ、評価者の人数は数人程度が適当とされる。ヒューリスティック法による評価の特徴として、システムの問題点を効率的に収集することができ、問題発見のためのコストを低く抑えられることが挙げられる。本評価では、3.4節で述べたシステムを評価用のプロトタイプシステムとして用いる。また、評

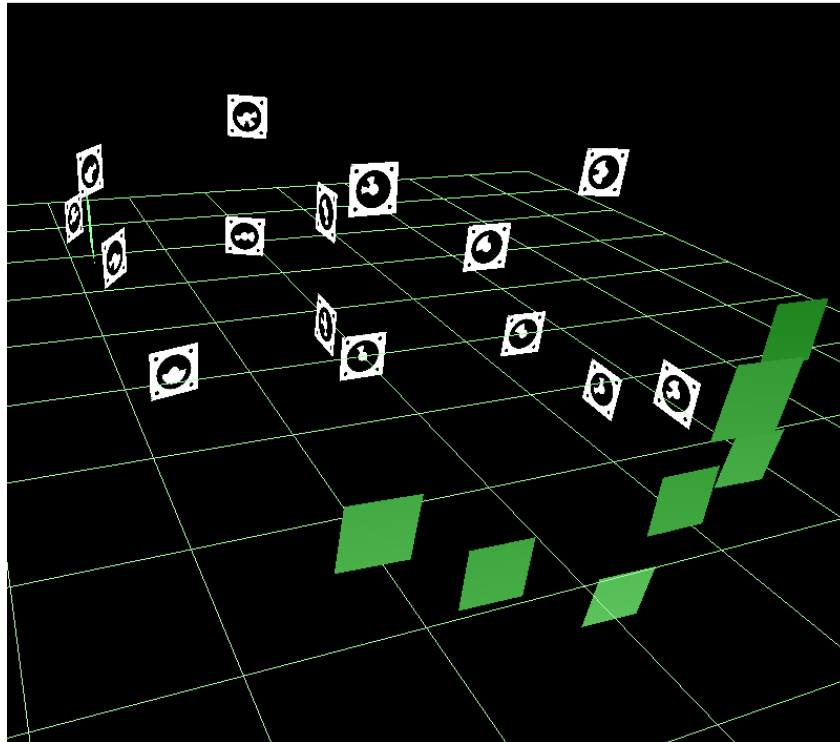


図 4.4: 評価環境に貼付したマーカの位置関係

価者はヒューマンインタフェースの専門家1名(評価者A)およびふげんの職員1名(評価者B)の計2名とし、次項に示す作業シナリオに沿って評価用システムを使用してもらった。

4.2.3 評価手順

本評価手順は以下の通りである。また、図4.5にその概略を示し、評価概要の事前説明に用いた資料を付録Aに示す。最初にモデリングサブシステム、次に作業検証サブシステムの順にシステムを使用してもらう。先に評価者Aによる評価を行い、次に評価者Bにより評価を行った。また、作業検証サブシステムで用いるサイコロマーカは評価実施担当者がもち、評価者の指示に従ってサイコロマーカを移動した。

- (1) 評価者に評価概要を説明する。
- (2) 作業シナリオに沿って、TPCOSSを使用してもらう
- (3) 評価アンケートおよび個別インタビューに答えてもらう

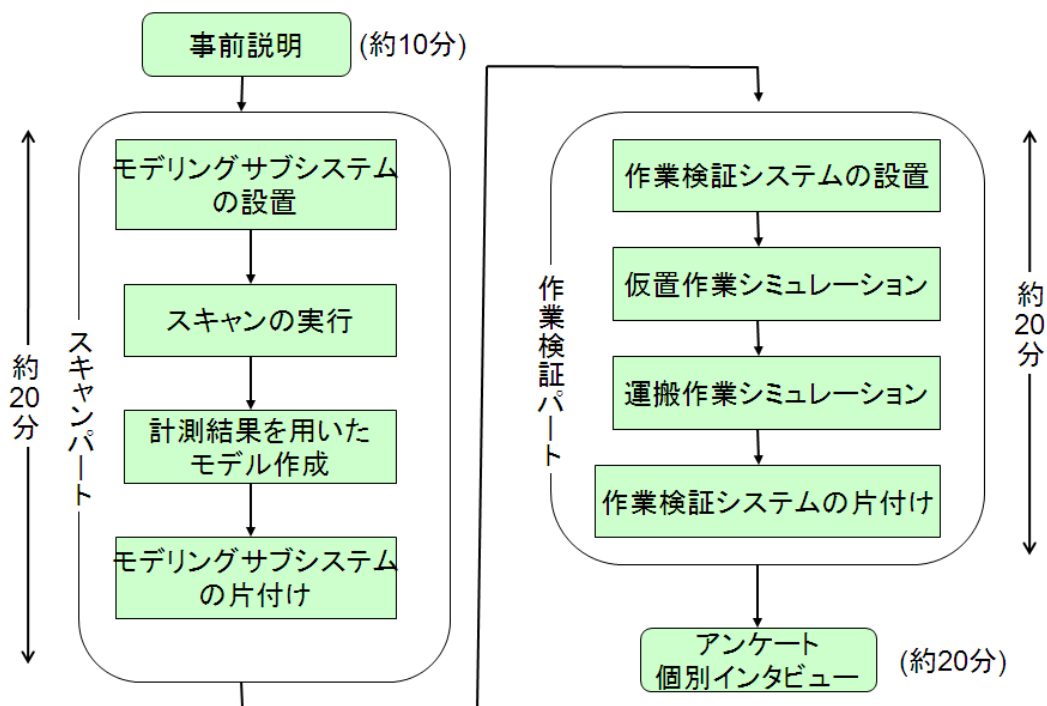


図 4.5: 評価手順

4.2.4 作業シナリオ

作業シナリオはスキャンパートおよび作業検証パートの2つの作業パートに大別される。スキャンパートでは評価者はモデリングサブシステムを使用して3次元計測を行うことにより、仮置・運搬作業シミュレーションに用いる解体機器の形状モデルを取得する。本評価では解体機器としてガスタービン进行想定する。得られたガスタービンの形状モデルを図4.6に示す。この形状モデルの大きさはおよそ200cm × 100cm × 240cmである。

作業検証パートでは、取得した解体機器の形状モデルを利用して、仮置・運搬作業のシミュレーションを行う。ただし、3章で述べたTPCOSSのモデリングサブシステムによる形状データの統合作業は、将来的に自動化されることを想定している。したがって、本研究で行う評価では、評価前に事前に作成した作業環境および解体機器の形状モデルを使用した。そのため、本評価における作業シナリオでは、3次元形状計測は1回のみ行うが、複数回の十分な形状計測を行い、その形状データを統合して十分な形状モデルを取得したと仮定して評価した。以上の仮定のもと作成された評価者の作業シナリオについて以下に述べる。

スキャンパート

- (a) レーザレンジファインダ、電動雲台、三脚、制御用 PC を解体された状態から、評価実施担当者の指示に従い組み立てる。
- (b) 組み立てが完了したら、評価環境内の任意の位置にシステムを配置し、制御用 PC の操作画面より「計測開始」ボタンを押すことで 3 次元形状計測を行う。
- (c) 評価者に計測結果が保存されたことを確認してもらう。
- (d) 次に形状モデルが作成されたという仮定のもと、評価前に事前に作成した形状モデルの様子を確認する。
- (e) システムを (a) の最初の状態に解体し片づける。

作業検証パート

- (f) 三脚、タブレット PC、カメラを解体された状態から、評価実施担当者の指示に従い組み立てる。
- (g) スキャンパートにより得られた形状モデルを用いて、図 4.1 の色付けされた楕円エリア内で、解体機器の形状モデルを仮置することにより作業シミュレーションを行ってもらう。作業検証サブシステムを使用する評価者の様子を図 4.7 に示す。仮置作業シミュレーション中の画面例を図 4.8 に示す。この図では、解体機器の形状モデルが作業環境のガスタービンに接触しているため、作業環境および解体機器の形状モデルが赤色に着色されている。
- (h) 評価者は、サイコロマーカを持つ評価実施担当者に指示を出し、図 4.1 の矢印の示す方向に、解体機器の形状モデルを移動し、運搬作業シミュレーションを行う。矢印の方向に解体機器の形状モデルを運搬していく様子を図 4.9 に示す。
- (i) 全ての作業シミュレーションが終了したら、(f) の最初の状態にシステムを解体し片づける。

