

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

題目： 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

指導教員： 下田 宏 准教授

氏名： 楊 首峰

提出年月日： 平成20年2月12日(火)

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 拡張現実感技術によるふげん発電所解体作業支援	3
2.1.1 ふげん発電所における解体作業の現状と課題	3
2.1.2 拡張現実感技術による作業支援	4
2.1.3 既存の代表的なトラッキング手法	10
2.1.4 原子力発電プラントで使用するトラッキング手法の要求仕様	12
2.2 研究の目的	14
第 3 章 マーカ自動計測システム (MAMS) の設計	16
3.1 MAMS の要求仕様	16
3.2 MAMS の概略設計	18
3.2.1 MAMS を用いたマーカ位置計測手法	18
3.2.2 MAMS の機能構成	19
3.2.3 MAMS の画面インタフェース設計	22
3.3 MAMS の各種機能を実現するアルゴリズム	22
3.3.1 座標系の定義	24
3.3.2 マーカ認識アルゴリズム	24
3.3.3 カメラを用いてマーカの位置を計測するアルゴリズム	25
3.3.4 レーザ距離計測器を用いてマーカの位置を計測するアルゴリズム	27
3.3.5 マーカの位置を世界座標系に変換するアルゴリズム	28
3.3.6 1 つのマーカの位置を自動的に計測するアルゴリズム	29
3.3.7 全てのマーカの位置を自動的に計測するアルゴリズム	32
第 4 章 開発した MAMS の構成と使用方法	39
4.1 ハードウェア構成	39
4.2 ソフトウェア構成	43

4.2.1	カメラ画像表示インタフェース	43
4.2.2	マーカ位置自動計測インタフェース	43
4.2.3	カメラ制御インタフェース	46
4.2.4	レーザ距離計測器制御インタフェース	46
4.2.5	マーカ計測状態表示インタフェース	47
4.2.6	手動マーカ位置計測インタフェース	49
4.2.7	システム動作記録	50
4.2.8	その他のインタフェース	50
4.3	MAMSを用いてマーカの3次元位置を計測する方法	50
4.3.1	環境に貼り付けられた全てのマーカを自動的に計測する方法	51
4.3.2	限定された範囲に貼り付けられたマーカを自動的に計測する方法	51
4.3.3	個々のマーカを半自動的に計測する方法	51
第5章	実験室環境におけるMAMSの評価実験	57
5.1	実験の目的	57
5.2	実験方法	57
5.2.1	実験環境	57
5.2.2	実験手順	58
5.2.3	評価指標	60
5.3	実験結果	63
5.3.1	照度の計測結果	63
5.3.2	計測精度	63
5.3.3	計測の安定性	65
5.3.4	計測時間	65
5.4	結果の考察	67
5.4.1	計測精度に関する考察	67
5.4.2	安定性に関する考察	67
5.4.3	計測時間に関する考察	67
第6章	ふげん発電所における有用性評価	69
6.1	評価の目的	69
6.2	評価方法	69
6.2.1	評価環境	69

6.2.2	評価手順	69
6.2.3	評価者	72
6.2.4	評価項目	74
6.3	評価の結果	74
6.4	評価結果に対する考察	74
6.4.1	機能に関する考察	78
6.4.2	ユーザビリティに関する考察	79
6.4.3	MAMSの改良点に関する考察	79
第7章 結論		90
謝辞		92
参考文献		93
付録 A	円形マーカ	付録 A-1
A.1	円形マーカのデザイン	付録 A-1
A.2	円形マーカを用いたトラッキング	付録 A-1
付録 B	アンケート用紙	付録 B-1

目 次

2.1	解体作業の流れ(左)及び想定されるヒューマンエラー(右)	4
2.2	拡張現実感技術の例	5
2.3	対象物の直感的理解	5
2.4	情報内容の容易な理解	6
2.5	自動車メンテナンス支援システム ^[5]	7
2.6	制御ボックス保守支援システム ^[6]	7
2.7	拡張現実感技術を用いた仮想家具の取り付け ^[7]	8
2.8	拡張現実感技術による放射線量可視化	8
2.9	切断箇所と解体禁止箇所を確認する様子	9
2.10	解体した箇所を記録する様子	9
2.11	ARToolKit で使用されるマーカ	11
2.12	ラインコードマーカ	12
2.13	円形マーカ	12
3.1	マーカ自動計測システムの基本構成	19
3.2	マーカ自動計測システムを使用する際の作業手順	20
3.3	マーカ自動計測システムのインタフェース画面の概念図	23
3.4	本研究で使用する座標系	25
3.5	実世界のマーカとカメラ画像上のマーカの関係	27
3.6	マーカを認識するフロー	33
3.7	カメラ座標系でマーカの位置を求めるフロー	34
3.8	マーカの3次元位置を計測するフロー	35
3.9	電動雲台座標系から世界座標系までの変換フロー	36
3.10	単一マーカの3次元位置の自動計測フロー	37
3.11	撮影可能な全ての円形マーカの3次元位置を自動計測フロー	38
4.1	開発したマーカ自動計測システムの外観	39
4.2	レーザ距離計測器の外観	40

4.3	ビデオカメラの外観	40
4.4	MAMS のハードウェア構成	40
4.5	MAMS インタフェース画面例	44
4.6	全自動で計測する場合の手順	55
4.7	手作業でマーカを一つだけ計測する場合の手順	56
5.1	実験環境の見取り図	59
5.2	マーカパネル No.1 の外観	60
5.3	マーカパネル No.2 の外観	60
5.4	パネル上のマーカの配置	61
5.5	実験手順	62
5.6	系統誤差 (マーカパネル No.1)	63
5.7	系統誤差 (マーカパネル No.2)	64
5.8	偶然誤差 (マーカパネル No.1)	65
5.9	偶然誤差 (マーカパネル No.2)	66
6.1	評価に用いた純水装置室	70
6.2	純水装置室における実験環境	71
6.3	純水装置室におけるマーカの貼付例	72
6.4	評価中の様子	73
6.5	計測で得られた結果を用いた拡張現実感	73
A.1	円形マーカのデザイン	付録 A-1
A.2	マーカの正規化	付録 A-3
B.1	アンケート用紙 A(その 1)	付録 B-2
B.2	アンケート用紙 A(その 2)	付録 B-3
B.3	アンケート用紙 A(その 3)	付録 B-4
B.4	アンケート用紙 B	付録 B-5
B.5	アンケート用紙 C	付録 B-6
B.6	アンケート用紙 D	付録 B-7

表 目 次

2.1	原子力発電所の現場で使用するトラッキング技術の要求仕様	10
4.1	実験用システムで使用したハードウェアの一覧	41
4.2	レーザ距離計測器及び電動雲台の主な仕様	41
4.3	ビデオカメラの主な仕様	41
4.4	制御用パソコンの仕様と USB ビデオキャプチャの仕様	42
4.5	使用した各ハードウェアの数量と単価	42
4.6	MAMS のインタフェース画面の各部名称と機能の概要①	53
4.7	MAMS のインタフェース画面の各部名称と機能の概要②	54
5.1	実験環境の照度 (単位 : lux)	63
6.1	機能に関するアンケート評価項目と要求仕様・機能構成との対応①	75
6.2	機能に関するアンケート評価項目と要求仕様・機能構成との対応②	76
6.3	ユーザビリティに関するアンケート評価項目と要求仕様・機能構成との 対応	77
6.4	機能に関する評価結果①	81
6.5	機能に関する評価結果②	82
6.6	機能に関する評価結果③	83
6.7	機能に関する評価結果④	84
6.8	機能に関する評価結果⑤	85
6.9	機能に関する評価結果⑥	86
6.10	ユーザビリティに関する評価結果①	87
6.11	ユーザビリティに関する評価結果②	88
6.12	評価者のアドバイス	89

第 1 章 序論

日本は、世界第4位のエネルギー消費国である。資源に乏しく、エネルギーの大半を輸入に頼っており、自給率は20%程度でしかない。石油危機を契機に脱石油を図り、原子力開発と電源の多様化に取り組んできた。現在、炭酸ガス削減とエネルギー・セキュリティの向上に向け、原子力発電の一層の開発が課題になっている。原子力発電所では、運転を開始した後、日常的にこれらの機器の点検・保守を行う必要がある。また、法律に基づいて13ヶ月に1回原子炉を止めて、点検と保守を行っている。しかし、原子力発電プラントは、環境が複雑であり、機器が非常に多く、綿密かつ膨大な点検や検査を行う必要があるため、多くの労力が必要である。また、どのように作業員の安全を保障するかが問題となる。そのため、作業量を低減し、被曝を低減し、安全性を向上させる新しい技術が必要とされている。

原子力発電プラントでの保守作業と解体作業の効率化やコスト低減が求められる中で、信頼性や安全性を向上させるには、プラントを運転・保守・解体する人間とプラントの間に存在するヒューマンマシンシステム (Human Machine System;HMS) の高度化が必要である。

近年注目を集めている新しいヒューマンインタフェース技術として、拡張現実感 (AR: Augmented Reality) 技術がある。ARは現実世界に仮想世界を重畳表示する技術であり、ユーザに直観的な情報提示を行うことができる技術である。この技術を原子力発電プラントにおける保守作業の支援に適用することにより、作業の効率化とヒューマンエラーの低減が実現できると期待される。

ARを原子力発電プラントで利用するためには、作業員の位置と向いている方向を正確かつリアルタイムで計測するトラッキング技術を利用可能にする必要がある。これまでにARで用いるための多種多様なトラッキング手法が開発され、それらを用いた様々なアプリケーションが開発されてきた。拡張現実感で使用可能なトラッキング手法としては、GPS法、超音波センサ法、磁気センサ法、慣性センサ法、画像マーカ法、自然特徴点法等が提案されている。これらの手法の中で、画像マーカを用いた手法は、屋内で使用できる、金属や磁界の影響を受けにくい、コストが比較的安く、使用するマーカの数を増やすことにより、トラッキング範囲を広くできる、拡張性が高い、精度も高いという利点があるため、原子力発電プラント内部での使用に適していると考え

られる。しかし、画像マーカを用いたトラッキングはカメラに十分な数のマーカが写っている時にしか使用できないため、広い原子力発電プラント内部で使用するためには、膨大な数のマーカを事前に貼り付け、その3次元位置を計測する必要がある。従って、今後の実用化を考えた場合、現在使われているマーカの3次元位置を一つ一つ手作業で計測する方法では、その労力の多さが問題となる。そこで、本研究では、環境に貼り付けたマーカの3次元位置を自動的に計測するシステムを開発し、その各種性能と有用性を評価することを目的とする。このような自動計測システムが原子力発電プラント内で使用できるようになれば、ARを用いた作業支援システムが実用化に大きく近づくと期待される。

本論文は、第1章の序論を含め、7章で構成されている。第2章では、ふげん発電所における解体作業の現状と課題について述べ、次いで拡張現実感技術を用いて作業を支援する際の課題について説明し、本研究の目的を述べる。第3章では、本研究で提案するマーカ自動計測手法、マーカ自動計測システムの要求仕様及び機能構成について説明する。第4章では、本研究で開発したマーカ自動計測システムの概要を説明する。第5章では、実験室環境において実施したマーカ自動登録システムの各種性能の評価実験について述べる。第6章では、ふげん発電所内で行ったマーカ自動計測システムの有用性の評価実験について述べる。第7章では、本研究の結果をまとめ、今後の課題を述べる。

第 2 章 研究の背景と目的

本章では、まず研究の背景として、ふげん発電所における解体作業の支援の必要性和拡張現実感技術の概要を述べた後、本研究の目的と意義について述べる。

2.1 拡張現実感技術によるふげん発電所解体作業支援

ここでは研究の背景として、まずふげん発電所における解体作業について説明する。次いで、拡張現実感技術とそれを用いた作業支援について述べる。

2.1.1 ふげん発電所における解体作業の現状と課題

ふげん発電所は、平成 15 年 3 月 29 日に運転を終了した。運転終了後の 10 年間は、廃止措置準備期間とし、使用済燃料の搬出や廃止措置計画の策定に必要な技術開発を行い、廃止措置計画を具体化する予定である^[1]。機器の解体作業は放射線管理区域内で行っている為、高い作業効率、被曝低減、処分費低減を図ることが必要である。また、この目標を達成すると同時に、有効な安全対策を行うことも不可欠である。ふげん発電所における解体作業の一般的な流れを図 2.1 の左側に示す。まず、作業員が作業作業指示書に記載された放射線量分布情報と地図を確認して、被曝量の少ない移動経路を記憶する。続いて、記憶を頼りに解体作業場まで移動して、解体箇所を切断する。最後に、解体物を所定の位置まで搬出する。このような解体作業の各ステップで、図 2.1 の右側に示すような記憶間違いや忘却、環境認識間違いなどのヒューマンエラーが起こる可能性がある。

このようなヒューマンエラーが増えれば、作業効率の低下を招き、作業員の被曝量が増加してしまう可能性が高くなる。従って、原子力発電プラントの解体作業において、被曝量を軽減させるために、ヒューマンエラーを防止することが課題となっている。

解体作業中のヒューマンエラーを防止するために、これまでふげん発電所では、3次元 CAD のデータベースを作成し、仮想現実感による解体作業シミュレーションシステムを開発することより、作業員に事前に教育を行うことが検討されている^[1]。しかしプラントの解体作業は複雑であるため、作業員の記憶に頼る方法では、ヒューマンエラーの発生を完全に防ぐことはできない。

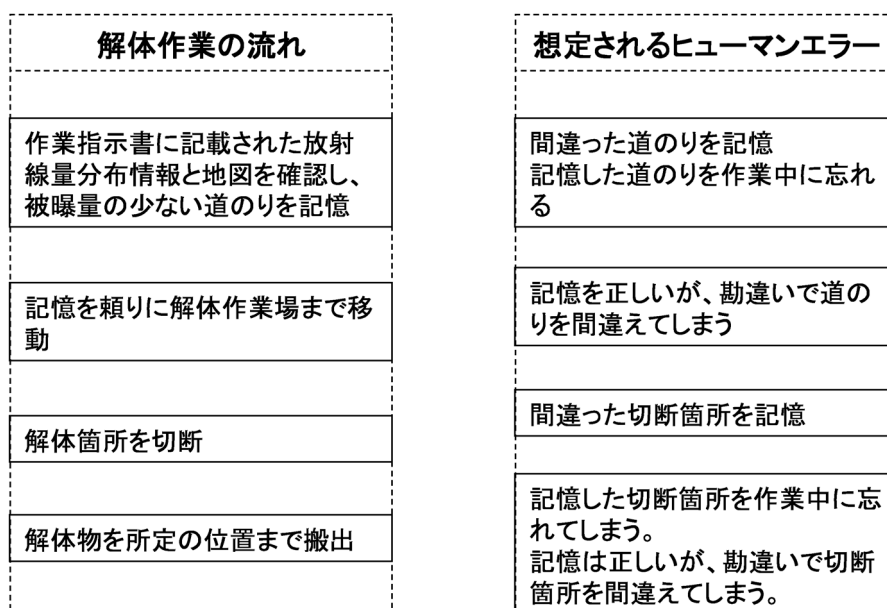


図 2.1: 解体作業の流れ (左) 及び想定されるヒューマンエラー (右)

2.1.2 拡張現実感技術による作業支援

前項で述べたように、原子力発電プラントでの解体作業では、被曝の低減、安全性の向上が大きな課題である。この問題を解決するため、プラント構成機器の性能向上だけではなく、プラントの運転保守を実施する人間とプラントの間に存在するヒューマンマシンインタフェースシステム (HMS) の高度化による作業員の支援が必要であると考えられる [2]。

拡張現実感 (AR:Augmented Reality) 技術は、現実空間と仮想空間を融合した複合現実感 (MR:Mixed Reality) の一種で、ユーザの視界に CG により生成した文字や図形などの情報を重ね合わせて、現実空間の情報を「拡張」する技術である [3][4]。コンピュータで生成された画像は、HMD(Head Mounted Display) や、小型ディスプレイ、PDA などを利用してユーザに提示される。図 2.2 は拡張現実感技術を用いて、実在する機の付近に、CG による花瓶と椅子を重畳表示している例である。

拡張現実感技術には以下のような特徴がある。

1. 対象物の直感的理解が可能

図 2.3 に示すように拡張現実感技術を用いると、拡張情報が対象物上に重畳表示されるため、ユーザはその情報が示す対象物を直感的に理解できる。

2. 情報内容の容易な理解が可能

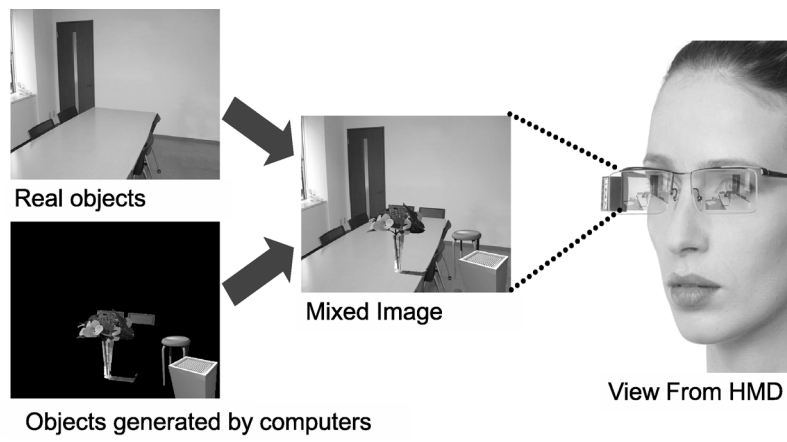


図 2.2: 拡張現実感技術の例

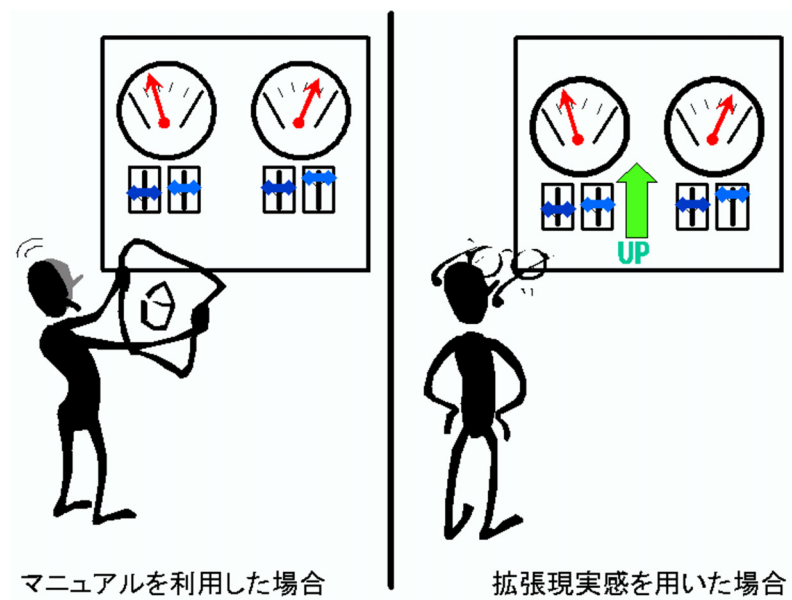


図 2.3: 対象物の直感的理解

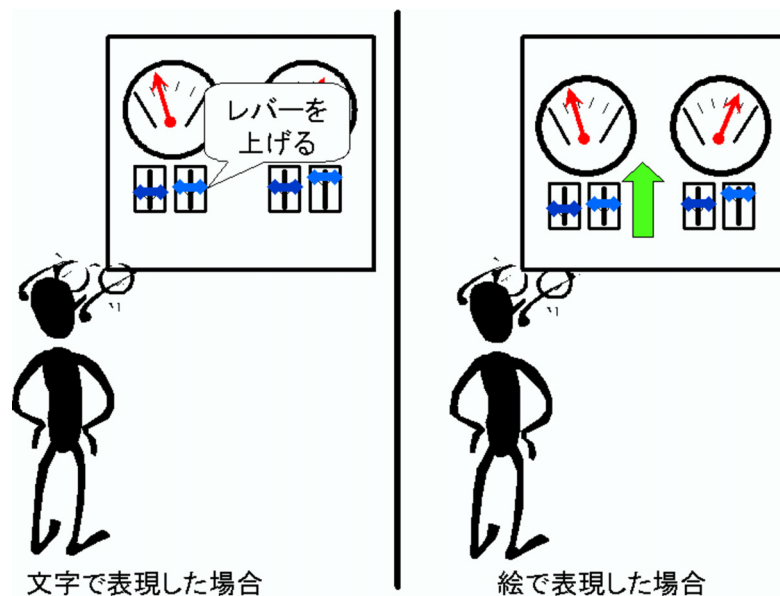


図 2.4: 情報内容の容易な理解

図 2.4 に示すように付加情報は、文字だけでなく矢印などを用いて絵で表現できるため、ユーザは拡張情報の内容を容易かつ確実に理解できる。

このような拡張現実感技術を用いた作業支援の例としては、BMW 社の自動車メンテナンス支援システム^[5]がある。このシステムでは、自動車の保守作業を行う際、図 2.5 に示すように、取り付けるべき機械の種類と位置を、エンジンルームに重畳表示することで、作業効率の向上を図っている。

また、制御ボックスの保守の支援を目的とした支援システムとして、ARTESAS がある^[6]。このシステムでは、図 2.6 に示すように、制御ボックスの主要な部品の点検作業、保守作業などを行う際に、作業員が HMD を介して保守手順などを参照できる。

図 2.7 に Davison らにより、AR を用いたキッチンのデザイン検討支援の例を示す。このシステムでは、ユーザが実在するキッチン内に仮想家具を配置することにより、キッチンのレイアウトを直感的に検討することができる^[7]。

また、図 2.8 に示すように、拡張現実感技術を原子力発電プラントの解体作業支援に応用すれば、解体作業情報や放射線情報を作業員に直観的に提示できる。例えば、放射線量の多い箇所を作業員に提示することにより、直感的に危険な領域を理解できるようになることができる。これにより、解体作業の時にヒューマンエラーを低減できると考えられる。

これ以外に、図 2.9 及び図 2.10 に示すように、プラント解体作業中の作業員の視野



図 2.5: 自動車メンテナンス支援システム [5]



図 2.6: 制御ボックス保守支援システム [6]



図 2.7: 拡張現実感技術を用いた仮想家具の取り付け [7]

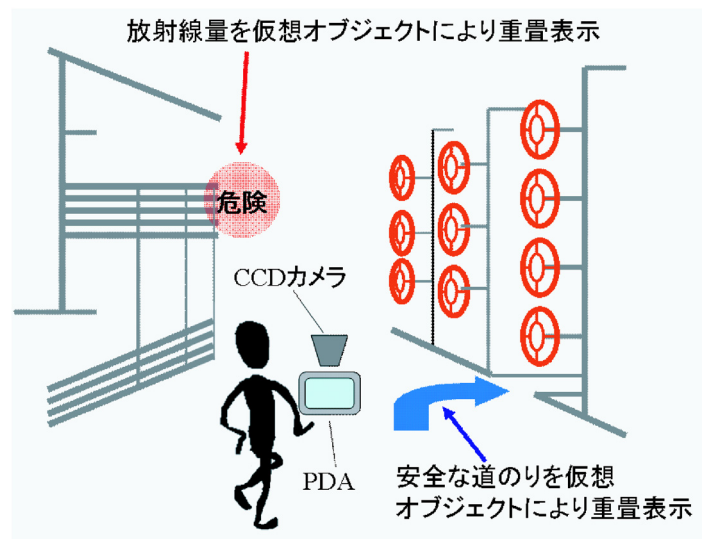


図 2.8: 拡張現実感技術による放射線量可視化

に拡張現実感を用いて、プラントの3次元CADデータを重畳表示することにより、解体箇所や解体禁止箇所を直感的に参照できるようにすることや、解体の進捗状況を直感的に記録できるようにすることが考えられる [8]。

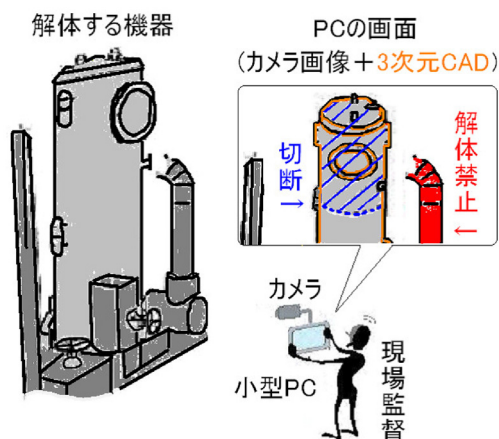


図 2.9: 切断箇所と解体禁止箇所を確認する様子

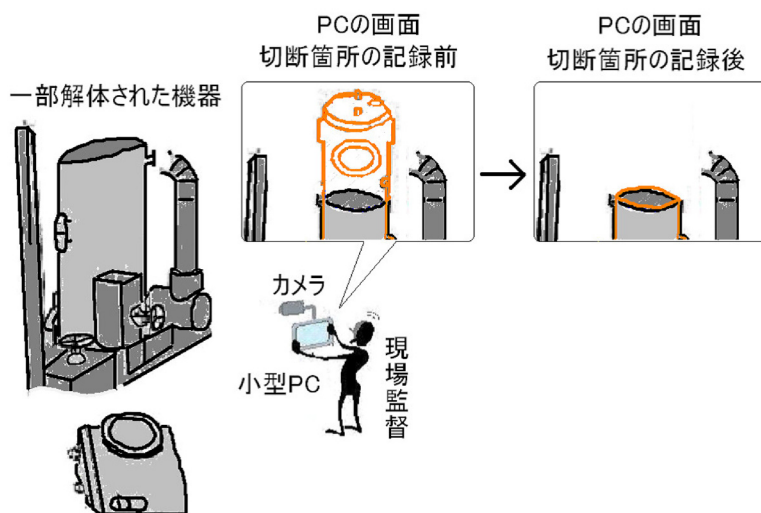


図 2.10: 解体した箇所を記録する様子

2.1.3 既存の代表的なトラッキング手法

拡張現実感技術を利用する際に、仮想情報を重畳表示させる周囲の実物とユーザの視点位置との相対位置関係をリアルタイムで計測するというトラッキング技術は、拡張現実感を用いる際に不可欠な技術である。この計測結果に基づいて現実世界の意図した位置に常に正しく仮想情報を表示させることができる。

