

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
原子力発電プラントの
題目： 現場作業支援のための拡張現実感用
トラッキング手法の開発と評価

指導教員： 吉川 榮和 教授

氏名： 関山 友輝

提出年月日： 平成18年2月9日(木)

論文要旨

題目：原子力発電プラントの現場作業支援のための拡張現実感用トラッキング手法の開発と評価

吉川榮和研究室 関山 友輝

要旨：

拡張現実感 (Augmented Reality:AR) 技術とは、作業対象物上に CG による作業情報を重畳表示させる技術で、作業員に作業の直感的理解を促すことができる。原子力発電プラント解体の際にこの拡張現実感技術を用いて放射線量情報や作業情報を提示すれば、ヒューマンエラーの防止につながり、作業員の被爆量を低減できると期待されている。

拡張現実感技術の実現に際しては、重畳情報を正確な位置・方向に表示させるために、ユーザと情報提示対象物との位置・姿勢関係を求めるトラッキング技術が必要不可欠である。これまでに様々なトラッキング技術が提案されているが、原子力発電プラント解体作業を支援するシステムを構築する場合、その特殊な環境から従来手法では実現不可能であるため、新たなトラッキング技術を開発する必要があった。

そこで昨年度当研究室では、原子力発電プラント内での利用に適したトラッキング手法として、バーコード型の人工マーカ（以下、バーコードマーカ）を用いたトラッキング手法が提案された。この手法は、環境中に貼付された位置が既知のバーコードマーカを1台のカメラで撮影し、その画像中での位置関係からトラッキングを行う手法である。バーコードマーカは長さ 68 cm～104 cm、幅 4 cm の細長い形状であるため、原子力発電プラント内のパイプ類に容易に貼付することが可能である。しかし昨年度の研究では、(1) 環境内に非常に多数のバーコードマーカを貼付し、その位置を正確に計測する必要がある (2) P6P 問題の解法を利用するため、その制約条件から同一平面上にないバーコードマーカのみしか利用できない (3) バーコードマーカが少なくとも2つ以上カメラに撮影されていないとトラッキングが行えないという問題点が残されていた。

そこで本研究では、上述の問題点 (1) に対しては3台のカメラを角度をつけて並べたマルチカメラユニットを用い、より視野の広い画像を得ることで、貼付する必要のあるバーコードマーカの数を実質的に低減する。また問題点 (2) に対しては、P4P 問題の解法を利用したトラッキング手法によって、同一平面内にある平行なバーコードマーカを利用する方法を提案する。さらに、問題点 (3) に対応するため、ジャイロセンサを併用したハイブリッドトラッキングを導入し、バーコードマーカが2つ以上認識できなくなった場合にもトラッキングを継続できるようにする。

提案手法を実装した評価用システムを構築し、評価実験を行った。その結果、トラッキングの精度はバーコードマーカを貼付する位置関係によって変化するものの、作業情報の重畳表示を行うのに十分耐え得るトラッキング精度が得られることが確認された。次いで、ふげん発電所内において動作検証を行った。その結果、1.0 - 2.7 m 間隔でバーコードマーカを貼付した場合、マルチカメラを用いることでシングルカメラの2.5倍の範囲でトラッキングが行えることが分かった。また、マルチカメラによるトラッキングのみでも、ふげん発電所で撮影された全 411 フレームの画像のうち 49% でトラッキングが行えることが確認されたが、さらにハイブリッドトラッキングを併用することで、69% のフレームで正しくトラッキングが行えると見積もられた。

今後の課題としては、より精度の高いアルゴリズムの導入や処理時間の短縮を行い、実用化に向けたトラッキングシステムの改良を行っていくことが挙げられる。

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 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技術	10
2.1.4 原子力発電プラントに適したトラッキング手法の要求仕様	14
2.2 昨年度までの研究成果	17
2.2.1 バーコードマーカを利用したトラッキング手法の特徴	17
2.2.2 昨年度のトラッキング手法の課題	20
2.3 研究の目的	20
第 3 章 バーコードマーカとマルチカメラによるトラッキング手法の開発	23
3.1 マルチカメラを用いたトラッキング手法	23
3.2 マルチカメラからの画像における P4P 問題の解法	24
3.2.1 座標系の定義	25
3.2.2 トラッキングシステムの入力および出力	26
3.2.3 マルチカメラにおける P4P 問題の解法の概略	27
3.2.4 初期値の計算手法	28
3.2.5 誤差関数の非線形最小化	32
3.2.6 カメラのキャリブレーション手法	32
第 4 章 ジャイロセンサを併用したハイブリッドトラッキング手法の導入	35
4.1 ジャイロセンサを併用したハイブリッドトラッキング	35
4.1.1 ジャイロセンサを併用したハイブリッドトラッキングの特徴	35
4.1.2 本研究で用いるジャイロセンサの特徴	36
4.2 提案するハイブリッドトラッキング手法	37

第 5 章 提案するトラッキング手法の評価実験	41
5.1 評価実験に用いるシステムの構成	41
5.2 バーコードマーカの配置によるトラッキング精度への影響の評価実験	43
5.2.1 2本のバーコードマーカの配置に対する精度評価実験	45
5.2.2 多数のバーコードマーカの配置に対する精度評価実験	60
5.3 ふげん発電所における本手法の可用性評価実験	70
5.4 動作速度の評価実験	78
第 6 章 結論	82
謝 辞	85
参 考 文 献	87
付録 A ARToolKit	付録 A-1
A.1 ARToolKit の概要	付録 A-1
A.2 マーカ検出処理	付録 A-1
A.2.1 取り扱う座標系	付録 A-1
A.2.2 マーカ抽出	付録 A-2
A.2.3 マーカ識別	付録 A-3
A.2.4 4 頂点位置検出	付録 A-4
A.3 マーカの 3 次元位置推定	付録 A-5
A.3.1 回転移動成分 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ の推定	付録 A-6
A.3.2 平行移動成分 $\mathbf{T}_{3 \times 1}$ の推定	付録 A-6
A.3.3 変換行列 \mathbf{T}_{cm} の修正	付録 A-6
A.4 カメラキャリブレーション	付録 A-6

目 次

2.1	拡張現実感技術の例	5
2.2	拡張現実感の位置付け	5
2.3	対象物の直感的理解	6
2.4	情報内容の容易な理解	6
2.5	航空機ワイヤーハーネス作成支援システム	8
2.6	KARMA	8
2.7	拡張現実感技術による放射線量可視化	9
2.8	ARToolKit のマーカ	14
2.9	昨年度の研究で提案されたバーコードマーカ	18
3.1	シングルカメラ・マルチカメラによる撮影範囲	24
3.2	本システムで扱う座標系	25
3.3	単一の理想スクリーン座標系への変換	29
3.4	仮想正方形マーカ	31
3.5	キャリブレーションボード	34
3.6	カメラの外部パラメータのキャリブレーション手法	34
4.1	InertiaCube ³ の外観	36
4.2	本研究で提案するハイブリッドトラッキング手法の概略	38
4.3	ハイブリッドトラッキングのデータフロー	39
4.4	差分情報の更新時のデータフロー	39
5.1	製作したマルチカメラユニット	41
5.2	評価用システムのソフトウェア構成	43
5.3	評価用システムの動作画面例	44
5.4	2本のバーコードマーカの配置に対する精度評価実験の各条件	46
5.5	2本のバーコードマーカの配置に対する精度評価実験のカメラ位置	47
5.6	条件 $c = 1$	47
5.7	条件 $c = 2$	47

5.8	撮影画像例 ($l = 200 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 1$)	49
5.9	撮影画像例 ($l = 300 \text{ cm}$, $\theta = 60^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 1$)	49
5.10	撮影画像例 ($l = 200 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 2$)	49
5.11	撮影画像例 ($l = 300 \text{ cm}$, $\theta = 60^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 2$)	49
5.12	マルチカメラを用いたトラッキングおよび重畳表示の例	50
5.13	評価対象の誤差	50
5.14	条件 $l = 50 \text{ cm}$, $c = 1$ の結果	51
5.15	条件 $l = 50 \text{ cm}$, $c = 2$ の結果	52
5.16	条件 $l = 100 \text{ cm}$, $c = 1$ の結果	53
5.17	条件 $l = 100 \text{ cm}$, $c = 2$ の結果	54
5.18	条件 $l = 200 \text{ cm}$, $c = 1$ の結果	55
5.19	条件 $l = 200 \text{ cm}$, $c = 2$ の結果	56
5.20	条件 $l = 300 \text{ cm}$, $c = 1$ の結果	57
5.21	条件 $l = 300 \text{ cm}$, $c = 2$ の結果	58
5.22	精度評価実験のバーコードマーカ配置	62
5.23	撮影画像例 ($l = 100 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 1$, 配置-A)	63
5.24	撮影画像例 ($l = 100 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 1$, 配置-B)	63
5.25	撮影画像例 ($l = 100 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 1$, 配置-C)	64
5.26	撮影画像例 ($l = 100 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 1$, 配置-D)	64
5.27	撮影画像例 ($l = 100 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 2$, 配置-D)	64
5.28	条件 $l = 50 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $c = 1$ の結果	65
5.29	条件 $l = 50 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $c = 2$ の結果	66
5.30	条件 $l = 50 \text{ cm}$, $d = 2 \text{ m}$, $c = 2$ の結果	67
5.31	条件 $l = 100 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $c = 2$ の結果	68
5.32	条件 $l = 100 \text{ cm}$, $d = 2 \text{ m}$, $c = 2$ の結果	69
5.33	ふげん発電所内における実験環境	72
5.34	コース1の撮影画像例	74
5.35	コース2の撮影画像例	74
5.36	カメラ1台でのトラッキング例	75
5.37	ブラーによる影響の例	75
5.38	バーコードマーカの認識数	76
5.39	バーコードマーカによるトラッキングに失敗した時間の分布	77

5.40 ハイブリッドトラッキングが行えるフレームの割合	79
A.1 ARToolKit の使用例	付録A-2
A.2 システムが取り扱う座標系	付録A-3
A.3 マーカの例	付録A-3
A.4 格子点のフィッティング1	付録A-7
A.5 格子点のフィッティング2	付録A-7

表 目 次

2.1	各トラッキング技術の長所	11
2.2	各トラッキング技術の短所	12
4.1	InertiaCube ³ の特徴	37
5.1	評価用システムのハードウェア構成	42
5.2	本実験で用いるレーザー計測機器の主な仕様	45
5.3	2本のバーコードマーカの配置に対する精度評価実験の条件	46
5.4	距離 1m あたりの重畳表示誤差の見積もり [mm]	61
5.5	バーコードマーカの組み合わせ条件	62
5.6	バーコードマーカの貼付位置	73
5.7	処理時間の計測結果	80

第 1 章 序論

日本は石油や石炭などのエネルギー資源が少ないこと、また国土が狭いため大規模な土地が必要な風力発電、水力発電などの発電方法では十分な発電量が得られないこと、さらには近年の地球温暖化問題から、原子力発電による電力供給がますます重要な役割を担うようになってきている。しかし、原子力発電の持つ危険性から十分厳重な管理と安全な運用が必要とされている。また、近年の電力自由化の流れの中で、原子力発電プラントは経済性の向上も求められるようになってきており、安全性と信頼性を確保した上で効率の良い運用が必要とされている。

一方、原子力発電プラントの建設、解体についても原子力発電の危険性から、他の発電プラントとは異なり十分に安全な対策を講じて建設、解体する必要がある。特に、プラント解体の際には放射能汚染物質を扱うため、綿密に計画を練る必要がある。また、解体作業はすでに発電を行わないプラントに対して行うため、発電によるプラントからの収益は望めない。そのため採算性はなく、解体作業に必要な経費はなるべく安価であることが望ましい。

福井県敦賀市に建設されたふげん発電所は、純国産エネルギーとも言えるプルトニウムとウランの混合酸化物、MOX (Mixed-Oxide) 燃料の再利用を行う新型転換炉である。新型転換炉開発については、その役割が終了しつつあることから撤退し、平成15年に運転を終了した。運転終了後は、「原子炉等規制法」に基づき、適切に設備を維持・管理し、十分な安全性を確保するとともに、約10年間を廃止措置準備期間とし、廃止措置計画の具体化に必要な開発・研究を行うことが決まっている。

現状の解体方法では、作業指示書に記載された放射線量情報を基に危険な領域を避けながら解体作業を行っている。そのため、記憶間違いや物忘れなどのヒューマンエラーが発生する可能性が高く、解体作業の効率が悪化し、解体作業員の被曝量が必要以上に増加してしまうという問題がある。

こういったヒューマンエラーによる被曝の低減、安全性の確保、および安価な解体作業を実現するための次世代ヒューマンマシンシステム (HMS: Human Machine Systems) の研究が行われている。その中でも拡張現実感技術 (AR: Augmented Reality) の利用が検討されている。拡張現実感技術は直感的で容易な理解を可能にする技術で、複雑な作業の効率化とヒューマンエラーの低減に効果があり、高い安全性を保ちながら

解体作業を行えると期待されている。

そこで本研究では、放射線量可視化や解体作業中に必要な作業情報の提示を拡張現実感技術を利用して行う作業支援システムの開発を目指す。その中でも特に、拡張現実感技術の要素技術であるトラッキング技術に注目し、ふげん発電所に適したトラッキング技術の開発を目的とする。トラッキング技術とは、現実世界に対する重畳表示を正しい位置・向きで実現するために必要な要素技術で、拡張現実感技術を利用する際には必要不可欠な技術である。拡張現実感技術による放射線量の提示を実現すれば、放射線量確認の際のヒューマンエラーの低減や、解体作業の効率化ができると期待される。

本論文は、第1章の序論を含め、6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まず述べ、次いで拡張現実感技術について説明し、本研究の目的と意義を述べる。第3章では、本研究で提案するマルチカメラを用いたトラッキング手法について説明する。第4章では、本研究で用いるハイブリッドトラッキング手法について説明する。第5章では、提案手法によるトラッキングを実装した実験用システムを用いて行った評価実験について述べる。第6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、まず本研究の背景について述べるとともに、昨年度までに得られた研究成果について説明する。その後で、本研究の目的について述べる。

2.1 拡張現実感技術によるふげん発電所解体作業支援

ここでは本研究の背景として、まずふげん発電所における解体作業のあらましについて説明する。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

新型転換炉ふげん発電所は平成 15 年 3 月 29 日に原子炉としての運転を終了した。現在ふげん発電所では発電は行っていないが、約 10 年間で廃止措置準備期間とし、設備の管理と安全の確保を行っている。またこの準備期間を利用し、廃止措置のために必要な計画の立案、および技術の研究・開発を行っている^[1]。

原子力発電プラントでの解体作業においては放射能汚染物質を取り扱う。ふげん発電所の廃止措置についても同様で、解体作業に従事する作業員は解体作業中に被曝する恐れがある。作業員には 1 日での累積的な被曝量や、年間での累積的な被曝量に制限があり、解体作業はその制限を越えないように計画的に、かつ迅速に進める必要がある。そのため、作業員は被曝量の少ない道を通りながら迅速に解体作業を行うことで、累積的な被曝量を低減させる必要がある。

ふげん発電所での解体作業は、4、5 人程度のグループごとに解体作業を行い、1 人の監督官の指揮の下、各人の累積的な被曝量が均等になるように作業を割り振り、解体作業を行うことが計画されている。以下に解体作業の流れを示す。

1. 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、解体作業場までの被曝量の少ない道のり、および解体物を搬出するための被曝量の少ない道のりを記憶する
2. 記憶をたよりに解体作業場まで移動する
3. 解体箇所を切断する

4. 解体物を所定の位置まで搬出する
5. 以上の工程を繰り返す

この現状の方法に従って解体作業を行う際には、次のようなヒューマンエラーが発生することが想定される。

1. 作業指示書確認の際に、間違っただのりを記憶してしまう
2. 記憶した道のりを作業中に忘れてしまう
3. 記憶は正しいが、勘違いで道のりを間違えてしまう
4. 作業指示書確認の際に、間違っただ断箇所を記憶してしまう
5. 記憶した切断箇所を作業中に忘れてしまう
6. 記憶は正しいが、勘違いで切断箇所を間違えてしまう

このようなヒューマンエラーが積み重なると、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。そのため、原子力発電プラントでの解体作業では、ヒューマンエラーによる被曝の軽減が課題となっている。

解体作業中のヒューマンエラーを低減するために、現在までにふげん発電所の3次元CADによるデータベースシステム、仮想現実感による解体作業シミュレーションシステムといった、解体作業計画段階での支援システムなどの研究・開発が進められており^[1]、これを用いて事前に教育・訓練を行うことで、解体作業時のヒューマンエラーを低減させることが検討されている。しかしこの場合でも、作業現場における勘違いや記憶間違いによるヒューマンエラーを根本的に避けることはできない。

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、ヒューマンエラーによる被曝を軽減することが大きな課題である。この問題を解決する方策として、作業員に直感的理解を促す情報提示を行うことが有用であると考えられており、現在、次世代HMS (Human Machine Systems) を用いた作業支援方法が検討されている^[2]。

次世代HMSの一つである拡張現実感技術 (AR:Augmented Reality) 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、現実空間の映像上にコンピュータを用いて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、持ち運び可能な小型ディスプレイ、PDA などを利用してユーザ

に提示される。図 2.1 は拡張現実感技術を用いて、実在する机の付近に、CG によるランプと 2 つの椅子を重畳表示している例である。



図 2.1: 拡張現実感技術の例 [3]

コンピュータで生成された仮想世界に人間が没入する仮想現実感（VR:Virtual Reality）や現実世界との関係は図 2.2 に示すようになっており、拡張現実感 は仮想現実感と比べてより現実世界に近いインタフェースである [5]。

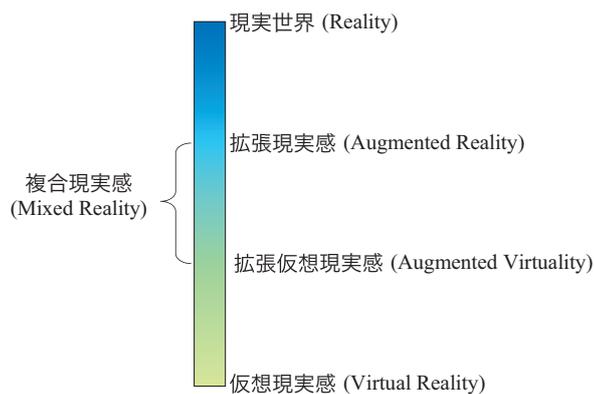


図 2.2: 拡張現実感の位置付け [5]

この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

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。例えば、図 2.3 に示すような機器のレバーを上げる操作を行う作業を考える。従来の方法では、マニュアルと実際の