ただし、作業検証サブシステムを使い終わる前に、全ての機能を一通り使用してもらうようにした。



図 4.6: 解体機器の形状モデルの例



図 4.7: 評価の様子

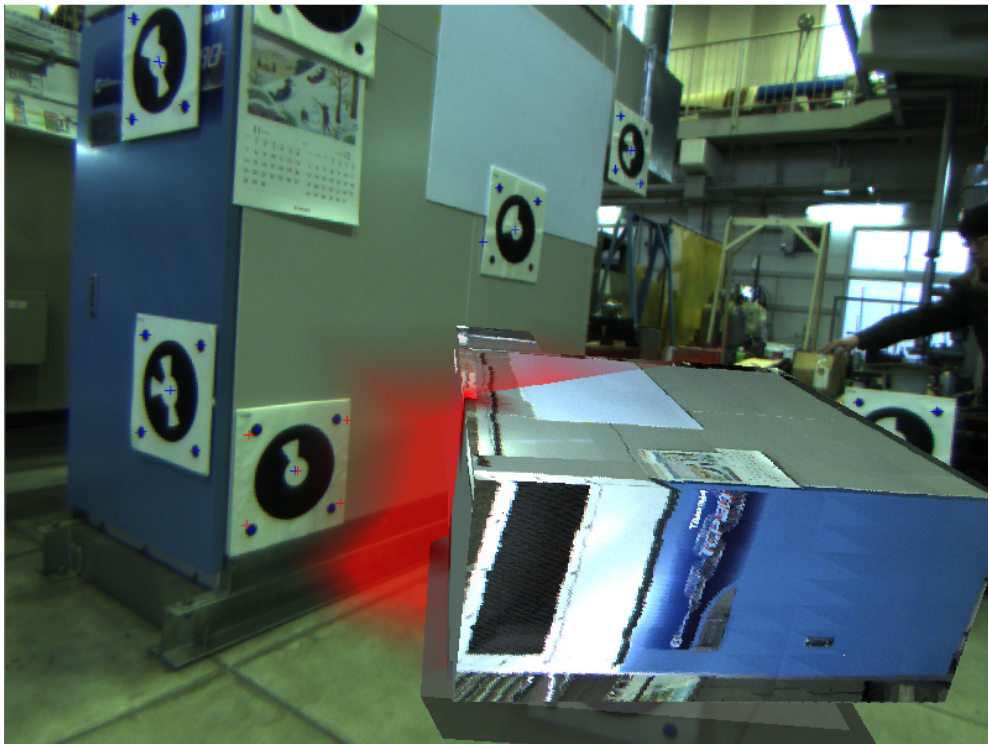


図 4.8: 仮置作業シミュレーションの様子

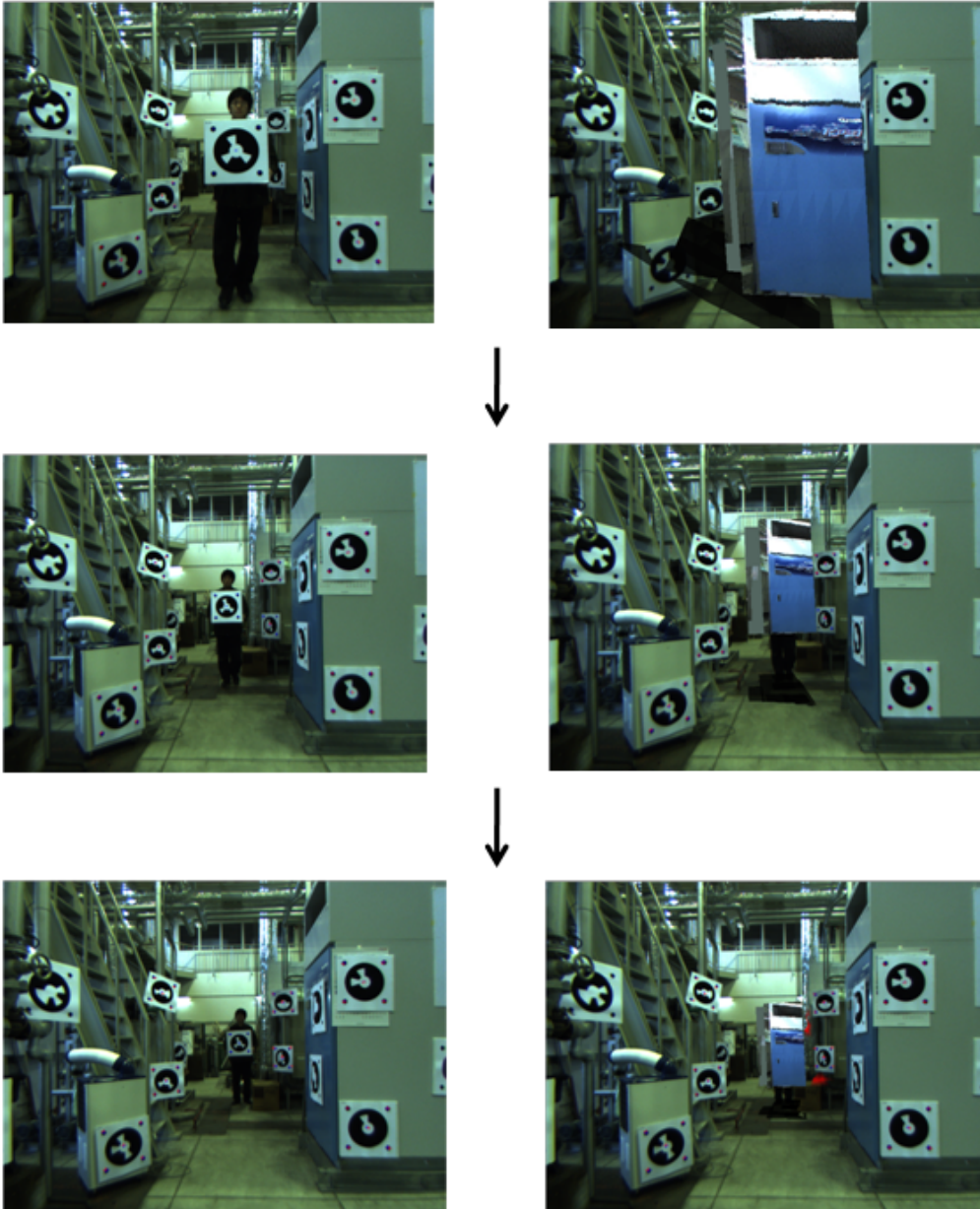


図 4.9: 運搬作業シミュレーションの様子

4.2.5 評価アンケート

作業シナリオが全て終了した後、評価者に評価アンケートに答えてもらい、さらに各評価項目のうち評価の比較的良かったものについてその理由を問う個別インタビューを行った。アンケート調査はTPCOSSの有用性および模擬環境における受容性を評価することを目的としている。質問項目は2章で述べたTPCOSSの要求仕様および機能構成に関する有効さや使いやすさを尋ねるように作成した。質問項目数は36項目あり、各項目は「5. そう思う」、「4. ややそう思う」、「3. どちらともいえない」、「2. あまりそう思わない」、「1. そう思わない」の5段階で評価する。さらに評価アンケートの後ろに自由記述欄を設け、その他の問題点や気づいた点などがあれば記述してもらった。また、システムの問題点や改善点をインタビューにより尋ねた。アンケートの質問項目と要求仕様および機能構成との対応を表4.1から表4.4に示す。また、実際に使用したアンケートを付録Bに示す。

4.3 評価結果

アンケート結果を表4.5から表4.8に示す。また、個別インタビューおよび自由記述により得られた意見を表4.9および表4.10に示す。評価中に特にトラブルは無く、無事に評価を実施できた。評価者Aの評価は全て4以上であった。評価者Bの評価ではいくつか2の評価があった。各評価者の評価により抽出された問題点、およびその解決策については次節で述べる。モデリングサブシステムの評価に要した時間は平均15分、作業検証サブシステムの評価に要した時間は平均20分であった。また、アンケート評価および個別インタビューに要した時間はともに平均15分だった。

4.4 問題点とその解決策

得られたTPCOSSの問題点は、システムを構成する機器の性能や性質に関するハードウェアの問題点と、情報の提示方法や操作画面設計に関するインタフェースの問題点の2つに大別できる。表4.11および表4.12に各問題点とその解決策を示す。

ハードウェアに関する問題点と解決策について述べる。問題1は評価者Bの表4.5の質問項目7に対する評価が2であったこと、および表4.10の評価者Bの意見(B-2)より抽出された。3次元形状計測にかかる時間を短縮することは可能であるが、レーザレンジファインダを制御する電動雲台の移動が高速になると計測により得られる距離点

表 4.1: モデリングサブシステムに関する質問項目と要求仕様・機能構成の対応表

| No | アンケート項目 | 要求仕様および機能構成 |
|----|---------------------------|---|
| 1 | システムの設置は簡単である | (F) システムの設置に広い場所を必要とせず、現場に容易に持ち込みできること |
| 2 | システムの片付けは簡単である | |
| 3 | 文字の大きさは適当である | (G) 使用方法がすぐに習得できること |
| 4 | ボタンの大きさは適当である | |
| 5 | パソコンのディスプレイ画面の大きさは充分である | |
| 6 | 初めてシステムを使う人でも簡単に使用できる | |
| 7 | 1回の計測にかかる時間は適当である | (E) 作業シミュレーションに用いる環境および解体機器の形状モデルが取得できること (i) レーザレンジファインダを用いて距離計測を行う機能 (ii) 計測データの位置合わせ、加工を行いシミュレーション実施に必要な形状モデルを得る機能 |
| 8 | ストレスを感じることなくシステムを使うことができる | — |

表 4.2: 作業検証サブシステムに関する質問項目と要求仕様・機能構成の対応表 (1/3)

| No | アンケート項目 | 要求仕様および機能構成 |
|----|---|--|
| 1 | システムの設置は簡単である | (F) システムの設置に広い場所を必要とせず、現場に容易に持ち込みできること |
| 2 | システムの片付けは簡単である | |
| 3 | カメラ画面に重畳表示された解体機器を見ることで仮置作業の様子が直感的に理解しやすい | (A) 作業現場において、解体機器の形状モデルが参照できること |
| 4 | カメラ画面に重畳表示された解体機器を見ることで運搬作業の様子が直感的に理解しやすい | (iii) 解体機器の形状モデルをカメラ画像に重畳表示する機能 (iv) 解体機器の形状モデルの表示/非表示を切り替える機能 |
| 5 | 解体機器と作業環境が接触した際に、解体機器の接触箇所を赤色で示すことにより解体機器の接触箇所を理解しやすい | (C) 解体機器の形状モデルが周囲の環境に接触した箇所が把握できること |
| 6 | 解体機器と作業環境が接触した際に、作業環境の接触箇所を赤色で示すことにより解体機器の接触箇所を理解しやすい | (vii) 解体機器の形状モデルが作業環境に接触した際に互いの接触箇所に着色する機能 (viii) 着色された色を着色される前の状態に戻す機能 |
| 7 | サイコロマーカを移動させることにより解体機器の位置や方向を変えられることは有効である | (B) 解体機器の形状モデルを自由に移動できること |
| 8 | サイコロマーカによる解体機器の平行移動は簡単である | (v) 解体機器の形状モデルを実世界オブジェクトの位置姿勢情報をもとに表示する機能 (vi) スタイラスペンを用いて解体機器の形状モデルを回転・平行移動させる機能 |
| 9 | サイコロマーカによる解体機器の回転移動は簡単である | |
| 10 | タッチペンを用いて解体機器を平行移動できることは有効である | |
| 11 | タッチペンを用いて解体機器を回転移動できることは有効である | |
| 12 | タッチペンを用いた解体機器の平行移動は簡単である | |

表 4.3: 作業検証サブシステムに関する質問項目と要求仕様・機能構成の対応表 (2/3)

| No | アンケート項目 | 要求仕様および機能構成 |
|----|-------------------------------------|--|
| 13 | タッチペンを用いた解体機器の回転移動は簡単である | (B) 解体機器の形状モデルを自由に移動できること |
| | | (v) 解体機器の形状モデルを実世界オブジェクトの位置姿勢情報をもとに表示する機能 (vi) スタイラスペンを用いて解体機器の形状モデルを回転・平行移動させる機能 |
| 14 | タッチペンで細かい作業をしやすい | (G) 使用方法がすぐに習得できること |
| 15 | 矢印(、 、 、)ボタンによる解体機器の平行移動は有効である | (B) 解体機器の形状モデルを自由に移動できること |
| 16 | 矢印(、 、 、)ボタンによる解体機器の平行移動は簡単である | (v) 解体機器の形状モデルを実世界オブジェクトの位置姿勢情報をもとに表示する機能 |
| 17 | リセットボタンを押すことにより解体機器が初期位置に戻る機能は有効である | (vi) スタイラスペンを用いて解体機器の形状モデルを回転・移動させる機能 |
| 18 | 解体機器の位置・方向を記録できる機能は有効である | (D) 必要に応じて仮置・運搬作業の様子を記録し、再び参照できること |
| 19 | 解体機器の位置・方向を記録する機能は簡単である | (ix) 解体機器の形状モデルの位置方向を記録する機能 |
| 20 | 19で記録した結果を視覚的に参照できることは有効である | (x) 記録を元に解体機器の形状モデルの重畳表示を再現する機能 |
| 21 | 19で記録した結果を視覚的に参照できることは簡単である | |
| 22 | 前の記録、次の記録の参照をボタンを押して切り替える機能は有効である | |
| 23 | 前の記録、次の記録の参照をボタンを押して切り替える機能は簡単である | |
| 24 | 解体機器の表示を消すことのできる機能は有効である | (A) 作業現場において、解体機器の形状モデルが参照できること |
| 25 | 接触箇所を示す赤色の表示を消して元の色に戻す機能は有効である | (iii) 解体機器の形状モデルをカメラ画像に重畳表示する機能 (iv) 解体機器の形状モデルの表示/非表示を切り替える機能 |

表 4.4: 作業検証サブシステムに関する質問項目と要求仕様・機能構成の対応表 (3/3)

| No | アンケート項目 | 要求仕様および機能構成 |
|----------------------------|--|--|
| 26 27 | システムのカメラ画面の大きさは適当である パソコンのディスプレイ画面の大きさは適当である | (G) 使用方法がすぐに習得できること |
| 28 | システムの大きさは適当であり、作業現場にも持ち込みやすい | (F) システムの設置に広い場所を必要とせず、現場に容易に持ち込みできること |
| 29 30 31 32 33 | ボタンの大きさは適当である 初めてシステムを使う人でも簡単に試用できる 操作に対する応答は即座に返ってくる カメラ視点を移動するためにシステムを見たい方向に向けることは簡単である カメラ視点を移動するためにシステムを移動することは簡単である | (G) 使用方法がすぐに習得できること |
| 34 35 | 作業環境の現在の形状をその場で測定し、仮置・運搬作業の検証に用いることは有効である 作業環境で解体機器のモデルを参照しながら仮置・運搬作業の検証を行うことは有効である | (A) 作業現場において、解体機器の形状モデルが参照できること (iii) 解体機器の形状モデルをカメラ画像に重畳表示する機能 (iv) 解体機器の形状モデルの表示/非表示を切り替える機能 |
| 36 | ストレスを感じることなくシステムを使うことができる | — |