拡張現実感技術の実用化においてトラッキングはキーテクノロジーであり、これまでも様々なトラッキング手法が研究されている^[9]。

図2.5に示した自動車メンテナンス支援システムでは、対象となるエンジンの部品にあらかじめ画像マーカを貼り付けておき、作業員の頭部に取り付けられたカメラを用いて、画像マーカを撮影することにより、トラッキングを行っている。図2.7に示した仮想家具の取り付けでは、一台のカメラで自然特徴点を抽出することでトラッキングを行っている。

既存のトラッキング手法と原子力発電所内で使用するトラッキングに要求される仕様の関係を表2.1に示す。画像マーカを用いたトラッキングとは、壁や天井などに3次

表 2.1: 原子力発電所の現場で使用するトラッキング技術の要求仕様

要求仕様	GPS	LPS	超音波センサ	磁気センサ	慣性センサ	ビジョンセンサ	
						マーカレス	画像マーカ
屋内で使用	×	○	○	○	○	○	○
長距離で使用	○	○	○	△	○	○	△
短距離で使用	○	○	○	○	○	○	○
複雑な環境で使用	△	×	×	○	○	○	○
金属が多い所で使用	○	○	○	×	○	○	○
6自由度トラッキング	×	△	×	○	○	○	○
信頼性	○	○	○	○	△	×	△
低コスト	○	○	△	△	○	○	○
据付けやすい	○	△	△	△	○	○	○
精度	×	△	△	○	×	△	△
トラッキング速度	△	○	○	○	○	○	○
拡張性	○	○	△	△	△	○	○
軽便	○	○	○	○	○	○	○

○ 良い
 △ 普通
 × 出来ない

GPS: 全地球測位システム
 LPS: 位置検知システム

元位置と姿勢が既知の画像マーカを貼り付け、ユーザの頭部などに取り付けたカメラでこのマーカを撮影し、得た画像を解析して、画像マーカとカメラ間の位置・姿勢関係を求める方法である^[10]。また、画像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^[11]。画像マーカを用いたトラッキングは、金属の影響を受けない、低コストで利用できるなどの利点があるが、カメラ画像内に画像マーカが撮影されていない場合や、認識できない場合には、トラッキングできないという問題がある。従って、広範囲のトラッキングに用いる場合には、多数のマーカを設置する必要がある。

マーカレストラッキングとは、カメラ画像内から特徴的な点（以下、自然特徴点）を抽出し、画像マーカの代用として用いる手法である。この手法では環境にマーカ等を貼付する必要が無いため、事前準備が簡単であるという利点があるが、トラッキングを開始した時の絶対位置を知るために、他のトラッキング技術を用いなければならないという問題がある。また、現場に多数の外観が似た機器がある場合や、照度が時間の経過と共に大きく変化する場合などでは安定性が低いという問題がある。

その他のトラッキング手法にも問題がある。例えば、GPSは、屋内では使えない、超音波センサは、複雑な形状の機器が多数ある場所では使えない。磁気センサは、金属製の機器が多い場所では使えない。自律センサ単体では、長時間使用する必要がある場合に、誤差が蓄積するため、精度が維持できない。

以上に述べたトラッキング手法の中で、加藤らが開発したARToolKit^[10]に代表される、画像マーカによるトラッキング手法は、比較的精度が高く、かつ容易に利用できるため、多くの研究で利用されている。画像マーカを用いた手法では、正方形のマーカが使われることが多い^[10, 12, 13]。ARToolKitにおいても、図 2.11 に示すような正方形の4頂点を基にトラッキングを行う。ARToolKitは正方形マーカを使ったトラッキング手法の中でも処理が速く、精度も比較的高い^[14]。正方形マーカを使ったトラッキング手法を使用する際には、事前にマーカの位置と方向を計測する必要がある。



図 2.11: ARToolKit で使用されるマーカ

一方、画像マーカを用いたトラッキング手法としては、図 2.12 に示す線形状をしたマーカ（ラインマーカ）を用いた手法^[15]や、図 2.13 に示す円形状をしたマーカ（円形マーカ）を用いた手法^[16]も提案されている。ラインマーカは、細長い形をしているた

め、原子力発電プラントや化学プラントに多数存在する配管の表面に貼り付けることが容易であり、正方形マーカに比べて、遠い位置からカメラで認識できるという特徴を持っている。ラインマーカを用いたトラッキングを利用する場合にはマーカの両端の3次元位置を事前に計測する必要がある。一方、円形マーカは、円を基本としてデザインされているために、遠方から撮影することにより解像度が低くなる場合や、カメラのフォーカスが合っていないために映像がぼやける場合でも、中心を正確に認識できるという特徴を持っている。円形マーカを用いたトラッキングを利用する場合には、マーカの中心の3次元位置を事前に計測する必要がある。

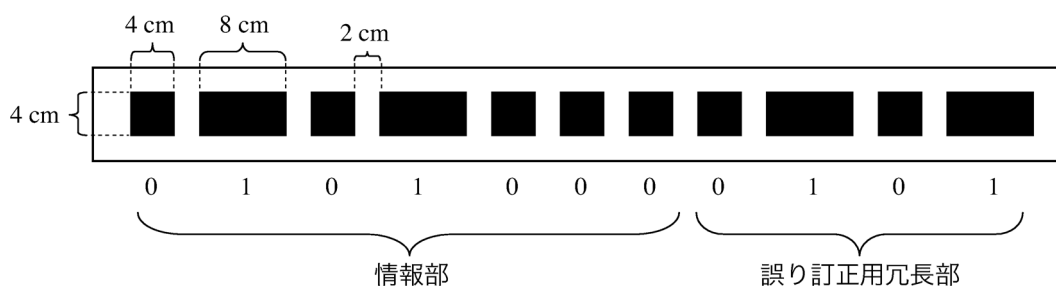


図 2.12: ラインコードマーカ

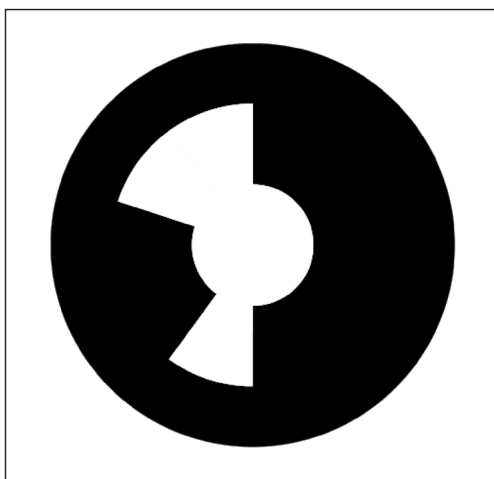


図 2.13: 円形マーカ

2.1.4 原子力発電プラントで使用するトラッキング手法の要求仕様

2.1.3項で述べたように、これまでに様々なトラッキング手法が開発、利用されているが、それぞれの利点と欠点があり、原子力発電所内で安全に利用するには、原子力

発電所の特徴に合った手法を選択する必要がある。以下に、まず原子力発電所構内の環境とそこで行われる作業の特徴をまとめる。

原子力発電所構内の特徴

1. 屋内である設置されている機器の種類や数が非常に多い
2. パイプが多い
3. 安全の確保や環境の制限から新しい機器を設置することは困難である
4. 一般的なオフィスに比べて場所による照度の変化が大きい
5. 機器から発せられる騒音が多い
6. 天井の高低差が激しい
7. 通路の幅が狭い場所が多い

作業の特徴

1. 安全のため、作業員はヘルメットを着用する
2. 作業を妨げる機器を身につけることはできない
3. 1グループ4、5人で解体作業を行う

解体作業環境におけるトラッキング技術への要求

1. 環境の変化に対する柔軟な対応が可能である
解体作業では、作業が進むにつれ、環境内設置物が移動し、作業領域の大きさ、照度が変わる。そのため、解体に伴う環境の変化に対応しやすいことが必要条件である。
2. 精度が高い
拡張現実感を用いて、作業指示を現実物体に重畳表示する際に、トラッキングの精度が十分でないと、間違った位置に情報を重畳表示させてしまい、ヒューマンエラーを誘発する可能性がある。
3. 広範囲で利用可能
解体作業時に作業員の被曝量を低減させたいという視点から考えると、トラッキングが可能となるユーザとマーカとの距離が重要な問題となり、比較的広域でのトラッキングが必要となる。現場の規模と放射線の安全性を考慮するとトラッキング可能な領域は5m平方以上の領域で使用可能である必要がある。

4. リアルタイムに動作

作業員が常に放射線量を確認するためには、リアルタイムにトラッキングを行い、放射線量情報を提示する必要がある。

上記の特徴を考慮した上で適切なトラッキング手法を選択する必要がある。

表 2.1 に示した既存のトラッキング技術とその特徴を上記の発電所の特徴等と照らし合わせてみると、解体作業環境は屋内環境であるため、GPS は利用できない、解体する機器が殆ど金属であるため、磁気センサも利用できない、作業環境内に新たに機器を設置することが難しいため、超音波センサは利用できない。解体作業は長時間作業であるため、慣性センサも利用できない。一方、画像マーカを用いたトラッキング手法は、高精度と低コストで実現できるため、ふげん発電所の解体作業支援時の利用に適している。また、画像マーカを用いたトラッキング手法は計算負荷も自然特徴点を利用した手法に比べて低く、リアルタイムな動作も十分可能であり、環境が変化した場合にも、画像マーカを貼り直すだけで良く、マーカの取り除く作業もしやすい。以上より、前項で述べたトラッキング手法のうち、マーカを用いたトラッキング手法が最も解体作業環境に適していると言える。

しかし、画像マーカを用いる場合、広範囲でトラッキングを行えるようにするためには、多数のマーカを環境内に貼付し、個々のマーカの 3 次元位置を計測しなければならないという問題がある。現場の作業環境は非常に複雑なため、手作業でマーカの 3 次元位置を一つ一つ計測することは非常に多くの労力が必要となる。また、計測や結果の入力際に間違ってしまう可能性もある。マーカの 3 次元位置の計測を間違えると、正確な位置に情報を示すことはできない。

また、マーカの 3 次元位置を計測する際にも作業員が被曝する恐れがあるため、より少ない時間と労力でマーカの 3 次元位置を計測できることが望ましい。

2.2 研究の目的

本研究では、マーカの 3 次元位置を計測する際の労力が非常に大きいという問題を解決する方策として、レーザ距離計測器とビデオカメラを利用してマーカの 3 次元位置を全自動で計測する具体的な手法を提案し、システムの実装と評価を行い、その有用性を評価することを目的とする。特に、原子力発電プラントの構造や、保守・解体作業の特徴を考慮したシステムを設計し、プラント保守作業の専門家やインタフェースの専門家に評価してもらうことにより、実用的なシステムの実現を目指す。少ない

労力でマーカの3次元位置を計測できるようになれば、拡張現実感を用いた作業支援システムの実用化に貢献できると期待される。

第 3 章 マーカ自動計測システム (MAMS) の設計

第 2 章で述べたように、画像マーカを用いたトラッキングを使用するためには、環境に多数のマーカを貼付し、その 3 次元位置を計測しておく必要があり、これが原子力発電プラント内部で実際に拡張現実感技術を利用する際の課題となっていた。そこで本研究では、この問題点を解決できるシステムとして、マーカ自動計測システム (Marker Auto-Measurement System ; MAMS) を提案する。

本章では、MAMS の要求仕様について述べた後、MAMS の概略設計および MAMS を実現するために必要となるアルゴリズムの詳細について述べる。

3.1 MAMS の要求仕様

本研究で提案する MAMS は、原子力発電プラントにおけるマーカの位置計測の支援を目指したものである。具体的には、マーカ自動計測システムを導入することによって、次の二つを実現することを目標としている。

目標 1 作業効率の向上

目標 2 ヒューマンエラーの低減

2.1.4 項で述べた原子力プラントの特徴を考慮しながら、上記の目標を実現するため、MAMS の要求仕様を以下のように定める。

仕様 1 短時間でマーカの 3 次元位置を計測できる。

環境に貼り付けたマーカの 3 次元位置を計測する際に、長い時間が必要であれば、作業員が被曝する可能性があり、好ましくない。また、被曝する危険性が低い場合でも、作業に長時間を要すると、作業員が疲労する、人的コストが高くなる等の問題がある。その為、MAMS を用いたマーカの 3 次元位置の計測は短時間で行える必要があり、マーカの計測自体に要する時間を短くするだけでなく、機器の設置や撤去も短時間で行えるようにする必要がある。

仕様2 安定・高精度にマーカの3次元位置を計測できる。

マーカの3次元位置の計測結果が間違っていたり、精度が低かったりすると、拡張現実感を用いて情報提示をする場合に、間違った位置に情報を提示してしまい、作業員に間違った作業をさせてしまう危険性がある。その為、MAMSでは、安定・高精度にマーカの3次元位置を計測できる必要がある。特に、原子力発電プラントは、通常のオフィスに比べて場所による照度の変化が大きいため、照度の変化に影響を受けにくい計測手法を実現する必要がある。

仕様3 使用方法の習得に多くの時間を要しない。

MAMSを使用するユーザは、原子力発電プラントの保守・解体の専門家であり、情報技術に必ずしも詳しいとは限らない。また、人的コストを下げるためにも、システムを使用する際に講習会を受ける必要があることは望ましくない。そのため、MAMSは、専門知識を持っていない人でも使用できるようにするだけでなく、インターフェースを使いやすく、かつ、分かりやすくする必要がある。

仕様4 安価である。

原子力発電プラントの保守や解体は、低コストで行うことが要求されており、MAMSも、安価に実現できるようにする必要がある。その為、特別なハードウェアを新たに開発することなく、既存の機器を組み合わせる必要がある。

仕様5 設置に広い場所を必要としない。

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、非常に狭い場所でMAMSを使用する必要性が生じる可能性が高い。その為、使用する機器はできる限り小型化しなければならない。

仕様6 障害物が多い場所でも使用できる。

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、貼り付けたマーカが機器に隠れる可能性がある。その様な場合でもマーカの3次元位置が計測できる必要がある。

3.2 MAMSの概略設計

3.2.1 MAMSを用いたマーカ位置計測手法

本研究では、前節で述べた要求仕様を満たすシステムとして、図3.1に示す様に、レーザ距離計測器、電動ズーム機能付きビデオカメラ、電動雲台、マーカ認識プログラムを組み合わせることにより、環境内に設置された多数のマーカの3次元位置を自動的に計測するマーカ自動計測システムを実現する。

ここで、レーザ距離計測器とは、距離を測りたい目標に向けてレーザ光を照射し、レーザ光が当たって戻ってくる時間から距離を算出する機器である。計測精度が1mm以上の機器も存在する(仕様2に対応)。また、電動雲台とは、上部に固定した機器の方向をステッピングモータで自由に変えることができる台座である。非常に正確に方向を制御できる機器も存在する(仕様2に対応)。共に持ち運びが可能な大きさであり(仕様5に対応)、商品として一般に販売されており、容易に入手できる(仕様4に対応)。

MAMSでは、図3.2に示すように、以下の手順でマーカの3次元位置を計測する。

- (1) 作業環境の適当な位置及び、作業環境の基準となる位置に世界座標系の原点を選んで右手系で世界座標系の各軸を選定する。
- (2) 原点と各軸に基準マーカを配置する。
- (3) 作業環境にレーザ距離計測器とカメラ、電動雲台、三脚、制御用パソコンを配置して、ケーブルで接続する。
- (4) カメラで環境を撮影し、マーカ認識プログラムでカメラ画像上のマーカを認識し、レーザ計測器とマーカの間の相対的な位置関係を求める。
- (5) (4)の結果を用いて電動雲台を駆動させ、レーザ計測器をマーカが存在する方向に向ける。
- (6) レーザを照射し、その照射位置がマーカ上の特徴点の位置に合っているかどうか確認し、レーザ照射の位置をマーカ上の特徴点の位置に合わせる。
- (7) レーザ計測器を用いてマーカとレーザ計測器の間の距離を求め、雲台の位置によりマーカの正確な方向を求める。
- (8) (7)の情報を元に、マーカの3次元位置を求める。

(9) マーカの3次元位置データを保存する。

(10) 使用した機器を撤去する。

以上により、従来に比べて非常に少ない労力でマーカの3次元位置を計測できると期待される(仕様1に対応)。

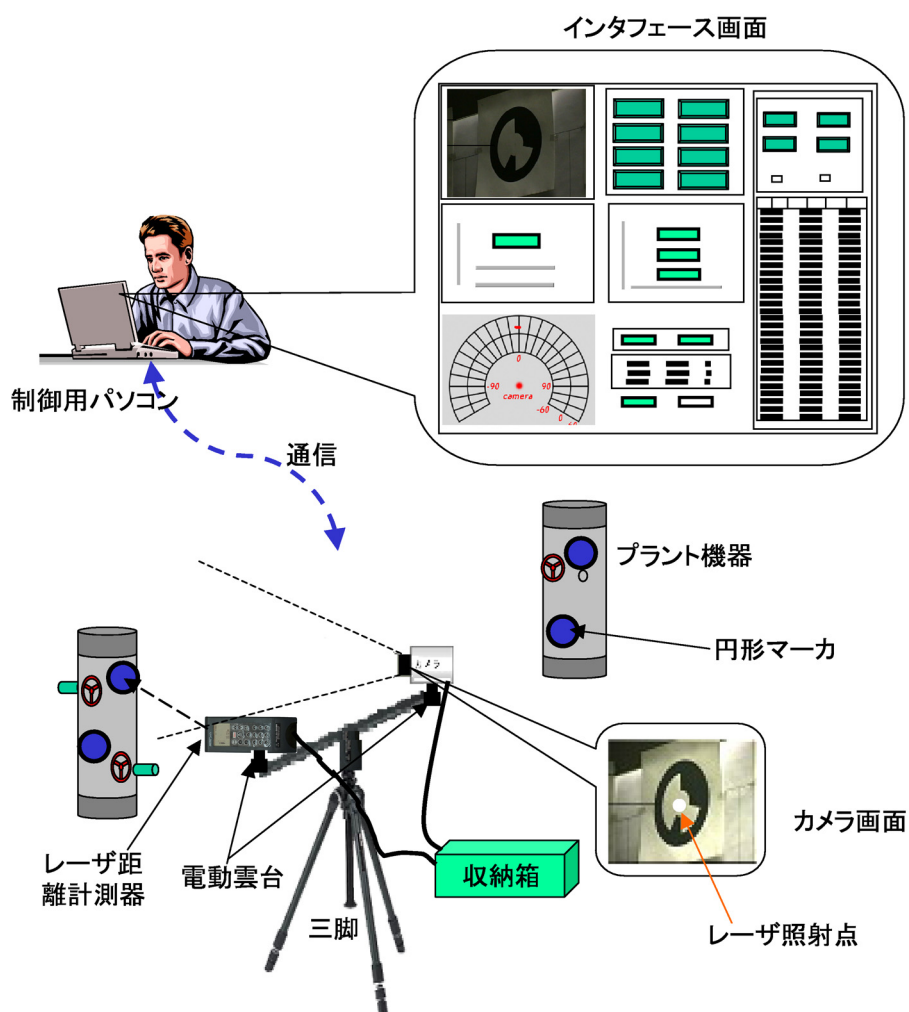


図 3.1: マーカ自動計測システムの基本構成

3.2.2 MAMS の機能構成

本研究で開発する MAMS では、前項で述べた手順でマーカの位置を計測することを可能にするために、(機能1) 全てのマーカの位置を自動的に計測することを可能にす

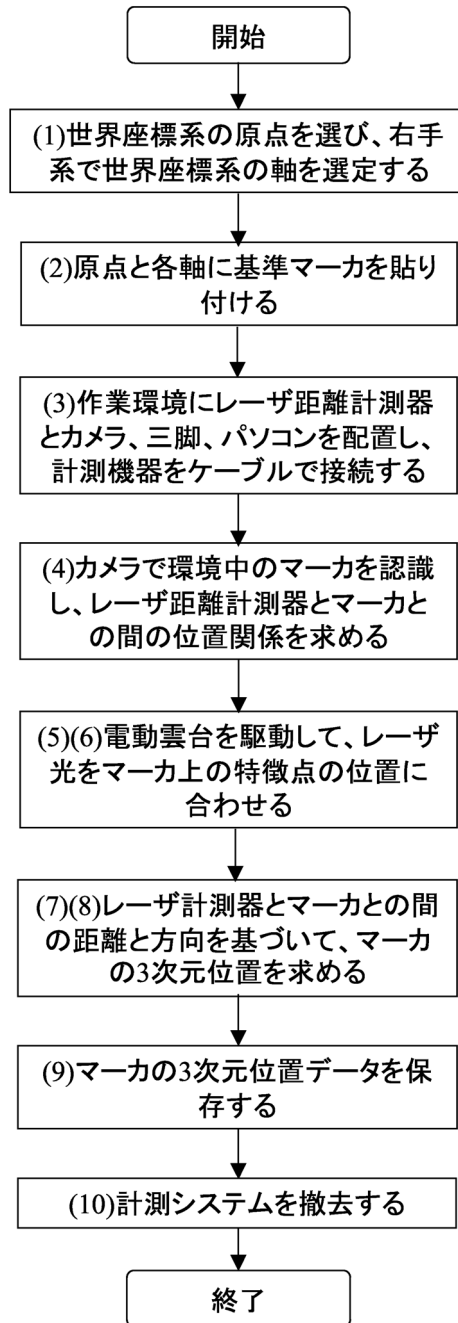


図 3.2: マーカ自動計測システムを使用する際の作業手順

る。その際、(機能2)カメラでマーカを自動認識する機能、(機能3)レーザ距離計測器を用いてマーカの位置を計測する機能を実現する。

一方、仕様1を満たすために、(機能4)機器やケーブルを全て収納箱に格納できるようにする。これにより、MAMSの運搬が容易になり、設置と撤去に要する時間が短縮できると考えられる。また、(機能5)カメラ初期化機能、(機能6)レーザ計測器初期化機能、(機能7)システム初期化機能を実現する。これは、計測を全てやり直す際、ソフトウェアを立ち上げ直すことや、計測した情報を個々に削除することは時間がかかるため、ボタン一つを押すだけでシステムや機器を初期化することを可能にすれば、時間短縮が実現できると考えられるためである。

また、仕様2を満たすために、本研究では、(機能8)画像マーカとして円形マーカを採用する。これは、円形マーカは、照明の変化が激しい場合や、カメラ画像のフォーカスが合っていない場合でも、安定して認識できるという特徴を持っており、円形マーカを対象とした計測システムを実現すれば、安定したシステムが実現できると考えられるためである。

仕様3を満たすには、システムの現在の状況を、ユーザに分かりやすく示し、使いやすいインタフェースを実現する必要がある。そこで、(機能9)操作ボタンをできるだけ大きく設計し、(機能10)機能実行中のボタンの色を変える。また、(機能11)認識したマーカの種別を画面上で容易に確認できるようにする。また、(機能12)システムの動作状態をログとして表示する機能、(機能13)自動計測開始からの経過時間を表示する機能、(機能14)自動計測の終了を知らせる機能、(機能15)認識したマーカの総数を表示する機能、(機能16)計測が終了したマーカの総数を表示する機能、(機能17)これから計測するマーカの総数を表示する機能、(機能18)現在カメラが写している範囲を直感的に示す機能、(機能19)カメラの方向をスライドバーを操作して変更する機能、(機能20)カメラの方向をアングルマップを操作して変更する機能、(機能21)計測結果を世界座標系を基準に表示する機能を実現する。

さらに、仕様6を満たすために、(機能22)手作業でマーカの位置を計測できるようにし、(機能23)MAMSとマーカ間の距離に応じた自動計測機能が利用できるようにする。また、(機能24)1個のマーカの位置を自動的に計測する機能、(機能25)画面上に映っている全てのマーカの種別と位置を自動的に計測する機能、(機能26)計測したマーカの情報を削除する機能、(機能27)自動計測を途中で止める機能を実現する。

3.2.3 MAMSの画面インタフェース設計

図 3.3 に、MAMS で利用する制御ソフトウェアのインタフェース画面の概念図を示す。MAMS のインタフェース画面は、①カメラ画像表示インタフェース、②マーカ位置自動計測インタフェース、③カメラ制御インタフェース、④レーザ距離計測器制御インタフェース、⑤マーカ計測状態表示インタフェース、⑥手動マーカ位置計測インタフェース、⑦システム動作記録、および⑧その他のインタフェースで構成される。

①カメラ画像表示インタフェースは、カメラのキャプチャ映像を表示するインタフェースであり、ユーザはこのインタフェースで、MAMS が処理している映像を見ることができる。②マーカ位置自動計測インタフェースは、MAMS のマーカ自動計測機能を駆動する際に利用するボタン等が配置される。③カメラ制御インタフェースと④レーザ距離計測器制御インタフェースは、カメラの方向や焦点距離、レーザ距離計測器の方向を手動で変更したい時に利用する。⑤マーカ計測状態表示インタフェースは、マーカの詳細情報（位置の計測結果や、MAMS がマーカの存在を認識しているか等）を表示するインタフェースとする。⑥手動マーカ位置計測インタフェースは、MAMS の自動機能では、マーカの 3 次元位置を計測できない場合に、手動でマーカの 3 次元位置を計測する際に使用する機能を配置する。⑦システム動作記録は、システムの動作ログを表示し、ユーザがシステムの現在の動作状態や、過去の動作の履歴を確認できるようにする。⑧その他のインタフェースでは、①から⑦のインタフェースでは足りない機能を配置する。

3.3 MAMSの各種機能を実現するアルゴリズム

本節では、3.2 節で述べた MAMS の各種機能を実現するアルゴリズムの詳細を述べる。MAMS の各種機能を実現するためには、以下に示す 6 つのアルゴリズムが必要である。

1. マーカ認識アルゴリズム
2. カメラを用いてマーカの位置を計測するアルゴリズム
3. レーザ距離計測器を用いてマーカの位置を計測するアルゴリズム
4. マーカの位置を世界座標系に変換するアルゴリズム
5. 1 つのマーカの位置を自動的に計測するアルゴリズム