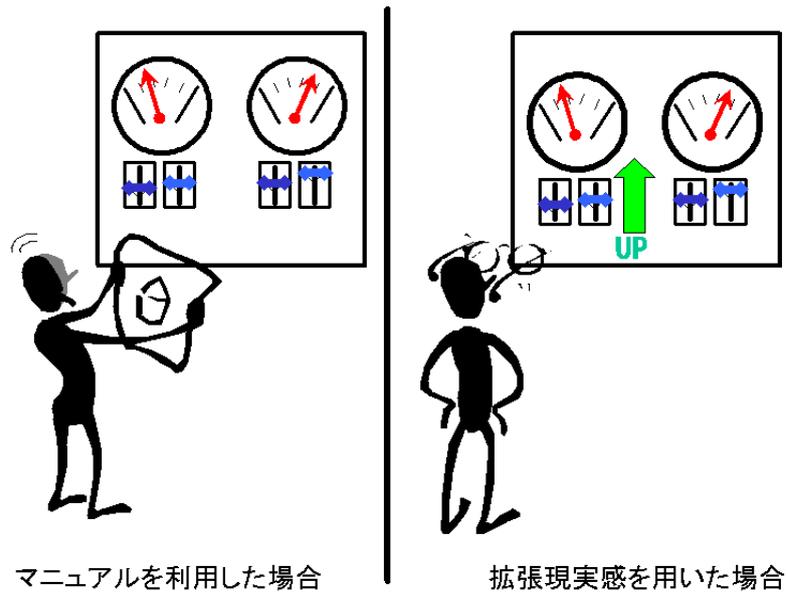


図 2.3: 対象物の直感的理解

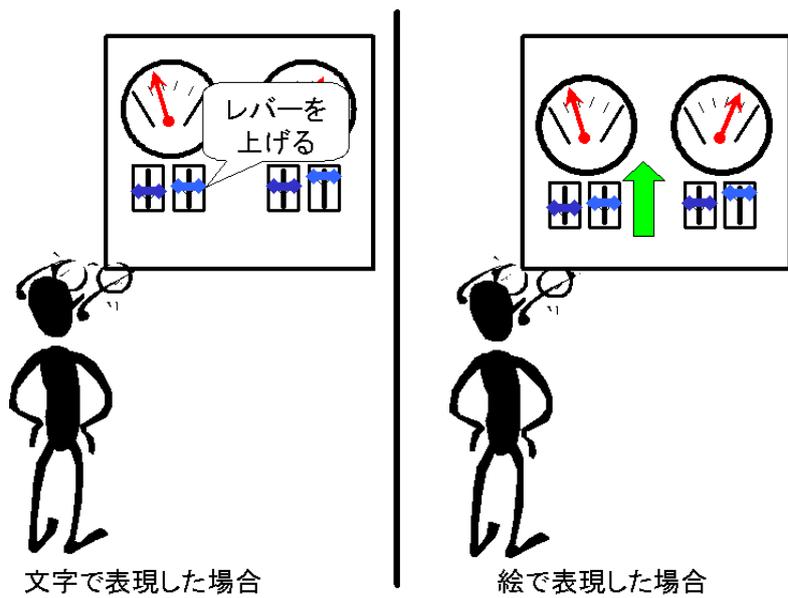


図 2.4: 情報内容の容易な理解

機器を見比べて操作の対象となるレバーを特定する。こういった方法では、ユーザは操作の対象を特定するためにマニュアルと実際の機器を視線移動を繰り返す必要があり、ユーザにかかる負担が大きい。また、操作の対象となるレバーを別のレバーと間違える可能性もある。一方、拡張現実感技術を用いた場合、文字や矢印などの拡張情報を操作の対象となる物体上に重畳表示できるため、ユーザは直感的に操作の対象を特定できる上、別のレバーと間違える可能性も少ない。

2. 情報内容の容易な理解が可能

拡張情報には、矢印などの絵を用いることもできるため、ユーザは拡張情報の内容を容易に、即座に、かつ確実に理解することができる。例えば、図2.4に示すように、文字による重畳表示と、矢印による重畳表示を考える。文字による重畳表示の場合、ユーザは重畳表示されている文字をすべて読み終えた時点で操作の対象となっているレバーをどう動かすべきか理解できる。一方、矢印による重畳表示の場合、ユーザは矢印を見た時点で即座に操作の対象となっているレバーをどう動かすべきか理解できる。また、文字のみの情報では意味が不明確になる場合があり、情報の本来の意味とユーザの解釈が一致していない可能性もある。しかし、絵等を用いてユーザにとって理解が容易な形で情報を提示することで、意味を明確に伝えることができる。

これら2つの特徴は、まず第1段階として提示したい情報と現実世界内の対象とを視覚的に結びつけ、そして第2段階として情報提示の表現手段をより豊かにするという関係にある。つまり「なに」を「どうする」という作業内容を、より直接的な表現で提示できる手段と言える。このような特徴から、拡張現実感技術は作業を支援するインタフェースとして有効と考えられる。

このような拡張現実感技術の特徴を生かした作業支援の例としては、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実用化されている^[6]。このシステムでは、航空機の電子機器配線ハーネスの配線を行う際、図2.5に示すように、配線すべきハーネスの種類と位置を、作業員が装着している光学シースルーHMDを用いて基板上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、レーザプリンタのメンテナンス作業の支援を目的とした支援システムとして、KARMAがある^[7]。このシステムでは、図2.6に示すように、目的の作業を行うには、部品をどのように動かせば良いかをHMDを介して提示している。

以上のような特徴を持つ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

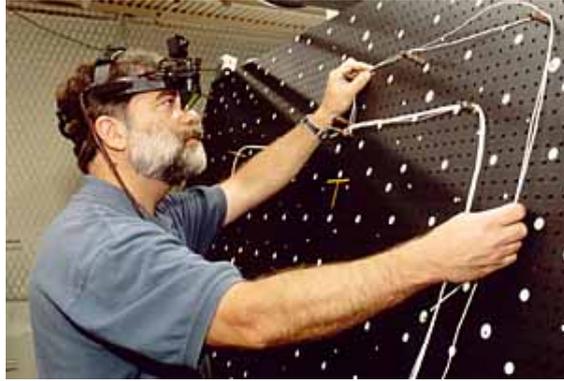


図 2.5: 航空機ワイヤーハーネス作成支援システム [6]

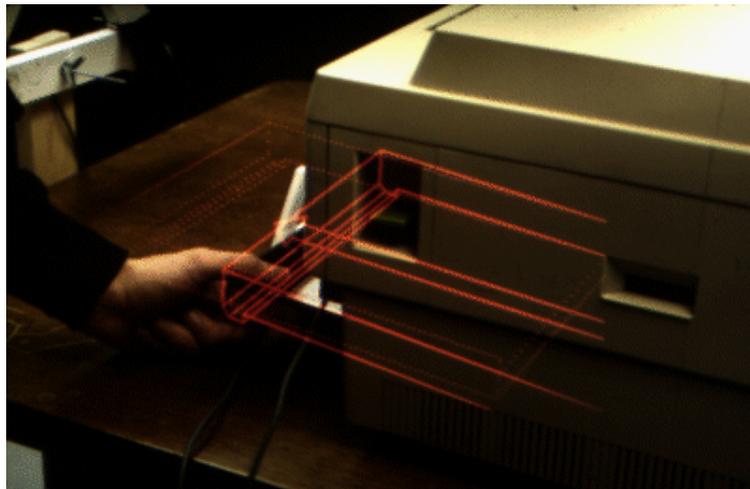


図 2.6: KARMA [7]

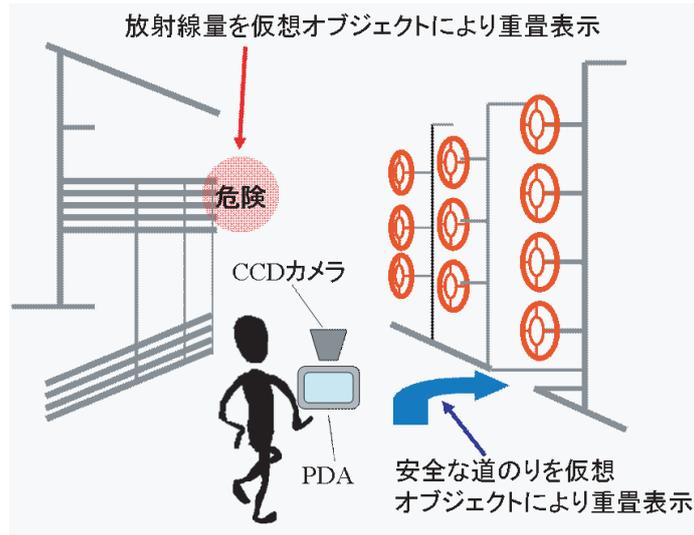


図 2.7: 拡張現実感技術による放射線量可視化

用すれば、作業員に周囲の放射線量や解体作業手順に関する直感的理解を促す情報提示を行うことが可能になり、解体作業時のヒューマンエラーを低減できると考えられる。

具体的には、図 2.7 に示すように、拡張現実感技術を用いて放射線量の多い箇所を視覚的に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することができる。また、安全な道のを矢印等によって提示することで、道順の記憶間違いなどを防止することができ、作業時間の短縮、ひいては被曝量の低減に繋がると期待される。これによって、前項で説明した 6 つのヒューマンエラーのうち、1～3 番目のヒューマンエラーを解決することができると考えられる。このように放射線量や安全な道のを提示する場合、被曝量の少ない安全な場所から、容易、迅速かつ正確に放射線量を把握し、正しい順路を確認できることが望ましい。こういった放射線量可視化に拡張現実感技術を応用する研究の例として、ハルデン原子炉プロジェクト^[8]が進められている。

それに加えて、解体作業の対象となる機器・配管や、解体手順等の作業情報を拡張現実感技術を用いて提示すれば、4～6 番目のヒューマンエラーを解決することも可能である。こういった作業指示を提示する場合には、作業現場において作業中にいつでも容易かつ精度よく必要な情報を提示できることが必要となる。

一方、拡張現実感技術を利用して実用的な支援システムを構築するにあたっては、インタフェースの開発とトラッキング技術開発の 2 点が主要課題として挙げられる^[3]。中でもトラッキング技術は、拡張現実感技術の特徴である現実世界との重畳表示を、正

しい位置・向きで実現するためには欠かせない技術であり、これを解決しなければ拡張現実感技術を利用した作業支援の実現は不可能である。

トラッキングとは、ユーザと情報提示対象物との位置・姿勢関係を取得することである。位置は対象物から見てどこにいるかを3次元座標で表したものの、姿勢はどの方向を向いているかを3次元空間の各軸からの角度で表したものであり、合わせて6自由度の値である。拡張現実感技術においては、トラッキングによって得られる位置・姿勢情報を利用して、現実世界に重畳して提示する情報の位置と向きを決定する。すなわちトラッキング技術は、拡張現実感技術を利用するには、まず初めに解決しなければならない問題であると言える。

2.1.3 既存の代表的なトラッキング技術

前項で述べたように拡張現実感技術の実用化においてトラッキング技術はキーテクノロジーであり、これまでも以下のような様々なトラッキング技術が研究されている^[9]。

- ユーザが装着したカメラで撮影された画像を画像処理することによって行うトラッキング
- 慣性センサ（加速度センサ・ジャイロセンサなど）を装着して動きを計測するトラッキング
- 磁気センサ・超音波センサなどの機器を環境に設置して用いるトラッキング
- GPS(Global Positioning System) を利用するトラッキング

図 2.5 に示す航空機ワイヤーハーネス作成支援システムでは、作業員の頭部に取り付けられた磁気センサを用いて作業員の頭部の位置を計測することでトラッキングを行っている。また、図 2.6 に示す KARMA では、対象となるプリンタの主要な部品にあらかじめ人工マーカを貼り付けておき、超音波を利用して各人工マーカを検出することでトラッキングを行っている。

表 2.1 および表 2.2 に既存のトラッキング技術について長所と短所を示す。

人工マーカを用いたトラッキングとは、壁や天井などに3次元位置と姿勢が既知のマーカ、いわゆる人工マーカを貼り付け、ユーザの頭部などに取り付けたカメラでこの人工マーカを撮影し、得られた人工マーカの画像を解析して、人工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、人工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]。人工マーカを用いたトラッキング手

表 2.1: 各トラッキング技術の長所

トラッキング手法	長所
人工マーカ	<p>3次元位置と姿勢が既知の人工マーカを利用するため高精度で安定したトラッキングが可能である</p> <p>必要な機材が視界画像を撮影するカメラと画像処理を行うコンピュータだけであり、また人工マーカも紙や木などの安価な物を利用できるため、コストが低い</p> <p>人工マーカを正確に認識できる近距離では、比較的精度が高い</p>
自然特徴点	<p>環境から自然特徴点を抽出するため、周囲に機器を設置する必要がない</p> <p>周辺環境の情報(自然特徴点の3次元位置)を順次取得していくため、広範囲で利用できる</p>
磁気センサ	安定した磁場内では比較的精度が高い
超音波センサ	同じ室内であれば比較的広い範囲で精度よく計測できる
慣性センサ	<p>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</p> <p>計算負荷が低く、リアルタイム性が高い</p>
GPS	<p>カーナビなどで利用実績があり、安定したトラッキングが可能である</p> <p>屋外であればどこでも利用できる</p>

表 2.2: 各トラッキング技術の短所

トラッキング手法	短所
人工マーカ	人工マーカが写っていない時は利用できないため、大量の人工マーカを貼付する必要がある
	精度は画像の解像度に依存するため、精度を上げるには高解像度の画像処理が必要になる
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
	複数画像間の特徴点同士を対応付けるのが困難であり、トラッキングに大きな乱れが生じることがある
	精度は画像の解像度に依存するため、精度を上げるには高解像度の画像処理が必要になる
磁気センサ	環境内に新たに機器を設置する必要がある
	金属や電子機器など磁場を乱す要因があれば計測結果に歪みが生じる
	トランスミッタの発生する磁場内でしか利用できないため、狭い範囲でしか利用できない
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
	環境内にある物体に影響されやすい
慣性センサ	センサのドリフト成分に起因する誤差を生じやすい
	積分計算の際に、誤差が蓄積しやすい
	得られる値は前回計測時からの変化分であり、絶対位置・姿勢を得るには初期値が必要になる
GPS	電波が届きにくいいため、屋内環境で利用できない
	一般の利用に際しては、精度の保証がされていない

法はこれまでも数多くの研究がなされており、精度や安定性が高い手法である。しかし、カメラ画像内に人工マーカが撮影されていない場合には、トラッキングすることができないという問題がある。広範囲のトラッキングに用いる場合には、数多くの人工マーカを設置する必要がある。

自然特徴点を用いたトラッキングとは、カメラ画像内から特徴的な点（以下、自然特徴点）を抽出し、自然特徴点の3次元位置を解析することで、人工マーカの代用として用いる手法である。カメラ画像内から直線を検出して自然特徴点として利用する研究もある^[12]。この手法では、トラッキングを開始した時点での自然特徴点の3次元位置を知る必要がある。そのため、この3次元位置を知るために、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。トラッキングを行うために必要な数の自然特徴点の3次元位置が分かれば、それらの自然特徴点を用いてトラッキングを行い、さらに他の自然特徴点の3次元位置を推定することができる。このように、トラッキングと他の自然特徴点の3次元位置の推定を継続的に繰り返すことで、広範囲でのトラッキングが可能となる。しかし、カメラ画像ごとの同一の自然特徴点を対応付けることが難しい上、自然特徴点の位置精度はカメラ画像の解像度により制限を受けるため、一般的には、計算負荷が高く、トラッキング精度が低い。

磁気センサを用いたトラッキングとは、環境に配置したトランスミッタから発せられる球体状の磁場を用いて、トラッキングを行う手法である^[13]。この手法では、環境にトランスミッタを設置する必要があるため、トラッキングできる範囲が限定される。また、磁場を用いたトラッキングであるため、金属や電子機器など磁場を乱す要因があれば計測結果に歪みが生じるという問題がある。しかし、安定した磁場内では比較的精度が高い。POLHEMUS社のFASTRAKの場合、計測精度は位置が0.8mm、角度が0.15度と高精度である^[14]。

超音波センサは天井などに取り付けた発信機から出る超音波が、ユーザが身につけた複数の受信機に到達するまでの時間を観測することによって位置・姿勢角を測定するものである。一台の発信機で1つの室内のトラッキングが可能になるが、超音波の経路上に物体があると干渉が発生し、トラッキング精度が低下する。

慣性センサを用いたトラッキングとは、微少時間ごとに、加速度センサによってユーザの位置の変位を、ジャイロセンサによってユーザの姿勢の変位を計測し、計測開始時の位置・姿勢を平行・回転移動させて現在の位置・姿勢を算出する手法である。しかし、両センサとも時間や環境に起因したドリフト成分が生じるため、正確なトラッキングができないという問題がある。さらに、センサからの値は加速度・角速度である

ため、角度・位置の変位を得るには、ジャイロセンサは1回、加速度センサは2回の積分演算が必要となる。積分演算では誤差が蓄積するため、トラッキング精度は低い。そのため、これらセンサを単体で用いるのではなく、加速度センサとカメラ画像を併用したり^[15]、ジャイロセンサとカメラ画像を併用したり^[16]など、補助的な要素として利用されることが多い。また、拡張カルマンフィルタを用いて補正を行う手法もある^[17]。加速度センサやジャイロセンサから得られた変位は、前回計測した時からの変位であり、常に相対位置・姿勢しか求められない。絶対位置・姿勢を求めるには前回計測時の位置・姿勢が必要になる。そのため、最初に得られた計測結果から位置・姿勢を算出するには、計測を開始した時点での作業員の位置・姿勢が必要になり、別のトラッキング手法を用いてこれを得なければならない。

GPSを用いたトラッキングとは、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^[18]。この手法はGPS端末が衛星から信号を受信できる必要があるため、屋内環境では使用できないことや、精度が電波状態に大きく左右される問題がある。

こういった様々なトラッキング手法の中でも、加藤らが開発したARToolKit^[10]に代表される、人工マーカによるトラッキング手法が、精度が高く、かつ容易で実用的であるとされており、多くの研究で利用されている。人工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, 19, 20, 21]。ARToolKitにおいても、図2.8に示すような正方形の人工マーカの4頂点の現実空間内の既知の位置情報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^[22]。



図 2.8: ARToolKit のマーカ

2.1.4 原子力発電プラントに適したトラッキング手法の要求仕様

解体作業支援に用いられるトラッキング技術は、利用環境や用途などの条件を考慮して決定する必要がある。まず、ふげん発電所構内の環境と作業員について説明する。

ふげん発電所構内の特徴

1. 新型転換炉であるためパイプが多い
2. 機器から発せられる騒音が多い
3. 天井の高低差が激しい
4. 通路の幅は狭い場所が多い
5. 解体作業が進むにつれてインフラが解体されていく

作業員の特徴

1. 安全のため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

上記のことから、解体作業環境で利用できるトラッキング技術には、以下の制限がある。

解体作業環境におけるトラッキング技術の制限

1. 屋内環境のため、GPSは利用できない
2. 機器の大部分は金属なので、磁気センサは利用できない
3. 解体する環境に様々な機器を設置することは困難であるため、磁気センサや超音波センサは利用できない