表 4.5: モデリングサブシステムに関する質問項目と評価結果

| No | アンケート項目 | 評価者 A | 評価者 B |
|----|---------------------------|-------|-------|
| 1 | システムの設置は簡単である | 4 | 5 |
| 2 | システムの片付けは簡単である | 5 | 5 |
| 3 | 文字の大きさは適当である | 5 | 4 |
| 4 | ボタンの大きさは適当である | 5 | 5 |
| 5 | パソコンのディスプレイ画面の大きさは充分である | 5 | 5 |
| 6 | 初めてシステムを使う人でも簡単に使用できる | 5 | 4 |
| 7 | 1回の計測にかかる時間は適当である | 5 | 2 |
| 8 | ストレスを感じることなくシステムを使うことができる | 3 | 5 |

群の点密度が小さくなってしまふことや、システム全体が小さく振動してしまふことにより計測結果に含まれる誤差が大きくなることがあるため、今回は対応しなかつた。この問題はより安定性の高い電動雲台を用いる、より高速の形状計測が可能なレーザーレンジファインダを用いるなどして解決できる。

問題 2 は、表 4.9 の評価者 A の意見 (A-1) により抽出された。問題への対応として、システムをより安全に使えるようにするため、ケーブルの長さを調整し、冗長部分を無くしてケーブルを束にしてまとめた。

問題 3 は表 4.9 の評価者 A の意見 (A-2) により抽出された。この問題はレーザーレンジファインダの仕様によるものであり、より軽いレーザーレンジファインダを用いるなどして改善できる。

問題 4 は、表 4.9 の評価者 A の意見 (A-7) により抽出された。これは油圧雲台付きの三脚を用いることによりネジを使用することなく台の向きを操作することができるようになる。

次に、インタフェースに関する問題点と解決策について述べる。また、改善したインタフェース画面を図 4.10 に示す。

問題 5 は評価者 B の表 4.6 の質問項目 6 に対する評価が 2 であったこと、および表 4.10 の評価者 B の意見 (B-4) より抽出された。接触により着色される領域が増えるにつれ、カメラ画面全体に占める赤色の領域が多くなり、作業環境と解体機器の形状モデルに着色された赤色が混じるため、画面が見づらくなりユーザの混乱を招くことが

表 4.6: 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (1/3)

| No | アンケート項目 | 評価者 A | 評価者 B |
|----|---|-------|-------|
| 1 | システムの設置は簡単である | 5 | 5 |
| 2 | システムの片付けは簡単である | 5 | 5 |
| 3 | カメラ画面に重畳表示された解体機器を見ることで仮置作業の様子が直感的に理解しやすい | 5 | 4 |
| 4 | カメラ画面に重畳表示された解体機器を見ることで運搬作業の様子が直感的に理解しやすい | 5 | 4 |
| 5 | 解体機器と作業環境が接触した際に、解体機器の接触箇所を赤色で示すことにより解体機器の接触箇所を理解しやすい | 4 | 4 |
| 6 | 解体機器と作業環境が接触した際に、作業環境の接触箇所を赤色で示すことにより解体機器の接触箇所を理解しやすい | 5 | 2 |
| 7 | サイコロマーカを移動させることにより解体機器の位置や方向を変えられることは有効である | 5 | 3 |
| 8 | サイコロマーカによる解体機器の平行移動は簡単である | 5 | 4 |
| 9 | サイコロマーカによる解体機器の回転移動は簡単である | 5 | 4 |
| 10 | タッチペンを用いて解体機器を平行移動できることは有効である | 4 | 3 |
| 11 | タッチペンを用いて解体機器を回転移動できることは有効である | 4 | 3 |
| 12 | タッチペンを用いた解体機器の平行移動は簡単である | 4 | 3 |

表 4.7: 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (2/3)

| No | アンケート項目 | 評価者 A | 評価者 B |
|----|-------------------------------------|-------|-------|
| 13 | タッチペンを用いた解体機器の回転移動は簡単である | 5 | 3 |
| 14 | タッチペンで細かい作業をしやすい | 4 | 3 |
| 15 | 矢印(、 、 、)ボタンによる解体機器の平行移動は有効である | 5 | 3 |
| 16 | 矢印(、 、 、)ボタンによる解体機器の平行移動は簡単である | 5 | 4 |
| 17 | リセットボタンを押すことにより解体機器が初期位置に戻る機能は有効である | 5 | 4 |
| 18 | 解体機器の位置・方向を記録できる機能は有効である | 5 | 5 |
| 19 | 解体機器の位置・方向を記録する機能は簡単である | 5 | 5 |
| 20 | (19)で記録した結果を視覚的に参照できることは有効である | 5 | 2 |
| 21 | (19)で記録した結果を視覚的に参照できることは簡単である | 5 | 3 |
| 22 | 前の記録、次の記録の参照をボタンを押して切り替える機能は有効である | 5 | 4 |
| 23 | 前の記録、次の記録の参照をボタンを押して切り替える機能は簡単である | 5 | 5 |
| 24 | 解体機器の表示を消すことのできる機能は有効である | 5 | 5 |
| 25 | 接触箇所を示す赤色の表示を消して元の色に戻す機能は有効である | 5 | 5 |

表 4.8: 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (3/3)

| No | アンケート項目 | 評価者 A | 評価者 B |
|----|--|-------|-------|
| 26 | システムのカメラ画面の大きさは適当である | 5 | 5 |
| 27 | パソコンのディスプレイ画面の大きさは適当である | 5 | 5 |
| 28 | システムの大きさは適当であり、作業現場にも持ち込みやすい | 5 | 5 |
| 29 | ボタンの大きさは適当である | 4 | 5 |
| 30 | 初めてシステムを使う人でも簡単に試用できる | 5 | 4 |
| 31 | 操作に対する応答は即座に返ってくる | 5 | 5 |
| 32 | カメラ視点を移動するためにシステムを見たい方向に向けることは簡単である | 4 | 5 |
| 33 | カメラ視点を移動するためにシステムを移動することは簡単である | 5 | 5 |
| 34 | 作業環境の現在の形状をその場で測定し、仮置・運搬作業の検証に用いることは有効である | 5 | 4 |
| 35 | 作業環境で解体機器のモデルを参照しながら仮置・運搬作業の検証を行うことは有効である | 4 | 5 |
| 36 | ストレスを感じることなくシステムを使うことができる(特にストレスを感じる点がございましたら、下の自由記述欄にその点をお書きください) | 4 | 3 |

表 4.9: 評価者 A のインタビューおよび自由記述による意見

| 識別番号 | インタビューおよび自由記述の意見 |
|------|--|
| A-1 | ケーブルが多く、初めて使用する人は雲台の回転でケーブルを巻き込む可能性がある |
| A-2 | レーザレンジファインダが重くて少しつけにくい |
| A-3 | モデルの裏側が見えない |
| A-4 | 矢印ボタンによる操作で、形状モデルがどちら向きに平行移動するかわかりにくい |
| A-5 | スタイラスペンによる操作で、形状モデルがどちら向きに回転移動するかわかりにくい |
| A-6 | 両サブシステムともに、字やボタンの大きさがやや小さい。もう少し大きくてよい |
| A-7 | キャスター付き三脚による作業検証サブシステムの移動はしやすい。しかし、システムの上下方向をネジを回して台を固定したり固定解除したりするのは面倒である |
| A-8 | 形状モデルを現場で使用することは有効。しかし重畳されるモデルが揺れてしまうと細かな接触判定はしにくい |

表 4.10: 評価者 B のインタビューおよび自由記述による意見

| 識別番号 | インタビューおよび自由記述の意見 |
|------|--|
| B-1 | 両システムとももう少し操作画面の文字が大きくてもよい |
| B-2 | 実際の解体作業現場で3次元計測を行う場合、計測に時間がかかりすぎるのではないか |
| B-3 | 解体機器の形状モデルがブレてしまうため、作業の様子が分かりにくい場面があった |
| B-4 | 接触が起こったときに解体機器の形状モデル、作業環境両方に対して赤色をつけてしまうとどっちがどっちかわかりにくく、混乱する |
| B-5 | 接触が起こった箇所に矢印が出る、ギザギザの強調効果が出るなどの強調表現があればよい |
| B-6 | サイコロマーカを操作するための細かい指示が与えにくいときがある |
| B-7 | 作業シミュレーションの記録は、解体機器の形状モデルの位置方向のみではなく、画面の様子が写真として残ればうれしい |
| B-8 | 複数記録をとった場合、任意の記録の番号を指定して参照できればうれしい |
| B-9 | 初めて使う人にはタッチペンの操作が難しいかもしれない |
| B-10 | 解体物をドラム缶やメッシュBOXに入れて保管するので、ボックス単位で仮置できるか否かを判断できると嬉しい |
| B-11 | 過去に接触した箇所と現在接触している箇所は区別して表示すると分かりやすい |

表 4.11: TPCOSS のハードウェアの問題点とその対応

| 番号 | 問題点 | 対応 |
|------|------------------------------|--|
| 問題 1 | 3次元形状計測にかかる時間が長い | より安定性の高い電動雲台を用いる・高速の形状計測が可能なレーザーレンジファインダを用いる |
| 問題 2 | ケーブルが多く危険である | ケーブルを束にしてまとめた |
| 問題 3 | レーザーレンジファインダが少し重いので取り付けがしづらい | より軽いレーザーレンジファインダを用いる |
| 問題 4 | 取っ手のネジを締めたり緩めたりして台の操作をするのは面倒 | 油圧雲台付き三脚を用いる |

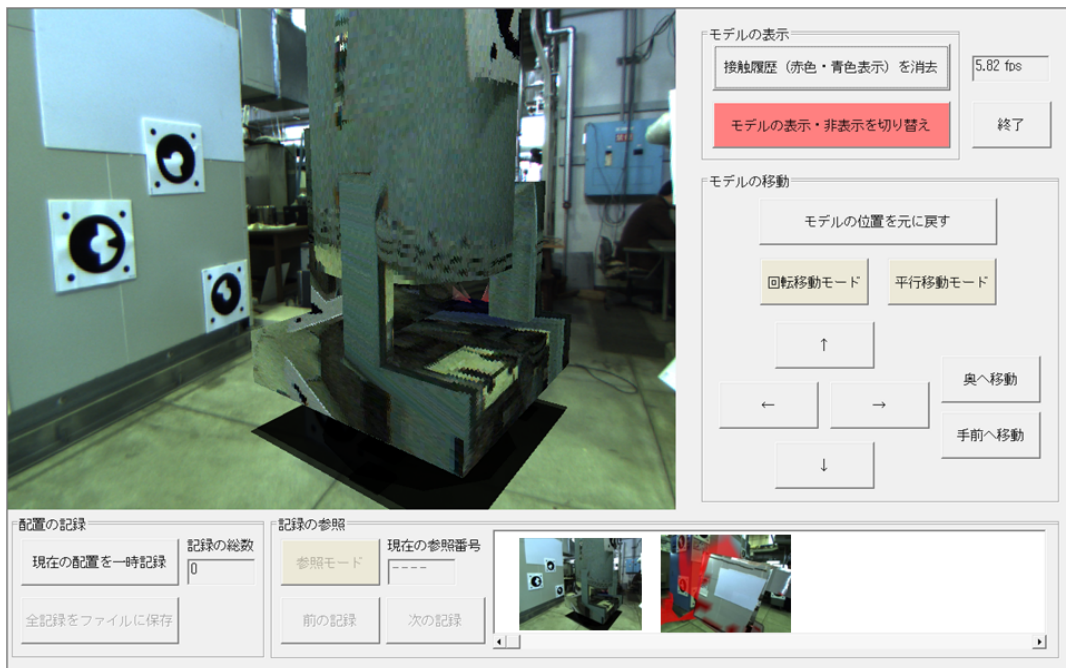


図 4.10: 改良したインタフェース画面

表 4.12: TPCOSS のインタフェースに関する問題点とその解決策

| 識別番号 | 問題点 | 対応 |
|-------|--------------------------------|--|
| 問題 5 | 作業環境と解体機器が両方赤色に着色されるのは混乱する | 接触が起こった際に着色する色を作業環境は赤、解体機器は黄に変更した |
| 問題 6 | 画面のキャプチャが記録に残るとよい | 記録ボタンを押した際、解体機器の形状モデルの位置方向情報とともに、カメラ画面をキャプチャできるようにした |
| 問題 7 | モデルの裏側が見えない | モデル表示・非表示切り替え機能の使い方を詳細に説明する |
| 問題 8 | 矢印ボタンがわかりにくい | 各ボタンと形状モデルの移動方向の対応を詳細に説明する |
| 問題 9 | スタイラスペンによる回転操作が難しい | スタイラスペンの移動と形状モデルの移動方向の対応を詳細に説明する |
| 問題 10 | 操作画面のボタンがやや小さい | 操作画面のボタンのサイズを大きくした |
| 問題 11 | 解体機器の形状モデルが揺れる | レジストレーションに関するパラメータを調整した |
| 問題 12 | 接触の起きた箇所を矢印や絵を用いて強調表示するとよい | 一度機能を実装した後、実装を中止した |
| 問題 13 | サイコロマーカを用いた細かい指示が難しい | 指示方法を事前に決める |
| 問題 14 | 任意の記録を指定して参照できるとよい | 記録の参照モードのインタフェースを改善した |
| 問題 15 | 解体物を保存するドラム缶やメッシュボックスが表示できるとよい | 別システムとして今後の開発を検討 |
| 問題 16 | 過去の接触箇所と現在の接触箇所を区別して表示されるとよい | 画面が煩雑になるため、実装を中止した |