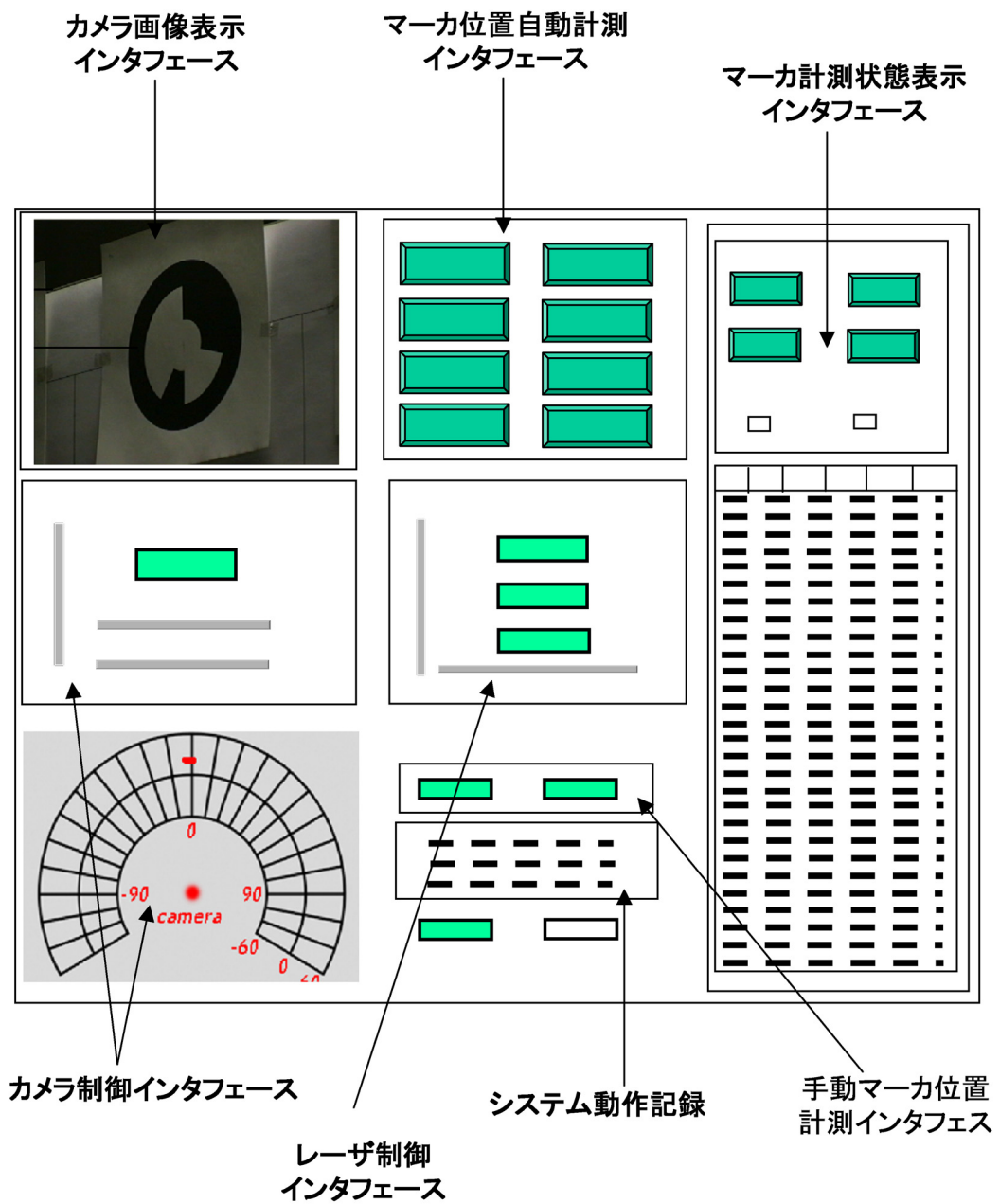


図 3.3: マーカ自動計測システムのインターフェース画面の概念図

6. 全てのマーカの位置を自動的に計測するアルゴリズム

以下では、本研究で扱う座標系を定義した後、上記の各アルゴリズムの詳細を述べる。

3.3.1 座標系の定義

図 3.4 に本研究で扱う座標系を示す。カメラ座標系 C はカメラレンズの焦点を原点、画像平面に垂直な方向を X 軸、画像の X, Y 軸に平行な方向を各 Y 軸、 Z 軸とする。マーカ座標系 M_i は、マーカの種類の数だけ設定され、マーカの中心を原点、マーカ面に垂直な方向を Z 軸、マーカ面に平行な面を XY 平面とする。電動雲台座標系 S は、電動雲台のチルト方向の回転軸と、パン方向の回転軸の交点を原点とし、電動雲台が初期化された時の上方向を Z 軸、正面方向を X 軸の負の方向とする。レーザ距離計測座標系 L は、電動雲台の回転台面の中心を原点とし、回転台面に垂直な方向を Z 軸、電動雲台が初期化された時の正面方向を X 軸の負の方向とする。世界座標系 W は、拡張現実感を利用する空間中に固定され、1 番のマーカの中心位置が原点、1 番のマーカの中心から 2 番のマーカの中心へ向かう方向が X 軸、1 番のマーカの中心から 3 番のマーカの中心へ向かう方向が Y 軸となる。スクリーン座標系 S_c は、ビデオカメラの CCD 素子平面上に定義され、カメラの撮影方向を見て左上隅を原点、右向きを X 軸、下向きを Y 軸とする。これら座標系の間は、3 次元ベクトルで表される平行移動と、3 行 3 列の行列で表される回転移動で変換が表現される。特に本研究では、座標系 1 から座標系 2 への平行移動を T_{12} 、回転移動を R_{12} で表す。それらを合わせた同次座標変換を $T_{12}^{4 \times 4}$ で表す。

3.3.2 マーカ認識アルゴリズム

本アルゴリズムは、カメラに写った円形マーカの種類 (ID) と画像上の位置 (x_c, y_c) ・大きさ r_{image} を認識するアルゴリズムであり、石井らが開発したアルゴリズムを利用した^[16]。詳細は、付録 A で述べ、以下では概要のみ述べる。

本アルゴリズムのフローチャートを図 3.6 に示す。本アルゴリズムでは、まず、カメラから取得した RGB カラー画像を、グレースケール画像に変換後、ラプラシアンフィルタを適用し、予め定められた閾値で 2 値化することにより、画像のエッジ（輝度の変化の大きい部分）を認識する。その後、エッジとして認識された画素間の連結性（互いに隣り合っているかどうか）を調べ、連結していると認識された個々のエッジ群が、楕円にフィッティングできるかどうかを判定する。楕円にフィッティングできると判断さ

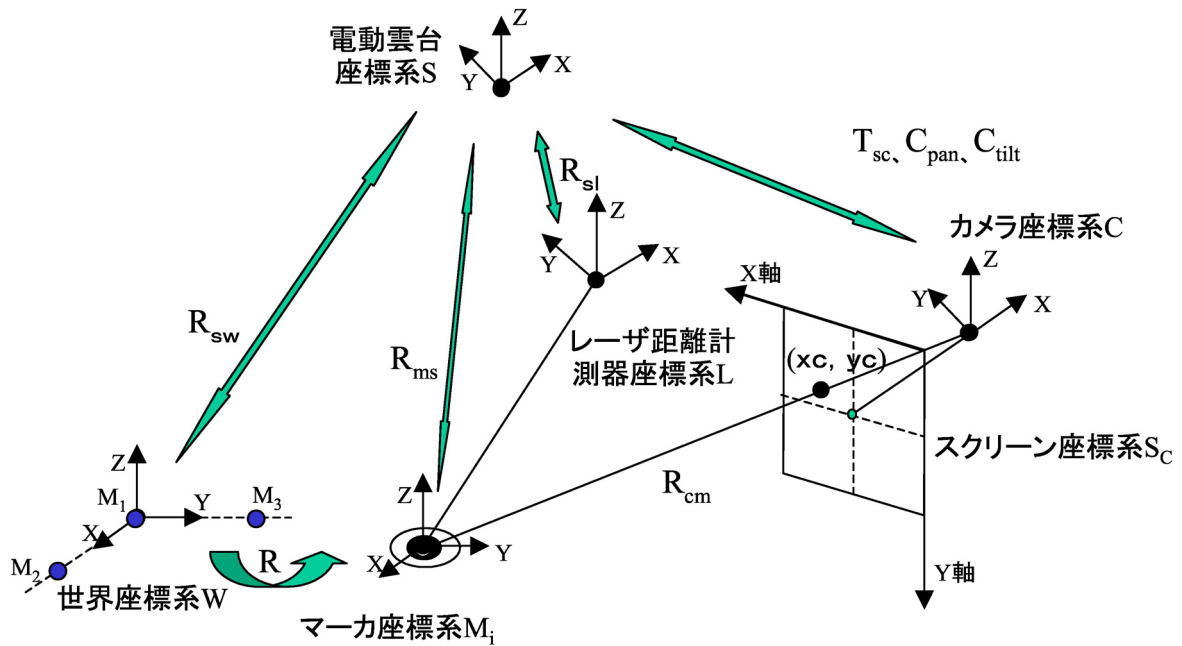


図 3.4: 本研究で使用する座標系

れたエッジ群の中の領域を解析し、その領域がマーカであるかどうかを判定する。マーカである場合は、マーカの種類を認識すると共に、フィッティングされた楕円の中心を、マーカの中心とし、楕円の長軸の長さをマーカの賀状上の大きさとする。以上に述べた方法により、カメラから得られた画像上の円形マーカの種類と位置・大きさを認識できる。

3.3.3 カメラを用いてマーカの位置を計測するアルゴリズム

本アルゴリズムは、マーカの半径 r_{real} 、カメラ画像上のマーカの位置 (x_c, y_c) と半径 r_{image} 、カメラの外部パラメータ (電動雲台座標系 S で表されたカメラの位置 T_{sc} 、パン方向 C_{pan} 、チルト方向 C_{tilt})、カメラの内部パラメータ (カメラの焦点距離 f 、カメラの CCD のチップの幅 w_{CCD} 、カメラの解像度 w_{reso}, h_{reso}) から、カメラに写った円形マーカの電動雲台座標系で表された 3 次元位置ベクトル T_{sm} を求めるアルゴリズムである。これらの値の関係を図 3.5 に示す。カメラの CCD のチップの幅とカメラの解像度は、カメラの仕様書等から得ることができ、電動雲台座標系で表されたカメラの位置 T_{sc} とマーカの半径 r_{real} は固定の為、事前に計測できる。カメラのパン・チルト方向とカメラの焦点距離は通信によりカメラから得られるものとする。本アルゴリズムのフローチャートを図 3.7 に示し、その詳細を以下に示す。

- (1) 3.3.2 項のアルゴリズムを用いてカメラ画像上のマーカの位置 (x_c, y_c) と半径 r_{real} を求める。
- (2) カメラとの通信により、カメラの現在のパン方向 c_{pan} ・チルト方向 c_{tilt} と焦点距離 f を得る。
- (3) カメラと実際のマーカの距離 d_{cm} を式 (3.1) により求める。

$$d_{cm} = \frac{f r_{real} w_{reso}}{r_{image} w_{CCD}} \quad (3.1)$$

- (4) カメラ座標系で表されたマーカのパン方向 m_{pan} 、チルト方向 m_{tilt} を式 (3.2) および式 (3.3) で求める。

$$m_{pan} = \frac{v_h}{w_{reso}} \left(\frac{w_{reso}}{2} - x_c \right) \quad (3.2)$$

$$m_{tilt} = \frac{v_h}{w_{reso}} \left(\frac{h_{reso}}{2} - y_c \right) \quad (3.3)$$

ただし、 $v_h = \arctan(w_{CCD}/2f)$ は、カメラの水平方向の半画角である。

- (5) 電動雲台座標系で表されたマーカの 3 次元位置ベクトル T_{sm} を以下の式で求める。

$$T_{sm} = T_{sc} + R_z(m_{pan} + c_{pan}) R_y(m_{tilt} + c_{tilt}) D_m \quad (3.4)$$

ただし、 $D_m = (d_{cm}, 0, 0)$ とし、 $R_y(\alpha)$ 、 $R_z(\beta)$ は、それぞれ、y 軸を中心に α 、z 軸を中心に β 回転させる回転行列である。

なお、式 (3.1) の導出方法は以下の通りである。マーカがカメラのほぼ中心に写っている時、図 3.5 において、 $FO' \simeq f$ 、 $FO \simeq d_{cm}$ である。ここで、三角形 FO'R' と三角形 FOR は相似であるため、 $FO' : FO = O'R' : OR$ が成り立つ。従って、以下の式が成り立つ。

$$d_{cm} = \frac{f r_{real}}{r_{image} \frac{w_{CCD}}{w_{reso}}} \quad (3.5)$$

電動雲台とカメラは、一つの器具に固定して利用することを前提とするが、計測システムを設置・撤去する際に、電動雲台とカメラの位置や方向が変化してしまう可能

性がある。また、使用可能なカメラの解像度には上限がある。その為、カメラの位置 T_{sc} 、3.3.2項のアルゴリズムで得られるマーカの大きさ r_{image} には、大きな誤差が含まれることになる。そのため、本アルゴリズムで求められるマーカの3次元位置には、大きな誤差が含まれることが予想され、この結果をそのままトラッキングに使用することはできない。

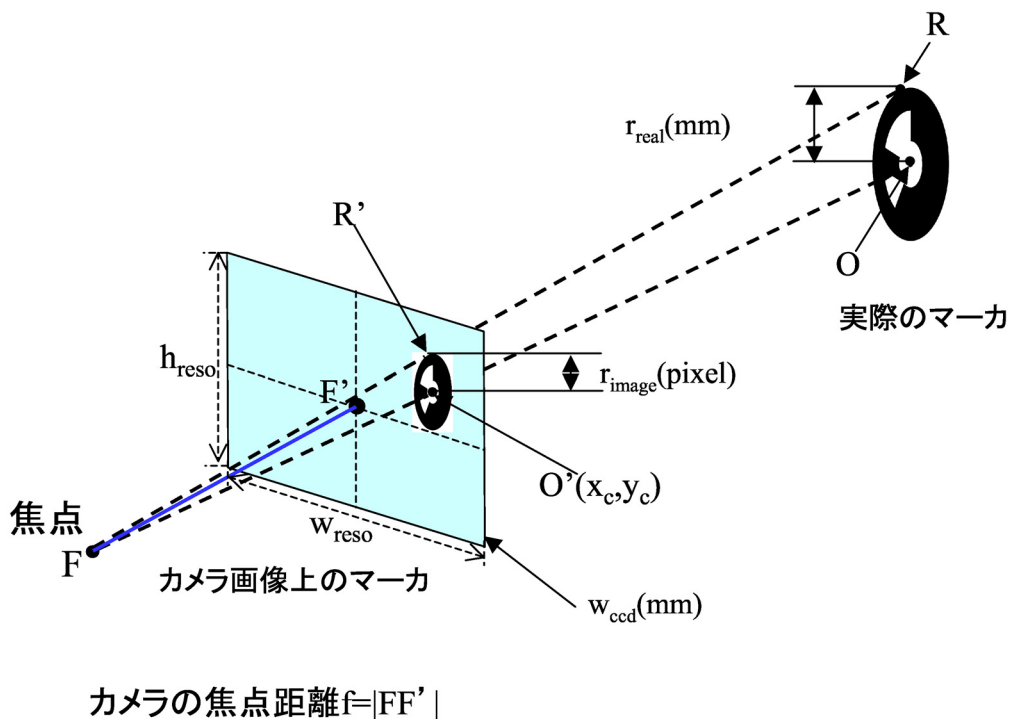


図 3.5: 実世界のマーカとカメラ画像上のマーカの関係

3.3.4 レーザ距離計測器を用いてマーカの位置を計測するアルゴリズム

本アルゴリズムは、電動雲台のパン方向 s_{pan} 、チルト方向 s_{tilt} とレーザ距離計測器とマーカの中心との間の距離 d_{lm} から、電動雲台座標系で表されたマーカの高精度な3次元位置 T_{sm} を求めるアルゴリズムである。レーザ距離計測器の距離計測結果と電動雲台のパン・チルト方向は、通信によりレーザ距離計測器と電動雲台から得られるものとする。

本アルゴリズムのフローチャートを図 3.8 に示し、その詳細を以下に示す。

- (1) 手作業、もしくは後述する自動化手法で、レーザ距離計測器のレーザ照射を計測対象となる円形マーカの中心に合わせる。

- (2) レーザ距離計測器を駆動して、レーザ距離計測器とマーカの中心との間の距離 d_{lm} を得る。
- (3) 電動雲台のパン方向 s_{pan} ・チルト方向 s_{tilt} を得る。
- (4) 電動雲台座標系で表されたマーカの3次元位置ベクトル T_{sm} を以下の式で求める。

$$T_{sm} = R_z(s_{pan})R_y(s_{tilt})D_r \quad (3.6)$$

ただし、 $D_r = (d_{lm}, 0, 0)$ とし、 $R_y(\alpha)$ 、 $R_z(\beta)$ は、それぞれ、y 軸を中心に α 、z 軸を中心に β 回転させる回転行列である。

3.3.5 マーカの位置を世界座標系に変換するアルゴリズム

本アルゴリズムは、3.3.4 項のアルゴリズムにより得られた電動雲台座標系で表されたマーカの3次元位置を、世界座標系で表されたマーカの3次元位置に変換するアルゴリズムである。このアルゴリズムを実行するにあたり、計測対象となるマーカに加え、1 番のマーカと、2 番から 4 番の 3 つのマーカのうちの 2 つが環境に貼り付けられているものとする。本アルゴリズムのフローチャートを図 3.9 に示し、その詳細を以下に示す。

- (1) 3.3.4 項のアルゴリズムを用いて、変換対象のマーカの3次元位置 T_{SM_i} および、1 番から 3 番のマーカの3次元位置 T_{SM_1} 、 T_{SM_2} 、 T_{SM_3} を得る。
- (2) 電動雲台座標系で表された世界座標系の X, Y, Z 軸方向の単位ベクトル X_u, Y_u, Z_u を以下の式で求める。

$$X_u = T_{SM_2} - T_{SM_1} \quad (3.7)$$

$$Y_u = T_{SM_3} - T_{SM_1} \quad (3.8)$$

$$Z_u = X_u \times Y_u \quad (3.9)$$

- (3) 電動雲台座標系から世界座標系への回転行列 R_{sw} を以下の式で求める。

$$R_{sw} = [X_u^T Y_u^T Z_u^T] \quad (3.10)$$

- (4) 電動雲台座標系で表された電動雲台の3次元位置 S_w を以下の式で求める。

$$S_w = -R_{sw}T_{SM_1} \quad (3.11)$$

(5) 電動雲台座標系から世界座標系への変換行列 T_{sw}^{44} を以下の式で求める。

$$T_{sw}^{44} = \begin{bmatrix} R_{sw} & T_{SM_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

(6) 以下の式により、電動雲台座標系で表されたマーカの3次元位置を、世界座標系で表されたマーカの3次元位置に変換する。

$$\begin{bmatrix} T_{WM_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{sw}^{44} \begin{bmatrix} T_{SM_i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

3.3.6 1つのマーカの位置を自動的に計測するアルゴリズム

本アルゴリズムは、カメラに円形マーカが写っている状態で、そのマーカの世界座標系で表された3次元位置を自動的に計測するアルゴリズムである。本アルゴリズムのフローチャートを図 3.10 に示し、その詳細を以下に示す。

- (1) 3.3.3項のアルゴリズムを実行し、カメラ座標系で表されたマーカのパン・チルト方向を求める。
- (2) (1) で求めたマーカのパン・チルト方向の情報を用いて、マーカがカメラの中心に写るようにカメラの方向を調整する。
- (3) (1) で求めた電動雲台座標系で表されたマーカの3次元位置ベクトル $T_{SM_i} = (x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i})$ から、以下の式を用いて電動雲台座標系で表されたマーカのパン方向 m_{pan_s} 、チルト方向 m_{tilt_s} を求める。

$$m_{pan_s} = \arctan(y_{s_i}/x_{s_i}) \quad (3.14)$$

$$m_{tilt_s} = \frac{z_{s_i}}{\sqrt{x_{s_i}^2 + y_{s_i}^2}} \quad (3.15)$$

- (4) (3) で求めたマーカのパン・チルト方向を用いて、レーザ計測器をマーカの方角に向ける。これは、レーザ計測器がこれから計測するマーカの方角とは違う方角に向いている場合に、レーザ計測器がカメラの視野を遮ることを避ける為である。ただし、前述の様に、カメラのみを用いて求めたマーカの3次元位置には比較的大きな誤差が含まれるため、この時点でレーザを照射しても、マーカの中心から離れた位置にレーザが照射される可能性が高い。

- (5) マーカのカメラ画像上での半径が、カメラの縦方向の解像度の 35%になるようにカメラの焦点距離を調整する。その際の焦点距離 $f_{35\%}$ は、以下の式で近似的に求めることができる。

$$f_{35\%} = f \frac{0.35h_{reso}}{a} \quad (3.16)$$

ただし、 f を、(1) でマーカを認識した際の焦点距離、 a をその時のマーカのカメラ画像上での長軸半径（マーカを楕円として見たときの長い方の半径）、 h_{reso} をカメラの縦方向の解像度とする。

- (6) (1) と (2) を繰り返し、マーカがカメラの中心に写るようにカメラの方向を調整する。これは、カメラの焦点距離を変えることにより、マーカのカメラ画像上での位置が、中心からずれる可能性がある為である。
- (7) 再度 (1) を実行し、より精度の高い電動雲台座標系で表されたマーカの 3次元位置ベクトルを求める。この時に、認識したマーカの中心座標 (x_c, y_c) と短軸半径（マーカを楕円として見たときの短い方の半径） b を残しておく。
- (8) (3) と (4) を繰り返し、レーザ距離計測器をマーカの方角に向ける。これにより、前回 (4) を実行した時に比べ、より正確な方向にレーザ距離計測器を向けることができる。
- (9) カメラのシャッタースピードを短くして、カメラ画像の全体的な明るさを下げる。
- (10) レーザ距離計測器のレーザ照射を OFF にする。
- (11) 現在のカメラ画像を保存する。得た画像を I_{org} とする。
- (12) レーザ距離計測器のレーザ照射を ON にする。
- (13) 現在のカメラ画像を保存する。得た画像を I_{laser} とする。
- (14) I_{org} と I_{laser} の差分を取り、予め定めた閾値よりも大きい画素を求め、その画素の面積 S を求める。
- (15) S が予め定めた閾値よりも小さい場合はカメラ画像にレーザの照射が映っていないと判断し (16) へ。 S が予め定めた閾値よりも大きくなった場合は (17) へ。

- (16) レーザの方向をマーカが存在すると思われる方向を中心に回転させながら、(10)から(15)を繰り返す。ただし、この繰り返し回数が規定の回数を超えた時点で、自動計測が失敗したと判断する。
- (17) (14)の差分のカメラ画像上での重心座標 $G = (x_G, y_G)$ を求める。
- (18) 重心座標 G と (7) で認識したマーカのカメラ画像上での位置 (x_c, y_c) の差のベクトルを計算し、その長さが (7) で認識したマーカのカメラ画像上での短軸半径 b の 1.5 倍よりも小さい場合は (19) へ。大きい場合は (16) へ。
- (19) (18) で求めたベクトルの長さが、予め定めた閾値 (例えば 2pixel) よりも小さい場合は、レーザがマーカの中心に照射されていると判断し (21) へ。
- (20) (18) で求めたベクトルを用いて、レーザ距離計測器をマーカの中心方向へ調整し、(10) へ。レーザ距離計測器を向けるべき方向は以下の式で求められる。

$$s_{pan} = s_{pan_o} + (v_h/w_{reso})(x_G - x_c) \quad (3.17)$$

$$s_{tilt} = s_{tilt_o} + (v_h/w_{reso})(y_G - y_c) \quad (3.18)$$

ただし、 v_h は、(7) の時点でのカメラの水平方向の半画角、 s_{pan_o} 、 s_{tilt_o} は、(13) の時点でのレーザ距離計測器のパン・チルトである。

- (21) 3.3.4 項のアルゴリズムを用いて、マーカの正確な 3 次元位置を求める。

なお、(15)において、レーザの照射位置を認識した際に、直接(20)へ行かず、(18)の様に、レーザの照射位置とマーカの中心位置の距離がマーカのカメラ画像上での短軸半径の 1.5 倍よりも小さい時のみ(20)へ行くのは、マーカを貼り付ける環境は、必ずしも平面ではなく、凹凸があり、カメラ画像上に投影された後のマーカとレーザ照射位置の関係だけでは、レーザ照射方向をどの方向に修正すれば、マーカの中心に調整できるかを知ることができない為である。レーザの照射位置とマーカの中心位置の距離がマーカのカメラ画像上での短軸半径の 1.5 倍よりも小さい場合は、レーザは既にマーカ上に照射していると判断でき、マーカは必ず平面であるため、(20)により、必ずレーザの照射位置をマーカの中心に近い方に調整できる。ここで、短軸半径の 1.0 倍ではなく、1.5 倍としたのは、円形マーカの周りには空白の領域があり、その領域も平面である為である。

3.3.7 全てのマーカの位置を自動的に計測するアルゴリズム

本アルゴリズムは、カメラで撮影可能な全てのマーカの世界座標系で表された3次元位置を全自動で計測するアルゴリズムである。基本方針としては、図3.11に示すように、全ての方向を1回は撮影する様にカメラのパン・チルト方向を一定の角度間隔で回転させ、その際に3.3.3項のアルゴリズムを用いてマーカの3次元位置を計測することにより、環境内に存在するカメラで撮影可能なマーカの全ての3次元位置を計測し、その後、3.3.6項のアルゴリズムを用いて個々のマーカの正確な3次元位置を計測することにする。しかし、最初の全ての方向を撮影する際のカメラの焦点距離をどのように設定するかが問題となる。すなわち、短い焦点距離で全ての方向を撮影すると、カメラから遠い位置にあるマーカを撮影する際に、カメラ画像上のマーカの大きさが非常に小さくなり、マーカとして認識できなくなる可能性がある。一方、長い焦点距離で全ての方向を撮影すると、カメラから近い位置にあるマーカを撮影する際に、カメラ画像上のマーカの大きさが非常に大きくなり、カメラの視野からマーカがはみ出し、マーカとして認識できなくなる可能性がある。従って、カメラから様々な距離に配置されたマーカを、一種類の焦点距離に設定したカメラで全て認識することは不可能である。従って、様々な距離に存在するマーカを計測するためには、焦点距離を何段階か変化させて、繰り返し全ての方向を撮影する必要がある。しかし、カメラで制御可能な全ての焦点距離について繰り返し全ての方向を撮影すると、非常に長い時間が必要となるため、本研究では、焦点距離をカメラで設定可能な最も短い値に設定した場合と、その2倍および3倍の焦点距離に設定した場合の3段階に変化させた場合で、繰り返し全ての方向を撮影することにした。