また、拡張現実感技術を原子力発電プラントの解体作業において利用する際には、以下のことが要求される。

解体作業環境におけるトラッキング技術への要求

1. 環境の変化への柔軟な対応

解体作業が進むにつれ、環境中に置かれた機器類は撤去されて行く。また、放射線を遮るための遮蔽版が設置されることもある。そのため、解体支援システムに用いるトラッキング手法は、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. 作業指示を行うのに十分な精度

作業指示を行う際に、トラッキングの精度が十分でないと、誤った位置に指示が

重畳されてしまい、逆にヒューマンエラーを発生させる原因となってしまう。特に作業対象の近距離にいる場合には、トラッキングの誤差が大きく見えるため、より高い精度が求められる。そのため作業指示を提示するためには、配管や機器類の配置間隔などから考えて、重畳表示の誤差は重畳対象物との距離が1 mの場合で5 cm以内である必要がある。ただし放射線可視化のみを行う場合は、より低い精度でも十分である。

3. 広範囲で利用可能

拡張現実感技術を広い原子力発電プラント内での放射線可視化に応用する場合、作業員の被曝量を低減させるために放射能汚染物質から離れた被曝量の少ない場所から常に放射線量を把握できる必要がある。そのため、比較的広域でのトラッキングが必要となる。

4. リアルタイムに動作

作業員が即座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。処理速度に関してはフレームレートで表すのが簡便である。フレームレートとはディスプレイ表示において、1秒間に何回画面が更新されるかを表す値であり、例えば1秒間に15回描画が行なわれるなら、描画速度は15 fps (Frames per Second) と表わされる。拡張現実感技術においては、10 fps が違和感を感じない、動きのなめらかな映像の限界値とされている^[3]。作業支援に利用するトラッキング技術も、作業員が違和感を覚えて作業に支障が出ることがないように、仮想情報の描画処理にかかる時間も含めて少なくとも10 fps 程度の更新速度を実現できる必要がある。

解体作業環境におけるトラッキング技術の制限から、前節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いえる。特に、人工マーカを用いた方法は、精度も高く安定したトラッキングが期待できる。また計算負荷も自然特徴点を利用した手法と比べて低く、リアルタイムな動作も十分可能である。環境が変化した場合にも、人工マーカを貼り直すだけで良い。

ただし、人工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なければならないという問題点がある。これは、カメラ画像内である程度の大きさで撮影されなければマーカとして抽出できないため、人工マーカとカメラ間の距離が十分近い必要があるためである。逆に、遠距離にあるマーカを利用してトラッキングを実現しようとする、人工マーカを大きくする必要

がある。例えば、解像度 320×240 ピクセル、焦点距離 6mm レンズのカメラ利用した場合、ARToolKit マーカからカメラまでの距離が 5 m まででトラッキングを実現しようとする、1 辺 20 cm 程度の大きさをもつ正方形の人工マーカが必要となる。

しかし、天井は 10 数 m 上方にある部屋もあるため人工マーカを貼ることはできず、他方、床面に人工マーカをおくと、作業中に隠れたり、汚れて識別不能になる恐れがある。また、作業対象となる機器の上に大きなマーカを貼ると、解体作業の邪魔になることが想定される。従って、大きな正方形の人工マーカを貼れる場所の多くは壁に限られる。人工マーカによるトラッキング手法では正確な情報の重畳表示を行える範囲は人工マーカ周辺に限られる上、ふげん発電所構内の機器の多くは構内の中央付近に存在するため、壁に人工マーカを貼るだけでは十分な精度を得ることは難しいと考えられる。

そこで、新型転換炉のふげん発電所構内にはパイプが非常に多いという特徴を活かし、パイプ類に貼ることが可能な細長い形状のマーカを利用してトラッキングを行う方法が考えられる。細長い形状であれば、認識し易い人工マーカの大きさを確保した場合でも、解体作業の妨げになることなく作業対象となる機器付近にマーカを設置できるため、十分な精度でトラッキングを行うことが可能となると考えられる。

2.2 昨年度までの研究成果

本節では、原子力発電プラントで用いるのに適したトラッキング技術に関して、本研究室で昨年度までに得られた研究成果とその課題について述べる。

2.2.1 バーコードマーカを利用したトラッキング手法の特徴

昨年度の研究では、ふげん発電所構内における拡張現実感技術を利用した解体作業支援システムのうち、特にその機能の一つである放射線可視化システムに利用するのに適したトラッキング手法として、バーコード型の人工マーカを利用した手法が提案された^[23, 24]。この手法では、図 2.9 に示すような白地の上に ID 番号をコード化した黒縞の模様を持つバーコード型の人工マーカ（以下、バーコードマーカ）を利用する。バーコードマーカの長さはコード内容によって 68 cm～104 cm、幅が 4 cm の細長い形状であるため、ふげん発電所構内のパイプ類に容易に貼ることが可能である。なお、カメラ画像からバーコードマーカの抽出を容易にするため、バーコード部分の周りには若干の余白を設けている。

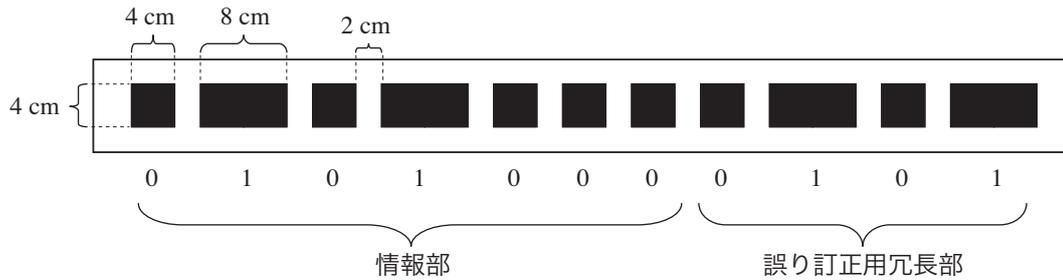


図 2.9: 昨年度の研究で提案されたバーコードマーカ

バーコード部分では、長さ 4 cm の黒縞が 0、長さ 8 cm の黒縞が 1 を表しており、全部で 11 bit の情報を表現することができる。この 11 bit のうち先頭の 7 bit を情報部として、バーコードの ID 番号を記録する。後部 4 bit は 1 bit の符号誤りを訂正するための冗長部（ハミング符号）となっている。冗長部によって、バーコードの一方の端がカメラ画像からはみ出している場合や、1 つの黒縞でそれが 0 と 1 のどちらを表現するのかの認識を誤った際でも、正しくバーコードマーカの ID 番号を識別することができる。この場合、使用可能なバーコードマーカは 128 種類となる。ふげん発電所構内では数 100 m² 程度の広さの区域ごとに分かれてるため、異なる区域では同種類のバーコードマーカを使用することで、構内全てでこのマーカを利用することができる。また、1 つの人工マーカを複数の場所で用いる手法^[26]を利用すればさらに必要なバーコードマーカの種類を減らすことも可能である。

バーコードマーカの素材は、白い部分は紙であり、黒縞はフェルトである。光が乱反射しやすいフェルトを用いることで、光沢によって黒縞がカメラに白く映るのを防ぐことができる。そのため、照明環境に左右されず安定してバーコードの認識を行うことが可能になる。

このバーコードマーカを利用したトラッキングの流れは次のようになっている。

1. バーコードマーカを環境内に貼り、その空間内の位置を計測
2. そのバーコードマーカをユーザが身につけた小型カメラによって撮影し、その画像を計算機に取り込む
3. 取り込んだ画像から、バーコードマーカを検出
4. 検出されたバーコードに表現された ID 番号を認識
5. 2 つのバーコードマーカの位置情報からバーコードマーカとカメラの相対的な位置・姿勢関係を算出

以下では、上述の手順 3,4 および 5 について、詳細な方法を説明する。

バーコードマーカの検出・認識

バーコードマーカの検出・認識は以下のようにして行われる。

まず、得られたカメラ画像 (320 × 240 ピクセル) をあらかじめ設定した閾値により二値化する。次に画像全域に対してラベリング処理を施し、連結成分を得る。こうして得られた連結成分のうち、面積が4 - 150 ピクセルでないものを除去する。また、著しくバーコードの黒縞と形状の異なるものも除外する。

こうして選択された黒縞である可能性のある領域のうち、一定の角度以内で10 - 12個並んでいるものをバーコードマーカの候補として抽出する。そしてそのバーコード中の各黒縞について、面積が最大値と最小値の中央値より大きければ1、そうでなければ0と判断する。バーコードの符号が得られたら、あらかじめ登録されている各バーコードの位置情報と照合して、そのバーコードの3次元座標を確定する。

なお、黒縞が10 bit しか連続していなかった場合は1 bit ずつずらしながら照合していき、10 bit が一致した時点で確定する。黒縞が12 bit 連続していた場合は、両端どちらかを無視して11 bit 分についてのみ照合を行い、登録されている符号と一致した方と見なす。また、11 bit の照合の前にはハミング符号によってチェック及び訂正を行う。こうすることで、ノイズや隠蔽によってバーコード読み取りに過不足がある場合や符号が誤認識された場合でも、ロバストに識別が行える。

評価実験の結果、この方法を用いると、垂直に設置したバーコードマーカをカメラで正面から捉えた場合、最大6m離れた位置からでも正しくバーコードを認識できることが分かった。また、バーコードマーカが映る角度が40°以内であれば、4m離れた位置から認識することができた。ただし、角度が80°の場合ではほとんどの距離において抽出が不可能であった。

また、ふげん発電所において実際に動作確認のための実験を行ったところ、正常にバーコードを検出・認識できることが確認された。また動作速度に関しては、最大30 fps、遅くとも10 fpsで検出・認識・結果の表示を行うことができ、リアルタイムに動作することが分かった。

検出したバーコードマーカを用いたカメラの位置・姿勢の推定

3次元位置と画像上の座標との対応が取れている n 点を用いて撮影したカメラの位置を求める問題を、透視 n 点問題 (PnP 問題) と言う^[27]。バーコードマーカとカメラの位置・姿勢関係の算出は P6P 問題を解くことで行う。P6P 問題の解法においては、同一平面上にない点の組を用いて計算を行わなければならないという制約条件がある^[23, 25]。

この条件を満たす2つのバーコードマーカの組があれば、それぞれのバーコードマーカから3点ずつ、計6点の位置情報を用いP6P問題を解くことで各バーコードマーカとカメラの相対的な位置・姿勢関係を算出できる。

評価実験の結果、1.5 m 間隔でバーコードマーカを配置した場合、カメラとバーコードの距離が2.0 - 5.0 m の範囲であれば、十分な精度でトラッキングが行えることが分かった。

2.2.2 昨年度のトラッキング手法の課題

以上で説明したトラッキング手法には、以下のような問題点が残されている。

1. 環境内に非常に多数のバーコードマーカを貼付し、その位置を正確に計測する必要がある
2. P6P 問題の解法の制約条件から、同一平面上にないバーコードマーカのみしか利用できない
3. バーコードマーカが少なくとも2つ以上カメラに撮影されていないとトラッキングが行えない

カメラに必要な数のバーコードマーカが映るようにし、かつ十分な精度でトラッキングを行うためには、重畳表示を行いたい箇所の付近に最長でも1.5m 間隔でバーコードマーカを貼っていく必要がある。さらに、その空間内の3次元位置を計測しなければならない。ふげん発電所構内は広く、またこの作業を行う際にも作業員が被爆する恐れがあるため、より少ないバーコードマーカでもトラッキングできることが望ましい。

また、P6P 問題の解法の制約のために、バーコードマーカを立体的に配置する必要がある。従って、例えば壁などに並べてバーコードマーカを貼るだけではトラッキングが行えないなど、利用可能な状況が狭められている。

2.3 研究の目的

そこで本研究では、昨年度提案された手法を改良して2.2.2項で述べた問題点を解消し、ふげん発電所に適したより高精度かつ広範囲で利用可能なトラッキング技術の開発を行うことを目的とする。また、開発した手法によってどの程度の精度でトラッキングが行えるか、またトラッキングが可能な範囲がどの程度向上するか、トラッキング速度は実用的な速度であるかを評価する。

図 2.9 に示したバーコードマーカの設計、およびその検出・認識手法については、昨年度までに一定の成果が得られているので本研究では取り扱わず、昨年度の手法をそのまま利用するものとする。本研究では、以下のようなアプローチによって 2.2.2 項で述べた問題点の解消を目指す。

1. マルチカメラによる画像取得

昨年度のトラッキング手法では、バーコードの画像撮影に視野角約 50° のカメラを 1 つ使用していた。トラッキングを行うためには、この視界内にバーコード型マーカが 2 つ完全に入る必要があり、このことがトラッキングが可能な条件を狭めていた。そこで本研究では、複数のカメラを角度をつけて配置し、撮影画像の視野を広げることによって、この問題点を解消する方法を採る。使用するカメラの台数が増えることで視野が広がれば、環境内に貼付する必要のあるバーコードマーカの数減らすことも可能になると考えられる。

複数のカメラ（マルチカメラ）を用いるためには、複数のカメラに映ったバーコードマーカの位置からカメラ位置を推定する方法や、およびそれぞれのカメラの位置関係のキャリブレーション手法の開発が必要になる。

2. P4P 問題の解法を利用したトラッキング手法の利用

昨年度のトラッキング手法では、P6P 問題を解くことで、カメラによって撮影されたバーコードマーカの位置からカメラ位置を推定していた。P6P 問題は線形な計算で解が求まるため解くことが容易であるが、少なくとも 2 本のバーコードマーカが同一平面上にないことが必要となり、これを満たすようにバーコードマーカの配置を工夫する必要があった。

本研究では、P4P 問題の解法を利用することによって同一平面上にある 2 本のバーコードマーカからでもトラッキングが行えるようにし、より柔軟にバーコードマーカを配置できるようにする。

3. ハイブリッドトラッキング

利用可能な条件を広げる方法には、ビジョンセンサ自体の視野を広げる他に、慣性センサなど他の情報源を追加する方法がある。複数のセンサを用いてトラッキングを行う方法はハイブリッドトラッキングと呼ばれ、複数のセンサを同時に利用することによって、それぞれのセンサの短所を補い合うことができる。これまでに以下のような様々な研究が行われている。

State ら^[28] は磁気トラッカーの誤差を、カメラ画像内のマーカの位置を検出することによって補正する方法を提案している。マーカ位置の検出は時間のかかる

処理であるが、高速な磁気センサによって、リアルタイムにトラッキングが行える。また、Welch ら^[29]によって提案された SCAAT は、拡張カルマンフィルタを応用して複数のセンサからの不完全な情報から高速・高精度にデータ統合を行って位置を得るとともに、各センサを自動的にキャリブレートすることができるアルゴリズムである。佐藤ら^[30]の開発した TOWNWEAR は屋外で用いることのできる AR システムであり、提示画像の位置合わせにはジャイロセンサを用いている。このセンサに発生するドリフトを、HMD にとりつけたカメラで撮影した画像と事前に登録した画像をテンプレートマッチングすることで得た位置情報によって補正している。You ら^[31]は、拡張カルマンフィルタを用いてビジョンセンサとジャイロセンサを統合する手法を提案している。ジャイロセンサはビジョンセンサよりも高頻度・低遅延でデータが得られることを利用して、ビジョンセンサの処理の遅延を補うことを可能としている。

本研究では、前述のマルチカメラとバーコードマーカを用いたトラッキング手法に加えてジャイロセンサを併用する手法を用いて、より広い範囲でトラッキングを行うことを目指す。ジャイロセンサによって得た回転情報から、あるフレームの画像とそれ以前のフレームの画像の撮影角度の差分を知ることができる。この情報を利用すれば、画像からバーコードマーカがはみ出すなどして、検出できるバーコードマーカが1本になってしまった場合でもトラッキングを継続することができる。また、検出できるバーコードマーカが0本になってしまっても、カメラが前フレームから平行移動していなければトラッキングを継続することが可能になると考えられる。

上記のアプローチ 1, 2 の詳細は第 3 章で、アプローチ 3 の詳細は第 4 章で説明する。

第 3 章 バーコードマーカとマルチカメラによる トラッキング手法の開発

前章で述べたように、昨年度提案されたトラッキング手法では、視野角約 50° の小型 CCD カメラを 1 台使用してバーコードマーカを含む画像の撮影を行っていた。しかし、バーコードマーカがいつでも撮影できるようにしておくためには、環境内に多数のバーコードマーカを貼付しておく必要があり、これが実際に運用する際の課題となっていた。そこで本章では、この問題点をカメラを複数用いることによって克服する手法について述べる。

3.1 マルチカメラを用いたトラッキング手法

環境内に貼付する必要のあるバーコードマーカの数を実減するためには、より広い範囲のカメラ画像を取得できるようにする方法が有効であると考えられる。広い範囲のカメラ画像を得るための方法として、広角のレンズを用いる方法や、円錐型のミラーを利用する方法^[32]がある。しかしいずれも画像の歪みが大きいため、バーコードマーカの抽出・認識が難しい、ユーザに視界画像を提示するには補正処理が必要になり処理負荷が大きくなるといった問題がある。

そこで本研究では、昨年度のシステムと比べて広い視野を得るために、複数代のカメラを利用する方法を用いる。しかし、使用するカメラの台数が増えると、バーコードマーカの認識のための画像処理に必要な時間が増加し、リアルタイム性が低下してしまうという問題がある。本研究では、十分広い視野が確保でき、かつリアルタイムに画像処理が行えるよう、図 3.1 に示すように、視野角約 40° の 3 台のカメラを角度をつけて並べたマルチカメラを使用する方法を提案する。最大限に広い視野を得るために、各カメラの視野は重ならないようにする。なお、カメラが増えることによる計算時間への影響については、第 5 章で評価実験を行い、実用的な速度で処理が行えることを確認する。

この方法では、特殊なカメラおよびレンズを用いる必要がなく、視野が広いながらも歪みの少ない画像を得ることができる。したがって、バーコードマーカを広い範囲

で検出するという目的に合った手法と言える。また、中央のカメラの画像に対してそのまま情報を重畳表示してユーザに提供することも可能であるため、拡張現実感技術への応用にも向いている。