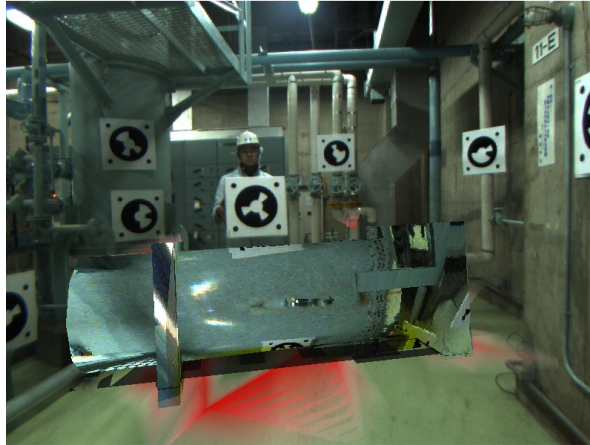


図 4.11: 作業シミュレーション画面の保存例

わかった。この問題の対策として作業環境は赤色、解体機器は黄色に着色するようにした。

問題 6 は、評価者 B の意見 (B-7) により得られた問題である。記録を行った際に、解体機器の形状モデルの位置と方向のみではなく、カメラ画面の映像を保存できれば、会議や作業報告書に使用する資料として有用であることがわかったため、TPCOSS の有用性を高めるために新たにカメラ画面を図 4.11 のように jpg ファイルとして保存する機能を実装した。

問題 7 は表 4.9 の評価者 A の意見 (A-3) により抽出された。作業検証サブシステムにはボタンクリックによる解体機器の形状モデルの表示・非表示を切り替える機能が実装されており、この機能を使用することにより解体機器の形状モデルの裏側にある環境を見ることが可能である。事前説明で本機能の有効な使い方についてより詳しく説明することにより、問題 7 は解決できると考えられる。

問題 8 は表 4.9 の評価者 A の意見 (A-4) より得られた問題点である。特に上向きと下向きの矢印が、画面と平行方向に上下に動くのか、画面に垂直な奥・手前方向に動くのかがわかりにくいことが発見された。

問題 9 は、表 4.9 の評価者 A の意見 (A-5) および表 4.10 の評価者 B の意見 (B-9) より抽出された。これよりスタイラスペンの動きと形状モデルの回転方向の対応がわかりにくいことが発見された。

問題 8 および問題 9 は、各々の操作に対し、形状モデルがどう移動するかを事前説明で詳しく説明することで解決できると考えられる。

問題 10 は、表 4.9 の評価者 A の意見 (A-6) および表 4.10 の評価者 B の意見 (B-1) か

ら抽出された。これは操作画面のボタンと字の大きさを大きくすることで解決した。

問題 11 は、表 4.9 の評価者 A の意見 (A-8) および表 4.10 の評価者 B の意見 (B-3) より抽出された。これは解体機器の形状モデルとカメラ画像の表示位置を合わせるレジストレーションに関するパラメータを調整することにより改善した。

問題 12 は、表 4.10 の評価者 B の意見 (B-5) より抽出された。この問題に対しては接触の生じた箇所に丸印を重畳表示することにより、接触箇所を強調する機能を実装したが、画面表示が煩雑になりユーザの混乱を招く可能性があったため、実装をとりやめた。

問題 13 は表 4.10 の評価者 B の意見 (B-6) より抽出された。これはサイコロマーカの操作指示の出し方を事前に決めることで解決できると考えられる。

問題 14 は表 4.10 の評価者 B の意見 (B-8) より抽出された。この問題に対しては操作画面右下に、記録したカメラ画面のサムネイルを表示し、サムネイルをスタイラスペンで選択することによりその記録を参照できる機能を実装した。

問題 15 は、表 4.10 の評価者 B の意見 (B-10) より抽出された。これは本研究であつかう仮置・解体シミュレーションとは別機能であるため、解体後の機器を保管する際に有効な技術として、今後システムの開発を検討する。

問題 16 については、表 4.10 の評価者 B の意見 (B-11) より抽出された。すでに接触が起こった箇所に着色する色と、現在接触が生じている箇所に着色する色を変えるなどして対応することが考えられる。しかし、色を多用することによりカメラ画面に映る映像が煩雑になる可能性があったため、実装をとりやめた。今後、過去と現在の接触箇所を区別するために有効な情報提示手法を考える必要があることがわかった。

第 5 章 解体作業現場におけるシステムの評価

本章では、解体作業現場において行った TPCOSS の評価について述べる。以下、評価の目的とその方法について述べ、次に得られた評価結果について述べ、最後に得られた評価結果について考察する。

5.1 評価の目的

前章で改良した TPCOSS を実際の解体作業現場において使用してもらうことにより、TPCOSS の有用性および受容性を評価することを目的とする。

5.2 評価方法

5.2.1 評価環境

本評価は、ふげんの保全区域の一画である純水装置室を評価環境として実施した。評価環境の見取り図を図 5.1 に示す。色付けされた楕円は、本評価中に作業シナリオに従って解体機器を仮置した領域を表し、矢印は解体機器を運搬したルートを示す。また、評価環境の様子を図 5.2 に示す。

本評価では、トラッキング用マーカとして、4 章で行った模擬環境における評価と同じ 1 辺 405m の正方形パネルに半径 147mm の遠近両用マーカを貼ったものを 24 枚使用した。また、同様の大きさの遠近両用マーカ 6 枚を用いて解体機器の形状モデルを操作するためのサイコロマーカを作成した。以下に本評価の準備手順を示す。

- (1) 評価環境にトラッキングを行うための遠近両用マーカを貼付ける。評価環境に貼付けたマーカの位置関係を図 5.3 に示す。
- (2) MAMS を用いてすべてのマーカの位置と方向を計測する。
- (3) MAMS により得られたマーカの位置情報を作業検証サブシステムに入力する。

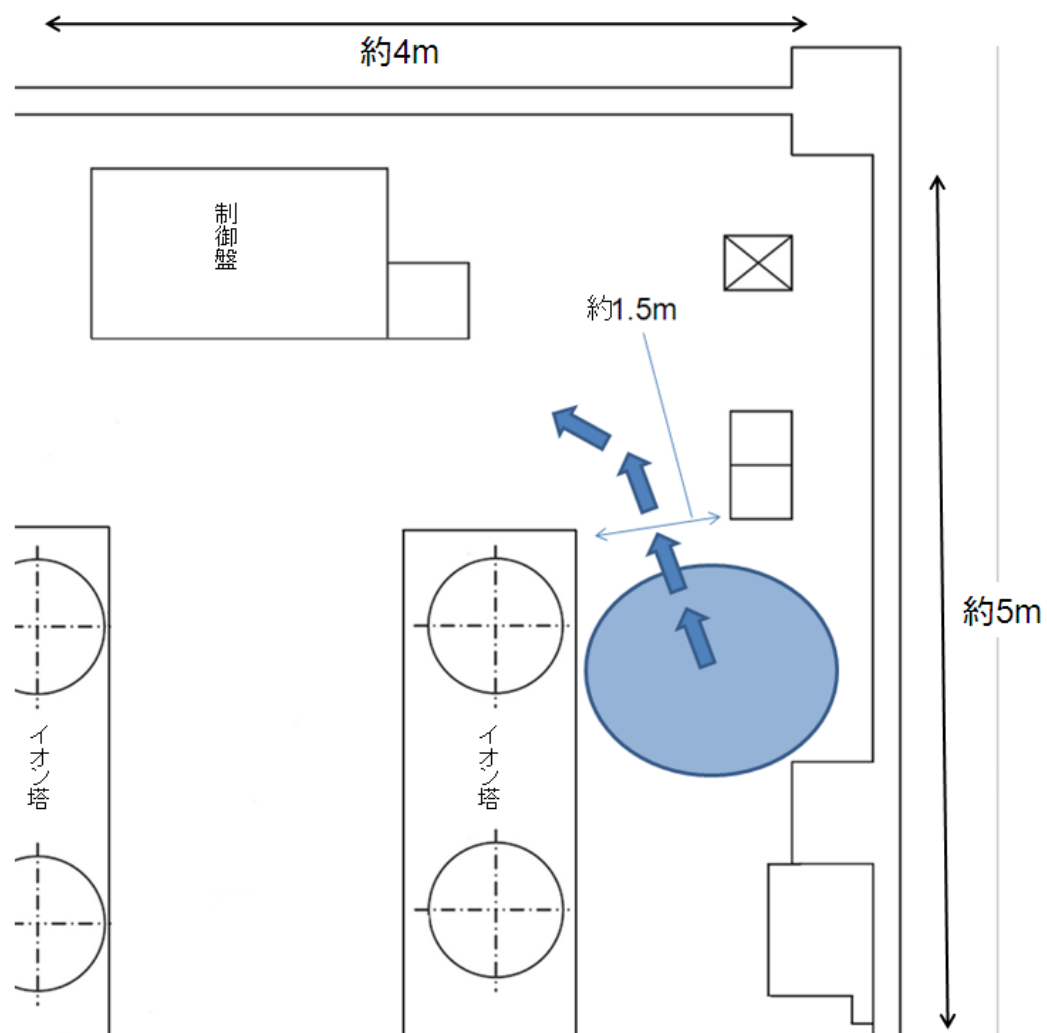


図 5.1: 純水装置室見取り図



図 5.2: 評価環境の様子

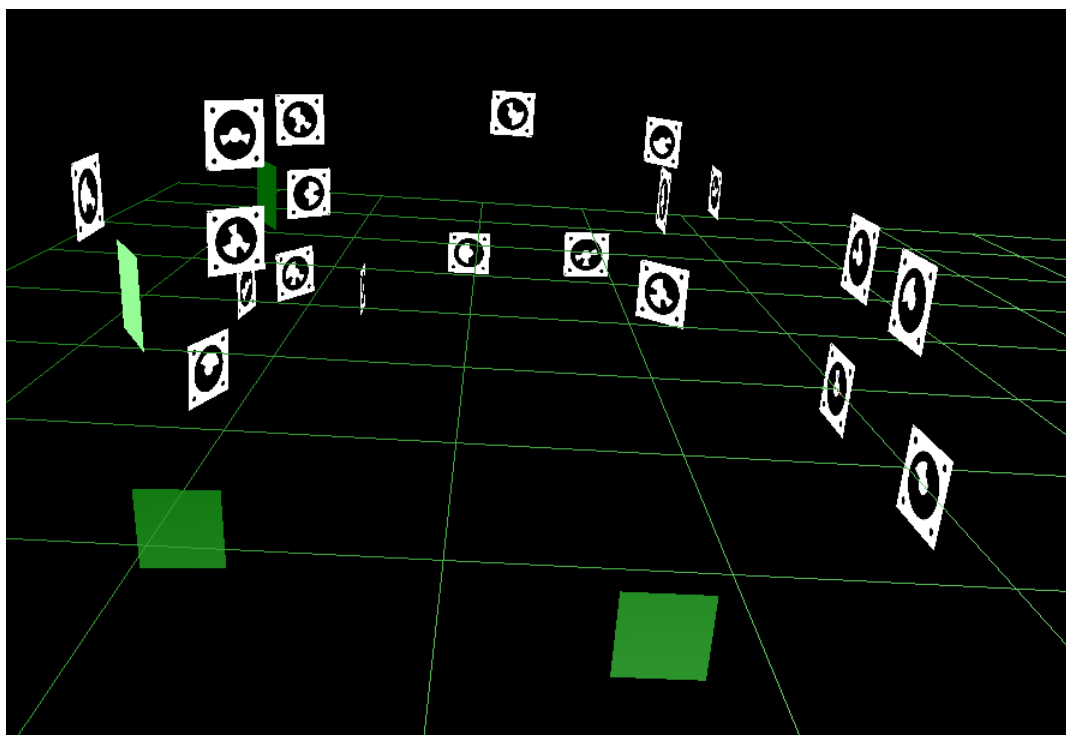


図 5.3: 評価環境に貼付したマーカの位置関係

5.2.2 評価手法

4.2.2 項で述べたヒューリスティック法による評価を行う。本評価におけるシステム評価者はふげんの職員3名(評価者B、C、D)およびヒューマンインタフェースの専門家1名(評価者A)の計4名で行った。ヒューマンインタフェースの専門家(評価者A)とふげんの職員の内1名(評価者B)は第4章で述べた評価者と同じである。ただし、4章でモデリングサブシステムについては改良しておらず、同じシステムであるので、前回モデリングサブシステムを使用した評価者A、Bの2名に対してはスキャンパートに関するアンケートを省略した。