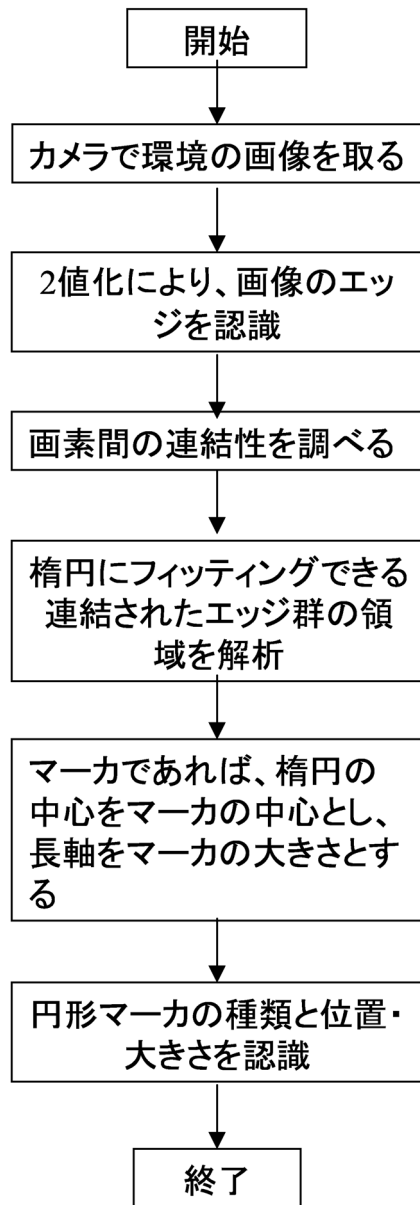


図 3.6: マーカを認識するフロー

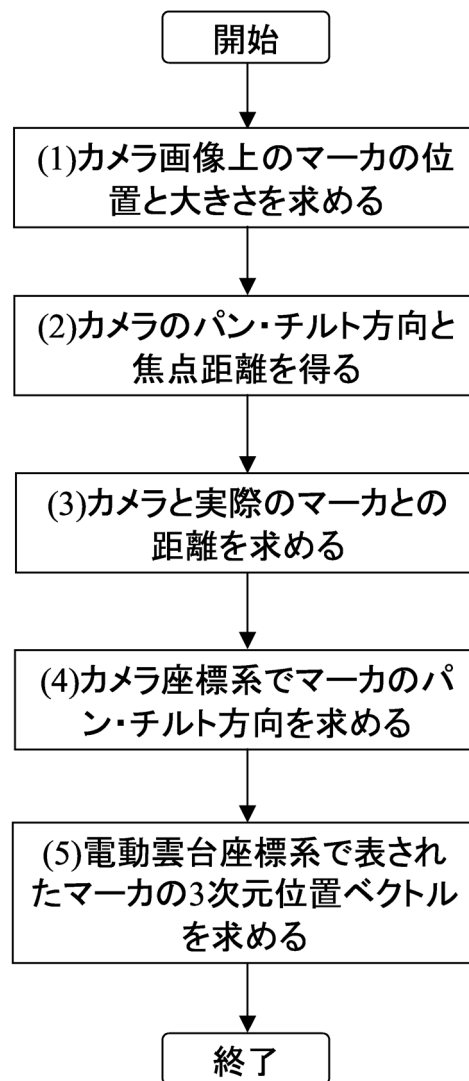


図 3.7: カメラ座標系でマーカの位置を求めるフロー

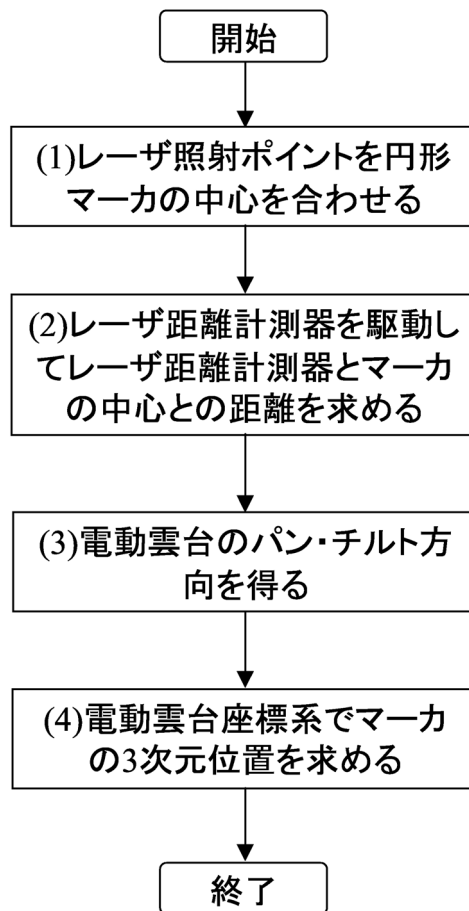


図 3.8: マーカの 3 次元位置を計測するフロー

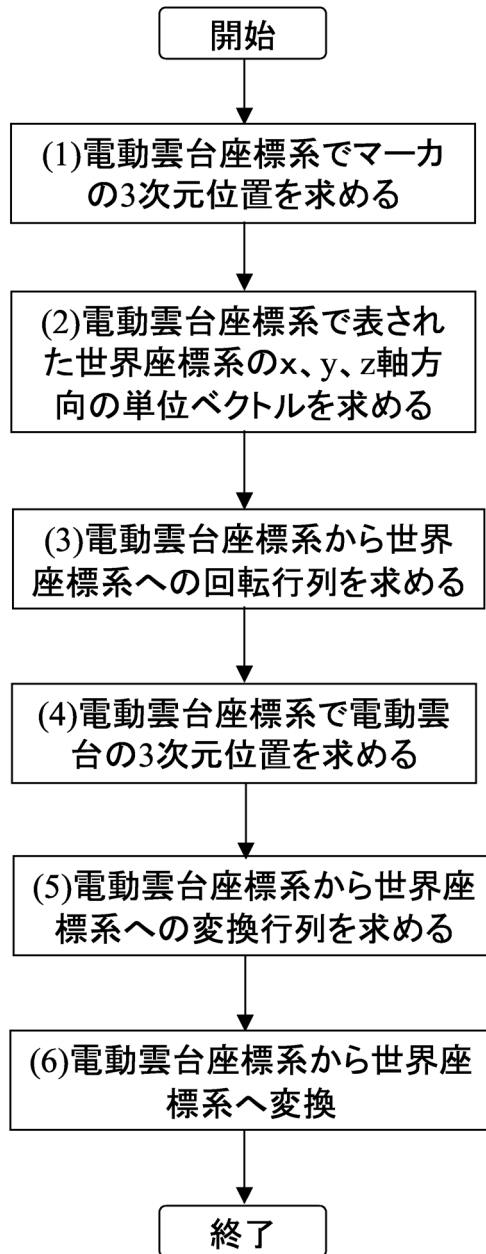


図 3.9: 電動雲台座標系から世界座標系までの変換フロー

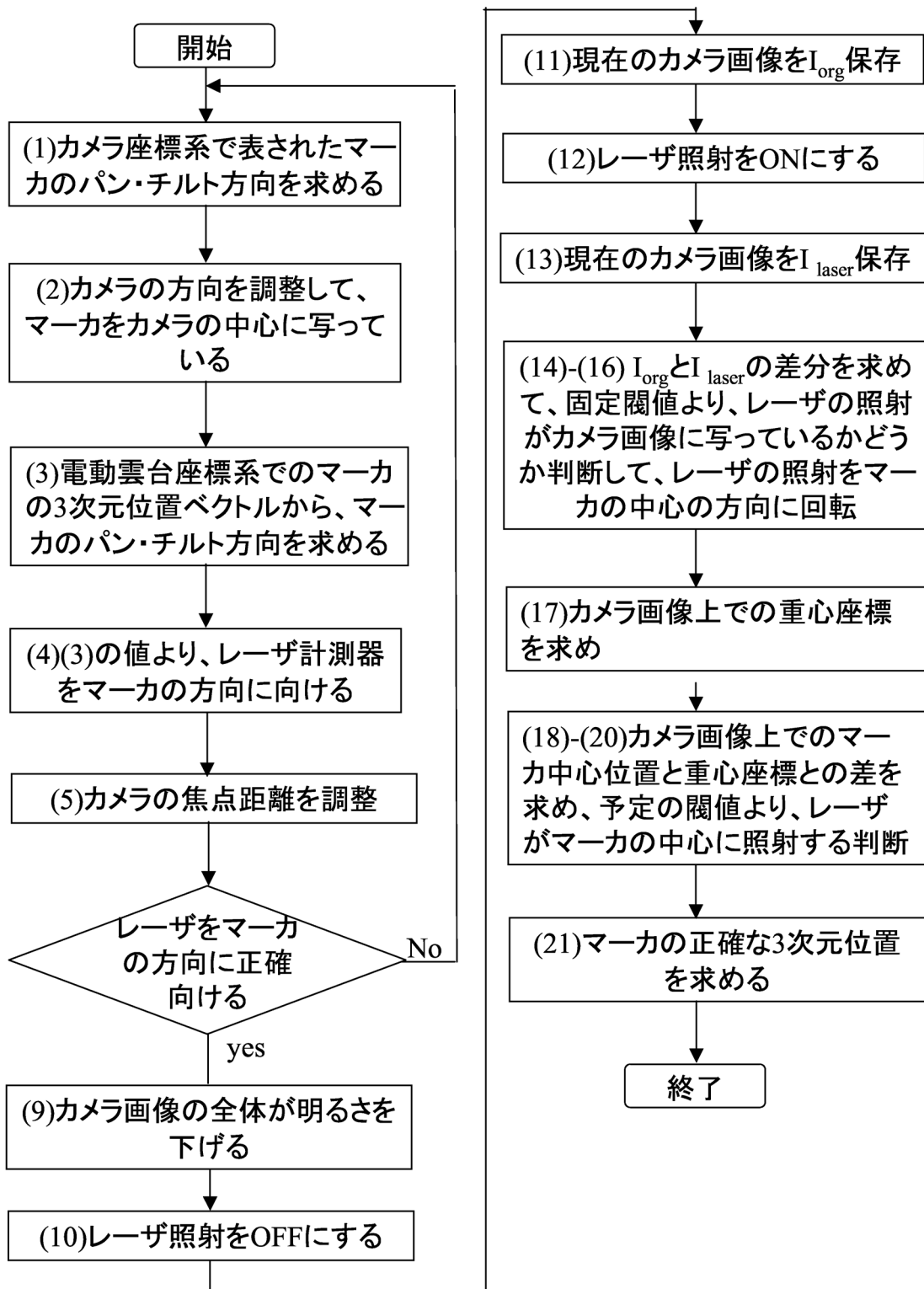


図 3.10: 単一マーカの3次元位置の自動計測フロー

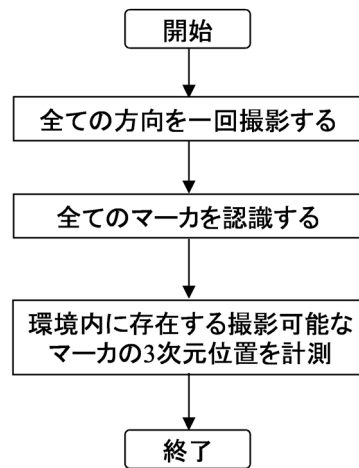


図 3.11: 撮影可能な全ての円形マーカの3次元位置を自動計測フロー

第 4 章 開発した MAMS の構成と使用方法

本章では、本研究で開発した MAMS のハードウェア構成及びソフトウェア構成について述べ、MAMS の使用方法を説明する。

4.1 ハードウェア構成

本研究で開発した MAMS の外観を図 4.1 に示す。レーザ距離計測器とビデオカメラを図 4.2、図 4.3 に示す。また、図 4.4 に MASS のハードウェア構成図を示す。



図 4.1: 開発したマーカ自動計測システムの外観

電動雲台とカメラは約 30cm 間隔を空けて、金属性の角材に固定され、更に、レーザ



図 4.2: レーザ距離計測器の外観



図 4.3: ビデオカメラの外観

距離計測器は電動雲台に固定されている (電動雲台とカメラは水平面を平行にし、初期化時に、カメラとレーザ距離計測器が共に前方を向くように固定する)。

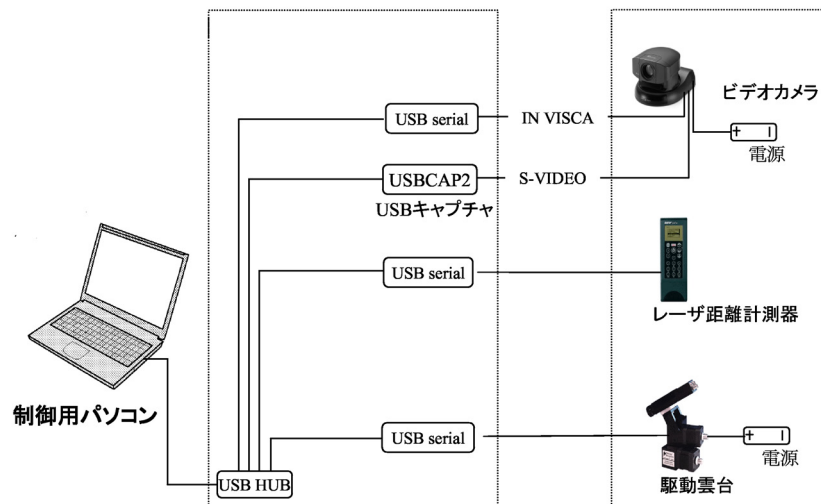


図 4.4: MAMS のハードウェア構成

本システムでは、ビデオカメラが撮影した画像を、USB キャプチャを介して制御用パソコン (ノート PC) に取り込む。その画像をノート PC が処理し、マーカを認識し、ノート PC のディスプレイに出力する。カメラ、レーザ距離計測器、電動雲台の制御信号線は USB シリアル変換ケーブルを介して制御用パソコンに連続される。表 4.1 に MAMS を構成するハードウェアを示す。また、レーザ距離計測器、電動雲台、ビデオカメラ、制御用パソコンの仕様を表 4.2、表 4.3 及び表 4.4 に示す。実験用計測機器の費用については表 4.5 に示す。

表 4.1: 実験用システムで使用したハードウェアの一覧

ハードウェア	メーカー	型名
電動雲台	Directedperception	PTU-D46-17
ビデオカメラ	SONY	EVI-D30
レーザー距離計測器	Leica Geosystems	DISTO TM pro 4a
制御用パソコン	ASUS	ASUS M5N
USB - シリアル変換	ARVEL	SRC06-USB
USB HUB	GREENHOUSE	GH-UHK204BW
USB ビデオキャプチャ	I-O DATA	USB-CAP2
三脚	VELBON JAPAN	PH - 360NC

表 4.2: レーザ距離計測器及び電動雲台の主な仕様

レーザー距離計測器	型番	DISTO pro 4a
	測定精度	標準: $\pm 1.5\text{mm}$ / 最大: $\pm 2\text{mm}$
	最小表示単位	1mm
	測定範囲	0.3m - 100m 以上
	レーザー波長	635nm
電動雲台	型番	PTU-D46-17
	耐加重量	2.72kg
	分解能	0.051428°
	最高速度	$300^\circ/\text{秒}$

表 4.3: ビデオカメラの主な仕様

寸法	高さ 109 × 幅 142 × 奥行 164[mm]
質量	1.2kg
映像信号	NTSC
レンズ	電動 12 倍ズームレンズ $f = 5.4 \sim 64.8\text{mm}$ $F=1.8 \sim 2.7$ 水平画角 $4.4 \sim 48.8[\text{deg}]$
パン・チルト機能	水平 $\pm 100\text{deg}$ 、垂直 $\pm 25\text{deg}$
コントロール端子	RS-232C

表 4.4: 制御用パソコンの仕様と USB ビデオキャプチャの仕様

制御用パソコン	型番	ASUS 社 M5N	
	CPU	Intel Pentium M1.4GHz	
	メモリ	DDR333 768MB	
	ビデオシステム	Embedded Intel 855GME internal graphics	
USB ビデオ キャプチャ	型番	I-O DATA の USB-CAP2	
	ビデオ入力	S ビデオ× 1、NTSC コンポジット× 1	
	ビデオフォーマット	RGB16bit, RGB24bit, YUV422, YUV12	
	フレームサイズ (動画)	Video Recorder DS:MAX	352 × 288
		Vidio Recorder:MAX	352 × 288
Holds Sight:		320 × 240	

表 4.5: 使用した各ハードウェアの数量と単価

ハードウェア	メーカー	型名	数量	単価 (円)
駆動雲台	Directedperception	PTU-D46-17	1 台	298,000.-
ビデオカメラ	SONY	EVI-D30	1 台	220,000.-
レーザ距離計測器	Leica Geosystems	DISTO TM pro 4a	1 台	150,000.-
制御用パソコン	ASUS	ASUS M5N	1 台	100,000.-
USB-シリアル変換	ARVEL	SRC06-USB	3 本	2,378.-
USB HUB	GREENHOUSE	GH-UHK204BW	1 台	780.-
USB ビデオキャプチャ	I-O DATA	USB-CAP2	1 本	14,800.-
三脚	VELBON JAPAN	PH-360NC	1 台	37,800
合計 :				828,514.-

4.2 ソフトウェア構成

4.1 節で述べたハードウェアを制御するプログラム及びユーザが使用するインタフェースは Microsoft Visual C++ Studio 2005 を使用して開発した。開発したシステムは Microsoft Windows 上で動作する。DirectShow でビデオキャプチャを行う為、Microsoft DirectX 8 SDK、もしくは、より新しい SDK をインストールする必要がある。図 4.5 に開発した MAMS のインタフェース画面を示す。インタフェース画面は、①カメラ画像表示インタフェース、②マーカ位置自動計測インタフェース、③カメラ制御インタフェース、④レーザ距離計測器制御インタフェース、⑤マーカ計測状態表示インタフェース、⑥手動マーカ位置計測インタフェース、⑦システム動作記録、および⑧その他のインタフェースで構成される。各インタフェースの詳細を表 4.6 と表 4.7 に示す。

4.2.1 カメラ画像表示インタフェース

カメラ画像表示インタフェースには、現在カメラで撮影されている映像が表示され、システムが円形マーカを認識している時には、認識したマーカの輪郭が緑色の線で描かれると共に、マーカの中心にマーカの番号が表示される。

4.2.2 マーカ位置自動計測インタフェース

マーカ位置自動計測インタフェースは、以下の 8 個のボタンで構成される。

- 「全自動」 ボタン

このボタンを押すと、MAMS の周りに貼り付けられた全ての円形マーカの 3 次元位置を自動的に計測する。具体的には、カメラの焦点距離を 7.0mm に設定し、カメラのパン・チルト方向を一定間隔で変化させながらマーカを認識する。その後、焦点距離を 14.0mm、21.0mm に設定して同様の認識を繰り返し、認識したマーカの 3 次元位置をレーザ距離計測器で自動的に計測する。この機能を実行中は、ボタンの色が赤色に変わる。

- 「全自動 (距離 1m 程度)」 ボタン

このボタンを押すと、MAMS から 1m 程度離れた位置に貼り付けられた円形マーカの 3 次元位置を自動的に計測する。具体的には、カメラの焦点距離を 7.0mm に設定し、カメラのパン・チルト方向を一定間隔で変化させながらマーカを認識し、

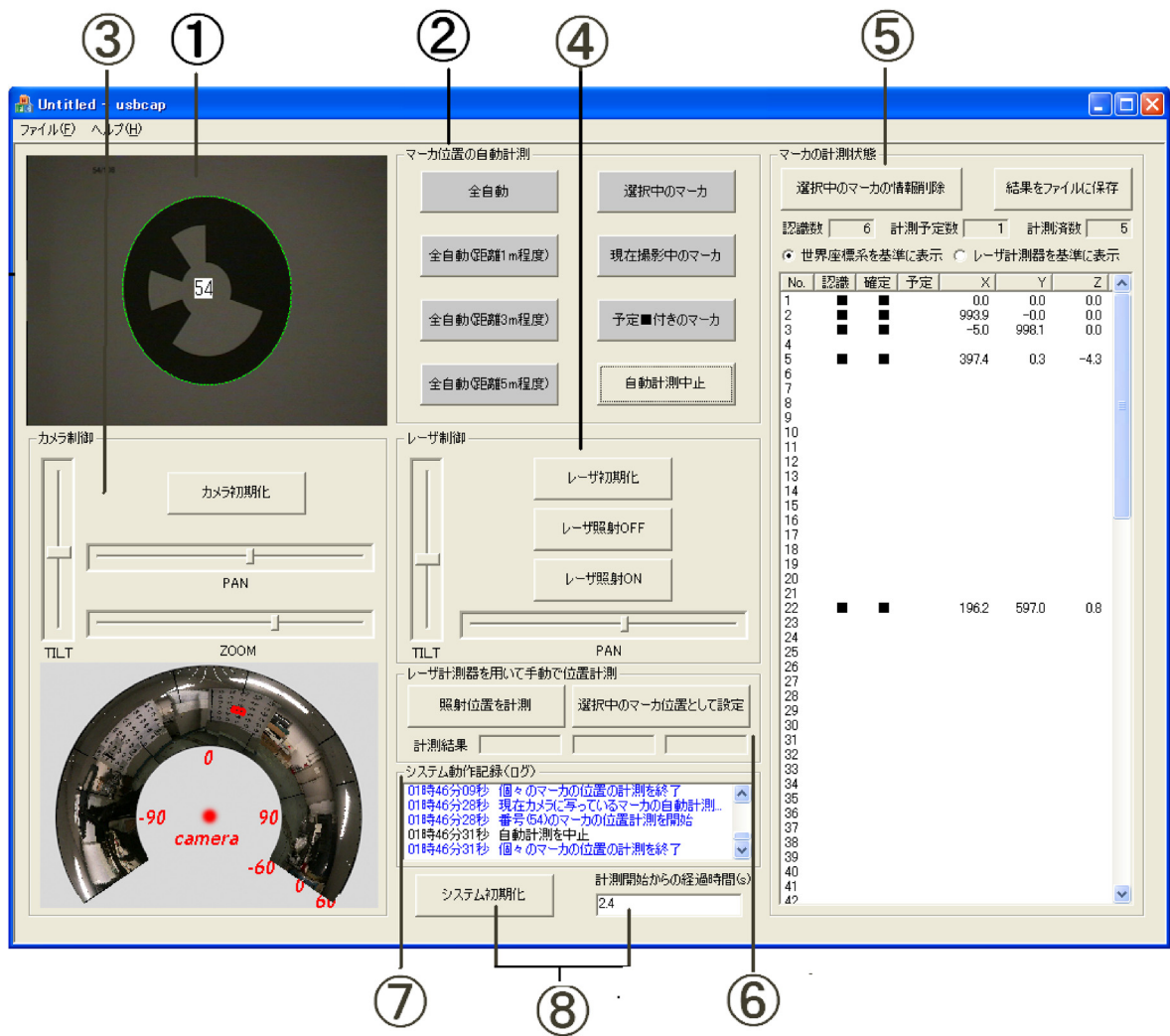


図 4.5: MAMS インタフェース画面例

その後、認識したマーカの3次元位置をレーザ距離計測器で自動的に計測する。
この機能を実行中は、ボタンの色が赤色に変わる。

- 「全自動(距離3m程度)」ボタン

このボタンを押すと、MAMSから3m程度離れた位置に貼り付けられた円形マーカの3次元位置を自動的に計測する。具体的には、カメラの焦点距離を14.0mmに設定し、カメラのパン・チルト方向を一定間隔で変化させながらマーカを認識し、その後、認識したマーカの3次元位置をレーザ距離計測器で自動的に計測する。この機能を実行中は、ボタンの色が赤色に変わる。

- 「全自動(距離5m程度)」ボタン

このボタンを押すと、MAMSから5m程度離れた位置に貼り付けられた円形マーカの3次元位置を自動的に計測する。具体的には、カメラの焦点距離を21.0mmに設定し、カメラのパン・チルト方向を一定間隔で変化させながらマーカを認識し、その後、認識したマーカの3次元位置をレーザ距離計測器で自動的に計測する。この機能を実行中は、ボタンの色が赤色に変わる。

- 「選択中のマーカ」ボタン

このボタンを押すと、マーカ計測状態表示インタフェース内のマーカリストで選択中のマーカの3次元位置を、自動的にレーザ距離計測器で計測する。この機能を使用するには、マーカが画面に映っている必要は無いが、MAMSが過去にマーカを認識し、マーカリストの「認識」項目に「■」が付いていなければならない。この機能を実行中は、ボタンの色が赤色に変わる。

- 「現在撮影中のマーカ」ボタン

このボタンを押すと、現在カメラに写っていて認識されている全てのマーカの3次元位置をレーザ距離計測器で自動的に計測する。この機能を実行中は、ボタンの色が赤色に変わる。

- 「予定■付きのマーカ」ボタン

このボタンを押すと、マーカ計測状態表示インタフェース内のマーカリストの「予定」項目に「■」が付いている全てのマーカの3次元位置をレーザ距離計測器で自動的に計測する。この機能を実行中は、ボタンの色が赤色に変わる。

- 「自動計測中止」 ボタン

このボタンを押すと、上記7つのボタンを操作して実行中の自動計測を中止する。

4.2.3 カメラ制御インターフェース

カメラ制御インターフェースは、カメラ PAN 制御スライドバー、カメラ TILT 制御スライドバー、カメラ焦点距離制御スライドバー、アングルマップ、「カメラ初期化」ボタンで構成される。

- カメラ PAN 制御スライドバー

このスライドバーを動かすことにより、カメラを左右に回転させることができる。

- カメラ TILT 制御スライドバー

このスライドバーを動かすことにより、カメラを上下に回転させることができる。

- カメラ焦点距離制御スライドバー

このスライドバーを動かすことにより、カメラの焦点距離を調整することができる。(カメラのズームを調整できる)

- アングルマップ

カメラが現在写している範囲を赤い枠で表示する。また、アングルマップ上の点をクリックすると、カメラの撮影の中心方向が、クリックした点に対応する方向に調整される。

- 「カメラ初期化」 ボタン

このボタンを押すと、カメラのシャッタースピード、焦点距離、方向をシステムの起動時の状態に戻すことができる。

4.2.4 レーザ距離計測器制御インターフェース

レーザ距離計測器制御インターフェースは、レーザ PAN 制御スライドバー、レーザ TILT 制御スライドバー、「レーザ初期化」ボタン、「レーザ照射 ON」ボタン、「レーザ照射 OFF」ボタン、で構成される。

- レーザ PAN 制御スライドバー

このスライドバーを動かすことにより、レーザ距離計測器を左右に回転させることができる。

- レーザ TILT 制御スライドバー

このスライドバーを動かすことにより、レーザ距離計測器を上下に回転させることができる。

- 「レーザ初期化」ボタン

このボタンを押すと、レーザ距離計測器の方向をシステムの起動時の状態に戻すことができる。

- 「レーザ照射 ON」ボタン

このボタンを押すと、レーザ距離計測器からレーザが照射される。

- 「レーザ照射 OFF」ボタン

このボタンを押すと、レーザ距離計測器の照射が止まる。

4.2.5 マーカ計測状態表示インタフェース

マーカ計測状態表示インタフェースは、マーカの計測状態一覧表、「選択中のマーカの情報削除」ボタン、「結果をファイルに保存」ボタン、計測結果表示モード切替ラジオボタン、認識済マーカ総数表示欄、計測予定マーカ総数表示欄、計測済マーカ総数表示欄で構成される。

- マーカの計測状態一覧表

マーカの計測状態一覧表には、円形マーカの個々の計測状態が一覧で表示される。個々のマーカ毎に表示される項目は以下の通りである。

- No.