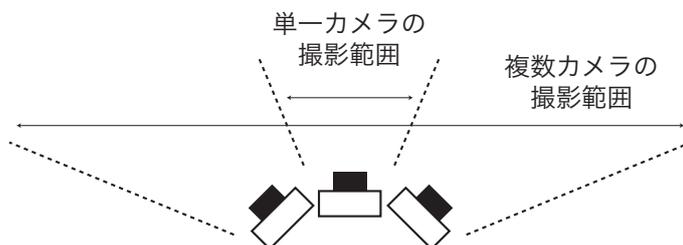


図 3.1: シングルカメラ・マルチカメラによる撮影範囲

3.2 マルチカメラからの画像における P4P 問題の解法

マルチカメラによって取得した画像を用いてトラッキングを行うためには、それぞれのカメラで撮影された画像における基準となる位置、すなわち基準点のスクリーン座標と、その基準点の実際の空間内での 3 次元位置から、カメラ位置・姿勢を推定する必要がある (PnP 問題)。マルチカメラを用いた PnP 問題の解法の例として、任意のカメラで撮影された 6 点以上の基準点からカメラ位置を線形に計算する方法 (P6P 問題の解法) が提案されている [33]。しかし、P6P 問題は線形に解くことができる一方で、全ての基準点が同一平面上にあってはならないという制約条件がある。そのため、この方法ではバーコードマーカが同一平面上にならないように工夫して貼付する必要があるため、実用が困難になる。

一方、ARToolKit^[10]では、正方形マーカの 4 頂点の座標を用いて P4P 問題を解くことによりトラッキングを行う。このとき、全ての基準点は同一平面上にあり、かつ正方形を成している必要がある。ただし、ARToolKit はマルチカメラに分散した基準点を扱うことはできない。

ふげん発電所内には、多数のパイプが平行して走っているため、バーコードマーカを同一平面上にならないように貼付するのに比べ、バーコードマーカが空間的に平行になるよう貼付するのは容易であると言える。そこで本研究ではマルチカメラを用いたトラッキング手法として、より容易にトラッキング可能な条件を整えられる P4P 問題の解法を応用したトラッキング手法を提案する。特に、バーコードマーカが平行であるという条件を課すことで、マルチカメラに分散したバーコードマーカの位置から、単

一のカメラにおける4つの基準点の位置を計算する方法を提案し、それに従来のP4P問題の解法を適用するという方法を利用する。

以下では、その具体的な計算方法について説明する。

3.2.1 座標系の定義

はじめに、本システムで扱う座標系を図3.2に示す。

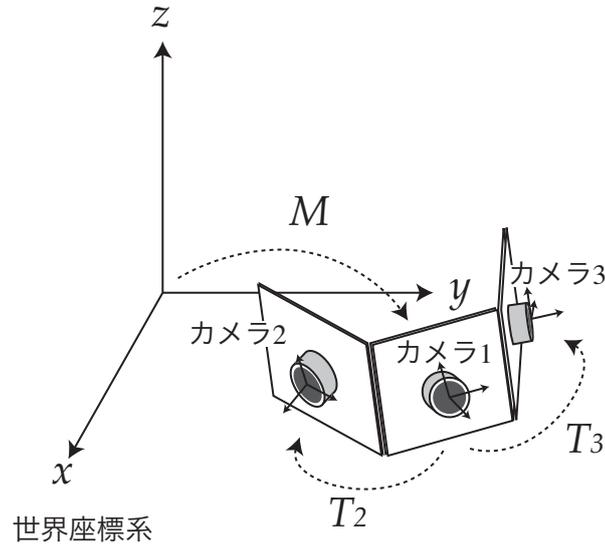


図 3.2: 本システムで扱う座標系

世界座標系からカメラ1座標系への変換行列を \mathbf{M} とする。また、カメラ1座標系からカメラ j 座標系への変換行列を \mathbf{T}_j とする。ただし、 \mathbf{T}_1 は単位行列である。

各行列の要素を、

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & & & p_1 \\ \mathbf{R}(r_1, r_2, r_3) & & & p_2 \\ & & & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

$$\mathbf{PT}_j = \begin{pmatrix} t_{j11} & t_{j12} & t_{j13} & t_{j14} \\ t_{j21} & t_{j22} & t_{j23} & t_{j24} \\ t_{j31} & t_{j32} & t_{j33} & t_{j34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

とする。ここで、 \mathbf{P} はカメラの透視変換行列であり、カメラキャリブレーションによって求められる。また、 $\mathbf{R}(r_1, r_2, r_3)$ は3自由度のパラメータ r_1, r_2, r_3 によって決まる回転行列である。

このとき、世界座標系 (x, y, z) とカメラ1座標系 (X, Y, Z) の間には、

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

という関係が成り立つ。また、カメラ1座標系 (X, Y, Z) とカメラ j の理想スクリーン座標系 (u, v) の間には、

$$\begin{pmatrix} au \\ av \\ a \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{PT}_j \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

という関係が成立する。ただし a は媒介変数である。

実際にカメラによって取り込まれる画像は、カメラのレンズ歪みのために式 (3.4) の変換によって表される透視変換モデルとは一致しない。カメラによって取り込まれた画像の座標系を観測スクリーン座標系と呼ぶ。3.2.6項で述べるカメラキャリブレーションを行って歪み関数を求めることで、観測スクリーン座標系と理想スクリーン座標系の間を相互に変換することができる。したがって、以下では特に必要がない場合には両者を区別せずに、単にスクリーン座標系と呼ぶ。

3.2.2 トラッキングシステムの入力および出力

マルチカメラによるトラッキングを行うためには、事前に以下の情報が必要である。

- 各カメラの内部パラメータ (透視変換行列 \mathbf{P})
- カメラ1からカメラ j への変換行列 \mathbf{T}_j ($j = 1, 2, \dots, c$)
- バーコードマーカの世界座標系における座標

まず全てのカメラから撮影画像を1フレームずつ取得し、その各画像に対してバーコードマーカの抽出・認識を行う。認識された各バーコードマーカの両端の点を基準点とする。ここで、基準点の数を n とする。 i 番目の基準点が撮影されたカメラの番号を k_i とし、基準点 i のカメラ k の観測スクリーン座標から求めた理想スクリーン座標を (\hat{u}_i, \hat{v}_i) とする。また、各点のバーコードのIDから事前に登録した世界座標系における3次元位置を検索する。そうして得られた斉次座標を $\mathbf{S}_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T$ ($i = 1, 2, \dots, n$) とする。

トラッキングシステムは、これらの座標を入力として、PnP問題を解き、カメラの位置・姿勢、具体的には世界座標系からカメラ1座標系への変換行列 \mathbf{M} を求めて出力するものとする。

3.2.3 マルチカメラにおけるP4P問題の解法の概略

本手法では、認識されたバーコードマーカのうち、平行な2本を選び、そのバーコードマーカの両端の点、計4点のスクリーン座標と、あらかじめ登録された3次元座標とを対応付けることによって、カメラの位置・姿勢を推定する(P4P問題)。しかし、P4P問題の解法によって得た解は、カメラ画像からのバーコードマーカの検出誤差や量子化誤差のために、大きな誤差を伴っている。

そこで本研究では、P4P問題を解いて求めたカメラの推定位置・姿勢を初期値とし、認識された全てのバーコードマーカの座標を利用して、以下の方法で解の非線形最適化を行う。

基準点 i の世界座標系における斉次座標 \mathbf{S}_i と、その k 番目のカメラ上への投影座標 (u_i, v_i) には、以下の関係が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} au_i \\ av_i \\ a \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{PT}_k \mathbf{MS}_i \quad (3.5)$$

ただし、 a は媒介変数である。しかし一般に、こうして求めた (u_i, v_i) は、カメラ画像からのバーコードマーカの検出誤差や量子化誤差によって、画像から求めた基準点の座標 (\hat{u}_i, \hat{v}_i) とは一致しない。

そこで、誤差関数 E を

$$E = \sum_{i=1}^n \{(u_i - \hat{u}_i)^2 + (v_i - \hat{v}_i)^2\} \quad (3.6)$$

と定義し、これを反復計算によって最小化することで、カメラの位置・姿勢を推定する手法を用いる。

3.2.4 初期値の計算手法

本研究では、初期値を求めるための P4P 問題の解法には、ARToolKit で提供されている機能を用いる。ただし、ARToolKit の P4P 問題の解法は、単一のカメラによって撮影された、3次元位置が既知である正方形のマーカの 4 頂点に対してのみ適用できるものである。したがって、本手法のようにマルチカメラを用いる場合や、必ずしも正方形に基準点が配置されていない場合には、事前に問題の形式を変換する処理が必要となる。以下では、その変換方法について述べる。

バーコードマーカの選択

まず、認識されたバーコードマーカのうち、その登録された 3次元位置を元に、平行に配置された 2 本を選択する。このとき、それぞれの 2 本が同一のカメラで撮影されたものである必要はない。これまでの研究で、基準点の距離が離れているほどトラッキング結果の空間精度が向上するという知見が得られている。そこで、認識されたバーコードの中で 3次元位置が最も離れた 2 つのバーコードマーカを選択する。

ここで、選択したバーコードマーカ的一方に含まれる基準点の番号を f_1, f_2 、他方に含まれる基準点の番号を f_3, f_4 とする。ただし、基準点 f_1 と f_3 、及び基準点 f_2 と f_4 がそれぞれ同じ側の端とする。このとき世界座標系における各基準点の 3次元位置は、 $S_{f_1}, S_{f_2}, S_{f_3}, S_{f_4}$ で表される。

単一の理想スクリーン座標系への変換

本手法では、複数のカメラを用いるため、複数のスクリーン座標系に渡って基準点の位置が得られるが、このままでは取り扱いが困難である。そこで図 3.3 に示すように、これを単一の理想スクリーン座標系に変換する必要がある。以下ではその具体的な計算方法について説明する。なお、同一のカメラで撮影されたバーコードマーカを正方形マーカ作成の基準として選択した場合には、既に基準点の座標が単一の理想スクリーン座標系上で得られているため、この手順は必要ない。

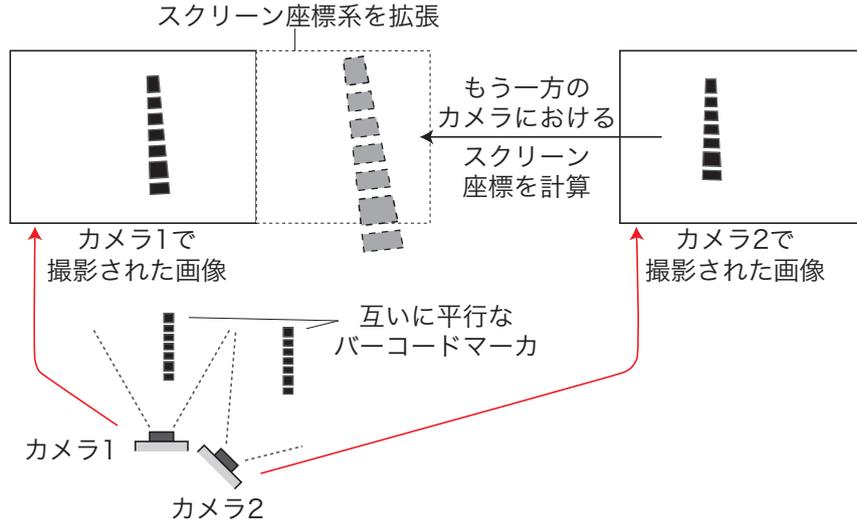


図 3.3: 単一の理想スクリーン座標系への変換

選択された基準点のうち f_1, f_2 を通る直線、及び f_3, f_4 を通る直線は、それぞれの理想スクリーン座標系において、

$$a_1 u + b_1 v + c_1 = 0, \quad a_2 u + b_2 v + c_2 = 0$$

$$\begin{pmatrix} a_1 = v_{f_1} - v_{f_2}, & a_2 = v_{f_3} - v_{f_4}, \\ b_1 = u_{f_2} - u_{f_1}, & b_2 = u_{f_4} - u_{f_3}, \\ c_1 = -v_{f_1} b_1 - u_{f_1} a_1, & c_2 = -v_{f_3} b_2 - u_{f_3} a_2 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

と表すことができる。式 (3.4) から求められる (u, v) をこれらの式に代入し、 X, Y, Z に関する項をまとめると、

$$\begin{aligned} & (a_1 t_{l_1 11} + b_1 t_{l_1 21} + c_1 t_{l_1 31}) X + \\ & (a_1 t_{l_1 12} + b_1 t_{l_1 22} + c_1 t_{l_1 32}) Y + \\ & (a_1 t_{l_1 13} + b_1 t_{l_1 23} + c_1 t_{l_1 33}) Z = \text{const.} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} & (a_2 t_{l_2 11} + b_2 t_{l_2 21} + c_2 t_{l_2 31}) X + \\ & (a_2 t_{l_2 12} + b_2 t_{l_2 22} + c_2 t_{l_2 32}) Y + \\ & (a_2 t_{l_2 13} + b_2 t_{l_2 23} + c_2 t_{l_2 33}) Z = \text{const.} \end{aligned} \quad (3.9)$$

となる。ただし、 l_1 は f_1, f_2 が撮影されたカメラの番号、 l_2 は f_3, f_4 が撮影されたカメラの番号である。すなわち、 $l_1 = k_{f_1} = k_{f_2}$ 、 $l_2 = k_{f_3} = k_{f_4}$ である。

式 (3.8), (3.9) はカメラ 1 座標系 (X, Y, Z) における面の式と見なすことができる。この各面はそれぞれ基準となったバーコードマーカを通る。それぞれのバーコードマーカは互いに平行であるので、この各面の法線ベクトルを $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ としたとき、その外積を正規化したもの

$$\mathbf{d} = \frac{\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2}{|\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2|} \quad (3.10)$$

は、カメラ 1 座標系におけるバーコードマーカの方向ベクトルとなる。

これを用いると、式 (3.4) の基準点 f_3, f_4 に対する媒介変数 a の値をそれぞれ a_3, a_4 とし、カメラ l_2 座標系におけるバーコードマーカの一方の端点から他方の端点へのベクトルを $\mathbf{d}' = (d'_1, d'_2, d'_3)^T = \mathbf{R}_{l_2} \mathbf{d} \cdot |S_{f_4} - S_{f_3}|$ とすると、

$$\begin{pmatrix} a_3 u_{f_3} \\ a_3 v_{f_3} \\ a_3 \\ 1 \end{pmatrix} + \mathbf{d}' = \begin{pmatrix} a_4 u_{f_4} \\ a_4 v_{f_4} \\ a_4 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

という関係が成り立つ。これより、

$$a_3 = \frac{d'_1 - u_{f_4} d'_3}{u_{f_4} - u_{f_3}} = \frac{d'_2 - v_{f_4} d'_3}{v_{f_4} - v_{f_3}}, \quad a_4 = a_3 - d'_3 \quad (3.12)$$

として媒介変数 a_3, a_4 の値を決定できる*。こうして、カメラ l_2 座標系における 3次元座標が得られる。これを用いれば、カメラ l_1 座標系における基準点 f_3, f_4 の理想スクリーン座標 $(u'_3, v'_3), (u'_4, v'_4)$ を、式 (3.4) から

$$\begin{pmatrix} a'_3 u'_{f_3} \\ a'_3 v'_{f_3} \\ a'_3 \\ 1 \end{pmatrix} = (\mathbf{PT}_{l_1})(\mathbf{PT}_{l_2})^{-1} \begin{pmatrix} a_3 u_{f_3} \\ a_3 v_{f_3} \\ a_3 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3.13)$$

$$\begin{pmatrix} a'_4 u'_{f_4} \\ a'_4 v'_{f_4} \\ a'_4 \\ 1 \end{pmatrix} = (\mathbf{PT}_{l_1})(\mathbf{PT}_{l_2})^{-1} \begin{pmatrix} a_4 u_{f_4} \\ a_4 v_{f_4} \\ a_4 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

として求めることができる。なお、 a'_3, a'_4 は媒介変数である。

* 実際に a_3, a_4 を計算する際には、 $u_{f_4} - u_{f_3}$ と $u_{f_4} - u_{f_3}$ の絶対値を比較し、大きい方が分母に来る計算式を採用することで、誤差の影響を少なくすることができる。

仮想正方形マーカの算出

次に、図 3.4 に示すような、選択した 2 本のバーコードマーカを向かい合う 2 辺とする仮想的な正方形マーカを考え、この各 4 頂点の 3 次元座標及びカメラ l_1 における 2 次元理想スクリーン座標を計算する。この仮想正方形マーカの頂点座標の具体的な計算方法を以下に示す。

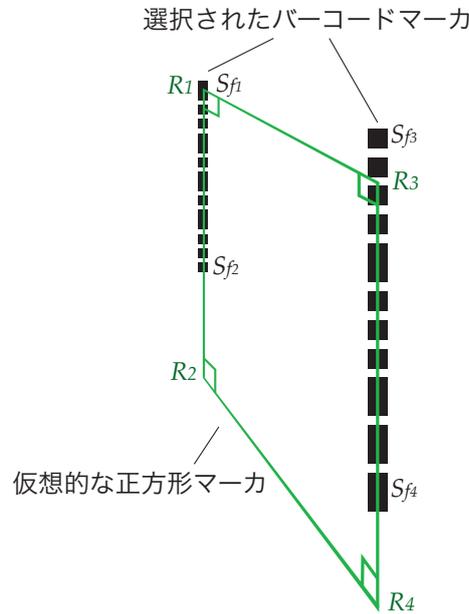


図 3.4: 仮想正方形マーカ

仮想正方形マーカの各頂点の 3 次元座標を $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3, \mathbf{R}_4$ とおく。まず、 $\mathbf{R}_1 = \mathbf{S}_{f_1}$ によって定める。次に、 \mathbf{S}_{f_3} と \mathbf{S}_{f_4} を通る直線に \mathbf{R}_1 から下ろした垂線の足を \mathbf{R}_3 とする。そして、 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3, \mathbf{R}_4$ が正方形を成すよう、 \mathbf{R}_2 と \mathbf{R}_4 を以下の式によって決める。

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_1 + \frac{\mathbf{S}_{f_2} - \mathbf{S}_{f_1}}{|\mathbf{S}_{f_2} - \mathbf{S}_{f_1}|} \cdot |\mathbf{R}_3 - \mathbf{R}_1|, \quad \mathbf{R}_4 = \mathbf{R}_3 + \frac{\mathbf{S}_{f_4} - \mathbf{S}_{f_3}}{|\mathbf{S}_{f_4} - \mathbf{S}_{f_3}|} \cdot |\mathbf{R}_3 - \mathbf{R}_1| \quad (3.15)$$

また、仮想正方形マーカの、頂点 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ のカメラ l_1 における理想スクリーン座標を $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ する。 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{S}_{f_1}, \mathbf{S}_{f_2}$ は空間内の同一直線上にあるので、理想スクリーン座標においても同一直線上になる。したがって、これらの点の直線上の位置関係と $(u_{f_1}, v_{f_1}), (u_{f_2}, v_{f_2})$ から、 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ を決定することができる。同様に、仮想正方形マーカの頂点 $\mathbf{R}_3, \mathbf{R}_4$ のカメラ l_1 における理想スクリーン座標 $\mathbf{r}_3, \mathbf{r}_4$ も、 $(u'_{f_3}, v'_{f_3}), (u'_{f_4}, v'_{f_4})$ から求めることができる。