5.2.3 評価手順

本評価の評価手順は4.2.3項で述べた手順とほぼ同様である。ただし4.2.3項に示す(3)の手順の後に、別室にて評価者4人の評価者とTPCOSSに関する全体的な意見や問題点を尋ねるグループインタビューを実施した。また、図5.4に本評価手順を示す。本評価は評価者A、B、C、Dの順に評価した。また、作業検証サブシステムで用いるサイコロマーカは評価実施担当者がもち、評価者の指示に従ってサイコロマーカを移動した。

5.2.4 作業シナリオ

作業シナリオは4章で述べた模擬環境における評価と同様である。ただし、本評価では解体機器としてタンクを想定する。3次元形状計測により得られた解体機器の形状モデルを図5.5に示す。形状モデルの大きさは約100cm × 100cm × 300cmである。また、作業検証サブシステムを使用する評価者の様子を図5.6に示し、仮置作業シミュレーションの画面例を図5.7に示す。また形状モデルを運搬していく様子を図5.8に示す。

5.2.5 評価アンケート

作業シナリオが全て終了した後、評価者に評価アンケートに答えてもらい、さらに各評価項目のうち評価の比較的低かったものについてその理由を問う個別インタビューを行った。また、全て終了した後、別室にて1時間程のグループインタビューを行い、ふげんの職員である評価者B~Dを中心に、システムについて気がついたことなどを自由に意見してもらった。アンケートは模擬環境における評価質問項目5を除いて同じ物を使用した。質問項目5は、4.4節で述べた問題の対応として、接触が生じた際に

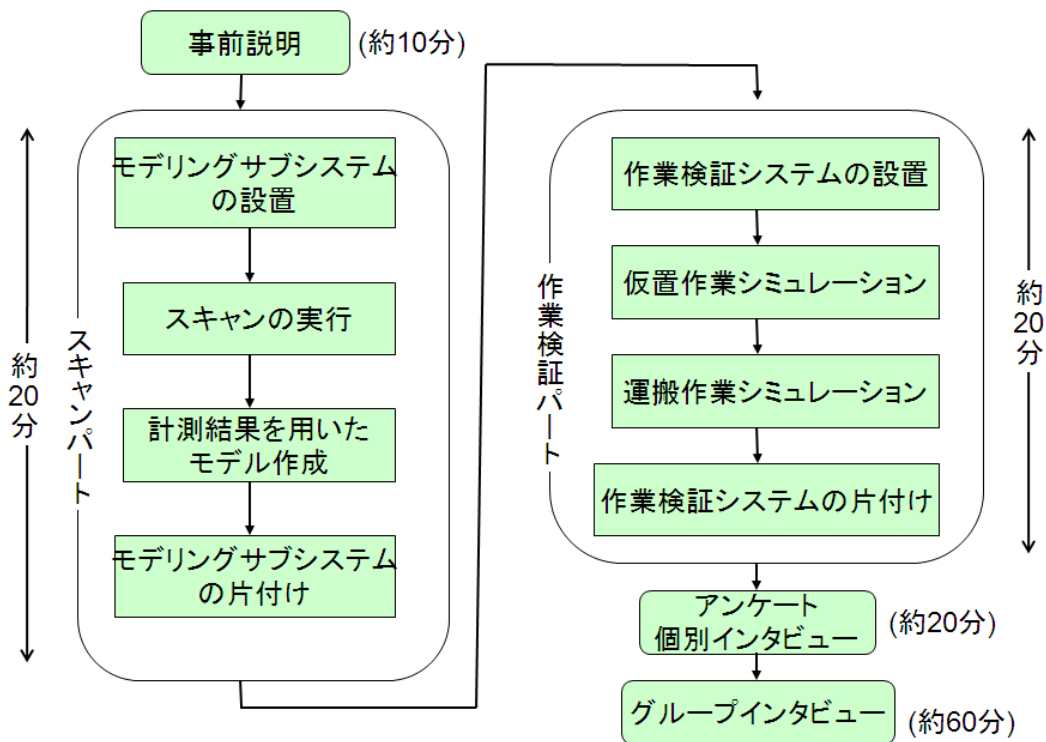


図 5.4: 評価手順

解体機器の形状モデルに着色される色を黄色にしたため、「解体機器と作業環境が接触した際に、解体機器の接触箇所を黄色で示すことにより解体機器の接触箇所を理解しやすい」と変更した。4章同様、各項目は「5. そう思う」、「4. ややそう思う」、「3. どちらともいえない」、「2. あまりそう思わない」、「1. そう思わない」の5段階で評価し、評価アンケートの後ろに自由記述欄を設け、その他の問題点や気づいた点などがあれば記述してもらった。

5.3 評価結果

アンケート結果を表 5.1 から表 5.4 に示す。また、個別・グループインタビューおよび自由記述により得られた意見を表 5.5 から表 5.8 に示す。



図 5.5: 解体機器の形状モデルの例



図 5.6: 評価の様子



図 5.7: 仮置作業シミュレーションの様子

表 5.1: モデリングサブシステムに関する質問項目と評価結果

| No | アンケート項目 | 評価者 A | 評価者 B | 評価者 C | 評価者 D |
|----|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | システムの設置は簡単である | - | - | 5 | 5 |
| 2 | システムの片付けは簡単である | - | - | 5 | 5 |
| 3 | 文字の大きさは適当である | - | - | 4 | 5 |
| 4 | ボタンの大きさは適当である | - | - | 4 | 5 |
| 5 | パソコンのディスプレイ画面の大きさは充分である | - | - | 4 | 5 |
| 6 | 初めてシステムを使う人でも簡単に使用できる | - | - | 5 | 5 |
| 7 | 1回の計測にかかる時間は適当である | - | - | 5 | 5 |
| 8 | ストレスを感じることなくシステムを使うことができる | - | - | 4 | 5 |

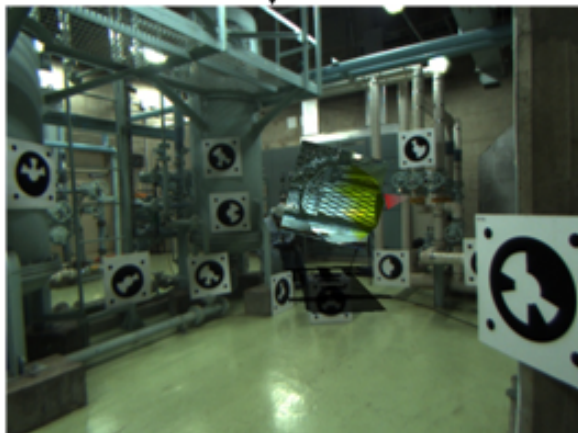
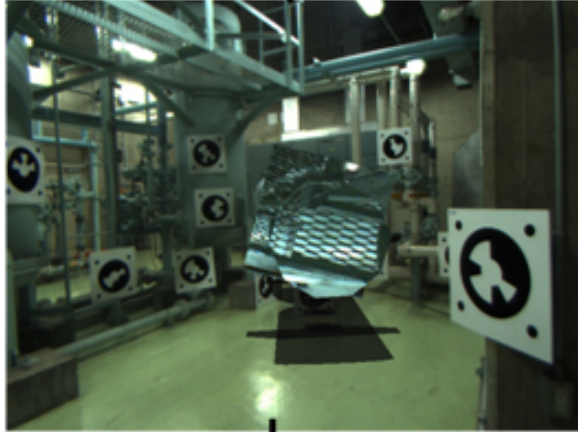
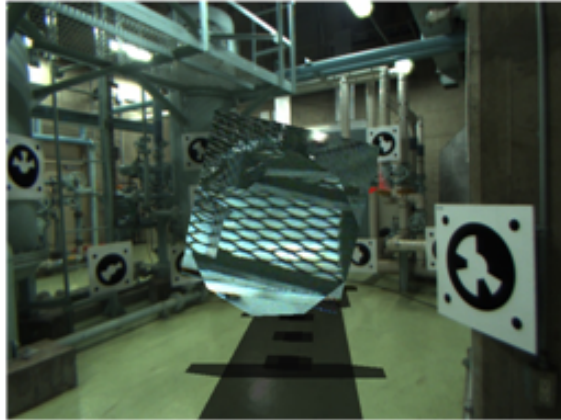


図 5.8: 運搬作業シミュレーションの様子

表 5.2: 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (1/3)

| No | アンケート項目 | 評価者 A | 評価者 B | 評価者 C | 評価者 D |
|----|---|-------|-------|-------|-------|
| 1 | システムの設置は簡単である | 5 | 4 | 5 | 5 |
| 2 | システムの片付けは簡単である | 5 | 4 | 5 | 5 |
| 3 | カメラ画面に重畳表示された解体機器を見ることで仮置作業の様子が直感的に理解しやすい | 5 | 4 | 4 | 5 |
| 4 | カメラ画面に重畳表示された解体機器を見ることで運搬作業の様子が直感的に理解しやすい | 5 | 5 | 4 | 5 |
| 5 | 解体機器と作業環境が接触した際に、解体機器の接触箇所を黄色で示すことにより解体機器の接触箇所を理解しやすい | 4 | 2 | 5 | 4 |
| 6 | 解体機器と作業環境が接触した際に、作業環境の接触箇所を赤色で示すことにより解体機器の接触箇所を理解しやすい | 5 | 4 | 5 | 5 |
| 7 | サイコロマーカを移動させることにより解体機器の位置や方向を変えられることは有効である | 4 | 2 | 4 | 5 |
| 8 | サイコロマーカによる解体機器の平行移動は簡単である | 4 | 2 | 3 | 5 |
| 9 | サイコロマーカによる解体機器の回転移動は簡単である | 2 | 4 | 3 | 5 |
| 10 | タッチペンを用いて解体機器を平行移動できることは有効である | 5 | 4 | 5 | 5 |
| 11 | タッチペンを用いて解体機器を回転移動できることは有効である | 5 | 4 | 5 | 5 |
| 12 | タッチペンを用いた解体機器の平行移動は簡単である | 5 | 4 | 5 | 5 |