各行の情報が、どの番号のマーカの情報であることを示す。

- 認識

システムが該当するマーカの存在を認識しているか否かを示す。「■」が表示されていれば、そのマーカが環境に存在しており、システムが既に認識して

いることを示す。ただし、この場合でも、該当するマーカの3次元位置が既に計測されているとは限らない。「■」が表示されている部分をクリックすることにより、認識の状態を外すこともできる。また、過去に認識の状態になったことがあるときのみ、同じ場所をクリックすることにより、認識の状態にすることができる。

－ 確定

システムが該当するマーカの3次元位置をレーザ距離計測器を使って既に計測したか否かを示す。「■」が表示されていれば、そのマーカの3次元位置は既に計測しており、値が確定している。この場合、自動計測機能を使用しても、そのマーカの3次元位置は計測されない。「■」が表示されている部分をクリックすることにより、確定の状態を外すこともできる。また、過去に確定の状態になったことがあるときのみ、同じ場所をクリックすることにより、確定の状態にすることができる。

－ 予定

システムが該当のマーカを今後、計測する予定であるか否かを示す。「■」が表示されていれば、そのマーカの3次元位置をこれから計測する予定である。「■」が表示されている部分をクリックすることにより、予定の状態を外すこともできる。また、マーカが認識の状態にあるときのみ、同じ場所をクリックすることにより、予定の状態にすることができる。

－ X,Y,Z

該当のマーカの3次元位置の計測結果を示す。この表示は、「計測結果表示モード切替」ラジオボタンを操作することにより、世界座標系を基準に表示するモードと、電動雲台座標系を基準に表示するモードを切り替えることができる。該当するマーカの3次元位置が計測されていない場合は、この項目には何も表示されない。

- 「選択中のマーカの情報削除」ボタン

このボタンを押すと、マーカの計測状態一覧表で選択されているマーカの全ての情報が削除される。

- 「結果をファイルに保存」ボタン

このボタンを押すと、ファイル名と保存先を尋ねるダイアログが表示される。計測結果は、テキストファイルに保存される。

- 「計測結果表示モード切替」ラジオボタン

このラジオボタンを操作することにより、マーカの計測状態一覧表のマーカの3次元位置の計測結果を、世界座標系を基準に表示するモードと、電動雲台座標系を基準に表示するモードを切り替えることができる。ただし、世界座標系を基準に表示するモードは、システムが、1番から3番までのマーカの3次元位置の計測が終わっている時のみ選択できる。

- 認識済マーカ総数表示欄

現在システムが環境に存在すると認識しているマーカの総数を表示する。マーカの計測状態一覧表の「認識」の項目に「■」が付いているマーカの総数に相当する。

- 計測予定マーカ総数表示欄

システムが今後計測する予定のマーカの総数を表示する。マーカの計測状態一覧表の「予定」の項目に「■」が付いているマーカの総数に相当する。

- 計測済マーカ総数表示欄

システムが既にレーザ距離計測器を用いて3次元位置を計測済みのマーカの総数を表示する。マーカの計測状態一覧表の「確定」の項目に「■」が付いているマーカの総数に相当する。

4.2.6 手動マーカ位置計測インタフェース

手動マーカ位置計測インタフェースは、「照射位置を計測」ボタン、「選択中のマーカの位置として設定」ボタン、計測結果表示で構成される。

- 「照射位置を計測」ボタン

このボタンを押すと、レーザ距離計測器の方向を固定したままで、レーザ距離計測器を駆動し、レーザ照射位置とレーザ距離計測器の間の距離を計測する。結果は、計測結果表示の3つの欄に表示される。

- 「選択中のマーカの位置として設定」ボタン

「照射位置を計測」ボタンを押して得られた結果を、マーカの計測状態一覧表で現在選択されているマーカの3次元位置の計測結果として設定する。

- 計測結果表示

「照射位置を計測」ボタンを押して計測した結果を表示する。

4.2.7 システム動作記録

システム動作記録には、システムの動作の記録が時間と共にテキストで表示される。

4.2.8 その他のインタフェース

前述のインタフェースに加え、MAMSのインタフェースは、「システムの初期化」ボタンと計測開始からの経過時間を表示する欄を備えている。

- 「システムの初期化」ボタン

このボタンを押すと、カメラ、レーザ距離計測器、電動雲台の全てが起動時の状態に戻され、マーカの計測状態一覧表で示しているマーカの計測結果や現在の状態等の情報が全て消去される。

- 計測開始からの経過時間を表示する欄

本表示領域には、マーカの3次元位置の自動計測を開始してからの経過時間が表示される。

4.3 MAMSを用いてマーカの3次元位置を計測する方法

本節では開発したMAMSを用いてマーカの3次元位置を計測する方法について述べる。MAMSを用いてマーカを計測する方法には、1. 環境に貼り付けられた全てのマーカを自動的に計測する方法、2. MAMSからある範囲の距離だけ離れたマーカを自動的に計測する方法、3. 個々のマーカを半自動的に計測する方法の3つの方法がある。

4.3.1 環境に貼り付けられた全てのマーカを自動的に計測する方法

環境に貼り付けられた全てのマーカを自動的に計測する際の手順を図 4.6 に示す。環境に貼り付けられた全てのマーカを自動的に計測する際には、ユーザは、1 番から 3 番の 3 つのマーカをそれぞれ、世界座標系の原点、X 軸上の点、Y 軸上の点に貼り付け、その他のマーカをトラッキングを実行するのに必要な箇所に貼り付ける。その後、MAMS を貼り付けたマーカが見渡せる場所に設置し、MAMS を制御するソフトウェアを起動する。「全自動」ボタンを押すと 3.3.7 項で述べたアルゴリズムが実行され、環境に貼り付けられた全てのマーカの 3 次元位置が自動的に計測される。計測が終了すると、その旨を知らせるベルが鳴る。ユーザは、「結果をファイルに保存」ボタンを押して結果をファイルに保存する。その後、MAMS を撤去する。

4.3.2 限定された範囲に貼り付けられたマーカを自動的に計測する方法

限定された範囲に貼り付けられたマーカを自動的に計測する際の基本的な手順は、環境に貼り付けられた全てのマーカを自動的に計測する方法と同じであるが、「全自動」ボタンを押す代わりに、「全自動（距離 1m 程度）」ボタン、「全自動（距離 3m 程度）」ボタン、「全自動（距離 5m 程度）」ボタンの内のどれかを押す点が異なる。ユーザは、計測するマーカが、MAMS からどの程度離れて貼付されているかを判断する必要がある。

4.3.3 個々のマーカを半自動的に計測する方法

自動計測中にマーカが何らかの理由で隠蔽された、限定された範囲に貼り付けられたマーカを自動的に計測する方法では全てのマーカを計測できなかった、新たにマーカを追加した等の場合は、本方法により、追加で計測するマーカを個々に指定して半自動的に計測する。個々のマーカを半自動的に計測する方法としては、「選択中のマーカ」ボタンを利用する方法、「現在撮影中のマーカ」ボタンを利用する方法、「予定■付きのマーカ」ボタンを利用する方法、手動マーカ位置計測インタフェースを利用する方法の 4 種類の方法がある。

- 「選択中のマーカ」ボタンを利用する方法

この方法は、マーカの計測状態一覧表で、「認識」に「■」が付いているマーカに対してのみ実行できる。この方法では、マーカの計測状態一覧表から追加で計測したいマーカを選択後、「選択中のマーカ」ボタンを押すと、カメラが自動的に

マーカを認識できる方向と焦点距離に調整され、3.3.6 項で述べたアルゴリズムを用いて 3 次元位置が自動的に計測される。

- 「現在撮影中のマーカ」 ボタンを利用する方法

この方法では、ユーザは、カメラ制御インタフェースを用いて追加で計測するマーカをシステムが認識している状態にした後、「現在撮影中のマーカ」 ボタンを押す。この方法では、カメラで認識されている全てのマーカの 3 次元位置が自動的に計測される。

- 「予定■付きのマーカ」 ボタンを利用する方法

この方法では、ユーザは、マーカの計測状態一覧表で、追加で計測するマーカの「予定」の項目を「■」が付いている状態にした後、「予定■付きのマーカ」 ボタンを押す。この方法では、マーカの計測状態一覧表で「予定」の項目に「■」が付いている全てのマーカが自動的に計測される。

- 手動マーカ位置計測インタフェースを利用する方法

この方法では、カメラや電動雲台、レーザ距離計測器を全て手作業で制御し、マーカの 3 次元位置を計測する。具体的な作業の流れを図 4.7 に示す。

1. 「レーザ照射 ON」 ボタンを押す。
2. アングルマップやカメラ画像表示インタフェース、実際のレーザの照射位置等を見ながら、レーザ制御インタフェースを操作して、追加で計測するマーカの中心にレーザ照射位置を合わせる。
3. 「照射位置を計測」 ボタンを押し、マーカの 3 次元位置を計測する。
4. マーカの計測状態一覧表から、追加で計測したマーカを選択する。
5. 「選択中のマーカの位置として設定」 ボタンを押して、計測結果を一覧表に追加する。

表 4.6: MAMS のインタフェース画面の各部名称と機能の概要①

番号	名称	機能概要	
①	カメラ画像表示インタフェース	カメラでキャプチャしている画面を表示する	
②	マーカ位置 自動計測 インタフェース	全自動	環境に貼り付けられている全てのマーカを全自動で計測する
		全方向 (距離 1m 程度)	MAMS との間の距離がほぼ 1m 程度の場所に貼り付けられているマーカを計測する
		全方向 (距離 3m 程度)	MAMS との間の距離がほぼ 3m 程度の場所に貼り付けられているマーカを計測する
		全方向 (距離 5m 程度)	MAMS との間の距離がほぼ 5m 程度の場所に貼り付けられているマーカを計測する
		現在撮影中のマーカ	カメラに写っているマーカを計測する
		自動計測中止	自動計測を中止する
		予定 ■ 付きのマーカ	⑧ のリスト中で予定の項目に ■ 印が付いている全てのマーカを計測する
		選択中のマーカ	⑧ のリスト中で選択中のマーカを計測する
③	カメラ制御 インタフェース	TILT	カメラを上下に動かす
		PAN	カメラを左右に動かす
		ZOOM	カメラの焦点距離を調整する
		カメラ初期化	カメラの方向と焦点距離をシステム起動時の状態にする
		アングルマップ	カメラが現在写している範囲を示す
④	レーザー距離 計測器制御 インタフェース	TILT	レーザー距離計測器を上下に動かす
		PAN	レーザー距離計測器を左右に動かす
		レーザー初期化	レーザー距離計測器の方向をシステム起動時の状態にする
		レーザー ON	レーザー距離計測器からレーザーを照射する
		レーザー照射 OFF	レーザー計測器のレーザー光の照射を止める

表 4.7: MAMS のインタフェース画面の各部名称と機能の概要②

番号	名称	機能概要	
⑤	マーカ計測	選択マーカのマーカの情報削除	リストで選択したマーカの情報を削除する
	状態表示 インタフェース	結果をファイルに保存	計測結果を保存する
		認識数	認識したマーカの総数
		計測予定数	自動計測で計測する予定マーカの総数
		計測済数	計測したマーカの総数
		世界座標系を基準に表示	マーカの 3 次元位置を世界座標系を基準に表示するモードに切り替える
		レーザ計測器を基準に表示	マーカの 3 次元位置をレーザ距離計測器座標系を基準に表示するモードに切り替える
		No.	マーカの番号
		認識	認識しているかどうか
		確認	計測しているかどうか
		予定	自動計測で計測するかどうか
		マーカ詳細情報表示部	各マーカの詳細な状態を表示する
	x,y,z	マーカの 3 次元位置	
⑥	手動マーカ位置計測 インタフェース	照射位置を計測	レーザ光の照射位置を手動で計測する
		選択中のマーカ位置として設定	⑨計測したマーカの位置をリスト中のマーカの位置をとして設定する
		計測結果	⑨計測したマーカの 3 次元位置 (x,y,z)
⑦	システム動作記録	システムの動作ログを表示する	
⑧	システム初期化ボタン	システムが起動した際の状態に戻す	
	計測開始からの経過時間	自動計測を開始してからの経過時間を表示する	

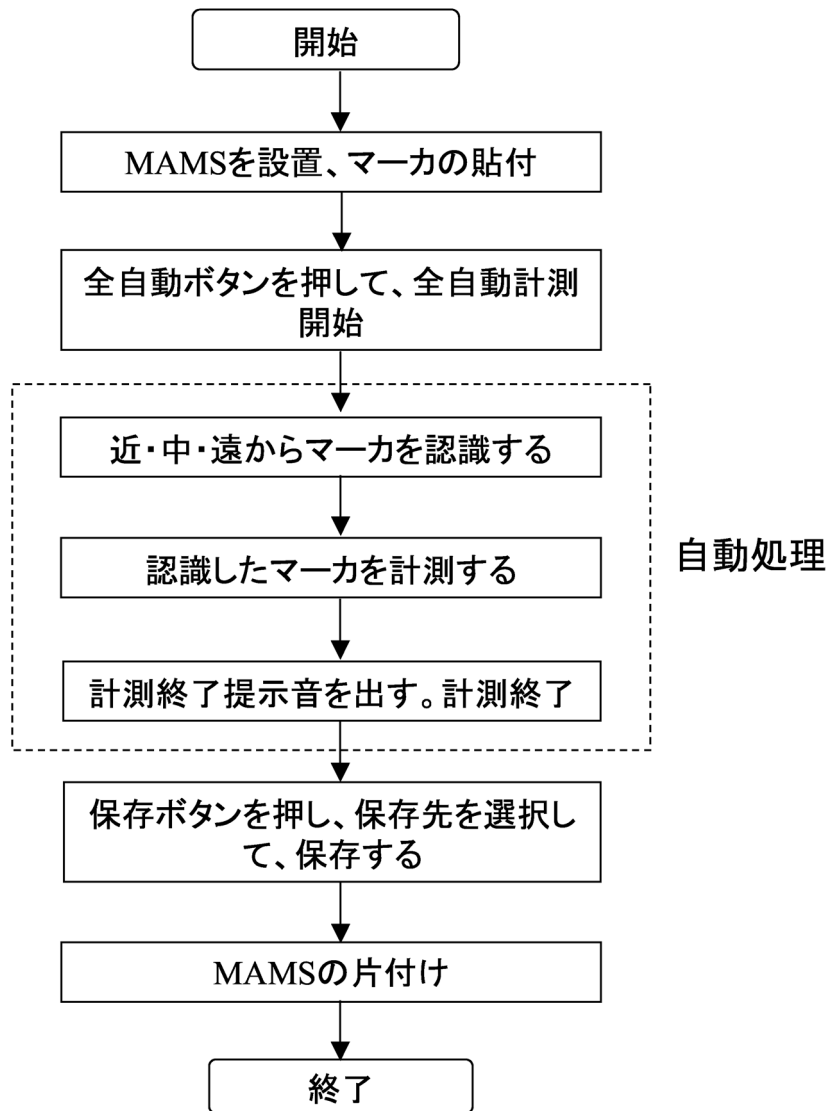


図 4.6: 全自動で計測する場合の手順

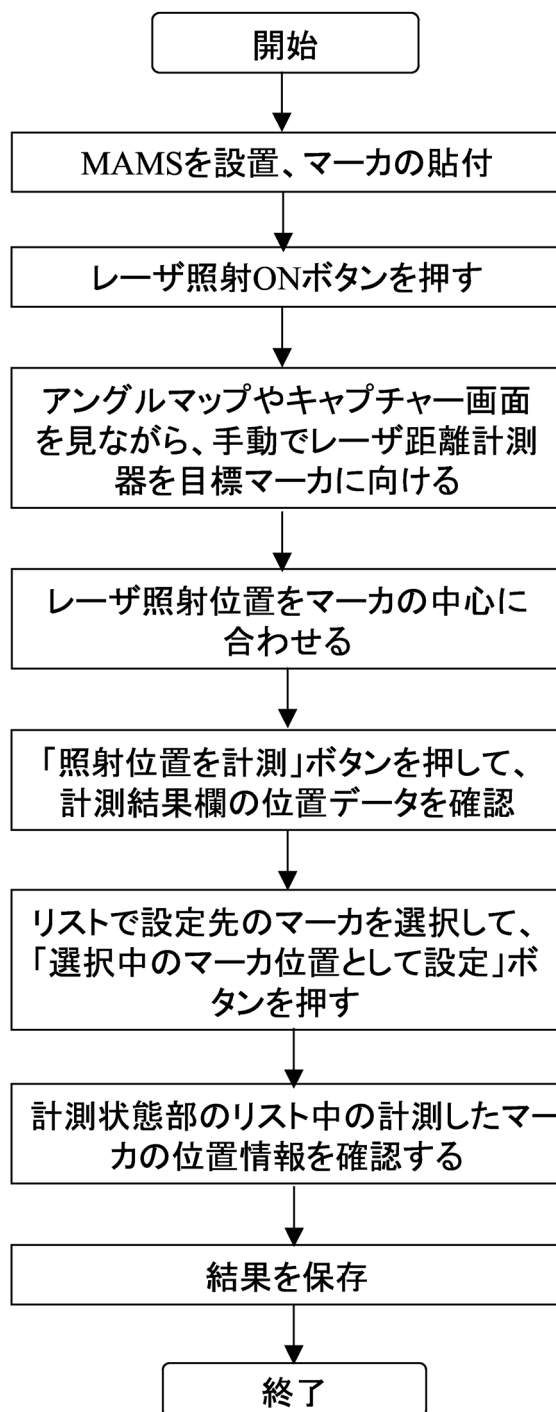


図 4.7: 手作業でマーカを一つだけ計測する場合の手順

第 5 章 実験室環境における MAMS の評価実験

本章では、実験室環境において実施した MAMS の評価実験について述べる。本実験では、正確な 3 次元位置が既に分かっている多数の円形マーカの位置を MAMS を用いて繰り返し計測することにより、MAMS の計測精度、安定性、タスクの完遂時間などを調べた。以下では、実験の目的とその概要について述べた後、続いて実験方法、結果について述べる。最後に、得られた結果について考察する。

5.1 実験の目的

原子力発電プラントにおける保守作業や解体作業を拡張現実感技術を用いて支援する場合、その準備に要する時間と労力は少なくなくてはならない。また、作業間違いを誘発しないようにする為に、拡張現実感技術を用いて提示する情報は正確な位置に表示する必要があり、その為、トラッキングの際に使用するマーカの 3 次元位置の情報は正確である必要がある。そこで本実験では、開発した MAMS の計測精度、安定性、計測に要する時間を評価することを目的とする。

5.2 実験方法

本実験では、実験室内の 3 次元領域に等間隔で設置された多数のマーカを、MAMS を用いて繰り返し計測し、計測に要した時間を測ると同時に、計測結果の系統誤差と偶然誤差を求めることにより、MAMS の計測精度、安定性、計測に要する時間を評価する。

5.2.1 実験環境

実験環境の見取り図を図 5.1 に示す。本実験環境は、研究室の一室に床が平面である 5m 四方の領域を確保して作成した。実験環境には、本研究で開発した MAMS の他に、計測対象となるマーカを多数貼り付けた 2 枚の平面パネル (マーカパネル No.1、マーカパネル No.2) が設置される。パネルのサイズは幅 1.24m、高さ 2.0m である。2 枚のマーカパネルの外観を図 5.2 および図 5.3 に示す。各パネルには、図 5.4 に示すように、

大判プリンタを用いて直径 100mm の円形マーカを、縦横 200mm 間隔で計 36 個印刷した紙を貼り付けた。マーカパネル No.1 の左下のマーカの番号を 1 番、右下のマーカの番号を 2 番、左上のマーカの番号を 3 番とし、他の 69 個マーカ (マーカパネル No.1 の残り 33 個とマーカパネル No.2 の 36 個) は、マーカパネルの左側に右側よりも若い番号、下側に上側よりも若い番号が来る様に順に配置した。なお、マーカは、一番下のマーカの列が、床と平行になる様に貼り付けられ、マーカの一番下の列から床までの距離は 27.5cm であった。

実験環境の世界座標系は、1 番のマーカの中心を原点とし、2 番目のマーカの中心位置を x 軸上の $x=1000\text{mm}$ の点、3 番目のマーカの中心位置を y 軸上の $y=1000\text{mm}$ の点とし、右手系の座標系とした。マーカパネル No.2 の位置は、後述するように、実験の進行に伴い変化させる。

電動雲台とビデオカメラは、長さ約 40cm の金属の角材に、30cm の間隔を空けて固定し、その中間を三脚に固定した。金属の角材と床の間の距離は約 142cm であった。三脚は、ビデオカメラをパン・チルトを変化させれば全てのマーカが撮影できる位置として、図 5.1 に示した様に $(x,z)=(230\text{cm},210\text{cm})$ の位置に置いた。機器を制御するためのパソコンは、三脚の近くに設置した机 (操作台) の上に置いた。部屋の照明は図 5.1 に示した様に天井に設置された蛍光灯だけであった。

5.2.2 実験手順

図 5.5 に示すように、実験は、以下の手順で実施した。

1. マーカパネル No.2 を、パネルの左下のマーカの位置が $(x,y,z)=(2000\text{mm},0\text{mm},400\text{mm})$ 、右下のマーカの位置が $(x,y,z)=(2000\text{mm},0\text{mm},1400\text{mm})$ 、全てのマーカの向きが x 軸負の方向を向くように設置する。
2. 2 枚のマーカパネルの 4 隅のマーカ上の照度 (計 8 箇所) を計測する。
3. MAMS を初期化する (計測情報を全て消去する)。
4. 「全自動 (距離 3m 程度)」の機能を使用して、72 個全てのマーカの 3 次元位置を自動的に計測する。その際、計測開始から終了までに要した時間を記録する。
5. 計測結果をファイルに保存する。
6. 3 から 5 までを 20 回繰り返す。

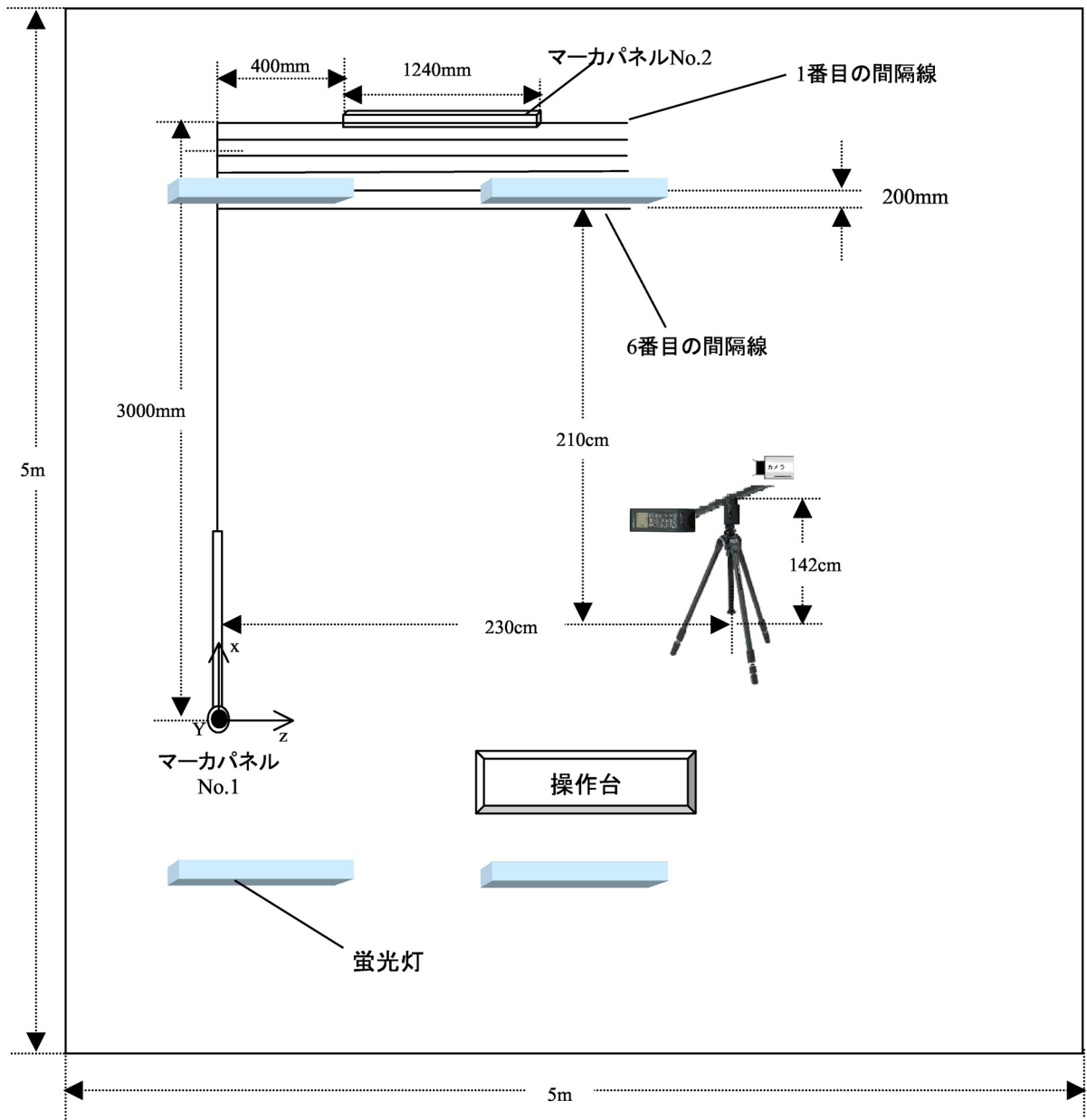


図 5.1: 実験環境の見取り図



図 5.2: マーカパネル No.1 の外観



図 5.3: マーカパネル No.2 の外観

7. 2から6までを、マーカパネルNo.2の位置が、 $x=2000\text{mm}, 2200\text{mm}, 2400\text{mm}, 2600\text{mm}, 2800\text{mm}, 3000\text{mm}$ の全ての場合で実施する。