P4P 問題の解法による初期値の導出

こうして得られた仮想正方形マーカの各 4 頂点の 3 次元座標及びカメラ l_1 における 2 次元理想スクリーン座標を、ARToolKit の入力として与えて P4P 問題を解くことで、世界座標系からカメラ l_1 の透視変換モデルの推定値 $\mathbf{PT}_{l_1}\hat{\mathbf{M}}$ が得られる**。これに $(\mathbf{PT}_{l_1})^{-1}$ を左から乗じれば、カメラの位置・姿勢の初期値 $\hat{\mathbf{M}}$ を求めることができる。なお、ARToolKit による解法については、付録 A にて詳しく説明する。

3.2.5 誤差関数の非線形最小化

前項のようにして求めた $\hat{\mathbf{M}}$ は 12 個のパラメータを持つ。しかし、 $\hat{\mathbf{M}}$ はもともと平行移動 (3 自由度)、回転 (3 自由度) を表す行列であるので、これを 6 自由度のパラメータ $(p_1, p_2, p_3, r_1, r_2, r_3)$ に縮退させることができる。この値を初期値として、誤差関数 E を再急降下法によって最小化することで、推定結果の誤差を小さく抑えることができる。

本手法では、各パラメータを

$$p_i \leftarrow p_i - \alpha_{p_i} \frac{\delta E}{\delta p_i}, \quad r_i \leftarrow r_i - \alpha_{r_i} \frac{\delta E}{\delta r_i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.16)$$

によって更新する。なお $\alpha_{p_i}, \alpha_{r_i}$ は導関数のスケール項で、各繰り返しにおいて E が最小となるよう動的に決定する。また、回転のパラメータとしては、等価な回転を表すクォータニオン (w, x, y, z) のうちの 3 つ (x, y, z) を用いる。

こうして求められたパラメータを用いて、最終的な \mathbf{M} の推定値を決定する。

3.2.6 カメラのキャリブレーション手法

以上のトラッキング手法を実行するのに先立って、カメラの位置関係やレンズの焦点距離等、各種のパラメータをキャリブレーションによって取得しておく必要がある。なお、このキャリブレーションは、一度正確に行っておけばカメラの配置やレンズ等を変更しない限り再度実行する必要はない。一方、本手法ではキャリブレーションで取得したパラメータを動的に変更 (学習) することはないので、トラッキングの精度は高々キャリブレーションの精度までしか期待できない。したがって、キャリブレーションの手法には、簡便さよりも正確性が要求される。

** 計算速度を向上させるため、ARToolKit 内での反復計算の回数は少なく設定する。ここで求めた値は後でより多くの基準点を用いて最適化されるため、この時点で精度が多少悪化しても問題ない。

カメラのキャリブレーションは、内部パラメータのキャリブレーションと、外部パラメータのキャリブレーションに大きく分けられる。内部パラメータのキャリブレーションでは、各カメラについてレンズの歪みや焦点距離などの補正を行う。本手法では、各カメラの内部パラメータについては ARToolKit を用いる。その具体的な方法は、付録 A で述べる。外部パラメータのキャリブレーションでは、カメラユニットを構成する各カメラの位置関係、すなわちカメラ座標系間の変換行列を求める。本研究では、外部パラメータのキャリブレーション方法について、マーカボードとレーザー計測機器を用いた方法^[34]を参考にし、以下の方法を採用する。

まず、カメラの内部パラメータのキャリブレーションを全てのカメラで実行しておく。外部パラメータのキャリブレーションには、図 3.5 に示すキャリブレーションボードを用いる。キャリブレーションボードは A4 サイズであり、ランダムに選択したバーコードマーカが適当な間隔を空けて 7 本印刷されている。このキャリブレーションボードを図 3.6 に示す位置に配置して各カメラで撮影し、各バーコードマーカの両端の点のスクリーン座標を記録する。さらに、このキャリブレーションボードの位置をレーザー計測機器等を使って正確に計測し、各バーコードマーカの両端の点の空間内での位置も記録する。この操作を各カメラについて、カメラとキャリブレーションボードの距離を変えながら 4,5 回繰り返して行う。なお、ここではカメラの相対位置関係を取得するのみであるので、レーザー計測機器の座標系は、測定中に同一であれば任意に設定してよい。

こうして得られた、各カメラにおけるバーコードマーカのスクリーン座標と空間内の点の記録から、前項までで説明したトラッキング手法を各カメラに 1 台ずつ適用して行き、各カメラについての位置推定を行う。なお、ここではカメラ 1 台のみに対して提案手法を適用するため、ここでは単一の理想スクリーン座標系への変換は用いる必要がない。また、キャリブレーションの精度を向上させるために、誤差関数の非線形最小化は反復回数を 1000 回程度と大きくし、計算時間をかけてでも十分誤差を小さく収束させる。

以上によって求められた 3 台のカメラの空間内の位置 M_i から、カメラ座標系間の変換行列

$$T_i = M_i M_1^{-1}$$

を決定する。

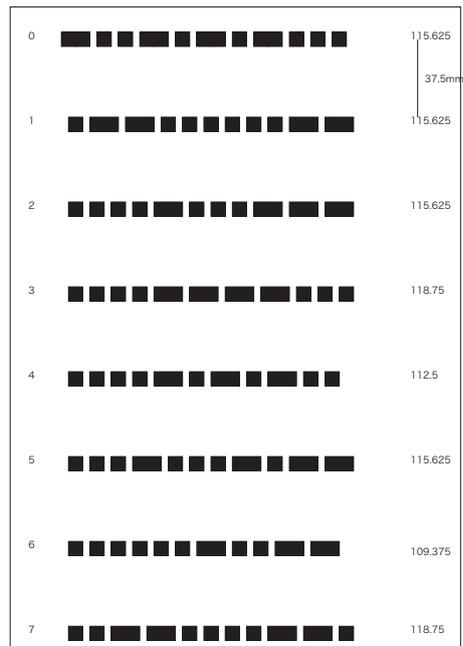


図 3.5: キャリブレーションボード

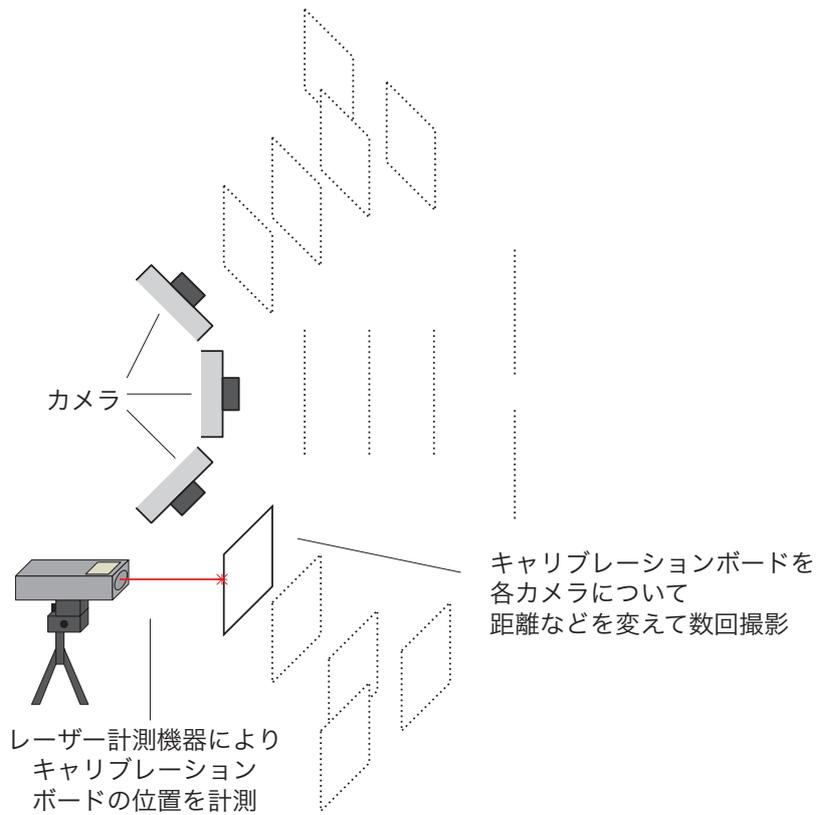


図 3.6: カメラの外部パラメータのキャリブレーション手法

第 4 章 ジャイロセンサを併用したハイブリッド トラッキング手法の導入

前章で述べたマルチカメラを用いたトラッキング手法は、カメラにバーコードマーカが完全に撮影されていないとトラッキングを行えないという問題がある。そこで、本章では前述のマルチカメラを用いたトラッキング手法とともに、ジャイロセンサを併用したハイブリッドトラッキングを用い、この問題を軽減する手法について述べる。

4.1 ジャイロセンサを併用したハイブリッドトラッキング

4.1.1 ジャイロセンサを併用したハイブリッドトラッキングの特徴

第 3 章で提案したマルチカメラを用いたトラッキング手法が使用可能となるためには、いずれかのカメラの視界内に合わせて 2 つ以上のバーコードマーカが完全に含まれている必要がある。このため、あるフレームでトラッキングが行えていても、その後作業員が移動したり視る方向を変えたりした際に、バーコードマーカの一部がカメラの視界外に出る（フレームアウト）と、トラッキングを継続できなくなってしまうという問題がある。また、解体作業中に作業員の体や工具等によってバーコードマーカの一部が隠された場合にもトラッキングが行えなくなる。

そこで本研究では、バーコードマーカを用いたトラッキング手法に加えて、3 軸の角速度が得られるジャイロセンサを用いたハイブリッドトラッキングを導入し、この問題を軽減することを目指す。

ハイブリッドトラッキングは、複数の種類のセンサを併用することで、個々のセンサが持つ欠点を補い合い、トラッキングの精度や利用可能な範囲を向上させる手法である。ハイブリッドトラッキングにおいては、アプリケーションに合わせて様々なセンサの組み合わせが用いられる [28, 30, 31]。

本研究で用いるジャイロセンサは、振動子に働くコリオリ力などを利用して角速度を検出するセンサであり、環境内に新たな機器を設置する必要がなくセンサ単体で機能するため、容易に利用できるという特徴がある。

角速度を積分すれば、姿勢の変位を求めることができる。カメラに 3 軸のジャイロセ

ンサを取り付ければ、フレーム間のカメラの姿勢の変化を検出することができる。この情報を用いれば、カメラの視界内にあるバーコードマーカが1本に減ってしまった場合でも、そのスクリーン座標からトラッキングを継続することができる。また、バーコードマーカが全く認識できなくなった場合にも、カメラが前フレームから平行移動していなければトラッキングを継続することが可能になると考えられる。

逆にジャイロセンサのみを用いた場合、得られるのは姿勢の変位のみであり、絶対的な姿勢や位置に関する情報が得られない。また、一般的にジャイロセンサは積分誤差を伴うため、長時間に渡って補正なしにトラッキングを継続することは困難である。従って、別のトラッキング手段で補う必要がある。本研究では、これらの欠点をバーコードマーカを用いたトラッキング手法によって補う方法を提案する。

以上で述べたように、バーコードマーカを用いたトラッキング手段とジャイロセンサは相補的に互いの欠点を補う合うことが可能であるため、併用するメリットの大きい組み合わせであると言える。

4.1.2 本研究で用いるジャイロセンサの特徴

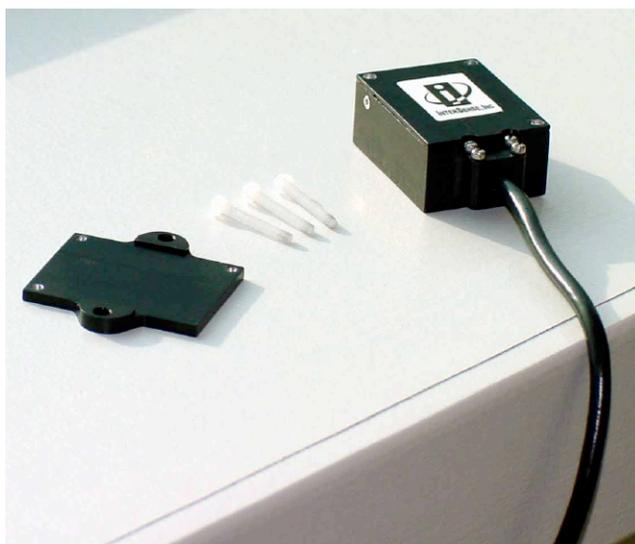


図 4.1: InertiaCube³ の外観

本研究では、ハイブリッドトラッキングに用いるジャイロセンサとして、InterSense社のInertiaCube³を用いる。InertiaCube³の外観を図4.1に示す。InertiaCube³は非常に小さく軽いという特徴を持つため、拡張現実感技術や仮想現実感技術等においてトラッキングを行う際に、ユーザが身につけて用いるウェアラブルセンサとして適して

表 4.1: InertiaCube³ の特徴

自由度	3 (Y/R/P)
可動角度範囲	360 度対応
最大角速度	1200 ° /s
最小角速度	0 ° /s
RMS 精度	Y 1 ° , R/P 0.25 °
角度分解能	0.03 °
データ更新レート	180Hz
データ延滞	2ms
プレディクション	最大 50ms
インタフェース	RS-232C
寸法 / 重量	26.2 × 39.2 × 14.8mm / 約 17g

おり、他の研究においても良く使用されている。

InertiaCube³ の特徴を表 4.1 に示す。InertiaCube³ は単体のジャイロセンサとは異なり、積分処理を内部で行って Yaw / Pitch / Roll の 3 自由度の角度値を出力するため、ゲインやオフセットの調整等を行うことなく容易に利用することができる。また、ジャイロセンサに加えて加速度センサを内蔵しており、これを用いたフィルタリング処理によってドリフトやジッタが非常に少ない出力を得ることができる。なお、出力角度の絶対座標系はユーザが指定する必要がある。

4.2 提案するハイブリッドトラッキング手法

本研究では、図 4.2 に示すように、マルチカメラユニットに InertiaCube³ を取り付け、カメラの回転角度を得ることで、バーコードマーカが必要数認識できない場合にトラッキングを補助する。また、マルチカメラによるトラッキングが行えている場合も、InertiaCube³ の出力を元にその誤差を軽減する。

本研究でのハイブリッドトラッキングは、マルチカメラによるトラッキング結果のうちの回転成分のみを、ジャイロセンサによって得られた回転角度情報から補正するものである。この処理の流れを図 4.3 に示す。

まず、マルチカメラによるトラッキング結果が 1 フレーム得られるたびに InertiaCube³ から回転角度情報を得る。このとき、マルチカメラの場合、トラッキング結果 (6 自由

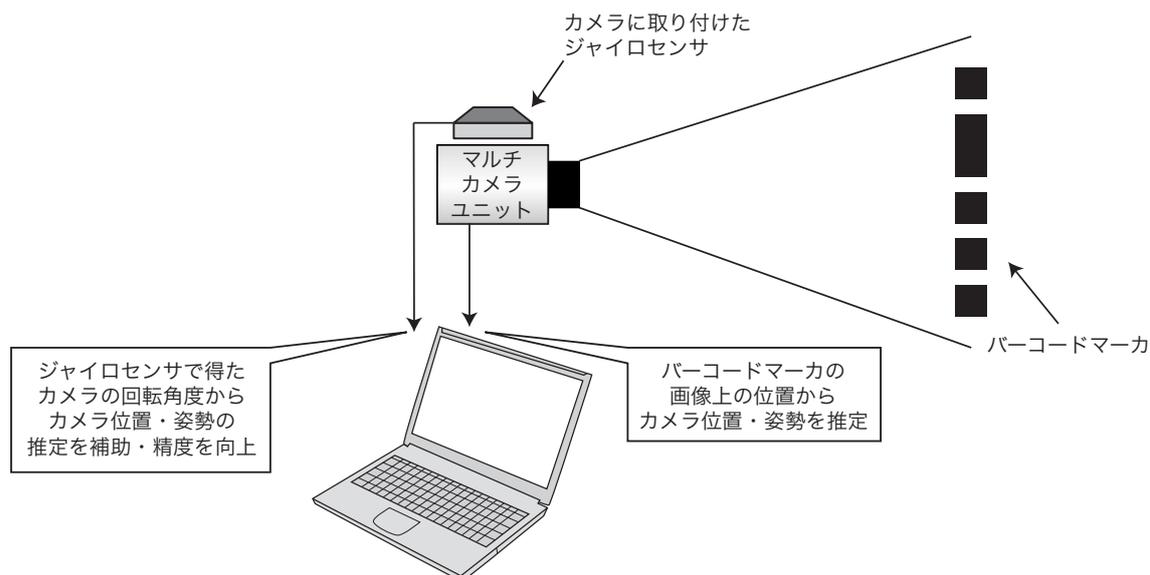


図 4.2: 本研究で提案するハイブリッドトラッキング手法の概略

度)をもとに、誤差情報(推定されたカメラ位置・姿勢から求めた画面上のバーコード位置と、実際に検出された画面上のバーコード位置の差)を計算する。InertiaCube³の出力にも誤差情報を付加する。これは事前に InertiaCube³の精度を計測しておき、固定値として設定しておく。InertiaCube³のデータは、世界座標系とは異なった座標系における回転角度となっている。そこで、前フレームまでに計算された世界座標との差分の回転行列を乗じて、世界座標系に直す。そして、誤差情報をもとに、誤差の自乗の逆数を重みとして両方式の回転行列の重み付き平均をとり、これを最終的なトラッキング結果の回転成分とする。このとき、その結果の誤差 σ_0 は、各結果の誤差を σ_1, σ_2 とすると、

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}} \quad (4.1)$$

で与えられる。

バーコードマーカを2本以上認識できずマルチカメラによるトラッキング結果が得られない場合は、マルチカメラの誤差は無限大とする。この場合、回転成分はジャイロセンサの情報で完全に上書きされる。カメラの現在位置は前フレームから変化していないものと仮定すれば、トラッキング結果を得ることができる。

ただし、カメラの位置が移動していた場合には、ジャイロセンサの結果が正しい場合でもトラッキング結果は平行移動分だけずれるため、重畳されるオブジェクトは平行移動分だけずれて表示されることになる。これを軽減するため、1本でもバーコード