表 5.3: 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (2/3)

| No | アンケート項目 | 評価者 A | 評価者 B | 評価者 C | 評価者 D |
|----|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 13 | タッチペンを用いた解体機器の回転移動は簡単である | 3 | 5 | 5 | 3 |
| 14 | タッチペンで細かい作業をしやすい | 5 | 3 | 3 | 4 |
| 15 | 矢印(、 、 、)ボタンによる解体機器の平行移動は有効である | 5 | 3 | 4 | 5 |
| 16 | 矢印(、 、 、)ボタンによる解体機器の平行移動は簡単である | 5 | 4 | 5 | 5 |
| 17 | リセットボタンを押すことにより解体機器が初期位置に戻る機能は有効である | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 18 | 解体機器の位置・方向を記録できる機能は有効である | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 19 | 解体機器の位置・方向を記録する機能は簡単である | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 20 | (19) で記録した結果を視覚的に参照できることは有効である | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 21 | (19) で記録した結果を視覚的に参照できることは簡単である | 5 | 5 | 5 | 4 |
| 22 | 前の記録、次の記録の参照をボタンを押して切り替える機能は有効である | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 23 | 前の記録、次の記録の参照をボタンを押して切り替える機能は簡単である | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 24 | 解体機器の表示を消すことのできる機能は有効である | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 25 | 接触箇所を示す赤色の表示を消して元の色に戻す機能は有効である | 5 | 5 | 5 | 5 |

表 5.4: 作業検証サブシステムに関する質問項目と評価結果 (3/3)

| No | アンケート項目 | 評価者 A | 評価者 B | 評価者 C | 評価者 D |
|----|---|-------|-------|-------|-------|
| 26 | システムのカメラ画面の大きさは適当である | 5 | 5 | 4 | 5 |
| 27 | パソコンのディスプレイ画面の大きさは適当である | 5 | 5 | 4 | 5 |
| 28 | システムの大きさは適当であり、作業現場にも持ち込みやすい | 5 | 4 | 4 | 5 |
| 29 | ボタンの大きさは適当である | 5 | 5 | 3 | 5 |
| 30 | 初めてシステムを使う人でも簡単に試用できる | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 31 | 操作に対する応答は即座に返ってくる | 5 | 4 | 5 | 5 |
| 32 | カメラ視点を移動するためにシステムを見たい方向に向けることは簡単である | 5 | 4 | 4 | 5 |
| 33 | カメラ視点を移動するためにシステムを移動することは簡単である | 4 | 5 | 4 | 5 |
| 34 | 作業環境の現在の形状をその場で測定し、仮置・運搬作業の検証に用いることは有効である | 5 | 4 | 5 | 5 |
| 35 | 作業環境で解体機器のモデルを参照しながら仮置・運搬作業の検証を行うことは有効である | 5 | 4 | 5 | 5 |
| 36 | ストレスを感じることなくシステムを使うことができる | 3 | 3 | 5 | 4 |

表 5.5: 評価者 A のインタビューおよび自由記述による意見

| 識別番号 | インタビューおよび自由記述の意見 |
|------|--|
| A-1 | 解体機器の接触箇所を示す黄色の色が薄く見にくかった |
| A-2 | サイコロマーカの操作に対する指示の出し方が難しく、細かい操作が難しい |
| A-3 | 操作画面と並行な方向の回転がしづらい |
| A-4 | 誤ってボタンを押してしまい形状モデルの位置を元に戻してしまった時のため、操作を一つ戻す機能が欲しい |
| A-5 | サムネイルを用いた記録の参照機能は分かりやすく使いやすい |
| A-6 | カメラとサイコロマーカの両方が静止しているのにモデルが振動するので、その意味が分かりづらい |
| A-7 | 三脚についてのキャスターが床のくぼみにはまる時がある |
| A-8 | 解体機器の形状モデルを半透明にする機能が欲しい |
| A-9 | 大まかな操作をサイコロマーカで行い、その後サイコロマーカを床に置いて平行移動と回転移動を画面操作で行うほうが簡単 |

表 5.6: 評価者 B のインタビューおよび自由記述による意見

| 識別番号 | インタビューおよび自由記述の意見 |
|------|--|
| B-1 | 運搬作業のシミュレーション時は視点移動が少なく、特に見やすい |
| B-2 | 接触が生じた際、解体機器または作業環境どちらかのみで色付けする方がすっきりとして見やすい |
| B-3 | 接触箇所を矢印や図形などを用いて強調できればわかりやすいのではないか |
| B-4 | 作業環境の形状モデルのポリゴンが大きいので、接触箇所の提示が大雑把になる |
| B-5 | サイコロマーカによる回転移動は簡単であるが、画面上で回転操作ができるなら必要ないかもしれない |
| B-6 | スタイラスペンのスライド幅に対する形状モデルの平行移動量が小さい |
| B-7 | 三脚がすこし場所をとる |
| B-8 | サイコロマーカを移動した際に形状モデルの追従が遅い時がある |

表 5.7: 評価者 C のインタビューおよび自由記述による意見

| 識別番号 | インタビューおよび自由記述の意見 |
|------|--|
| C-1 | モデリングサブシステムの操作画面はもう少し大きくしてもいい |
| C-2 | カメラ画像に平行な方向の回転はサイコロマーカじゃないとできない |
| C-3 | サイコロマーカの大きさが大きい |
| C-4 | 解体機器の形状モデルの移動は微調整が難しい |
| C-5 | 慣れていないので、細かい操作がしづらいが、2、3回システムを使えば慣れるので問題ない |
| C-6 | 矢印を1回押して形状モデルが動く量を調整できればよい |
| C-7 | 各種操作ボタンはもっと大きくてもよい |
| C-8 | タブレットPCのディスプレイが光を反射して光るので見づらい |

5.4 結果の考察

5.4.1 モデリングサブシステムに関する評価

表 5.1 に示すモデリングサブシステムに関するアンケート評価結果は全て 4、5 のいずれかの評価であった。ただし、4.4 節で述べた問題 1、3、4 については、本評価では問題にならなかったが第 4 章では問題として抽出されたため、解決する必要があると考えられる。これらの問題は全てレーザレンジファインダの仕様、レーザレンジファインダと PC の通信速度容量の制限、三脚台の仕様に依存するものであり、より軽く通信速度の速いレーザレンジファインダを用いる、台の向きを簡単に換えられる三脚を用いるなどして解決できる。

5.4.2 作業検証サブシステムに関する評価

表 5.2 から表 5.8 の結果について述べる。要求仕様の (A) に対応する質問項目は項目 3、4、24、25、34、35 であり、評価者全員から各項目に対して評価が 4 以上となった。この結果より、拡張現実感を用いて解体機器の形状モデルを重畳表示することにより仮置・運搬作業の様子を直観的に理解しやすく提示でき、実際の作業現場においても有効であることが分かった。また、仮置・運搬作業シミュレーションに、3 次元形状計測を作業現場で行い取得した形状モデルを用いることが有効であることが分かった。ただし、評価者 A からは、4 章で述べた模擬環境における評価時と同様に、解体機器の

表 5.8: 評価者 D のインタビューおよび自由記述による意見

| 識別番号 | インタビューおよび自由記述の意見 |
|------|--|
| D-1 | 解体機器が長尺物の場合、少しのブレの影響が大きい |
| D-2 | サイコロマーカによる移動は直観的でよい |
| D-3 | スタイラスペンによる回転移動はむずかしい |
| D-4 | モデルの位置と方向のみを記録しており、それを再び参照する、という概念が最初分からなかった |
| D-5 | 慣れれば操作は簡単だが、PC 初心者はどうか分からない |
| D-6 | トラッキングを行うために生じるカメラとサイコロマーカの距離の制約がどの程度なのか分かりにくかった |
| D-7 | 記録した静止画もシステム使用中に再参照できればよい |
| D-8 | 作業初心者の事前教育に使用できるかもしれない |
| D-9 | 実際に解体作業を行う作業員の姿まで重畳表示で再現できれば非常に有効 |
| D-10 | 運ぶ機器と周囲の環境の間の距離が分かれば有効である |
| D-11 | 解体機器を運ぶ際に用いるクレーンなどの運搬機器が重畳表示できればよい |
| D-12 | 機器をどこで回転するか、そのためどこに人を配置するかなど作業全体の様子も確認できるとよい |

形状モデルを半透明に表示する機能があると有効であるという意見 (A-8) が得られた。解体機器の形状モデルを半透明で表示することは、モデルの表示・非表示をボタンクリックで切り替えることなく、常に作業状況全体と解体機器の形状モデルの位置を確認できるメリットがある。しかし、その半面、解体機器の形状モデルの立体感が失われ、解体機器の形状が把握しづらくなる可能性がある。

次に、要求仕様の (B) に対応する質問項目 7 から 13、および 15 から 17 について述べる。これらの質問項目に対する評価の平均値は 4 を超えたが、サイコロマーカによる解体機器の形状モデルの移動について、質問項目 9 について評価者 A より 2、質問項目 7、8 について評価者 B より 2 の評価結果を得た。その理由として、細かい操作を行う際には、サイコロマーカの操作に対する指示の出し方が難しいこと (A-2) やスタイラスペンによる操作では形状モデルを回転させにくい方向があること (A-3)、作業検証サブシステムの画面上でも回転操作が行えること (B-5)、スタイラスペンを用いた平行移動の感度がよくないこと (B-6)、サイコロマーカの移動に対して形状モデルの追従が遅い場合があること (B-8) などが挙げられた。また、サイコロマーカの大きさが大きすぎるといった意見 (C-3) もあった。一方で、サイコロマーカを用いた操作は簡単、あるいは直観的であり操作しやすいという意見もある (B-5、D-2)。また、作業検証サブシステムの画面上でスタイラスペンを用いて回転しづらい場合があるという意見 (D-3) もある。以上より、オブジェクトを用いた解体機器の形状モデルの操作機能は必要であるが、オブジェクトの大きさを小さくする必要や、出しやすいオブジェクトの操作指示方法を検討する必要があることが分かった。

次に、要求仕様の (C) に対応する質問項目 5、6 について述べる。これらの項目についての評価値はほぼ全員の評価者が 4 以上であり、解体機器および作業環境の形状モデルの接触箇所を着色することにより、接触が生じた箇所を把握しやすいことが分かった。しかし、評価者 B による質問項目 (6) の評価については 2 となった。その理由としては意見 (B-2) にあるように、解体機器および作業環境の両方に着色することでカメラ画面の映像が煩雑になることが指摘された。これは、着色を行う対象を解体機器の形状モデルのみ、作業環境の形状モデルのみ、または両方の形状モデルに切り替える機能を実装することで解決できると考えられる。

次に、要求仕様 (D) に対応する質問項目 18 から 23 について述べる。これらの項目に対する評価はほぼ全て 5 となった。これにより、作業状況の記録および参照は簡単にでき、有用であることが分かった。特に記録の参照機能については、4.4 節で述べたインタフェースの改善およびカメラ画像を保存する機能の実装により、評価者 B の質

問項目 20、21、22 の評価が 2、3、4 から全て 5 に上昇している。一方で、解体機器の形状モデルの位置方向を記録し、後に再び参照する、という作業の概念がわかりづらいという意見 (D-4) があった。これは、カメラ撮影のように、映像を静止画として保存する機能が記録機能であるという概念が評価者 D は強かったためだと考えられる。したがって、TPCOSS を使用する前に、記録機能が静止画保存機能のみではなく、画面に映る解体機器の形状モデルの位置と方向を記録する機能を備えていることを詳しく事前説明をすることで解決できると考えられる。

次に、要求仕様 (F) および (G) に対応する質問項目 1、2、14、および 26 から 33 について述べる。これらの質問項目に対する評価の平均値は 4 を超えた。この結果より、システムは作業現場への持ち運びが可能であり、操作は簡単で使いやすいことが分かった。ただし、PC を使った経験の無いユーザが TPCOSS を使用する場合には注意が必要であるという意見 (D-5) があった。これは数回 TPCOSS を使用してもらうことで慣れにより克服できると考えられる。また、作業検証サブシステムに使用したタブレット PC のディスプレイが光を反射しやすく見づらいという意見 (C-8) があった。これは非光沢パネルディスプレイを備えたタブレット PC を用いることで改善されることが考えられる。