5.2.3 評価指標

本実験では、MAMSの計測精度を表す指標として系統誤差を、MAMSの計測の安定性を表す指標として偶然誤差を求める。

系統誤差：

ある測定において、同じ方法を用いて繰り返し測定した結果に、真の値に対して系統的にずれて測定される誤差が存在する場合、それを系統誤差と呼ぶ。本研究では、MAMSの計測結果の系統誤差を以下の式で求める。

$$SE = \sqrt{(\bar{x} - x_0)^2 + (\bar{y} - y_0)^2 + (\bar{z} - z_0)^2} \quad (5.1)$$

ただし、 x_0, y_0, z_0 は、マーカの3次元位置の真の値であり、 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ は、マーカの3次元位置の計測結果のx座標値、y座標値、z座標値の平均値である。これらは、以下の式で求められる。

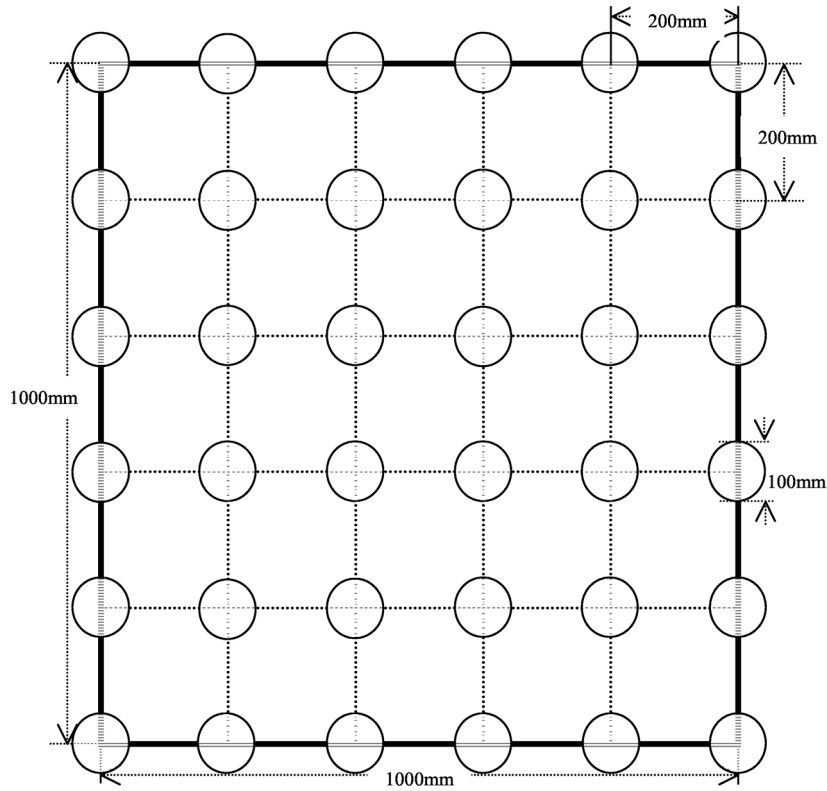


図 5.4: パネル上のマーカの配置

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad ; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad ; \quad \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (5.2)$$

上式において、 n はマーカの計測回数、 x_i 、 y_i 、 z_i はそれぞれ、 i 回目のマーカの 3 次元位置の計測結果の x 座標値、y 座標値、z 座標値である。

偶然誤差 :

ある測定において、同じ方法を用いて繰り返し測定した際の結果のばらつきのことを偶然誤差と呼ぶ。本研究では、MAMS の計測結果の偶然誤差を以下の式で求める。

$$RE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2\}} \quad (5.3)$$

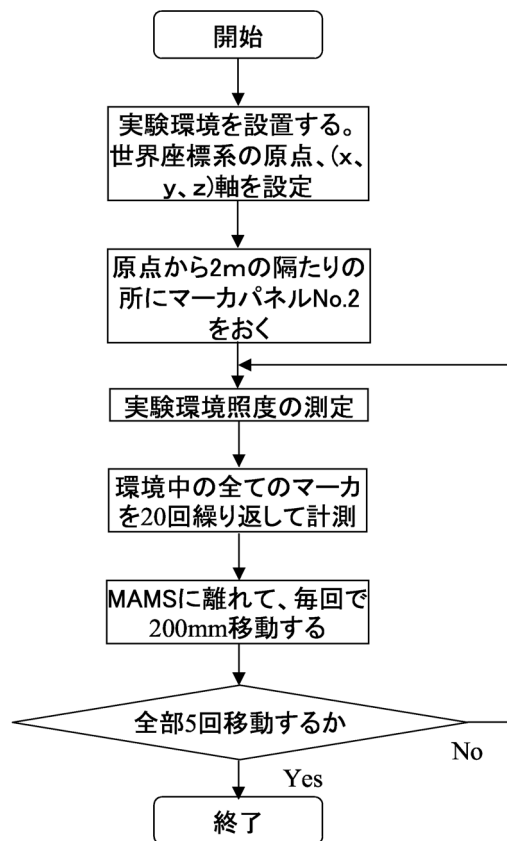


図 5.5: 実験手順

5.3 実験結果

5.3.1 照度の計測結果

表 5.1 に、2 枚のマーカパネルの 4 隅のマーカ上の照度を計測した結果を示す。

表 5.1: 実験環境の照度 (単位 : lux)

マーカパネル No.2 の 位置 (x 座標 : mm)	No.1				No.2			
	左上	左下	右上	右下	左上	左下	右上	右下
2000	170	154	257	258	227	157	550	165
2200	170	154	257	258	1122	281	390	185
2400	170	154	257	258	462	181	1248	219
2600	170	154	257	258	512	216	1070	241
2800	170	154	257	258	465	256	847	272
3000	170	154	257	258	115	132	124	160

5.3.2 計測精度

マーカパネル No.1 上にあるマーカの 3 次元位置を計測した結果の系統誤差を図 5.6 に、マーカパネル No.2 上にあるマーカの 3 次元位置を計測した結果の系統誤差 (x=2000mm, 2200mm, 2400mm, 2600mm, 2800mm, 3000mm の 6 箇所) を図 5.7 に示す。

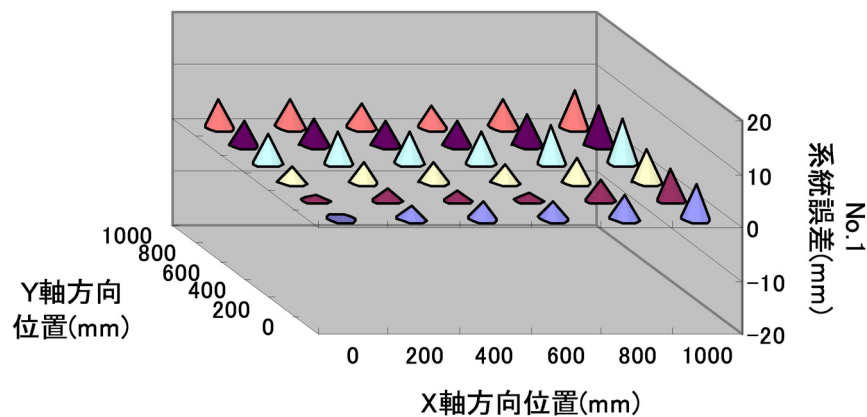


図 5.6: 系統誤差 (マーカパネル No.1)

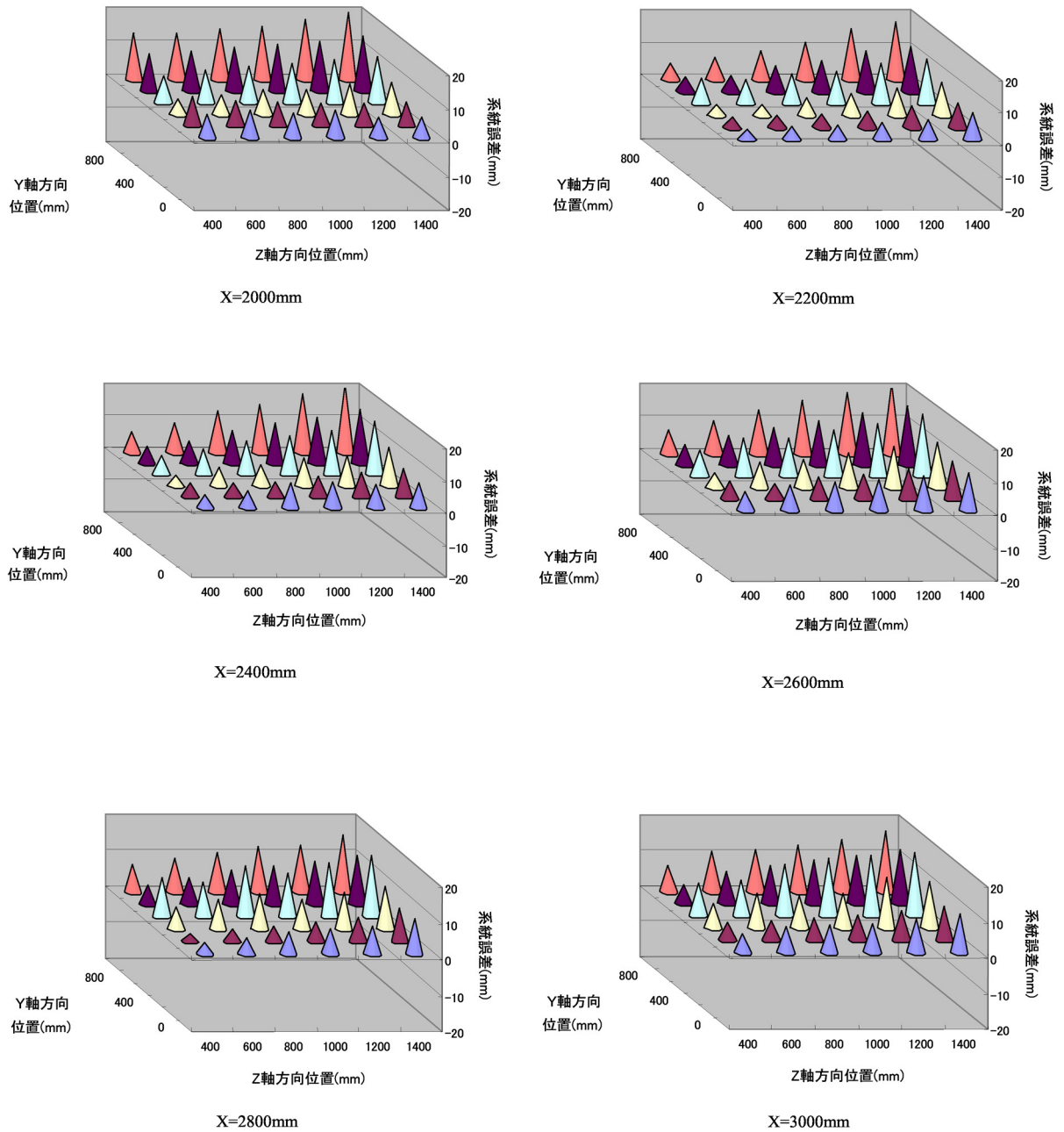


図 5.7: 系統誤差 (マーカパネル No.2)

一方、全 8640 回 (マーカ 72 個×繰り返し 20 回×パネル移動 6 箇所) の計測結果について、結果として得られたマーカの 3 次元位置と、真の 3 次元位置の差 (距離) の最大値は、27.6mm であり、平均値は 7.6mm であった。

5.3.3 計測の安定性

マーカパネル No.1 上にあるマーカの 3 次元位置を計測した結果の偶然誤差を図 5.8 に、マーカパネル No.2 上にあるマーカの 3 次元位置を計測した結果の偶然誤差 (x=2000mm, 2200mm, 2400mm, 2600mm, 2800mm, 3000mm の 6 箇所) を図 5.9 に示す。

一方、計測対象位置全 252 箇所 (マーカパネル No.1 上のマーカの位置 36 箇所+マーカパネル No.2 上のマーカの位置 36 箇所× 6 箇所) での計測結果の標準偏差の最大値は 6.2mm であり、平均値は 3.5mm であった。

また、全 8640 回のマーカの 3 次元位置の計測の内、失敗したのは 1 回であった。この失敗の原因を調べたところ、レーザ距離計測器から距離情報が得られず、MAMS とマーカとの間の距離を 0mm として処理していたことが分かった。本実験では、この失敗を含んだ自動計測のデータは破棄し、再度自動計測を行った。

5.3.4 計測時間

「全自動 (距離 3m 程度)」の機能を使用して、72 個全てのマーカの 3 次元位置を計測するのに要した時間の平均は、25.2 分 (マーカ 1 個あたり 21.0 秒) であった。

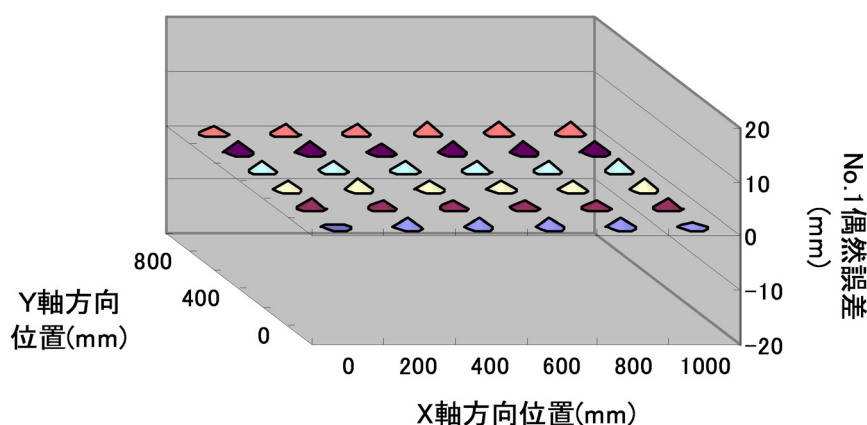
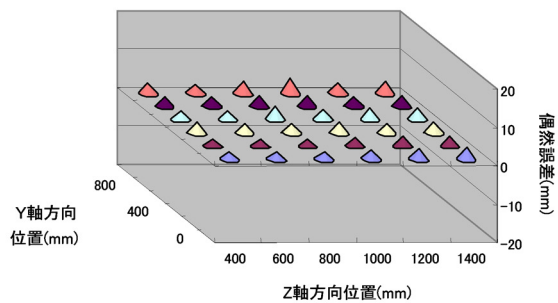
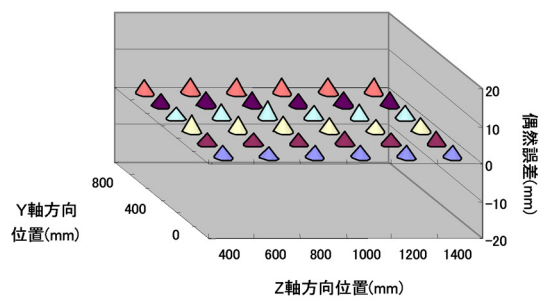


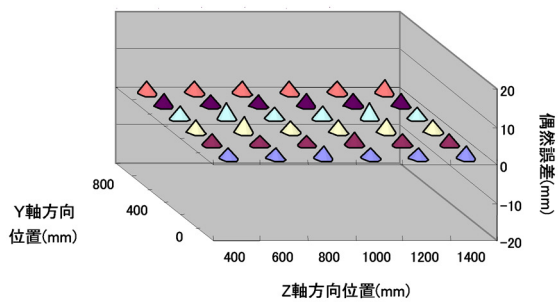
図 5.8: 偶然誤差 (マーカパネル No.1)



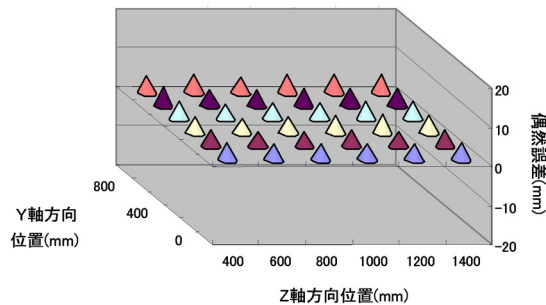
X=2000mm



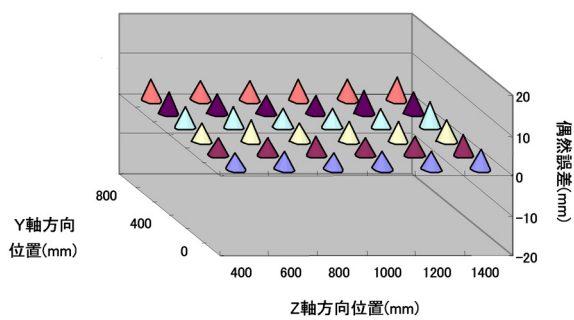
X=2200mm



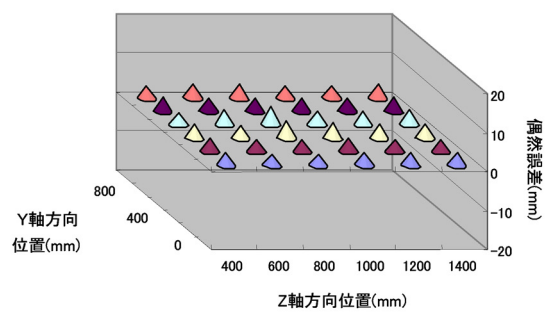
X=2400mm



X=2600mm



X=2800mm



X=3000mm

図 5.9: 偶然誤差 (マーカパネル No.2)

5.4 結果の考察

5.4.1 計測精度に関する考察

図 5.6 および図 5.7 の系統誤差に関する結果を見ると、マーカパネル No.1 よりマーカパネル No.2 の方が系統誤差が大きく、また、マーカパネル No.2 の系統誤差は、パネルの設置位置が変化しても常に左下よりも右上の方が誤差が大きく、その大きさも良く似ている。次項で述べる様に、図 5.8 や図 5.9 を見ると、偶然誤差は系統誤差の半分以下になっており、MAMS は、繰り返し計測した際のばらつきが小さい。従って、マーカパネル No.2 の系統誤差は、マーカパネル No.2 が傾いていたことが原因である可能性がある。これを確かめるためには、今後、マーカパネル No.1 とマーカパネル No.2 を固定した状態で、MAMS の設置位置を変化させ、その時の系統誤差と偶然誤差を計測する必要がある。

5.4.2 安定性に関する考察

図 5.8 や図 5.9 の偶然誤差に関する結果を見ると、マーカパネル No.1 とマーカパネル No.2 の偶然誤差は系統誤差よりも小さく、繰り返し計測に対して値のばらつきが小さいことが分かる。偶然誤差の最大値が 6.2mm、平均値が 3.5mm であったが、この値が、MAMS を実用化するにあたり十分であるかどうかは、系統誤差での結果の場合と同様に、拡張現実感で提示する情報の位置精度がどの程度必要であるかに依存する。

一方、計測を失敗したのは、全 8640 回の計測のうち、マーカパネル No.1 上に配置された 1 個のマーカの 1 回の計測だけであった (失敗率 0.01%)。

5.4.3 計測時間に関する考察

5.3.4 項で示した様に、マーカ 1 個の計測に要する時間は平均 21.0 秒であった。厳密な評価実験は行っていないが、MAMS の全自動の計測機能を使わず、手作業で電動雲台やレーザ距離計測器を操作してマーカの 3 次元位置を計測する際に要する時間も同程度である。その為、本研究で提案した全自動の計測機能を利用することにより、拡張現実感を利用する環境を準備するための作業時間を大幅に削減できることはできていないが、全自動の計測機能を使った場合は、MAMS がマーカを計測している間、作業員は別の場所に行き、別の作業をすることができると考えられる。なお、21.0 秒というマーカ 1 個あたりの計測時間が十分短いかどうかに関しては、次章で述べる有用

性の評価実験で調べる必要がある。

MAMS とマーカパネル No.2 の間の距離が長くなるにつれて、自動計測に要する時間が長くなったことに関しては、以下の仮説が考えられる。

- ・ビデオカメラとマーカとの距離が長くなると、ビデオカメラを用いたマーカの 3次元位置の計算精度が悪くなり、その結果を用いる最初のレーザの照射位置の精度が悪くなる。その為、レーザの照射位置をマーカの中心に合わせる作業に要する時間が長くなり、全体としてマーカの計測に要する時間が長くなった。

上記の仮説が正しいかどうかを確かめるためには、マーカパネル No.2 の位置の変化に伴って、自動計測の際の各処理に要する時間がどのように変化するかを詳細に調べる必要がある。

第 6 章 ふげん発電所における有用性評価

本章では、ふげん発電所構内の純水装置室で行った MAMS の有用性評価について述べる。

6.1 評価の目的

本研究では、第 3 章で述べた要求仕様に従って MAMS を設計・開発した。そして、実験室環境において性能評価実験を行ったが、ここで得られた結果は、MAMS の計測精度や安定性、計測時間の数値だけであり、MAMS が要求仕様を満たしているかどうか、MAMS の性能が実際に原子力発電プラント内に貼付された画像マーカの 3 次元位置を計測するのに十分であるか、MAMS が実際に原子力発電プラントで働く人に受け入れられるのか、実用化に向けて改良すべき点は何かなどは、明らかになっていない。

そこで本評価では、実際の原子力発電プラント内部で評価者に MAMS を使って画像マーカの 3 次元位置を計測する作業をしてもらい、アンケートやインタビューを通じて、上記の不明な点を明らかにすることを目的とする。

6.2 評価方法

6.2.1 評価環境

評価は、図 6.1 に示すふげん発電所構内の純水装置室で行った。放射能による汚染はないが、管理区域に分類される場所である。純水装置室は、図 6.2 に示すように、約 9.5m×8m の部屋の中に、タンクや多数のパイプ、バルブ等が配置されており、照明器具としては蛍光灯が用いられている。部屋の明るさは、200Lux から 500Lux 程度であり、円形マーカを容易に視認できる。

6.2.2 評価手順

評価は、MAMS の開発者が評価者の前で、マーカの環境への貼り付け、MAMS の設置、MAMS を用いたマーカの全自動計測、MAMS の撤去までの、一連の流れを言葉の



図 6.1: 評価に用いた純水装置室

説明無しでデモンストレーションした後、以下の手順で作業を行ってもらった。なお、デモンストレーション見学後、評価者からは質問を受け付けず、MAMS の使用方法に関する細かな機能も説明しなかった。これは、MAMS に対する必要最低限の知識しか持っていないユーザが、MAMS を用いて計測作業ができるかどうかを調べる為である。

1. 拡張現実感を利用する領域を確認する。
2. 直径 10cm の 23 枚の円形マーカを受け取り、1 番から 3 番までのマーカを事前に指示された箇所に貼り付けた後、残りのマーカを、拡張現実感で用いるトラッキングを実施することを意識しながら貼付する。
3. 図 6.3 に示すようにマーカを見渡すことができる箇所に MAMS を設置する。
4. MAMS を用いてマーカの 3 次元位置を計測する。
5. 結果をファイルに保存する。
6. MAMS を撤去する。

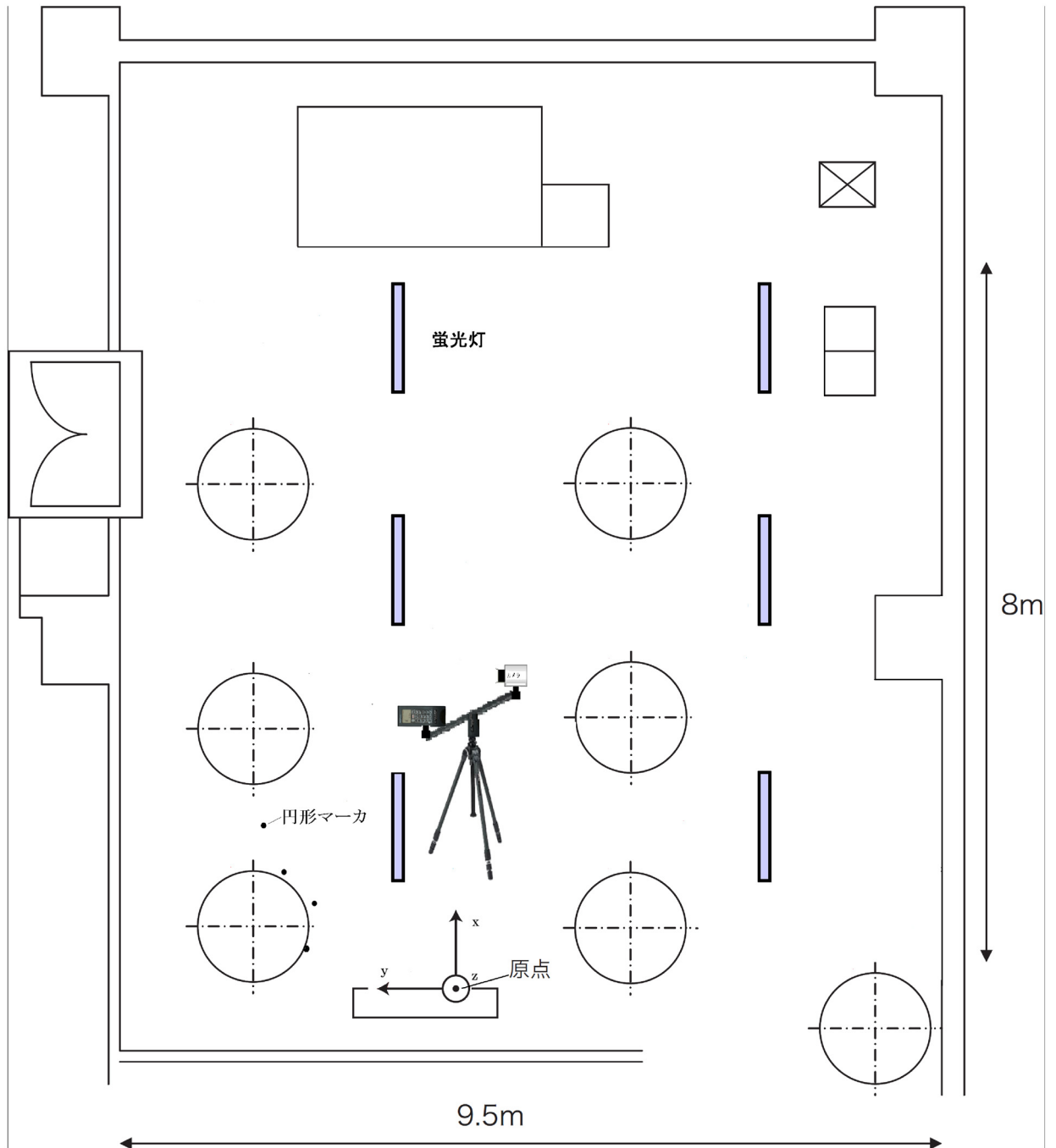


図 6.2: 純水装置室における実験環境

7. 得られた結果を用いて、図 6.4 に示すように、予め準備された小型パソコンを用いて拡張現実感を体験する。パソコンの画面に表示される拡張現実感の例を図 6.5 に示す。