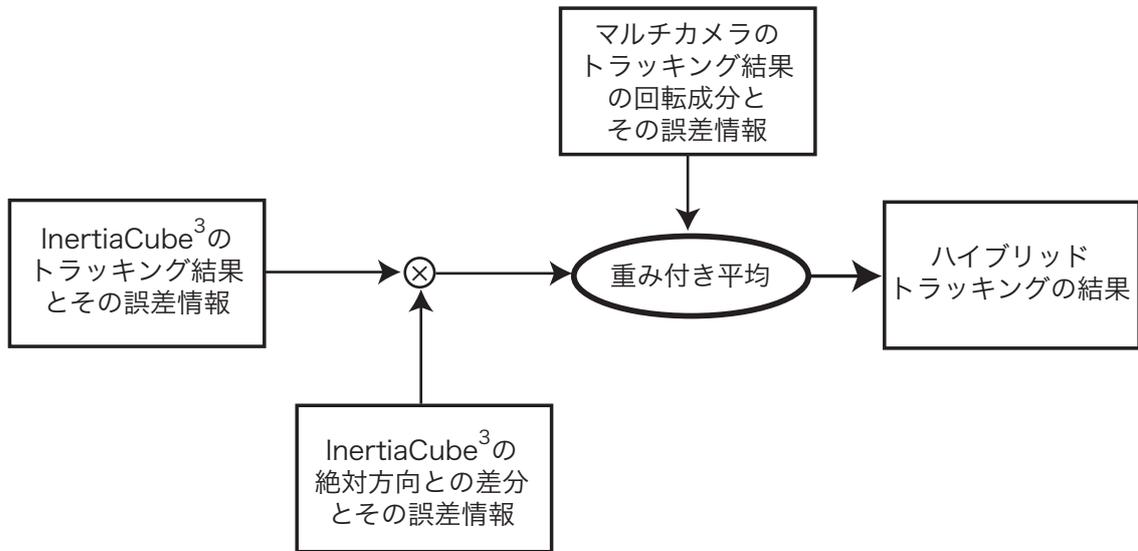


図 4.3: ハイブリッドトラッキングのデータフロー

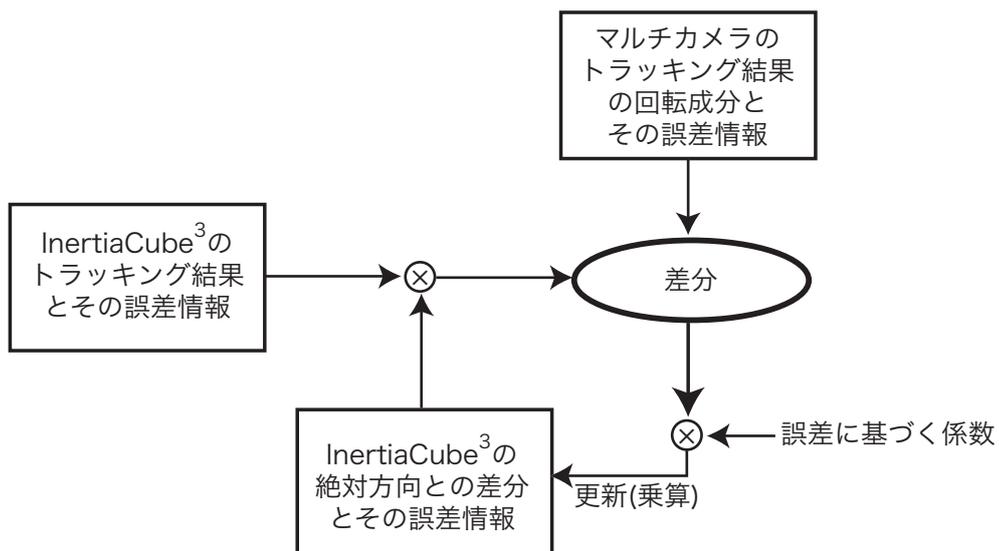


図 4.4: 差分情報の更新時のデータフロー

マーカが認識できている場合は次の処理によって位置を求める。

まず推定位置・姿勢の初期値として、位置を前フレームのトラッキング結果と同じ位置、姿勢をジャイロセンサで得た値とする。そして、認識されたバーコードマーカのスクリーン座標を用いて3.2.5項で述べた誤差関数の非線形最小化を行い、その結果を最終的な推定位置・姿勢とする。

逆にマルチカメラによるトラッキング結果の誤差が少ないと推定された場合、世界座標との差分の回転行列を更新する。この処理の流れを図4.4に示す。マルチカメラから得た結果と、InertiaCube³から得た結果（世界座標系）の差分を計算し、この差分にマルチカメラから得た結果の誤差の自乗の逆数を重みとして乗算した後、差分成分に掛け戻すことによって更新する。このように重みを加えて更新することで、マルチカメラによるトラッキング結果の誤差が大きいときには差分情報は少ししか変化しないため、トラッキング結果のノイズに対するロバスト性が向上すると考えられる。

第 5 章 提案するトラッキング手法の評価実験

この章では、本研究で提案したトラッキング手法が、2.1.4 項で述べた要求仕様をどの程度満たしているかを評価するために、以下の項目について評価実験を行う。

1. 撮影されたバーコードマーカの配置によるトラッキング精度への影響
2. 撮影されたバーコードマーカとカメラの位置関係によるトラッキング精度への影響
3. 撮影されたバーコードマーカの本数によるトラッキング精度への影響
4. 実際の原子力発電プラント中で提案手法が十分な精度で利用可能な範囲
5. マルチカメラ化、ハイブリッドトラッキングによる可用性の向上の程度
6. バーコードマーカの検出やトラッキングを行うために必要となる処理時間

まず5.1節で実験に用いるトラッキングシステムのハードウェアおよびソフトウェア構成について説明する。その後で、1,2,3の評価実験について5.2節で、4の評価実験については5.3節で、5の評価実験については5.4節で述べる。

5.1 評価実験に用いるシステムの構成

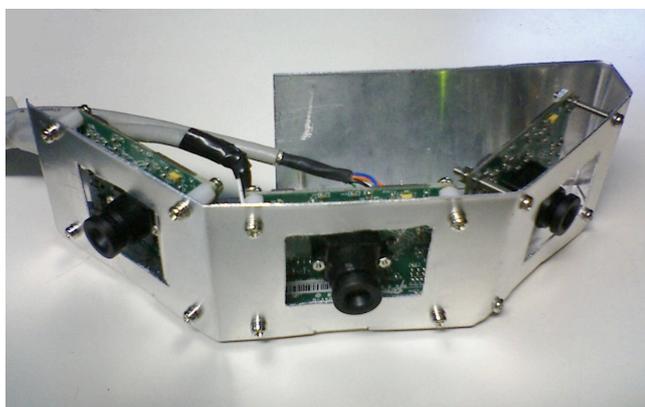


図 5.1: 製作したマルチカメラユニット

評価実験を行うために、前章までに説明した本研究で提案するトラッキング手法を実装した評価用システムを作成した。画像の撮影には、図 5.1 に示すマルチカメラユニットを用いた。このマルチカメラユニットは3台のカメラを角度をつけて固定したものである。また、本体内部に InertiaCube³ を取り付けることができる。評価用システムでは、このマルチカメラユニットで取得した画像、および InertiaCube³ で得た回転角度を、デスクトップ PC で処理してトラッキング結果を得る。評価用システムに用いたカメラ及び PC の仕様を表 5.1 に示す。このカメラは撮影時のシャッタースピードなどのパラメータをソフトウェアで設定することができる。本評価実験の際はシャッタースピードを、十分明るい画像が撮影できブラーの影響も少ないと思われる 20ms に設定した。また、画像の明るさ(ゲイン)は周囲の光量に応じて自動的に調整するように設定した。なお、本研究で使用する Dragonfly カメラは本来はカラーカメラであるが、カラー変換処理を PC 上でソフトウェアによって行う必要があり、このために多くの処理時間が必要となる。そこで本研究では、カラー変換処理を省いてカメラの画像を半分のサイズのグレースケール画像とみなして処理することにより、処理の高速化を図っている。

表 5.1: 評価用システムのハードウェア構成

PC	CPU	Pentium 4 3.2GHz
	メモリ	512MB
	ビデオカード	Canopus SPECTRA WF17
	ビデオメモリ	64MB
	カメラ接続インタフェース	IEEE 1394
カメラ	機種	Dragonfly (Color) × 3台
	解像度	1024 × 768 ピクセル *
	最大フレームレート	15fps
	複数台の自動同期機能	あり
	レンズの焦点距離	6mm
	寸法	63.5mm × 50.8mm × 13.15mm
	重量	38g

評価用システムのソフトウェア構成を図 5.2 に示す。点線部が第 3 章で述べた手法、

* うち 512 × 384 ピクセルのみ使用

それ以降が第4章で述べた手法を実装した部分である。ソフトウェアはMicrosoft社 Visual C++ 6.0を用いて作成し、Intel社 C++ Compiler 8.0でコンパイルを行った。この評価用システムの動作画面例を図5.3に示す。

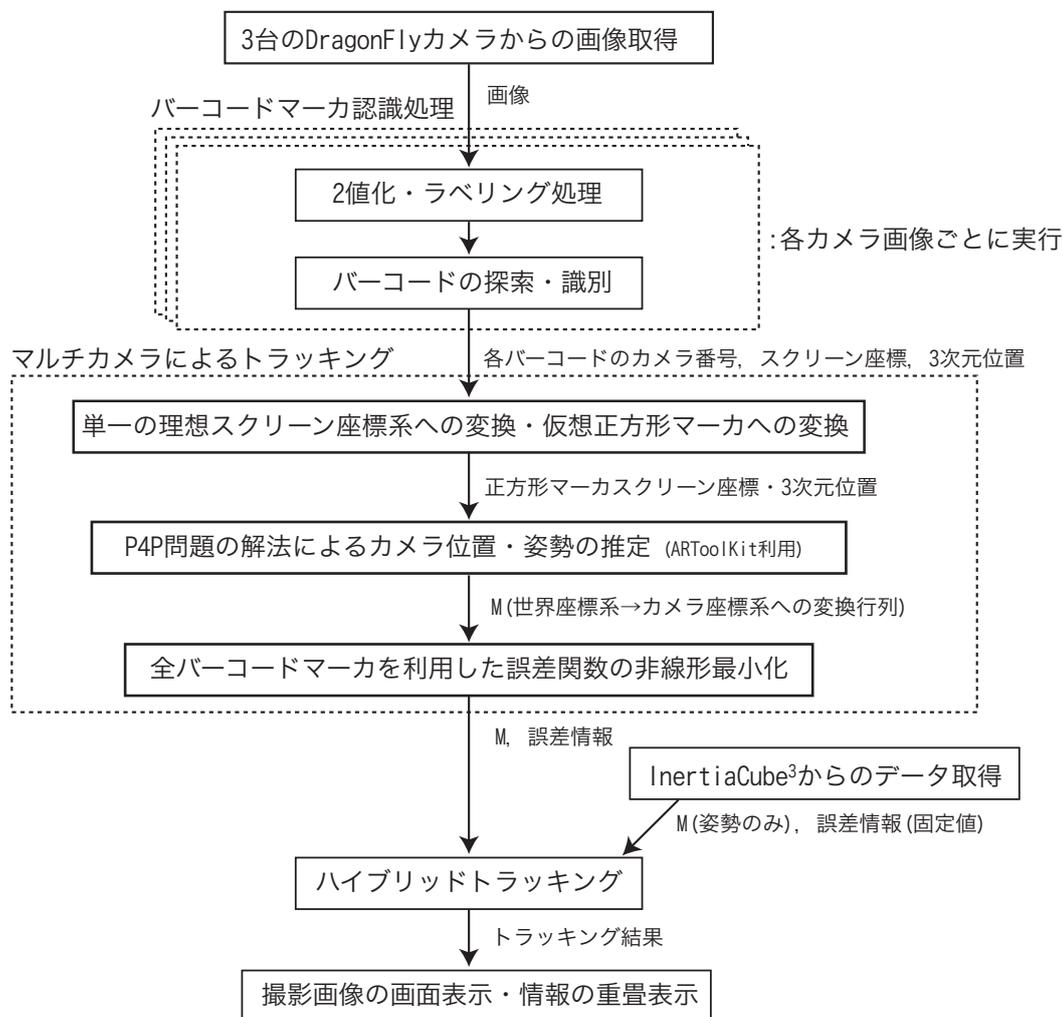


図 5.2: 評価用システムのソフトウェア構成

5.2 バーコードマーカの配置によるトラッキング精度への影響の評価実験

本研究で提案するマルチカメラを用いたトラッキング手法の精度は、カメラによって撮影されるバーコードマーカの本数が同じであれば、以下の条件に依存して決まると考えられる。

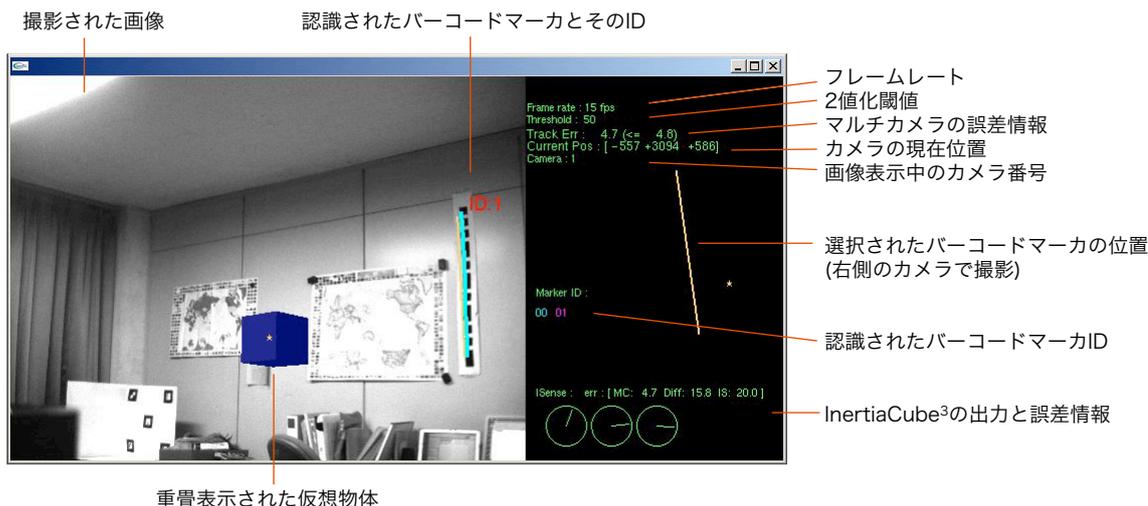


図 5.3: 評価用システムの動作画面例

1. バーコードマーカ間の距離 (l)
2. バーコードマーカとカメラの距離 (d)
3. バーコードマーカを撮影する角度 (水平面内の角度: θ , 垂直面内の角度: ϕ)
4. 正方形マーカ生成用に選択された2本のバーコードマーカを撮影しているカメラの台数 ($c=1$ または 2)
5. バーコードマーカの画像上の位置
6. バーコードマーカの撮影されている状態 (照明環境など)

このうち、6に関してはバーコードマーカの検出・認識部分に関わる部分であり、本研究の範囲外である。また、5に関しては主としてレンズの歪みが影響するものであり、カメラの内部パラメータが正確に行われていれば排除できる要因である。そこで、本節では1-4を変化させた場合、トラッキング精度にどのような影響を与えるかを定量的に評価する実験について述べる。いずれの評価実験においても、5・6による影響を避けるために、カメラの内部パラメータ・外部パラメータのキャリブレーションを十分に行うとともにバーコードマーカを可能な限り画面中央付近に写すようにし、さらにバーコードマーカを認識し易い天井の蛍光灯による一様な照明環境下で実験を行う。

また、バーコードマーカやカメラの3次元位置を正確に測定するために、測定にはレーザー計測機器を用いる。表 5.2 に本実験で使用するレーザー計測機器の仕様を示す。

表 5.2: 本実験で用いるレーザー計測機器の主な仕様

レーザー距離計	型番	Leica 社 DISTO pro ⁴ a
	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
パンチルトユニット	型番	Directed Perception 社 PTU-D46-17
	キャパシティ	2.7kg 以上
	分解能	3086 弧分 ($.514^\circ$)

5.2.1 2本のバーコードマーカの配置に対する精度評価実験

実験の目的

まず、撮影されたバーコードマーカが、トラッキングが行える最小限のマーカ数である2本であるときについて、前述の1 - 4の条件を変化させた場合にトラッキング精度がどのように変化するか調べるための評価実験を行う。

実験の方法と条件

2本のバーコードマーカをいずれも鉛直方向になるよう設置する。2本の床面からの高さは同程度とする。各バーコードマーカの空間座標をレーザー計測機器で測定し、トラッキングシステムに登録する。そして、図 5.4 の各バーコードマーカの中心線間の距離 l 、2本のバーコードマーカの中心を原点としたときの水平面内のカメラ角度 θ 、カメラ距離 d をそれぞれ表 5.3 に示した条件になるようマルチカメラユニットを設置する。この条件を満たすカメラ位置を上方から見た図を 5.5 に示す。このときカメラの床面からの高さはバーコードマーカの中心と同一とする。このため、垂直面内のカメラ角度 ϕ は、 0° となる。バーコードマーカをマルチカメラユニットで撮影し、提案するトラッキング手法によってカメラの現在位置を計算する。照明環境の僅かな変化（蛍光灯の

点滅など) による誤差を避けるため、カメラは同一の位置のまま画像を 15 フレーム撮影し、その各フレームからカメラの位置推定を行った結果の平均をとる。こうして取得したカメラの推定位置と、レーザー計測機器によって計測したカメラの位置を比較する。

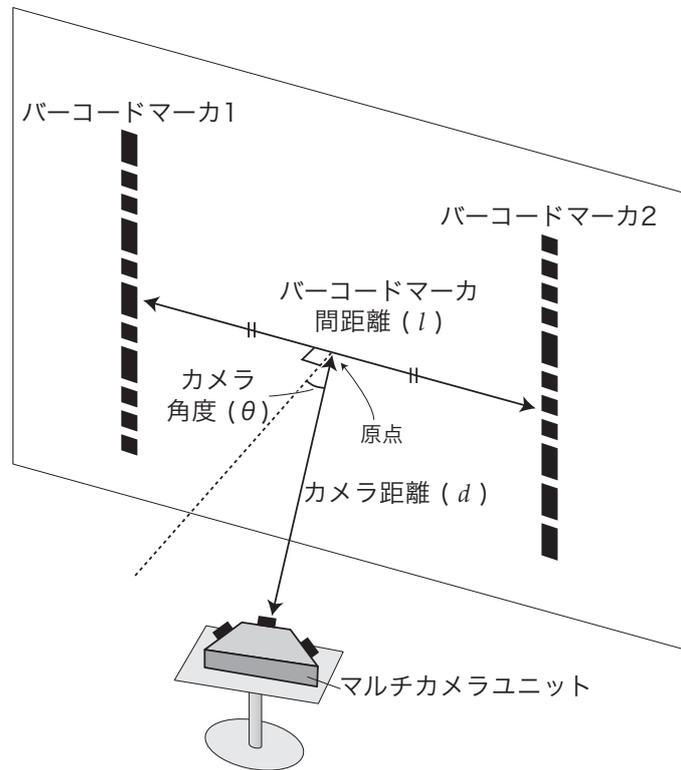


図 5.4: 2本のバーコードマーカの配置に対する精度評価実験の各条件

表 5.3: 2本のバーコードマーカの配置に対する精度評価実験の条件

バーコードマーカ間距離 l	0.5m, 1.0m, 2.0m, 3.0m
水平面内のカメラ角度 θ	0° , 15° , 30° , 45° , 60°
カメラ距離 d	2m, 3m, 4m, 5m
バーコードマーカを撮影するカメラの台数 c	1, 2