その他、TPCOSS の改善した点以外の部分では、評価者 A および評価者 B の評価に大きな変化はなかった。また、今後の課題として、評価者 D の意見 (D-9) から意見 (D-12) にあるように、解体機器と作業環境の間の距離が画面に重畳表示される機能や、運搬に用いる機器および解体に携わる作業員の姿が重畳表示する機能などがあれば今後さらに TPCOSS の有用性が高くなることが分かった。また、TPCOSS を解体作業初心者にも使用してもらい、仮置・運搬作業シミュレーションを体験してもらうことにより解体作業に関する事前教育へ適用できる可能性があることが分かった。

5.5 まとめと今後の課題

本評価により、拡張現実感を用いて、解体機器の形状モデルを重畳表示し仮置・運搬作業シミュレーションを行うことが有効であることが分かった。また、仮置・運搬作業シミュレーションに用いる形状モデルとして、実際の解体作業現場を測定することにより得た形状モデルを用いることが有効であることが分かった。

また、4.4 節で述べたことも含めて、本研究において改良を加えることができなかった問題点と今後の課題を以下にまとめる。問題点は主にハードウェア、情報提示手法、

形状モデルの移動方法およびその他の問題に分類できる。

ハードウェアに関する問題 (モデリングサブシステム)

- 問題 1: 3次元計測にかかる時間が長い

計測時間はより高速に計測を行えるレーザレンジファインダを用いる、振動することなく安定して高速で台を旋回できる電動雲台を用いるなどして解決することができる。しかし高性能のレーザレンジファインダは大変高価なため、作業シミュレーションの精度の向上により得られる安全・作業効率面での成果と、レーザレンジファインダの購入コストのバランスを考えることが必要である。

- 問題 3: レーザレンジファインダが少し重いので取り付けがしづらい

より軽量のレーザレンジファインダを用いることにより解決できると考えられる。また、レーザレンジファインダと三脚などの固定台を一体化させるなど、組み立ての工数を減らすことでも対応できると考えられる。

(作業検証サブシステム)

- 問題 4: 取っ手のネジを締めたり緩めたりして台の操作をするのは面倒

油圧雲台付き三脚を使用することにより解決できると考えられる。また、台の向きを操作するのはカメラ方向を変えるためであるので、カメラのみ頭部装着タイプやハンドヘルドタイプにして用いる使用方法も考えられる。今後、様々なカメラタイプのシステムを現場作業員に試用してもらうなどして、システムのインターフェースを検討する必要がある。

情報提示手法に関する問題

- 問題 7: モデルの裏側が見えない

この問題はシステム使用者が解体機器の形状モデルの表示・非表示機能を有効に使えるよう、同機能について詳細な事前説明を行う、または半透明かつ立体感を失わず明確に機器の形が認識できる形状モデルを用いることで解決できると考えられる。

- 問題 12: 接触の起きた箇所を矢印や絵を用いて強調するとよい

接触箇所の提示には、さまざまな強調効果による提示手法がある。したがって、各手法を比較することにより、画面が煩雑になることを避け、システムの利用者が接触箇所を容易に理解できる強調効果を検討していく必要がある。

- 問題 16: 過去の接触箇所と現在の接触箇所が区別して表示されるとよい

過去に接触の起こった箇所と現在接触が起きている箇所の接触を区別する方法の一つとして、互いに異なった色を用いて着色する方法がある。しかし、異なる色を多用することは、画面を煩雑にしまい、かえってシステム利用者の接触箇所の把握を妨げてしまう可能性がある。そのため、新たにボタンを設け、過去に起こった接触の箇所、現在起きている接触の箇所、過去と現在すべての接触の箇所のように表示を切り替える機能を実装するなどして解決する必要があると考えられる。

形状モデルの移動手法に関する問題

- 問題 8: 矢印ボタンが分かりにくい

各矢印ボタンにより、解体機器の形状モデルがどちらに動くのか、事前に詳細な説明をすることにより解決できると考えられる。

- 問題 9: スタイラスペンによる回転操作が難しい

スタイラスペンの移動方向と解体機器の形状モデルの回転方向の対応を事前に詳細に説明することで解決できると考えられる。

- 問題 13: サイコロマーカを用いた細かい指示が難しい

事前にサイコロマーカの操作指示方法を取り決めておくことで解決できると考えられる。

その他の問題

- 問題 15: 解体物を保存するドラム缶やメッシュボックスが表示されるとよい

解体作業により生じる放射性廃棄物などを効率的に一時保管するための機能として、今後別システムとして開発することを検討する。

第 6 章 結論

本研究では、原子力発電プラントの安全で効率的な廃止措置を行うために、3次元形状計測技術および拡張現実感を利用した仮置・運搬作業シミュレーションシステムを開発した。解体作業現場において3次元形状計測し取得した形状モデルを、拡張現実感を用いて作業現場に重畳表示することにより、仮置・運搬作業のシミュレーションを直観的に実施することができる。また、開発したシステムの有用性および受容性を評価するため、まず模擬環境における評価実験によりシステムの動作確認および現場での使用に向けた改良点の確認を行った。その後実際に解体中の原子力発電プラント内において改良した評価用システムを解体作業に携わる職員およびヒューマンインタフェースの専門家に試用してもらい評価した。

第2章では、研究の背景として、ふげん発電所における解体作業、特に仮置・運搬作業の現状および課題点を述べ、次に課題を解決するために有効に適用できると考えられる技術について述べた。また、本研究の目的が、仮置・運搬作業シミュレーションシステムの開発・および評価であることを述べた。

第3章では、仮置・運搬作業シミュレーションシステムの設計について述べた。具体的には、仮置・運搬作業シミュレーションシステムの概要を説明した後、システムに必要な要求仕様および機能構成を述べた。その後、設計をもとに開発したシステムについて述べた。

第4章では、第3章で設計・開発したシステムの動作確認を実施するとともに、予備的に有用性と受容性を評価し、実際の解体現場で使用するにあたり必要なシステムの改良点を発見することを目的として模擬環境における評価を実施した。また、評価により得られた結果をもとに、改良が必要と考えられる部分についてシステムの改良を行った。

第5章では、第4章で改良された仮置・運搬作業シミュレーションシステムを用いて、実際の解体作業現場であるふげん発電所において評価を行った。評価の結果により、レーザレンジファインダにより計測した作業環境および解体機器の形状モデルを用いて、拡張現実感による現場での仮置・運搬作業のシミュレーションを行うことが直観的に分かりやすく有効であることが分かった。また、本研究で開発した仮置・運搬作業シミュレーションシステムは、解体作業初心者への事前教育にも適用できる可

能性があることが分かった。

原子力発電プラントへの新しい解体支援システムの導入のためには、システムの利便性のみならず高い安全性が要求される。また、今後運転を終了する原子力発電プラントは益々増え、有効な解体作業支援システムの重要性が高まっていくと考えられる。本研究で開発したシステムをふげんのみならず、新たに解体期を迎える原子力プラントの解体において有効なシステムとするためには、拡張現実感を使用するための事前準備の自動化やトラッキングの安定性の更なる向上など、安全性と労力コストの削減を達成するが重要である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、研究の方針や進め方について非常に適切な助言をあたえてくださっただけでなく、可愛らしいジョークでいつも研究室の雰囲気を楽しいものにしてくださった下田宏准教授に心より感謝いたします。

システムの構築に始まり、度重なる神戸大学・ふげんへの引率、ノルウェーでの保護者役、論文の執筆指導、最新技術動向のお話、その他とにかくここに書き記せないほど数多くの御支援を頂いた石井裕剛助教に心より感謝いたします。

部品購入、書籍取り寄せその他一切の事務処理をしていただき、また、研究室で快適な生活を送るために本当に多くの仕事をしてくださった若林友美さん、山下恵未依さんに心より感謝いたします。

研究の進め方や、物事の考え方に関する様々な知見をいただきました博士後期課程の青柳西藏さん、宮城和音さんに心より感謝いたします。評価の準備を度々手伝っていただいた博士後期課程の顔偉達さんに心より感謝いたします。

同じ修士2回生として、共に歩を進め苦楽を共有して過ごしてくださった金宏哲君、趙躍さんに心より感謝いたします。

また、自宅に多数の似たようなコレクションを所有しているにも関わらず、私のノルウェー土産を涙と鼻水を垂らしながら喜んでくれた修士2回生の岡村智明君に心より感謝いたします。

非常に柔軟な発想で予想外のテーマを次々と提案し、刺激的な知見と笑いを与えてくれた修士2回生の大谷充宏君に心より感謝いたします。

次々と降ってくる雑用に追われ本当に忙しい中、論文校正にご協力いただいた修士1回生の伊藤達理君、小野義人君に心より感謝いたします。

私の作業用PCのディスプレイをあの手この手で斬新なものに更新してくれた修士1回生の北村尊義君、藤原央樹君に心より感謝(?)いたします。

また、2年間の研究生生活を支えて下さった修士1回生の満智遠君、いつもおいしい反応を返してくれるリアクション芸人氣質の河野翔君、学部4回生の松田宅司君に心より感謝いたします。

最後に、陰で私を常に支え、学生生活を応援してくれた両親に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構・ふげん発電所ホームページ, <http://www.jaea.go.jp/04/fugen/index.html> (2010年1月31日現在)
- [2] 未来を拓く原子力 - 原子力機構の研究開発成果 http://jolisfukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/mirai/2006/9_3.html (2010年1月31日現在)
- [3] Ronald Azuma: A Survey of Augmented Reality, Presence, Vol.6, No.4, pp.355-385 (1997)
- [4] Ronald Azuma, Yohan Baillet, Reinhold Behringer, Steven Feiner, Simon Julier, Blair MacIntyre: Recent Advances in Augmented Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, 21, 6(Nov/Dec(2001)), pp.34-47 (2001)
- [5] P. Milgram, F. Kishino: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, IEICE Transactions of Information System E77-D, 12, pp.1321-1329 (1998)
- [6] T. P. Caudell: Augmented reality: an application of heads-updisplay technology to manual manufacturing processes, System Sciences, Proc. 25th Hawaii Int. Conference, Vol. 2, pp.7-10 (1992)
- [7] 松岡和宏 : 拡張現実感技術を利用した住宅景観シミュレーションシステムの開発, 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 (2008)
- [8] 中井俊憲 : 拡張現実感技術を利用した原子力プラントの解体支援手法の提案と評価, 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 (2006)
- [9] SICK 株式会社ホームページ <http://www.sick.jp/product/automatic/laser/indoor/LMS100/>(2010年1月31日現在)
- [10] D. Miyazaki, T. Ooishi, T. Nishikawa, R. Sagawa, K.Nishino, T. Tomomatsu, Y. Takase, and K. Ikeuchi : The Great Buddha Project: Modelling Cultural Heriagethrough Observation, Proceedings of the 6th International Conference on Virtual Systems and Multimedia(VSMM 2000), pp. 138-145 (2000).