その後、アンケートに答えてもらい、最後に個別に実験者が対面インタビューを実施した。



図 6.3: 純水装置室におけるマーカの貼付例

6.2.3 評価者

評価者は、解体作業に精通したふげん職員 1 名 (評価者 A) とヒューマンインタフェースの専門家 1 名 (評価者 B) とし、2 名が同時に協力して計測作業をしてもらった。共に拡張現実感技術を用いるためには、マーカの 3 次元位置を事前に計測する必要があること、トラッキングを実行するためには、カメラにマーカが写る必要があることを事前に知っているが、MAMS を使用するの今回は初めてであった。



図 6.4: 評価中の様子

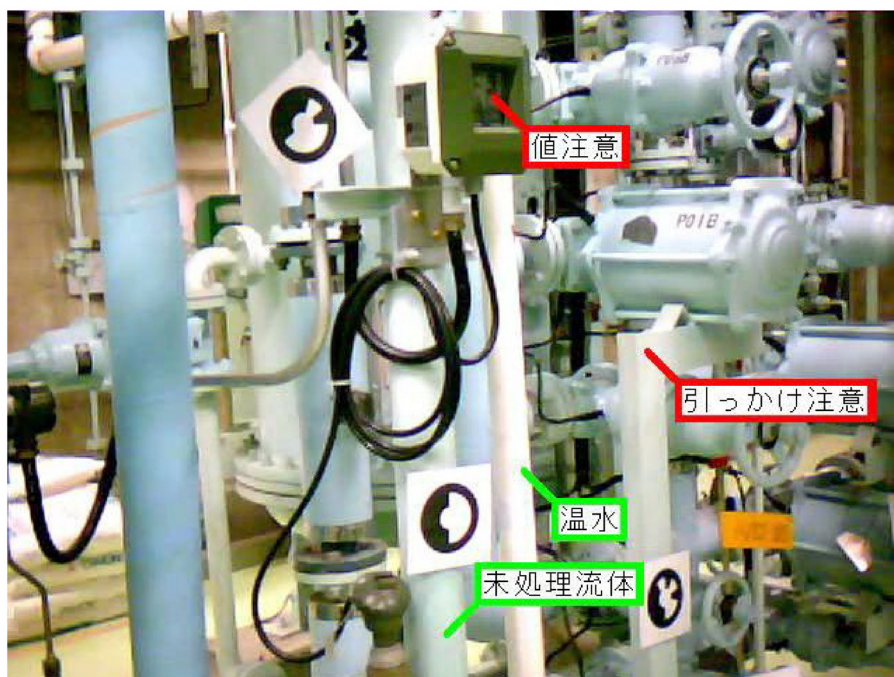


図 6.5: 計測で得られた結果を用いた拡張現実感

6.2.4 評価項目

第3章で挙げた MAMS の要求仕様や実現した機能に基づいて、機能的な面とユーザビリティの面から表 6.1 及び表 6.2 と表 6.3 の左側に示す質問項目のアンケートを作成し [(A)-1 はアンケート用紙 A の 1 番目の項目である]、評価者に各項目を、「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 段階評価で答えてもらった。また、自由記述欄を設け、それぞれの項目についての評価の理由や気づいた問題点、改善案を記述してもらった。各質問項目と要求仕様・実現した機能との対応を表 6.1 及び表 6.2 と表 6.3 の右側に示し、実験に使用したアンケートの用紙を付録 B に示す。

6.3 評価の結果

機能に関する評価の結果を表 6.4 から表 6.9 に、ユーザビリティに関する評価の結果を表 6.10 から表 6.11 に示す。

評価者は、マーカの貼付から MAMS の撤去までを実施することができた。

マーカを環境に貼り付けるのに要した時間は 1 分 25 秒、機器の間のケーブルを接続するのに要した時間は 5 分 50 秒、MAMS を制御するアプリケーションを起動し、自動計測を開始するまでに要した時間は 1 分 15 秒、MAMS がマーカの 3 次元位置を計測するのに要した時間は 10 分 40 秒、MAMS を撤去するの要した時間は 4 分 0 秒であり、マーカの設置から MAMS の撤去までに要した合計時間は、23 分 10 秒であった。

最初、環境に貼り付けたマーカの内、床に配置した 1 枚と、2 m 程度の高さに配置した 1 枚のマーカが、ビデオカメラを回転させてもカメラに写らない箇所に配置されたため、MAMS を用いて計測することができなかったが、評価者がマーカが計測できなかった理由に気が付き、2 枚のマーカの位置を移動させることにより、最終的に全てのマーカの 3 次元位置を計測することができていた。

6.4 評価結果に対する考察

以下では、機能に関する評価およびユーザビリティに関する評価結果について考察し、最後の今後の改良点を纏める。

表 6.1: 機能に関するアンケート評価項目と要求仕様・機能構成との対応①

番号	アンケート項目	要求仕様・機能構成
(A)-1	マーカの位置を計測する際に、カメラでマーカを自動認識することは有効である。	(機能 2) カメラでマーカを自動認識する機能
(A)-2	マーカの位置を計測する際に、レーザー距離計測器を利用することは有効である。	(機能 22) 手作業でマーカの位置を計測できるようにする (機能 3) レーザ距離計測器を用いてマーカの位置を計測する機能を実現する。
(A)-3	マーカの位置を計測する際に、電動雲台を利用することは有効である。	(機能 22) 手作業でマーカの位置を計測できるようにする。
(A)-4	環境に貼り付けたマーカを全て自動的に認識する機能は有効である。	(機能 2) カメラでマーカを自動認識する機能
(A)-5	環境に貼り付けられたマーカの位置を全て自動的に計測する機能は有効である。	(機能 1) 全てのマーカの位置を自動的に計測することを可能にする。
(A)-6	マーカの位置を自動計測する際に必要な時間は十分短い。	[仕様 1] 短時間でマーカの 3 次元位置を計測できる。
(A)-7	マーカの位置の計測精度は要求を満たしている。	[仕様 2] 安定・高精度にマーカの 3 次元位置を計測できる。
(A)-8	自動計測機能を利用することにより、作業環境を準備する際の効率が上がる。	[仕様 1] 短時間でマーカの 3 次元位置を計測できる。(機能 23)MAMS とマーカとの距離に応じた自動計測機能が利用できるようにする。
(A)-9	システムは照明条件が悪いところでも利用できる。	[仕様 2] 安定・高精度にマーカの 3 次元位置を計測できる。(機能 8) 画像マーカとして円形マーカを採用する。
(A)-10	システムは障害物が多くても利用できる。	[仕様 6] 障害物が多い場所でも使用できる。
(A)-11	システムは広い環境でも利用できる。	[仕様 5] 設置に広い場所を必要としない。
(A)-12	システムは狭い環境でも利用できる。	[仕様 5] 設置に広い場所を必要としない。
(A)-13	自動的にマーカを計測する際、作業終了時に音を出すことは有効である。	[仕様 3] 使用方法の習得に多くの時間を要しない。(機能 14) 自動計測の終了を知らせる機能
(A)-14	カメラの PAN,TILT,ZOOM を SLIDER を用いて手動で制御できることは有効である。	(機能 19) カメラの方向をスライドバーを操作して変更する機能 (機能 20) カメラの方向をアングルマップを操作して変更する機能

表 6.2: 機能に関するアンケート評価項目と要求仕様・機能構成との対応②

番号	アンケート項目	要求仕様・機能構成
(A)-15	現在カメラに映っているマーカのみを計測する機能は有効である。	(機能 25) 画面上に映っている全てのマーカの種類と位置を自動的に計測する機能
(A)-16	マーカの計測結果を個別に消去できる機能は有効である。	(機能 26) 計測したマーカの情報を削除する機能
(A)-17	マーカの計測結果の確定・未確定を切り替える機能は有効である。	(機能 11) 認識したマーカの種類を画面上で容易に確認できるようにする。
(A)-18	マーカの計測予定・未予定を切り替える機能は有効である。	(機能 11) 認識したマーカの種類を画面上で容易に確認できるようにする。
(A)-19	マーカの計測結果の表示の座標系を切り替える機能は有効である。	(機能 21) 計測結果を世界座標系を基準に表示する機能を実現する。
(A)-20	システムの動作状態を文字で表示する機能は有効である。	(機能 12) システムの動作状態をログとして表示する機能
(A)-21	システムを初期化する機能は有効である。	(機能 7) システム初期化機能を実現する。
(A)-22	カメラが写している範囲をアングルマップ上で赤枠を用いて表示する機能は有効である。	(機能 20) カメラの方向をアングルマップを操作して変更する機能
(A)-23	カメラの方向をアングルマップ上でクリックすることにより変更する機能は有効である。	(機能 20) カメラの方向をアングルマップを操作して変更する機能
(A)-24	マーカの自動計測を途中で止める機能は有効である。	(機能 27) 自動計測を途中で止める機能を実現する。
(A)-25	選択したマーカのみを自動的に計測する機能は有効である。	(機能 22) 手作業でマーカの位置を計測できるようにする
(A)-26	認識したマーカの総数を表示する機能は有効である。	(機能 15) 認識したマーカの総数を表示する機能
(A)-27	自動的に計測する予定のマーカの総数を表示する機能は有効である。	(機能 17) これから計測するマーカの総数を表示する機能
(A)-28	計測済みのマーカの総数を表示する機能は有効である。	(機能 16) 計測が終了したマーカの総数を表示する機能
(A)-29	個々のマーカの状態 (計測済・値確定・計測予定) を表示する機能は有効である。	(機能 15) 認識したマーカの総数を表示する機能 (機能 16) 計測が終了したマーカの総数を表示する機能 (機能 17) これから計測するマーカの総数を表示する機能
(A)-30	自動計測の際のズーム値を 3 段階に分けていることは有効である。	(機能 23)MAMS とマーカ間の距離に応じた自動計測機能が利用できるようにする。
(A)-31	カメラの方向を初期化する機能は有効である。	(機能 5) カメラ初期化機能

表 6.3: ユーザビリティに関するアンケート評価項目と要求仕様・機能構成との対応

番号	アンケート項目	要求仕様・機能構成
(C) -1	1. システムで使用する機器は現場に設置しやすい	(機能 4) 機器やケーブルを全て収納箱に格納できるようにする。
(C) -2	2. システムを使用しない際に、システムを所定の場所に収納しやすい	(機能 4) 機器やケーブルを全て収納箱に格納できるようにする。
(C) -3	3. 画面上の文字や数字は読みやすい	(機能 9) 操作ボタンをできるだけ大きく設計する
(C) -4	4. 手作業で操作する際に、操作しやすい	(機能 22) 手作業でマーカの位置を計測できるようにする
(C) -5	5. インタフェースの画面は分かりやすい	[仕様 3] 使用方法の習得に多くの時間を要しない。
(C) -6	6. ソフトウェアのボタンは押しやすい	(機能 10) 機能実行中のボタンの色を変える。
(C) -7	7. 提示する計測結果は分かりやすい	[仕様 3] 使用方法の習得に多くの時間を要しない。
(C) -8	8. 手作業での PAN,TILT,ZOOM の操作は簡単である	(機能 9) 操作ボタンをできるだけ大きく設計する (機能 19) カメラの方向をスライドバーを操作して変更する機能
(C) -9	9. 初めてシステムを使う人でも簡単に操作できる	[仕様 3] 使用方法の習得に多くの時間を要しない。
(C) -10	10. 操作に対して応答は即座に返ってくる	(機能 7) システム初期化機能を実現する。
(C) -11	11. 各マーカの計測状態の表示は分かりやすい	(機能 12) システムの動作状態をログとして表示する機能
(C) -12	12. システムの操作にいらいらさせられる	(機能 1) 全てのマーカの位置を自動的に計測することを可能にする。

6.4.1 機能に関する考察

表 6.4 から表 6.9 までを見ると、(A-1) から (A-5) および (A-8) の質問に関して、両評価者共に肯定的な意見になっている。特に、評価者 B の方が、エラーを起こさずに自動計測できる事実に対して高い評価をしていることが分かる。(A-6) の質問に関しては、低めの評価になっており、実用化するためには、計測速度を現状よりも速くする必要がある。(A-7) の質問に関しては、両者とも、拡張現実感を利用する目的によって必要な精度が変わるため、今回の精度で十分かどうか判断できず、低めの評価になっていると思われる。(A-9) の質問に関しては、今回の評価に用いた環境が、プラントの中でも明るい方に分類される環境であった為、暗い環境で MAMS が使用できることを確認できず、高い評価が出せなかったと思われる。この点に関しては、4 章で述べた実験室環境での実験で、比較的暗い環境でも MAMS が使用できることを確認しており、今後、両評価者に対して、MAMS が暗いところで使用できることをデモンストレーションすることにより、この質問に対する評価が上がると考えられる。(A-10) や (A-12) の質問に対しては、両者共に低い評価になっている。今回の MAMS の設計では、要求仕様 6 に対応する為、全自動計測だけではなく、計測に失敗した時の為に、手作業で計測するための機能の充実させたが、後述するユーザビリティの評価結果からも分かる様に、手作業で計測する方法は初心者が実施するのは難しく、他の方法で対策を立てる必要がある。しかし、障害物にマーカが隠蔽されてしまう問題は、画像マーカとカメラを用いたトラッキング手法のみを用いる限り、避けることができない問題であり、今後、慣性センサとの併用や、自然特徴点との併用により、障害物のある場所では、マーカを貼り付ける必要性自体を無くすことにより、対応するべきであると考えられる。(A-11) の質問に対しては、(A-10) の質問の場合とは逆に、広い場所では十分使用できると判断されていることが分かる。(A-13) の質問に対しては、両被験者共に比較的低い評価となっており、計測作業が終了した際に音を鳴らしてユーザに終了を知らせる方法は、あまり必要性が無かったと言える。(A-14) から (A-17) および (A-19) の質問に関しては、両者共に、高い評価になっており、カメラの動きを手作業で変化できることや、カメラに写っているマーカのみを計測する機能、マーカの計測情報の操作や表示は有用であったと言える。(A-18) の質問に関しては、機能を実装した目的が評価者に伝わっておらず、実装方法を変える等の検討が必要であると言える。(A-20) および (A-21) の質問に対しては、両評価者で意見が分かれており、この結果だけからは、必要な機能か必要がない機能かの判断はできない。(A-22) から (A-29) の質問に対しては、両評価者共に肯定的な意見となっており、これらの機能は設計取り有用であっ

たと言える。(A-30)に関しては、「MAMSからある範囲で離れた位置にあるマーカのみ」を計測するという考え自体が理解するのが難しく、今後は、全自動計測と個別計測の機能のみに絞る必要があると考えられる。しかし、全自動計測の場合、その計測に要する時間が長くなることが問題であり、(A-6)の質問に対する回答からも明らかになった様に、計測時間を現状よりも短くする工夫が必要である。(A-31)の質問に対しては、両評価者に低い評価となった。その為、カメラの方向を初期化する機能は必要ないと思われる。

6.4.2 ユーザビリティに関する考察

表6.10から表6.11までを見ると、まず、(C-1)と(C-2)の質問に関して、両評価者の意見が分かれており、解体作業に精通した作業員(評価者A)の方が否定的な意見になっている。これらの質問項目は、解体作業の実体を理解している評価者の方が信頼できる回答が得られると考えられ、MAMSは更に小型化する必要があることが分かる。一方、(C-3)から(C-8)の質問に関して、評価者Aの方は概ね肯定的な意見になっているが、ヒューマンインタフェースの専門家(評価者B)の方が一部、否定的な意見になっている。これらの質問項目は、ヒューマンインタフェースを理解している評価者の方が信頼できる回答が得られると考えられ、全体的に分かりやすいインタフェースであるが、手作業でマーカを計測する際の操作が分かりにくいと考えられる。(C-9)の質問項目に関しては、両評価者とも、否定的な意見になっている。3章で述べた要求仕様3を満たすためには、マニュアルを読んだり、講習会を受けたりしなくてもMAMSが使えることが望ましいが、現在のインタフェースや計測方法では、初心者が殆ど説明を受けずにMAMSを使用することは難しかったことが分かる。ただし、両者とも、マニュアルを読んだり、説明を聞いたりすれば初めてMAMSを使う場合でも操作できるかもしれないと考えていることが分かる。(C-10)から(C-12)の質問に対しては、両者とも肯定的な意見になっている。インタフェースの応答速度は十分であり、マーカの情報表示も分かりやすかったと言える。

6.4.3 MAMSの改良点に関する考察

今回の実験では、表6.12のアドバイスに基づいて、評価者に予めMAMSのインタフェースについて詳しい説明をしなかった為、インタフェースの評価としては、かなり厳しい条件であったと言えるが、MAMSを今後、より良くしていく為に、以下の改

良を行うべきであると考えられる。

- システム全体の動作速度を改善し、現状より計測に要する時間を短くする。
- カメラやレーザ距離計測器の回転可能方向を広げ、カメラの解像度を上げることにより、より広い範囲のマーカを計測可能にする。
- システム全体を小型化・軽量化する。
- 手作業でマーカを計測する方法、インタフェースを更に分かりやすく、簡単にする。
- 詳細な説明を受けなくても MAMS が簡単に使用できるようにするために、1. 現在実行可能な操作一覧をユーザに提示する機能、2. 操作ボタンの上にマウスカーソルを移動させると、詳しい説明を表示する HELP 機能等を実装する。

表 6.4: 機能に関する評価結果①

番号	アンケート項目	評価者 A	評価者 A の回答の理由	評価者 B	評価者 B の回答の理由
(A)-1	マーカの位置を計測する際に、カメラでマーカを自動認識することは有効である。	4	5では無い理由：今回使われている技術の内容を全て理解している訳ではないと思うので、不安があり、5とは答えなかった。	5	人間が何もやらなくても良いと思う。省力化を実現できる。
(A)-2	マーカの位置を計測する際に、レーザー距離計測器を利用することは有効である。	4	5では無い理由：今回使われている技術の内容を全て理解している訳ではないと思うので、不安があり、5とは答えなかった。	5	自動計測を実現できるから。
(A)-3	マーカの位置を計測する際に、電動雲台を利用することは有効である。	5		5	自動計測を実現できるから。
(A)-4	環境に貼り付けたマーカを全て自動的に認識する機能は有効である。	5		5	時間がかかるが、速いと思う。エラーがない。
(A)-5	環境に貼り付けられたマーカの位置を全て自動的に計測する機能は有効である。	5		5	速いと思う。エラーがない。
(A)-6	マーカの位置を自動計測する際に必要な時間は十分短い。	3	5では無い理由：実際に運用する場合は、もっと短い時間で計測できる必要がある。少なくとも、10分程度で計測できる必要があると思う。	4	人間が計測するよりは速い。ただ、動いているすべての時間が更に短くなると思う。

表 6.5: 機能に関する評価結果②

番号	アンケート項目	評価者 A	評価者 A の回答の理由	評価者 B	評価者 B の回答の理由
(A)-7	マーカの位置の計測精度は要求を満たしている。	4	5では無い理由：拡張現実感を、どのような目的で使用するのかによって、必要な精度が変わってくるので、今回の精度で十分かどうか判断できない。	3	精度がアプリケーションによって違うと思う。
(A)-8	自動計測機能を利用することにより、作業環境を準備する際の効率が上がる。	5	5とした理由：これまでの計測方法を知っているので、それに比べると、かなり効率が上がったと思う	5	作業環境を速く準備できる。
(A)-9	システムは照明条件が悪いところでも利用できる。	3	5では無い理由：最初は、質問の意味が分からなかった。質問の意味の説明を聞いた後も、回答は変わらない。その理由は、プラント内ではもっと暗いところがあり、その場所で今回の方法が使えるかどうか分からない。	4	プラント中で 98% 大丈夫だと思う。
(A)-10	システムは障害物が多くても利用できる。	3	5では無い理由：プラントの内部は、もっと狭くて物が沢山ある場所がある。その場所で使えるかどうか分からない。	1	プラント内は障害物が多いので、写す際に遮蔽が起こりやすい。また、システムを設置する時、障害物が邪魔になる。
(A)-11	システムは広い環境でも利用できる。	5		5	広範囲で利用でき、精度はあまり問題がない、大丈夫だと思う。

表 6.6: 機能に関する評価結果③

番号	アンケート項目	評価者 A	評価者 A の回答の理由	評価者 B	評価者 B の回答の理由
(A)-12	システムは狭い環境でも利用できる。	3	5では無い理由：狭いところでは使えないと思う。	2	狭い環境で三脚台に設置し、マーカとの距離が近過ぎ、計測できない。
(A)-13	自動的にマーカを計測する際、作業終了時に音を出すことは有効である。	3	5では無い理由：プラント内部には今回の評価環境よりも騒音が激しい所がある。その様な環境では、使うことが難しいと思う。	4	有効であるが、この機能がなくても良い。
(A)-14	カメラの PAN,TILT,ZOOM を SLIDER を用いて手動で制御できることは有効である。	5		5	写す失敗の時に自己で現画面で直接に操作すれば便利だと思う。
(A)-15	現在カメラに映っているマーカのみを計測する機能は有効である。	5	5とした理由：簡単に使えていたので有効だと思う。	5	個別計測機能は有効である。
(A)-16	マーカの計測結果を個別に消去できる機能は有効である。	5	5では無い理由：要らなければ消去してしまえば良い	5	使っていなかったもので、必要だと思う。
(A)-17	マーカの計測結果の確定・未確定を切り替える機能は有効である。	4	機能とその実装意図を説明すると回答は4になった。5では無い理由、判断を確定できない。必要となる状況が多いか少ないか分からない。	5	使っていなかったもので、必要だと思う。

表 6.7: 機能に関する評価結果④

番号	アンケート項目	評価者 A	評価者 A の回答の理由	評価者 B	評価者 B の回答の理由
(A)-18	マーカの計測予定・未予定を切り替える機能は有効である。	3	5では無い理由として、機能を設ける意図が分からない。理想的には1回で計測できるようになって欲しい。	2	どういうときに必要あるかよく分からない。
(A)-19	マーカの計測結果の表示の座標系を切り替える機能は有効である。	5	質問の意味がわからなかったので、機能とその実装意図を説明すると回答は5になった。	5	確認するとき、便利だと思う。
(A)-20	システムの動作状態を文字で表示する機能は有効である。	3	画面右にあるリストを見れば、システムの状態は大体のことが分かる。	5	そうすれば、よく分かりやすい。
(A)-21	システムを初期化する機能は有効である。	5	前回計測したデータを間違えて使ってしまうようにする意味で重要である。	1	その機能がなくても良い。
(A)-22	カメラが写している範囲をアングルマップ上で赤枠を用いて表示する機能は有効である。	5	説明前の回答は4である。そんな機能がなんとなくない、なぜこのような機能があるか分からなかった。機能とその実装意図を説明すると回答は5になった。	4	その機能は特別な必要がない。あれば、進捗状況がよく分かる。

表 6.8: 機能に関する評価結果⑤

番号	アンケート項目	評価者 A	評価者 A の回答の理由	評価者 B	評価者 B の回答の理由
(A)-23	カメラの方向をアングルマップ上でクリックすることにより変更する機能は有効である。	5	説明前の回答は4である。評価の際、このような機能が有ることに気が付かなかった。機能とその実装意図を説明すると回答は5になった。ただし、画像は見にくい。	5	ユーザはこの機能が使えるかどうかよく分からない。
(A)-24	マーカの自動計測を途中で止める機能は有効である。	4	説明前の回答3である。機能とその実装意図を説明すると回答は4になった。5では無い理由として、基本的に自動で計測して欲しいので、途中で停止する必要が生じないようになって欲しい。	5	この機能は必ず必要である。
(A)-25	選択したマーカのみを自動的に計測する機能は有効である。	5		5	途中で開始すれば、便利だと思う。
(A)-26	認識したマーカの総数を表示する機能は有効である。	5		5	何かをしたの機能があった、絶対必要である。
(A)-27	自動的に計測する予定のマーカの総数を表示する機能は有効である。	5		5	何かをするの機能があった、絶対必要である。
(A)-28	計測済みのマーカの総数を表示する機能は有効である。	5		5	何かをしたの機能があった、絶対必要である。

表 6.9: 機能に関する評価結果⑥

番号	アンケート項目	評価者 A	評価者 A の回答の理由	評価者 B	評価者 B の回答の理由
(A)-29	個々のマーカの状態 (計測済・値確定・計測予定) を表示する機能は有効である。	5		5	何かをしているの機能があった、絶対必要である。
(A)-30	自動計測の際のズーム値を3段階に分けていることは有効である。	3		2	そのこと、基本的に必要ない、有用な可能性があるかもしれない、ただ、全自動をしたほうが良い。
(A)-31	カメラの方向を初期化する機能は有効である。	5	質問の意味が分からなかった。機能とその実装意図を説明しても回答は3のままであった。5では無い理由として、分けるのであれば、他の距離も必要になる。一つで計測できるようになって欲しい。全自動でしたほうが良い。	2	その機能が要らなくても良い。