ただし、各バーコードを撮影するカメラの条件で、 $c = 1$ は中央のカメラ 1 台のみで全てのバーコードマーカを撮影している場合 (図 5.6)、 $c = 2$ はいずれか 2 台のカメラでそれぞれ 1 本ずつバーコードマーカを撮影している場合 (図 5.7) を表す。

なお、カメラの姿勢については、バーコードマーカが適切に認識されており、カメラの推定位置が正しく求められていれば、バーコードマーカのスクリーン座標とカメ

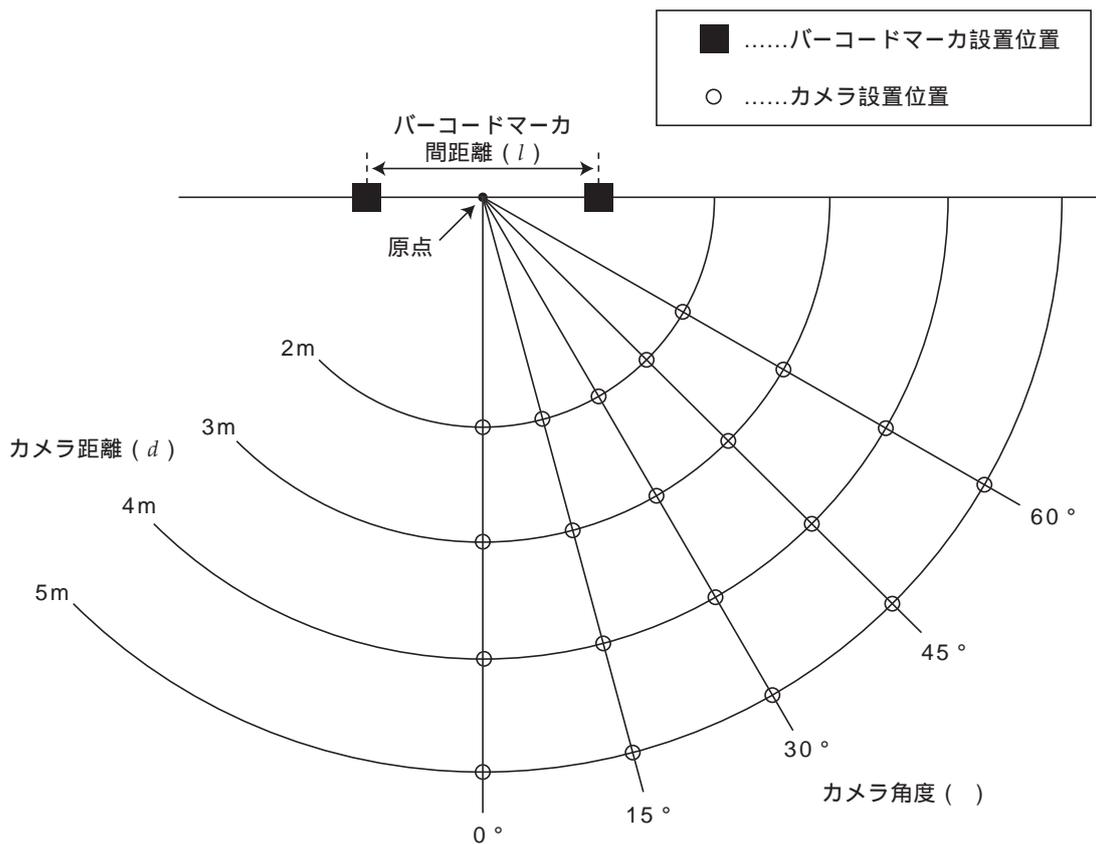


図 5.5: 2本のバーコードマーカの配置に対する精度評価実験のカメラ位置

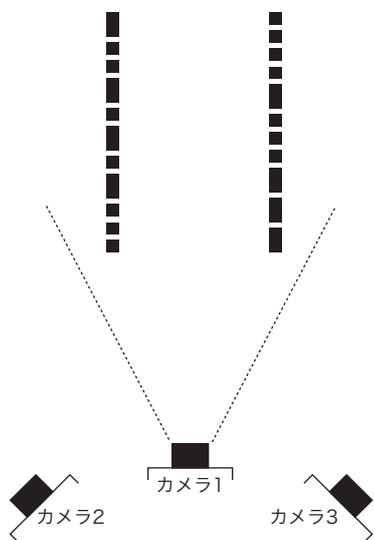


図 5.6: 条件 $c = 1$

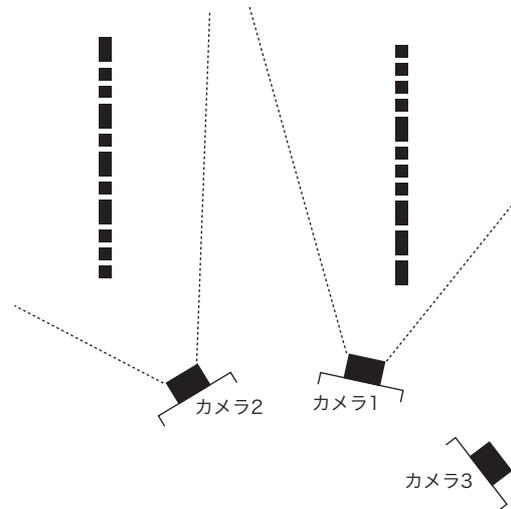


図 5.7: 条件 $c = 2$

ラの推定位置に基づいて計算することができる。この場合、バーコードマーカのスクリーン座標の分解能は原理的に1ピクセル以下となるため、推定された姿勢の精度はカメラの推定位置の精度によってほぼ決定される。したがって本実験では、バーコードマーカが正しく認識されていることを実験時に画面上で確認するのみとし、カメラの姿勢の推定結果は精度評価を行わない。

実験の結果

実験を行う際、2本のバーコードマーカ間の距離が近い ($l = 50 \text{ cm}$) 場合、条件 $c = 2$ のときにバーコードマーカを撮影範囲内に収めることができない場合があった。これは、マルチカメラユニットの各カメラの視野が重ならないよう並べられているため、その死角に入ってしまうからである。これは特に角度が大きい場合に顕著にみられる。

一方、2本のバーコードマーカ間の距離が遠い ($l = 200 \text{ cm}, 300 \text{ cm}$) 場合、条件 $c = 1$ のときに両方のバーコードマーカを同時に1台のカメラの撮影範囲内に収めることができない、あるいは収まっても画像内の位置が偏りすぎているためにバーコードマーカの認識が行えない場合があった。このような場合の撮影画像の例を図 5.8, 5.9 に示す。この場合、バーコードマーカの配置が同じであっても、使用するカメラが複数台であれば2本のバーコードマーカを視野内の中央付近に収めることができる。複数台のカメラを用いて撮影された画像の例を図 5.10, 5.11 に示す。また、図 5.12 に図 5.11 と同じ条件において、トラッキングおよび青い立方体の重畳表示を行っている様子を示す。このように、マルチカメラを用いて視野が広がったことで、バーコードマーカ間の間隔を広げることができることが分かる。それにより、マルチカメラを用いたトラッキング手法では、単一のカメラしか用いない場合 (シングルカメラ) と比べて環境中に貼付する必要のあるバーコードマーカの数を実減することができると考えられる。

また、($l = 200 \text{ cm}, d = 5 \text{ m}, \theta = 60^\circ$), ($l = 300 \text{ cm}, d = 4 \text{ m}, \theta = 60^\circ$), ($l = 300 \text{ cm}, d = 5 \text{ m}, \theta = 60^\circ$) の各条件においては、一方のバーコードマーカとカメラの距離が近すぎるためにフレームアウトしてしまい、バーコードマーカを認識することができなかった。

本実験で評価対象となる推定位置は、3自由度の値となる。この3自由度の誤差を図 5.13 に示した指標で表したものを、各実験条件ごとに図 5.14-5.21 に示す。それぞれの図で赤い×印は、その条件においてトラッキング結果が得られなかったことを示す。

推定位置結果はいずれも十分安定しており、撮影した15フレームの間に大きな差は見られなかった。



図 5.8: 撮影画像例 ($l = 200$ cm, $\theta = 0^\circ$, $d = 3$ m, $c = 1$)

図 5.9: 撮影画像例 ($l = 300$ cm, $\theta = 60^\circ$, $d = 3$ m, $c = 1$)



(a) カメラ 2 で撮影された画像



(b) カメラ 3 で撮影された画像

図 5.10: 撮影画像例 ($l = 200$ cm, $\theta = 0^\circ$, $d = 3$ m, $c = 2$)



(a) カメラ 1 で撮影された画像



(b) カメラ 2 で撮影された画像

図 5.11: 撮影画像例 ($l = 300$ cm, $\theta = 60^\circ$, $d = 3$ m, $c = 2$)



図 5.12: マルチカメラを用いたトラッキングおよび重畳表示の例

なお、 d は重畳表示を行う仮想物体の大きさに影響を与え、 θ, ϕ は重畳表示を行う際の位置に影響を与える。

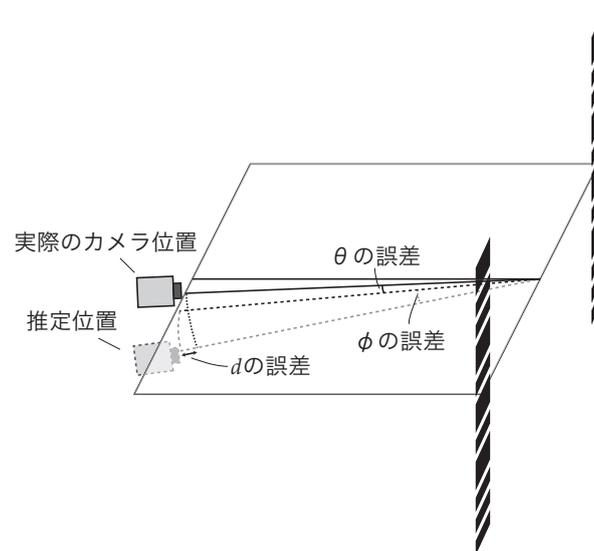


図 5.13: 評価対象の誤差

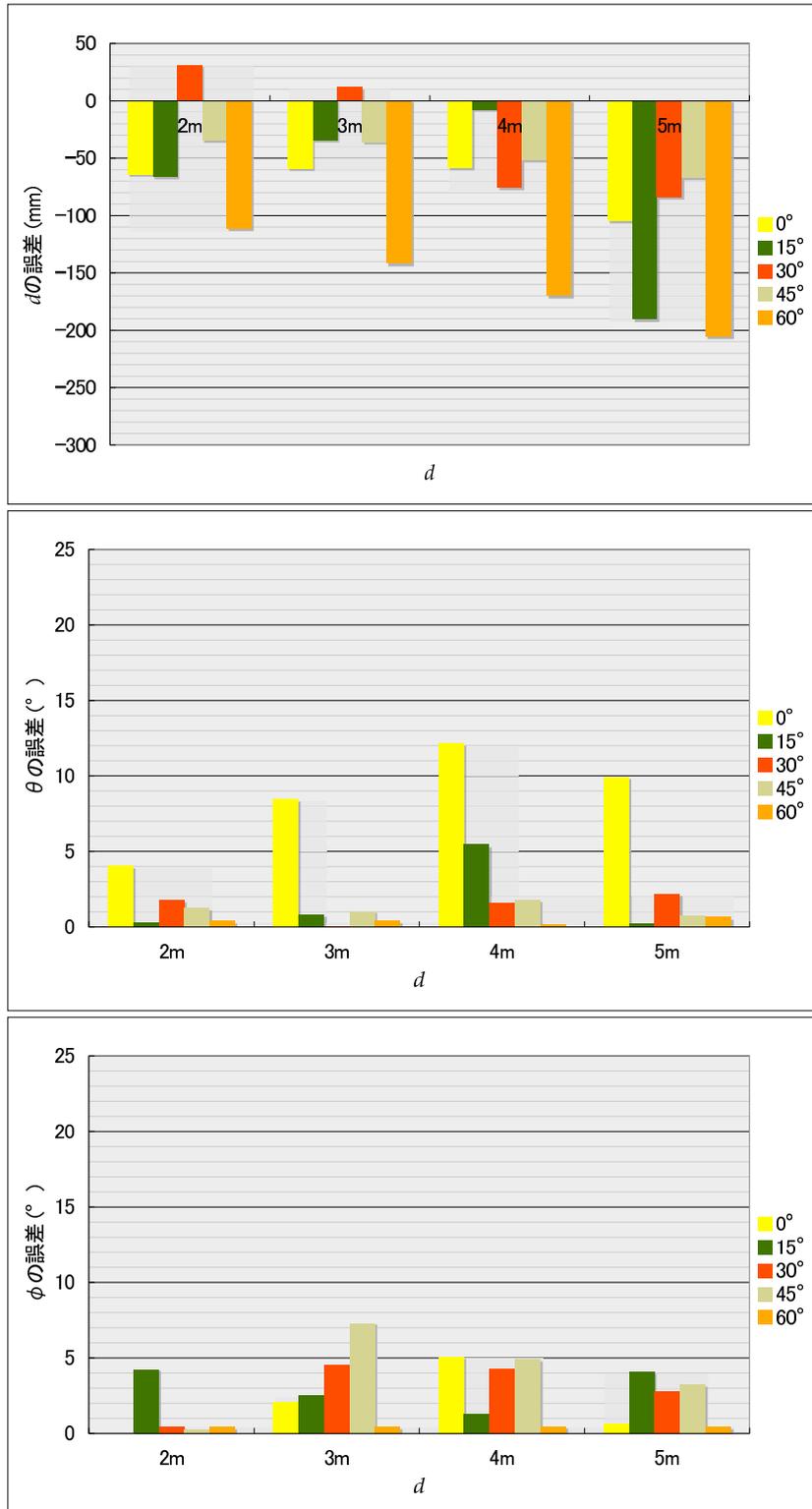


図 5.14: 条件 $l = 50\text{cm}$, $c = 1$ の結果

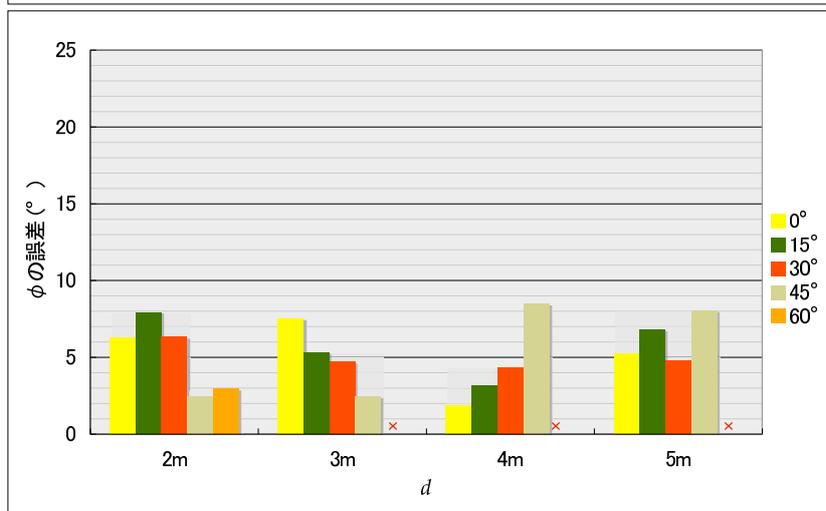
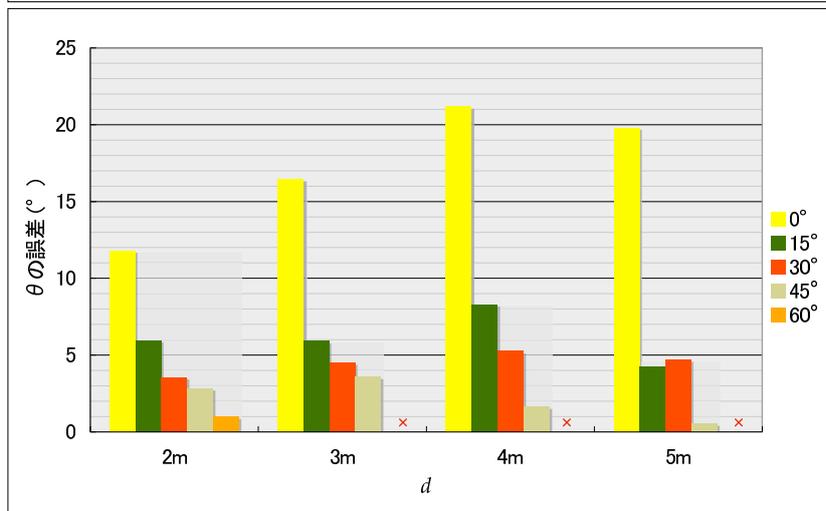
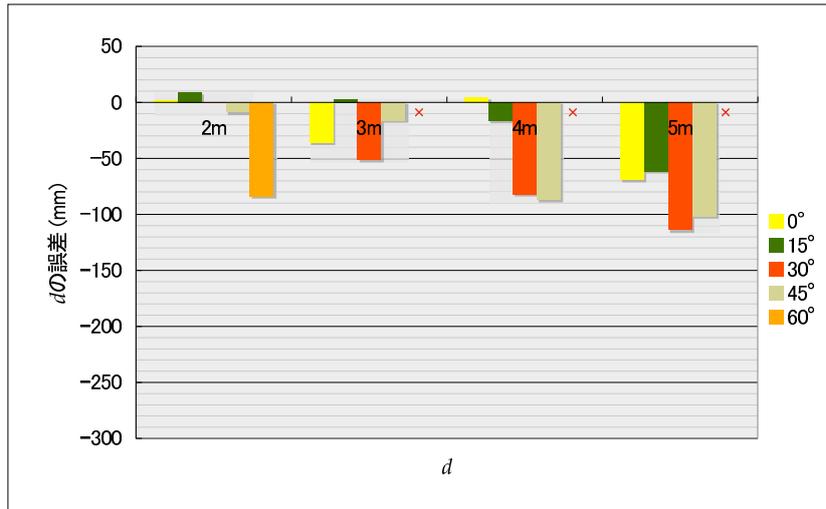