- [11] 大石岳史, 増田智仁, 倉爪亮, 池内克史: 創建期奈良大仏及び大仏殿のデジタル復元
日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10 No. 3, pp. 429-436 (2005)
- [12] P. J. Besl and N. D. McKay: A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE
Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256
(1992)
- [13] Toshikazu Karitsuka and Kosuke Sato: A Wearable Mixed Reality with an On-
board Projector, International Symposium on Mixed and Augmented Reality
2003, pp.321-322(2003)
- [14] 佐藤清秀, 田村秀行: 複合現実感における位置合わせ手法, 画像の認識・理解シン
ポジウム (MIRU 2002) 論文集 I, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, Vol.2002,
No.11, pp.I.61-I.68 (2002)
- [15] Bolan Jiang, Ulrich Neumann: Extendible Tracking by Line Auto-Calibration,
Proc. IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, pp.97-103
(2001)
- [16] Bruce Thomas, Victor Demczuk, Wayne Piekarski, David Hepworth, Bernard Gun-
ther: A Wearable Computer System with Augmented Reality to Support Terres-
trial Navigation, 2ND. International Symposium on Wearable Computers, pp.166-
167 (1998)
- [17] Joseph Newman, David Ingram, Andy Hopper: Augmented reality in a wide area
sentient environment, Proc. IEEE and ACM International Symposium on Aug-
mented Reality, pp.77-86 (2001)
- [18] Hirokazu Kato, Mark Billinghurst: Marker Tracking and HMD Calibration for a
Video-based Augmented Reality Conferencing System, Proc. of 2nd Int. Workshop
on Augmented Reality, pp.85-94 (1999)
- [19] H.Ishii et al.: Development of Wide Area Tracking System for Augmented Real-
ity, the 12th International Conference on Human-Computer Interaction, Vol.14,
pp.234-243 (2007)

- [20] 楊首峰: 拡張現実感用画像マーカの3次元位置自動計測システムの開発と評価, 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 (2007)
- [21] The Visualization Tool Kit ホームページ <http://www.vtk.org/> (2010年1月31日現在)
- [22] Bullet Physics Library ホームページ <http://code.google.com/p/bullet/> (2010年1月31日現在)
- [23] 黒須正明, 伊東昌子, 時津倫子: ユーザ工学入門, pp.194-199, 共立出版 (1999)

付録 A 事前説明資料

以下に評価の際に用いた事前説明資料を示す。

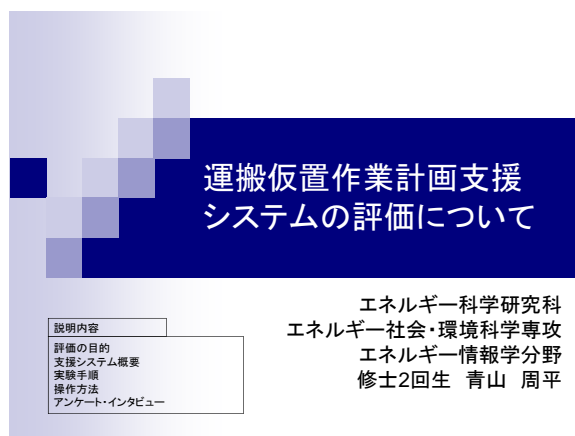


図 A.1: 事前説明資料 (1/10)

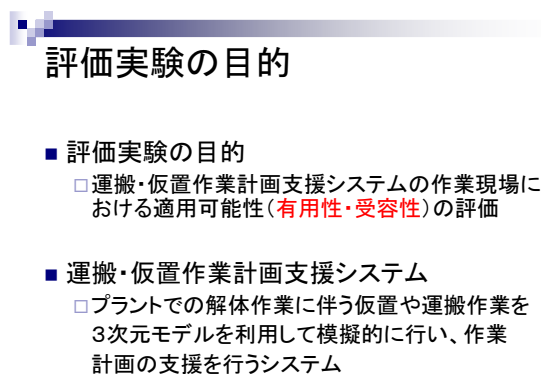


図 A.2: 事前説明資料 (2/10)

運搬・仮置作業計画支援システムの概要

- システムの構成
 - スキャンパートと作業検証パートの2部分構成
- スキャンパート
 - 作業検証パートで用いる3次元モデル作成のための計測を行う
- 作業検証パート
 - スキャンパートで得たモデルを用いて仮置・運搬作業の模擬を行う

図 A.3: 事前説明資料 (3/10)

実験手順

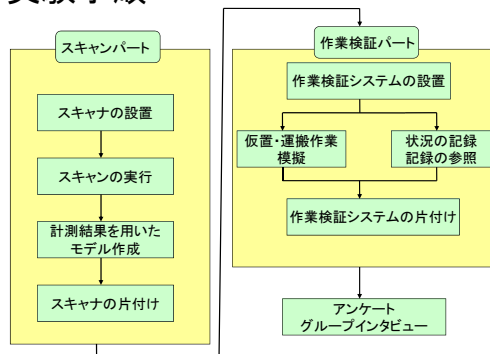


図 A.4: 事前説明資料 (4/10)

スキャンパート

- システムの設置
 - 指示に従って、システムを組み立てる。
- スキャンの実行
 - 操作画面で「計測開始」のボタンを押す。
- ファイル出力・システムの片付け
 - 計測結果をファイルに出力した
 - システムを元のバラバラの状態にする。



図 A.5: 事前説明資料 (5/10)

スキャンパート



図 A.6: 事前説明資料 (6/10)

作業検証パート

- システムの設置
 - 指示に従って、システムを組み立てる。
- 仮置・運搬作業の模擬
 - 詳しくは次スライド。
- システムの片付け
 - システムを元のバラバラの状態にする。
 - (模擬中に行った記録はファイル出力可能)



図 A.7: 事前説明資料 (7/10)

仮置・運搬作業の模擬

- 仮置・運搬作業の対象となる解体機器のモデルはサイコロマーカの位置に表示される
- モデルはサイコロマーカの動きに連動して動く
- 細かいモデルの回転・平行移動をペンやボタンを用いて調整することができる
- モデルが作業環境に接触した場合、それぞれ接触箇所が赤色に着色される。(リセットしない限り色は残る)

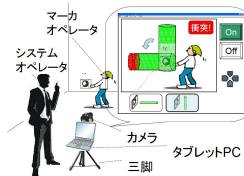


図 A.8: 事前説明資料 (8/10)

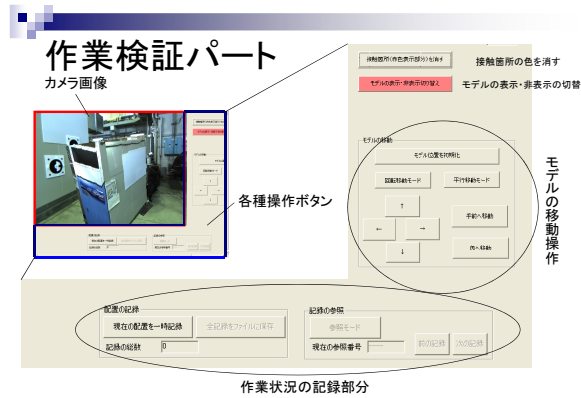


図 A.9: 事前説明資料 (9/10)

アンケート・インタビュー

- 評価実験後、アンケートに答えていただきます。
- その後、システムの評価についてグループインタビューを行います。

図 A.10: 事前説明資料 (10/10)

付録 B アンケート用紙

以下に評価の際に用いたアンケート用紙を示す。

アンケート用紙 (スキャンパート)

以下の項目について、次の五段階評価に最も近い数字に○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

また、それぞれの項目について評価の理由やお気づきの点などがあれば余白にお書きください。

- | | そう思わない | | | | そう思う |
|---|--------|---|---|---|------|
| (1) システムの設置は簡単である | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (2) システムの片付けは簡単である | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (3) 文字の大きさは適当である | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (4) ボタンの大きさは適当である | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (5) パソコンのディスプレイ画面の大きさは充分である | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (6) 初めてシステムを使う人でも簡単に使用できる | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (7) 1回の計測にかかる時間は適当である | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| (8) ストレスを感じることなくシステムを使うことができる (特にストレスを感じる点がございましたら、下の自由記述欄にその点をお書きください) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

他によかった点、改良すべき点、気づいたことがあれば自由にお書きください。

評価者(氏名: _____)

図 B.1: モデリングサブシステムアンケート用紙

アンケート用紙（作業検証パート）

以下の項目について、次の五段階評価に最も近い数字に○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

また、それぞれの項目について評価の理由やお気づきの点などがあれば余白にお書きください。

- | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| (1) システムの設置は簡単である | ● | ● | ● | ● | ● |
| (2) システムの片付けは簡単である | ● | ● | ● | ● | ● |
| (3) カメラ画面に重畳表示された解体機器を見ることで <u>仮置</u> 作業の様子が直感的に理解しやすい | ● | ● | ● | ● | ● |
| (4) カメラ画面に重畳表示された解体機器を見ることで <u>運搬</u> 作業の様子が直感的に理解しやすい | ● | ● | ● | ● | ● |
| (5) 解体機器と作業環境が接触した際に、 <u>解体機器</u> の接触箇所を赤色で示すことにより <u>解体機器</u> の接触箇所を理解しやすい | ● | ● | ● | ● | ● |
| (6) 解体機器と作業環境が接触した際に、 <u>作業環境</u> の接触箇所を赤色で示すことにより <u>解体機器</u> の接触箇所を理解しやすい | ● | ● | ● | ● | ● |
| (7) サイコロマーカを移動させることにより解体機器の位置や方向を変えられることは有効である | ● | ● | ● | ● | ● |
| (8) サイコロマーカによる解体機器の <u>平行</u> 移動は簡単である | ● | ● | ● | ● | ● |
| (9) サイコロマーカによる解体機器の <u>回転</u> 移動は簡単である | ● | ● | ● | ● | ● |
| (10) タッチペンをを用いて解体機器を <u>平行</u> 移動できることは有効である | ● | ● | ● | ● | ● |

図 B.2: 作業検証サブシステムアンケート用紙 (1/4)

- | | |
|---|----------------------------------|
| (11) タッチペンを用いて解体機器を <u>回転</u> 移動できることは有効である | そう思わない 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (12) タッチペンを用いた解体機器の <u>平行</u> 移動は簡単である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (13) タッチペンを用いた解体機器の <u>回転</u> 移動は簡単である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (14) タッチペンで細かい操作をしやすい | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (15) 矢印 (→、←、↑、↓) ボタンによる解体機器の平行移動は <u>有効</u> である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (16) 矢印 (→、←、↑、↓) ボタンによる解体機器の平行移動は <u>簡単</u> である。 | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (17) リセットボタンを押すことにより解体機器が初期位置に戻る機能は有効である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (18) 解体機器の位置・方向を <u>記録</u> できる機能は有効である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (19) 解体機器の位置・方向を <u>記録</u> する操作は <u>簡単</u> である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (20) (19)で記録した結果を視覚的に参照できることは <u>有効</u> である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (21) (19)で記録した結果を視覚的に参照することは <u>簡単</u> である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (22) 前の記録、次の記録の参照をボタンを押して切り替える機能は有効である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (23) 前の記録、次の記録の参照をボタンを押して切り替えることは簡単である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (24) 解体機器の表示を消すことのできる機能は有効である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |
| (25) 接触箇所を示す赤色の表示を消して元の色に戻す機能は有効である | 1 2 3 4 5 ●—●—●—●—● |

図 B.3: 作業検証サブシステムアンケート用紙 (2/4)

| | |
|---|------------------------|
| (26) システムのカメラ画面の大きさは適当である | 1 2 3 4 5 ● ● ● ● ● |
| (27) パソコンのディスプレイ画面の大きさは適当である | 1 2 3 4 5 ● ● ● ● ● |
| (28) システムの大きさは適当であり、作業現場にも持ち込みやすい | 1 2 3 4 5 ● ● ● ● ● |
| (29) ボタンの大きさは適当である | 1 2 3 4 5 ● ● ● ● ● |
| (30) 初めてシステムを使う人でも簡単に使用できる | 1 2 3 4 5 ● ● ● ● ● |
| (31) 操作に対する応答は即座に返ってくる | 1 2 3 4 5 ● ● ● ● ● |
| (32) カメラ視点を移動するためにシステムを見たい方向に向けることは簡単である | 1 2 3 4 5 ● ● ● ● ● |
| (33) カメラ視点を移動するためにシステムを移動することは簡単である | 1 2 3 4 5 ● ● ● ● ● |
| (34) 作業環境の現在の形状をその場で測定し、仮置・運搬作業の検証に用いることは有効である | 1 2 3 4 5 ● ● ● ● ● |
| (35) 作業環境で解体機器のモデルを参照しながら仮置・運搬作業の検証を行うことは有効である | 1 2 3 4 5 ● ● ● ● ● |
| (36) ストレスを感じることなくシステムを使うことができる（特にストレスを感じる点がございましたら、下の自由記述欄にその点をお書きください） | 1 2 3 4 5 ● ● ● ● ● |

図 B.4: 作業検証サブシステムアンケート用紙 (3/4)

他によかった点、改良すべき点、気づいたことがあれば自由にお書きください。



評価者(氏名: _____)

図 B.5: 作業検証サブシステムアンケート用紙 (4/4)