表 6.10: ユーザビリティに関する評価結果①

番号	アンケート項目	評価者 A	評価者 A の回答の理由	評価者 B	評価者 B の回答の理由
(C)-1	システムで使用する機器は現場に設置しやすい	1	実際の現場を考えると あれでは使えない。レーザとカメラを一つにしたい。携帯電話、ミニパソコンくらいになると良い。ケーブルは無い方が良い。バッテリーで使えるようにして、電源ケーブルを無くして欲しい。ただし、ケーブルがあっても受け入れられなくはない。	4	設置しやすいが、三脚台が狭いところで設置しにくい。
(C)-2	システムを使用しない際に、システムを所定の場所に収納しやすい	3	もし小型化できないのであれば、これで良いが可能なら小型化して欲しい。	5	収納しやすい、便利である。
(C)-3	画面上の文字や数字は読みやすい	4	文字はもっと大きい方が良い。ボタンの数が多いので少ない方が良い。	4	文字と数字は読みやすいが、やや小さすぎ。
(C)-4	手作業で操作する際に、操作しやすい	5	ズームの操作等は簡単であった。	2	画面でのボタンの意味はあまり分からない。
(C)-5	インタフェースの画面は分かりやすい	5	インタフェースの画面は大体分かる。	4	およそ十分であるが、レストが必要で、よく分かりやすい。
(C)-6	ソフトウェアのボタンは押しやすい	5	ボタンは押しやすい。	5	押しやすいが、ボタンを大きくしたほうが良い。
(C)-7	提示する計測結果は分かりやすい	5	認識できる等は分かった。	4	世界座標系の提示は分かりやすい。

表 6.11: ユーザビリティに関する評価結果②

番号	アンケート項目	評価者 A	評価者 A の回答の理由	評価者 B	評価者 B の回答の理由
(C)-8	手作業での PAN,TILT,ZOOM の操作は簡単である	5	操作は簡単である。	2	操作しにくい。
(C)-9	初めてシステムを使う人でも簡単に操作できる	3	初めて一人でやる場合、できるかどうか分からない。マニュアルとかあれば分かるかもしれない。マーカが認識できなかった場合、確実に認識するようにできるか自信が無い。	2	説明する必要がある。
(C)-10	10. 操作に対して応答は即座に返ってくる	4	カメラを回転させてマーカを撮影した後に、動き（画面の更新、機器の次の動作）が遅いと感じた。	5	問題ない。
(C)-11	11. 各マーカの計測状態の表示は分かりやすい	5	質問の意味が分からなかったので、説明前の回答が3である。。意味を説明後、5番に変更した。	5	視覚で非常に分かりやすい。
(C)-12	12. システムの操作にいらいらさせられる	1	特に問題無い。	1	何もしているのは、よく分かりやすい。

表 6.12: 評価者のアドバイス

アドバイス	評価者 A	評価者 B
機能について (B)	<p>1、最初から最終までの3次元位置計測の時間が約30分程度となったので、これまでの計測時間の大幅な短縮になったと思う。2、任意に置いたマーカを検出できない場合があった(床、高い位置に置いた場合)ので、マーカをどのような位置に置いても認識できるようにしてもらいたい。</p>	<p>1、レーザ距離計測器の手動コントロールは必要ない。2、レーザがマーカの中心から少しずれたところに当たっている場合があり、正確に計測できているかどうか不安と思う。3、アングルマップでPAN、TILTを制御できるなら、スクロールバーは不要だと思う。4、アングルマップ上のカメラ取得画像は分かりやすい。ただ、画像が大きければ良いと思う。</p>
使いやすさについて (D)	<p>1、現場への適用となると、計測器全体の大きさが大きい気がする。2、小型にすることが必要である。</p>	<p>1、同じようなボタン等がいくつかあり、紛らわしい(例えば、全自動、PAN、TILT等)。最も良く使うと思われる全自動ボタンをもっと目立つようにしてほしい。2、計測に失敗したときにどうすれば良いのかの指示が表示されると良いと思う(例えば、「もっと下にマーカを貼る」等を指示すれば良い)。3、カメラヘッドのケーブル群の取り回しが良い。ただ、カメラヘッドのどこにどのケーブルを接続するのか分かりにくい。4、三脚は水平に設置する必要はあるのか?</p>

第 7 章 結論

本研究では、画像マーカを用いたトラッキングを利用する際に必要となる、マーカの 3 次元位置を計測する作業の労力が非常に大きいという問題を解決するために、画像マーカの 3 次元位置を自動的に計測するシステムを提案し、システムの実装と評価を行い、その有用性を評価することを目的とした。そして、この目的を達成するため、マーカ自動計測システム (Marker Automatic Measurement System; MAMS) の設計と開発、実験室環境での性能評価実験、ふげん発電所内での有用性評価実験を行った。

第 2 章では、研究の背景として、原子力発電プラントにおける解体作業の現状と問題点について述べた。そして、拡張現実感技術を用いた作業支援方法が有効であることを述べ、拡張現実感技術の特徴を概説した。その後、様々なトラッキング手法が提案・利用されている中で、画像マーカを用いたトラッキング手法が、原子力発電プラント内部での使用に適していることを述べた。そして、マーカの 3 次元位置を計測する作業の労力が非常に大きい点が問題になっていることを述べ、本研究の目的が、画像マーカの 3 次元位置を自動的に計測するシステムの開発と評価であることを述べた。

第 3 章では、MAMS の設計について述べた。まず始めに、提案するマーカ自動計測手法について述べ、本研究で開発する MAMS は、電動雲台、レーザ距離計測器、電動ズーム付ビデオカメラを組み合わせた計測システムであり、これらをコンピュータで制御することにより、自動的に環境に貼り付けた円形マーカを認識、その 3 次元位置を計測するシステムであることを述べた。その後、原子力発電プラントの構造や保守・解体作業の特徴から想定される、MAMS に要求される仕様や機能について述べた。その後、MAMS を実現するにあたり必要となる各種アルゴリズムについて述べた。

第 4 章では、開発した MAMS の構成について述べた。まず、MAMS のハードウェア構成について述べ、その後、ソフトウェア構成について述べた。特に、ソフトウェア構成では、開発した MAMS のインタフェースについて詳細に説明し、MAMS では、環境に貼り付けた全てのマーカを自動的に計測する機能、個々のマーカを個別に計測する機能等が実装されていることを述べた。その後、MAMS を用いたマーカの計測手順について述べた。

第 5 章では、実験室環境において実施した MAMS の性能評価実験について述べた。まず始めに、原子力発電プラント内で拡張現実感を使用するためには、準備に要する

時間が短くなければならないこと、マーカの3次元位置の計測結果は正確でなければならぬことを述べ、それを受け、本実験の目的が、MAMSの計測精度、安定性、計測に要する時間を評価することであることを述べた。その後、実験の方法として、本性能評価実験では、直径10cmの円形マーカを、縦横20cm間隔で計36個貼り付けた平面パネルを2枚作成し、1枚を世界座標系の基準として環境に固定し、もう1枚を20cm間隔で5回移動させ(計6箇所配置)、各場合でMAMSを用いて円形マーカの3次元位置を20回繰り返し計測した際の計測精度と安定性を評価したことを述べた。そして、実験の結果として、自動計測での計測結果の誤差の最大値は27.6mm(平均は7.6mm)であり、各計測箇所毎の標準偏差の最大値は6.2mm(平均は3.5mm)であったこと、また、マーカ1個あたりの計測に要する時間の平均は21秒であったことを述べた。

第6章では、ふげん発電所構内の純水装置室において実施したMAMSの有用性評価実験について述べた。この実験では、解体作業に精通した作業員とヒューマンインタフェースの専門家の計2名にMAMSを試用してもらい、その後、機能やユーザビリティを評価する項目を含むアンケートとインタビューを実施した。その結果、「マーカの計測方法やMAMSを使用するためのインタフェースは全体的に分かりやすく、MAMSの使用法の詳細を説明しなくても、マーカの貼付から3次元位置の計測までを実施できる」、「MAMSを使用することにより拡張現実感を使用するための環境の準備に要する労力を大幅に削減できるため、MAMSは非常に有用である」等が分かった。しかし、一方で、「MAMSを実際の現場で使用するためには、システム全体を小型化・軽量化する必要がある」ことが分かった。

本研究では、円形マーカの3次元位置を自動計測する手法を開発したが、原子力発電プラント内で拡張現実感を利用するには、円形マーカだけでなく、ラインマーカも併用する必要がある。そのため、今後は、本研究で提案した手法をラインマーカの計測にも適用できるように拡張する必要がある。また、MAMSの実用性をより高めるために、ハードウェアの更新やアルゴリズムの改良による計測精度の向上、計測時間の短縮が必要である。さらに、使いやすさの観点から考えると、MAMSで使用しているカメラやレーザ距離計測器、電動雲台とパソコンの間の通信は無線にするべきであると考えられる。

本研究で提案した画像マーカの3次元位置を自動的に計測する手法は、原子力発電所において拡張現実感技術を利用する時だけでなく、様々なプラントにおける保守作業や機器の組立作業の支援、屋外での景観シミュレーション等に拡張現実感技術を用いる際にも利用できる可能性を持っており、今後の様々な分野への応用が期待される。

謝 辞

下田宏准教授には、日本語が全然分からない私を研究室に受け入れることに深く心より感謝いたします。先生から研究中で難関にぶつかることを根気強く教えて頂きました。2年間の研究中で、研究全般にわたって親身になって直接ご指導いただいたこと、また数々の広い視点からの助言をいただきましたこと、深く感謝致します。

石井裕剛助教には、プログラミングやデータ解析の方法、論文の執筆方法等に関して数々の適切な助言をいただいたこと、深く感謝致します。特別に、石井先生から身を立てる道理を教えて頂きました。また、現場まで何度もドライブに連れて行ってくださったことに衷心より感謝いたします。

吉川榮和京都大学名誉教授には私がこの研究室に配属されて以来、非常に熱心にご指導いただき、また、「システム安全学」を担当する際にいろいろな知識を教えてください。

日本原子力研究開発機構の泉正憲さんには、本研究実施のためにさまざまなご協力をしていただきましたこと、誠にありがとうございました。

研究中で助言を頂くうちの研究室の先輩、今松下電工で勤務している **Bian Zhiqiang** さんに心より御礼申し上げます。研究と論文の執筆に関して様々なご協力を頂きました博士課程3回生藤野秀則さんに心より御礼申し上げます。実験に関してご協力を頂きました博士課程1回生顔偉達さんに感謝します。

本論文の作成にあたり、協力してくれた同級生の松田君、近藤君、及び修士1年生の榎本君、伊丹君、B4の宮城君に深く感謝の意を表す。

さらに、日頃から何かとお世話をいただいた、山下恵未依さんに心から御礼申し上げます。

最後に、私の研学生活を支えるくれている、愛妻李輝と愛児悠々ちゃんに感謝する。

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/> (2008年1月31日現在)
- [2] 尾崎貞彦, 吉川榮和, 北村正晴, 古田一雄, 五福明夫, 伊藤広二: 原子力発電所運用高度化のための次世代HMSの技術開発, 日本原子力学会2002年春の年会要旨集, 第II分冊, p.407 (2002)
- [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] Julia Mayer: ARTESAS supports service and maintenance workers, http://www.inigraphics.net/press/topics/2007/issue2/2_07a04.pdf (2008年1月31日現在)
- [6] Advanced Augmented Reality Technologies for Industrial Service Applications, <http://www.wzl.rwth-aachen.de/en/aa272c5cc77694f6c12570fb00676ba1.htm> (2008年1月31日現在)
- [7] Andrew J. Davison, Ian D. Reid, Nicholas D. Molton, and Olivier Stasse MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 29, No.6, pp.1052-1067 (2007)
- [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 (2004)
- [9] 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)

- [10] 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)
- [11] Sebastian Vogt, Ali Khamene, Frank Sauer, Heinrich Niemann: Single camera tracking of marker clusters: multiparameter cluster optimization and experimental verification, Proc. IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.127-136 (2002)
- [12] M. Appel, N. Navab: Registration of technical drawings and calibrated images for industrial augmented reality, IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, pp.48-55 (2000)
- [13] X. Zhang, Y. Genc, N. Navab: Taking AR into large scale industrial environments: Navigation and information access with mobile computers, IEEE Int. Symp. on Augmented Reality , pp.179-180 (2001)
- [14] Xiang Zhang, Stephan Fronz, Nassir Navab: Visual Marker Detection and Decoding in AR Systems: A Comparative Study, International Symposium on Mixed and Augmented Reality(ISMAR'02), pp.97-106 (2002)
- [15] Bian: A study on augmented reality technology for supporting field work of nuclear power plants. Dissertation, Graduate school of energy science, Kyoto University, (2007).
- [16] 石井裕剛, 藤野秀則, 卞, 関山友輝, 中井俊憲, 下田宏: 拡張現実感用広域トラッキングシステムの開発 ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006, Vol.2, Paper No.2233, pp.579-584,(2006).

付録 A 円形マーカ

A.1 円形マーカのデザイン

図 A.1 に石井らが考案した円形マーカのデザインを示す。この円形マーカは、マーカの半径を $10u$ とした場合、最も外側に半径 $10u$ 太さ $3u$ の黒色の円（最外領域）、最も内側に半径 $3u$ の白色の円（最内領域）を配置し、残りの領域（半径 $7u$ 、太さ $4u$ の円）をコード領域として同じ形の扇形に分割し、個々の扇形毎に白色もしくは黒色とする。以後、個々の扇形をビット要素と呼ぶ。このビット要素の総数はマーカを使用する状況によって変更できる。なお、最外領域はマーカの位置と姿勢を計測する際に用い、コード領域を解析する際の黒色の基準としても用いる。また最内領域はコード領域を解析する際の白色の基準として用いる。このマーカを使った場合、位置基準領域が無い場合、例えば図 A.1 に示した 3 つのマーカの内、中央と右側のマーカは同じマーカとして扱う必要がある。したがって、コード領域の分割数を 8 とした場合、マーカの種類は 30 個、9 とした場合は 56 個、10 とした場合は 99 個となる。

A.2 円形マーカを用いたトラッキング

トラッキングを行う際の処理を以下に示す。ただし、以下ではマーカのビット要素の数（コード領域の分割数）を N_{bit} とする。

(1) HMD などにとりつけたカメラでマーカを撮影し、得られた画像をあらかじめ設定した閾値により二値化する。そして画像全域に対してラベリング処理を施し、連

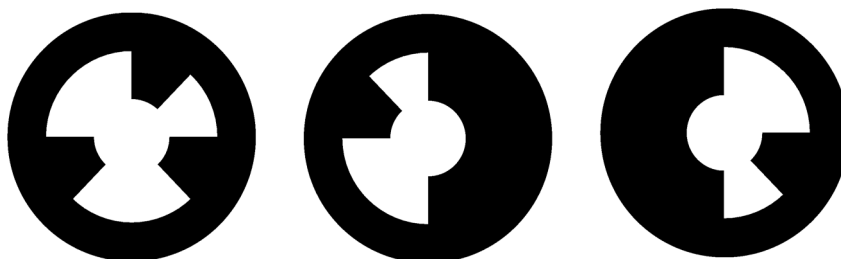


図 A.1: 円形マーカのデザイン

結領域を得る。さらに、得られた連結領域のうち、面積が予め設定された範囲内に入らないものを除外する。また、画像の境界線に隣接する連結領域も除外する。

(2) 残された各連結領域に対して輪郭線追跡を行い、輪郭線上の画素位置を記憶する。その際、処理の開始位置から順番に輪郭線上の点に番号を付ける。

(3) (2) で発見された輪郭線上の点の重心座標を求めて楕円の中心とする。

(4) 輪郭線上の点から (2) で付された番号が等間隔になるように3点を抽出し、この3点を通る楕円を求める。これを K 回繰り返す、得られた K 個の楕円の長軸半径、短軸半径、回転角度の平均を求める。

(5) (4) で求めた長軸半径の短軸半径に対する比を求め、閾値よりも大きい楕円をマーカの候補から外す。

(6) 残された楕円に対して (2) で求めた輪郭線上の点と (4) で求めた楕円との最小距離の二乗平均を求め、閾値よりも大きい楕円をマーカの候補から外す。この処理により一部が欠けた楕円はマーカの候補から除外される。

(7) 楕円の長軸半径と短軸半径の比を用いて、楕円を図 A.2 に示す円に正規化する。すなわち、マーカの最外領域は半径方向に5分割、円弧方向に20分割し、コード領域は個々のビット要素毎に円弧方向に10分割する。以下、このコード領域において円弧方向に分割された個々の領域をコード要素と呼ぶ。また個々のコード要素は半径方向に10分割する。最内領域は半径方向に5分割、円弧方向に20分割する。

(8) 最外領域の画素値の平均 a_{out} と分散 v_{out} 、最内領域の画素値の平均 a_{in} と分散 v_{in} を求める。分散 v_{out} 及び分散 v_{in} が閾値以上の場合は、この楕円をマーカの候補から外す。また、 a_{out} と a_{in} の平均を求め、コード領域を解析する際の閾値 th とする。

(9) 各コード要素毎に (8) で求めた閾値 th よりも大きい画素値を持つ画素の総数 s_w 及び小さい画素値を持つ画素の総数 s_b を求める。

(10) 図 A.2 に示した基準線 (Base line) から反時計回りにコード要素を走査し、初めて $s_w > s_b$ から $s_w < s_b$ となるコード要素を求め、このコード要素の位置をコード領域を解析する際の基準位置とする。また基準線から基準位置までに走査したコード要素の数を N_{scn} として記録しておく。求められた基準位置はビット要素間の境界の内の1つと考えられる。

(11) (10) で求めた基準位置からビット要素毎に $s_w > s_b$ となるコード要素の総数 S_w と $s_w < s_b$ となるコード要素の総数 S_b を調べる。

(12) S_w と S_b の差が S_w と S_b の合計の半分よりも小さいビット要素を持つ楕円をマーカの候補から外す。

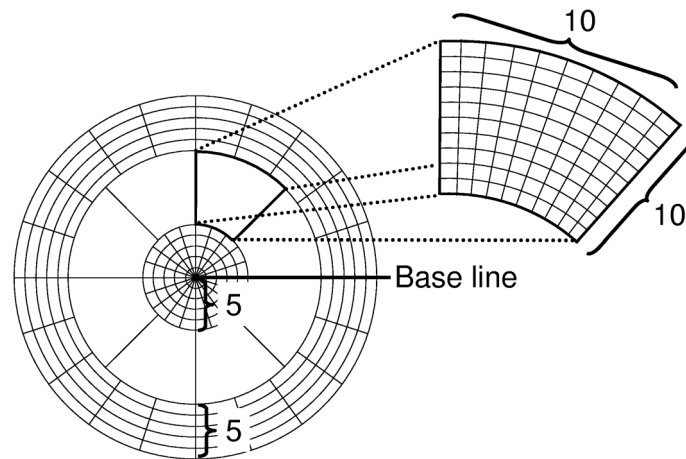


図 A.2: マーカの正規化

(13) $S_w > S_b$ となるビット要素を 1、 $S_w < S_b$ となるビット要素を 0 とすることにより N_{bit} 個のビット列を得る。

(14) (13) で得られたビット列を 1 ビットずつループシフトし、2 進数として最も小さくなる値を最終的なマーカの番号とする。この時、最終的なマーカの番号を得た時のシフト回数を N_{sft} として記録しておく。

以上に述べた楕円認識処理及びマーカ認識処理により、マーカの入力画像中での位置と種類を得ることができる。マーカの入力画像中での位置と種類を得た後は、同時に認識できたマーカの数に応じて P3P や P4P の手法を用いて、マーカとカメラの間の相対的な位置と姿勢を求める。

なお、(4) における繰り返し回数 K は、少ない方が処理が軽くなるが、少な過ぎると結果が安定しない。ここでは円形マーカが直径約 30pixel で写っている静止画像に対して繰り返し楕円認識処理を施し、その際に得られる長軸半径と短軸半径の標準偏差が共に 0.5pixel 以内に収まる K を実験的に調べ、その結果から K を 150 回としている。

付録 B アンケート用紙

図 B.1 から図 B.6 に評価の際に用いたアンケートを示す。

アンケート用紙

以下の「機能に関する評価」と「ユーザビリティに関する評価」について、以下の 5 段階の評価のうち、最も近い数字に○をつけてください。

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—②—③—④—⑤

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自由にお書きください。

(A) 機能に関する評価

1. マーカの位置を計測する際に、カメラでマーカを自動認識することは有効である。
①—②—③—④—⑤
2. マーカの位置を計測する際に、レーザ距離計測器を利用することは有効である。
①—②—③—④—⑤
3. マーカの位置を計測する際に、電動雲台を利用することは有効である。
①—②—③—④—⑤
4. 環境に貼り付けたマーカを**全て自動的に認識する**機能は有効である。
①—②—③—④—⑤
5. 環境に貼り付けられたマーカの**位置を全て自動的に計測する**機能は有効である。
①—②—③—④—⑤
6. マーカの位置を自動計測する際に必要な時間は十分短い。
①—②—③—④—⑤
7. マーカの位置の計測精度は要求を満たしている。
①—②—③—④—⑤
8. 自動計測機能を利用することにより、作業環境を準備する際の効率上がる。
①—②—③—④—⑤

図 B.1: アンケート用紙 A(その 1)

9. システムは照明条件が悪いところでも利用できる。

①—②—③—④—⑤

10. システムは障害物が多くても利用できる。

①—②—③—④—⑤

11. システムは広い環境でも利用できる。

①—②—③—④—⑤

12. システムは狭い環境でも利用できる。

①—②—③—④—⑤

13. 自動的にマーカを計測する際、作業終了時に音を出すことは有効である。

①—②—③—④—⑤

14. カメラのPAN,TILT,ZOOMをSLIDERを用いて手動で制御できることは有効である。

①—②—③—④—⑤

15. 現在カメラに映っているマーカのみを計測する機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

16. マーカの計測結果を個別に消去できる機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

17. マーカの計測結果の確定・未確定を切り替える機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

18. マーカの計測予定・未予定を切り替える機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

19. マーカの計測結果の表示の座標系を切り替える機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

20. システムの動作状態を文字で表示する機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

図 B.2: アンケート用紙 A(その 2)

2 1. システムを初期化する機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

2 2. カメラが写している範囲をアングルマップ上で赤枠を用いて表示する機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

2 3. カメラの方向をアングルマップ上でクリックすることにより変更する機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

2 4. マーカの自動計測を途中で止める機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

2 5. 選択したマーカのみを自動的に計測する機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

2 6. 認識したマーカの総数を表示する機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

2 7. 自動的に計測する予定のマーカの総数を表示する機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

2 8. 計測済みのマーカの総数を表示する機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

2 9. 個々のマーカの状態（計測済・値確定・計測予定）を表示する機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

3 0. 自動計測の際のズーム値を3段階に分けていることは有効である。

①—②—③—④—⑤

3 1. カメラの方向を初期化する機能は有効である。

①—②—③—④—⑤

図 B.3: アンケート用紙 A(その3)

(B)機能について、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。

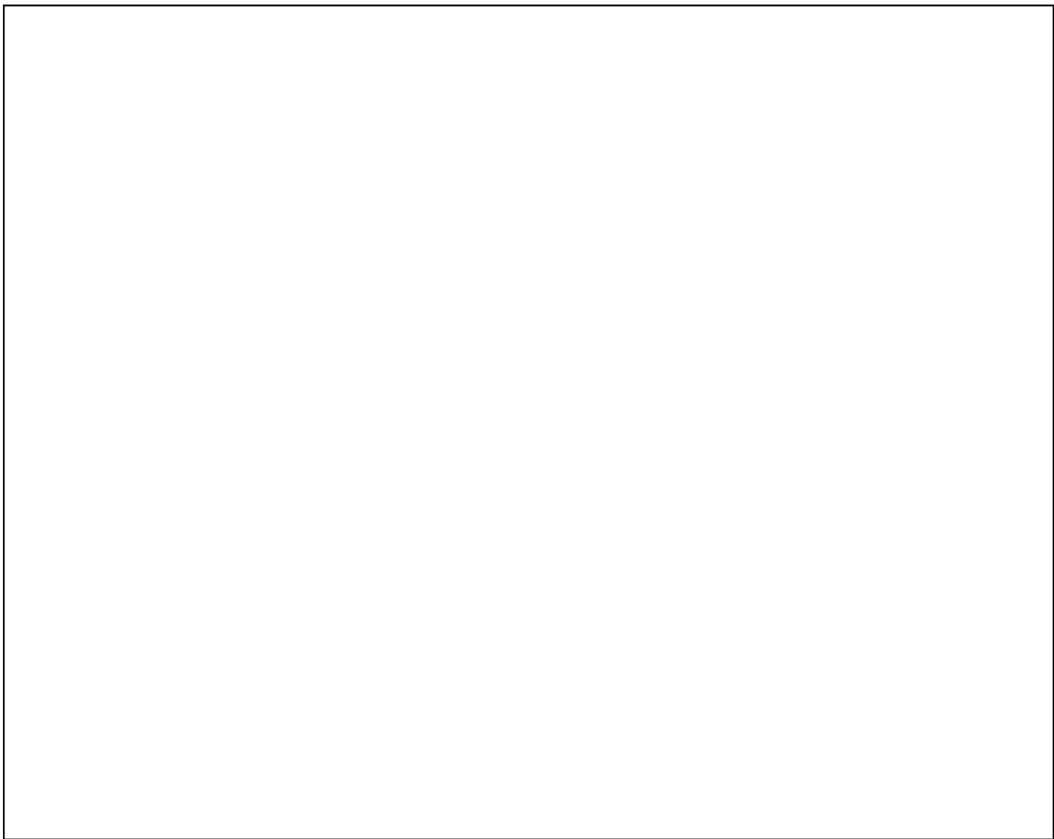
A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for handwritten or typed responses to the survey question above it.

図 B.4: アンケート用紙 B

(C) ユーザビリティに関する評価

1. システムで使用する機器は現場に設置しやすい
①—②—③—④—⑤
2. システムを使用しない際に、システムを所定の場所に収納しやすい
①—②—③—④—⑤
3. 画面上の文字や数字は読みやすい
①—②—③—④—⑤
4. 手作業で操作する際に、操作しやすい
①—②—③—④—⑤
5. インタフェースの画面は分かりやすい
①—②—③—④—⑤
6. ソフトウェアのボタンは押しやすい
①—②—③—④—⑤
7. 提示する計測結果は分かりやすい
①—②—③—④—⑤
8. 手作業での PAN,TILT,ZOOM の操作は簡単である
①—②—③—④—⑤
9. 初めてシステムを使う人でも簡単に操作できる
①—②—③—④—⑤
10. 操作に対して応答は即座に返ってくる
①—②—③—④—⑤
11. 各マーカの計測状態の表示は分かりやすい
①—②—③—④—⑤
12. システムの操作にいらいらさせられる
①—②—③—④—⑤

図 B.5: アンケート用紙 C

(D)使いやすさについて、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。

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

図 B.6: アンケート用紙D