図 5.15: 条件 $l = 50\text{cm}$, $c = 2$ の結果

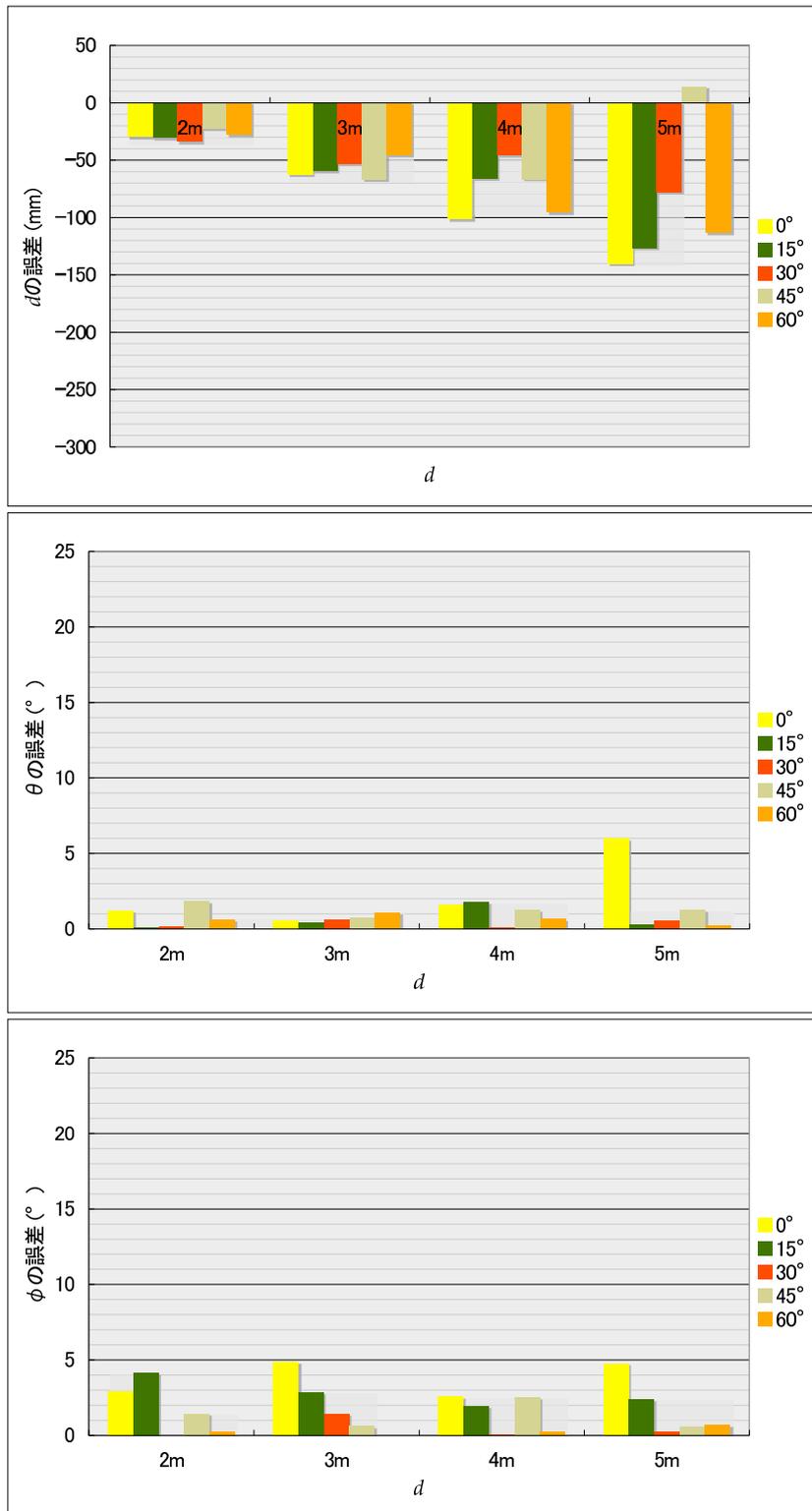


図 5.16: 条件 $l = 100\text{cm}$, $c = 1$ の結果

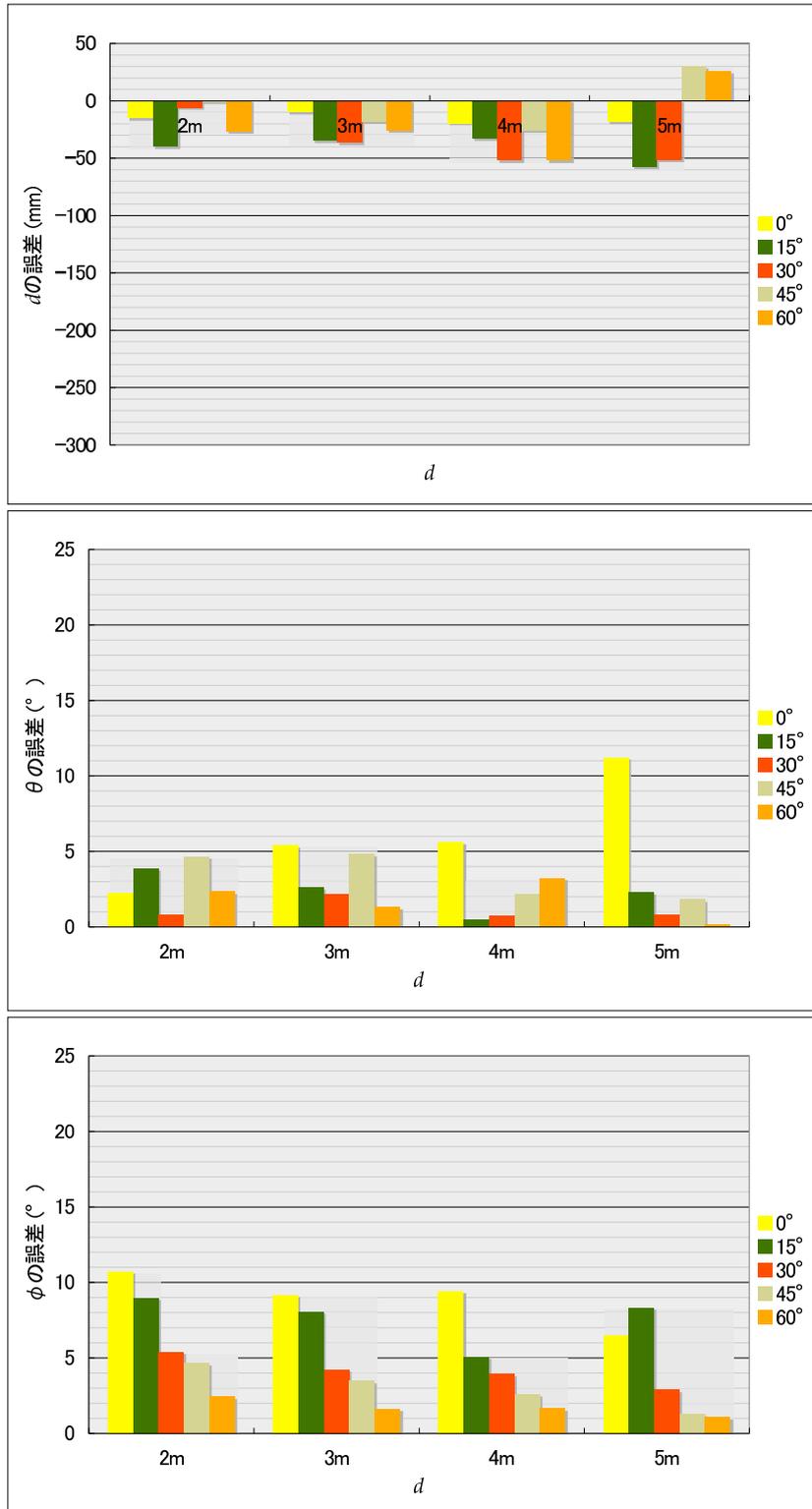


図 5.17: 条件 $l = 100\text{cm}$, $c = 2$ の結果

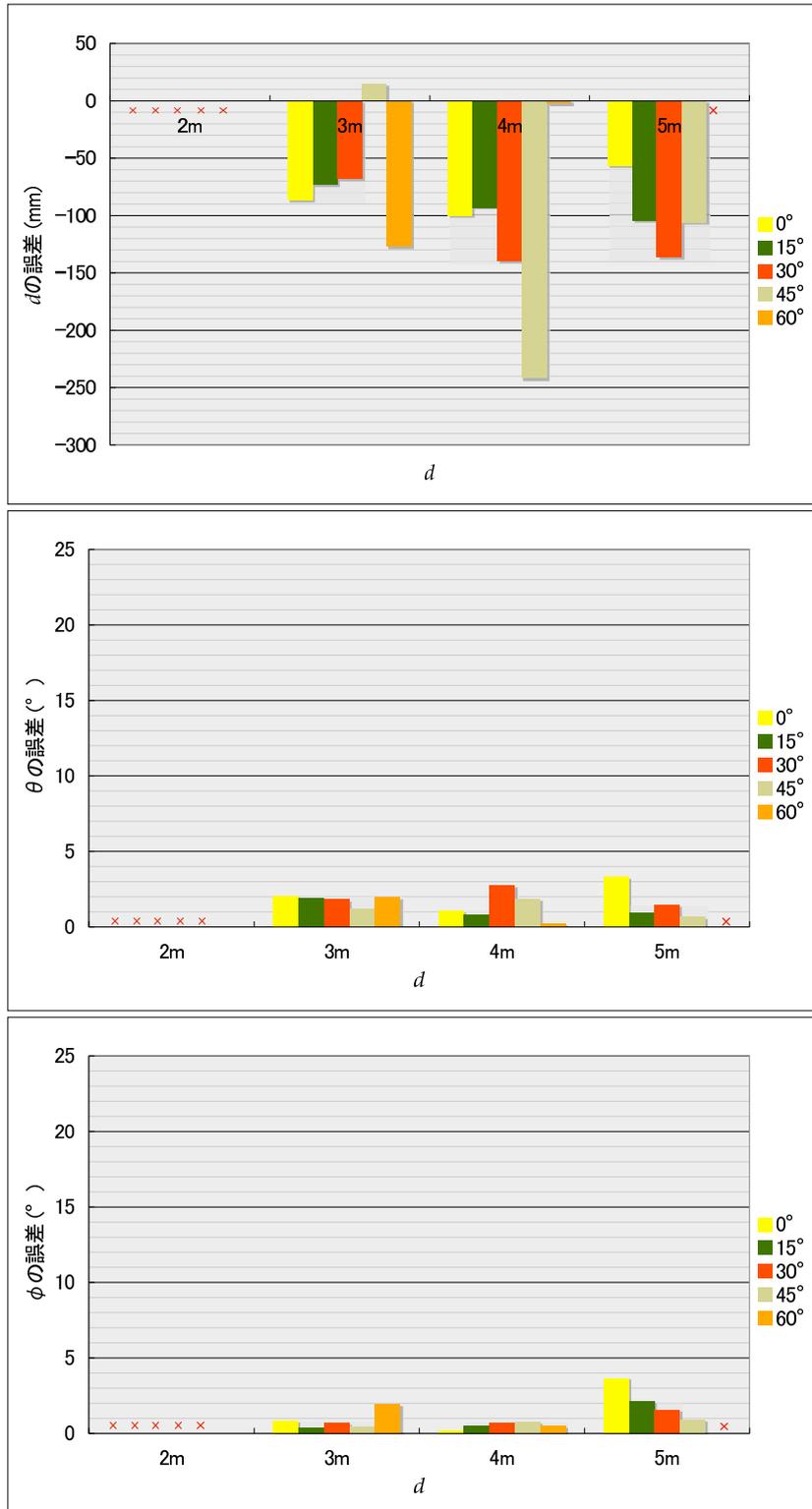


図 5.18: 条件 $l = 200\text{cm}$, $c = 1$ の結果

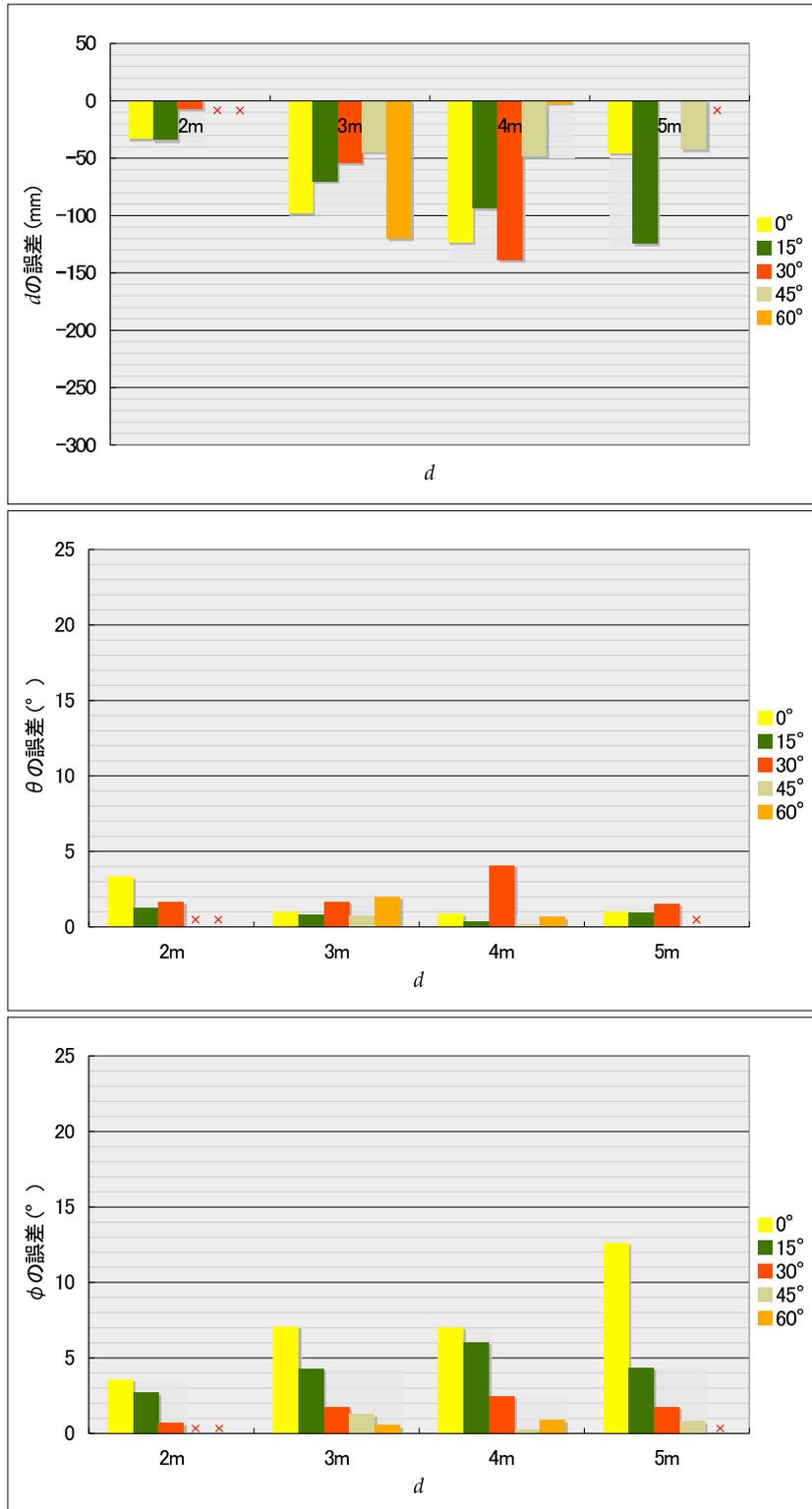


図 5.19: 条件 $l = 200\text{cm}$, $c = 2$ の結果

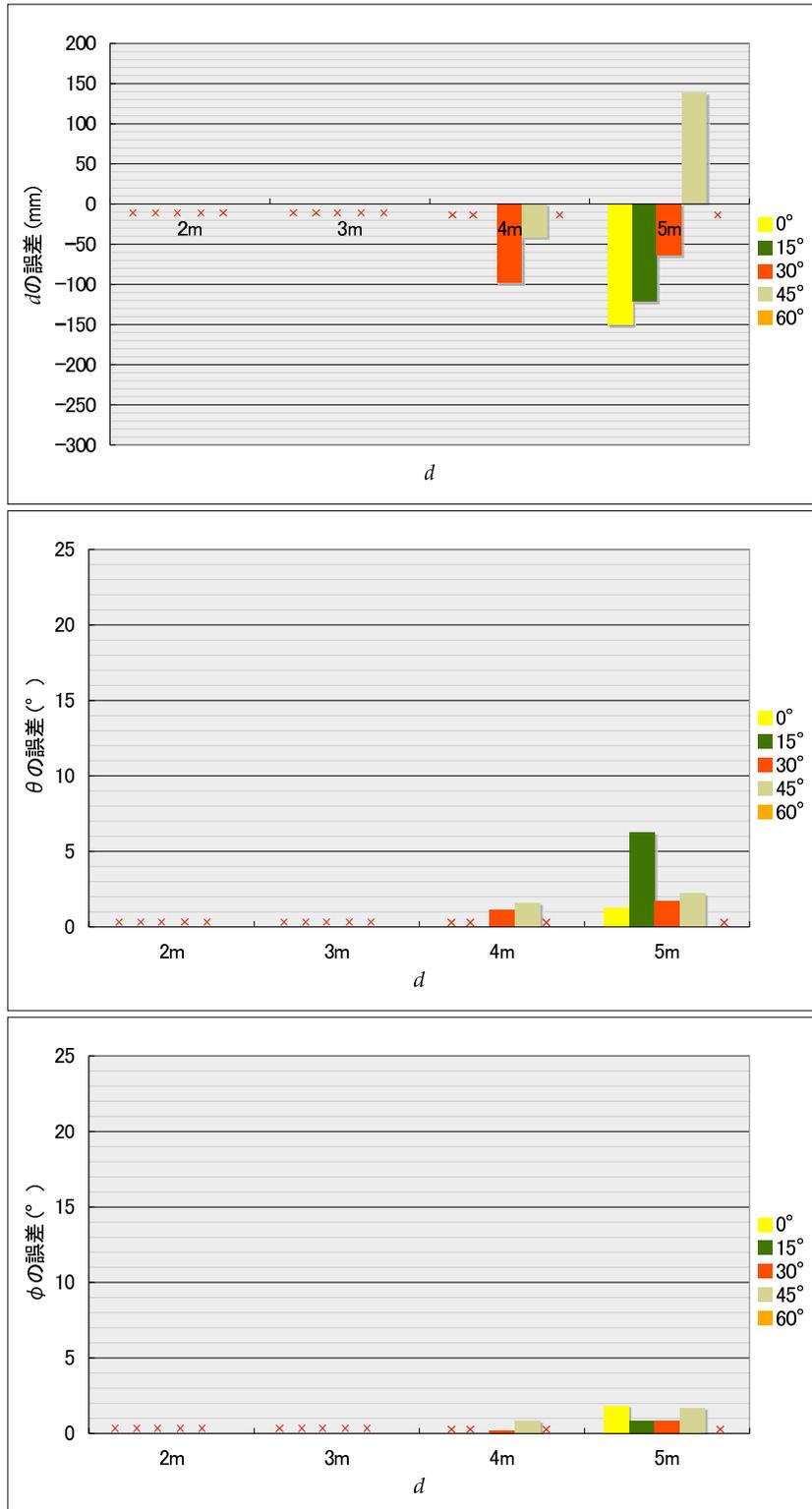


図 5.20: 条件 $l = 300\text{cm}$, $c = 1$ の結果

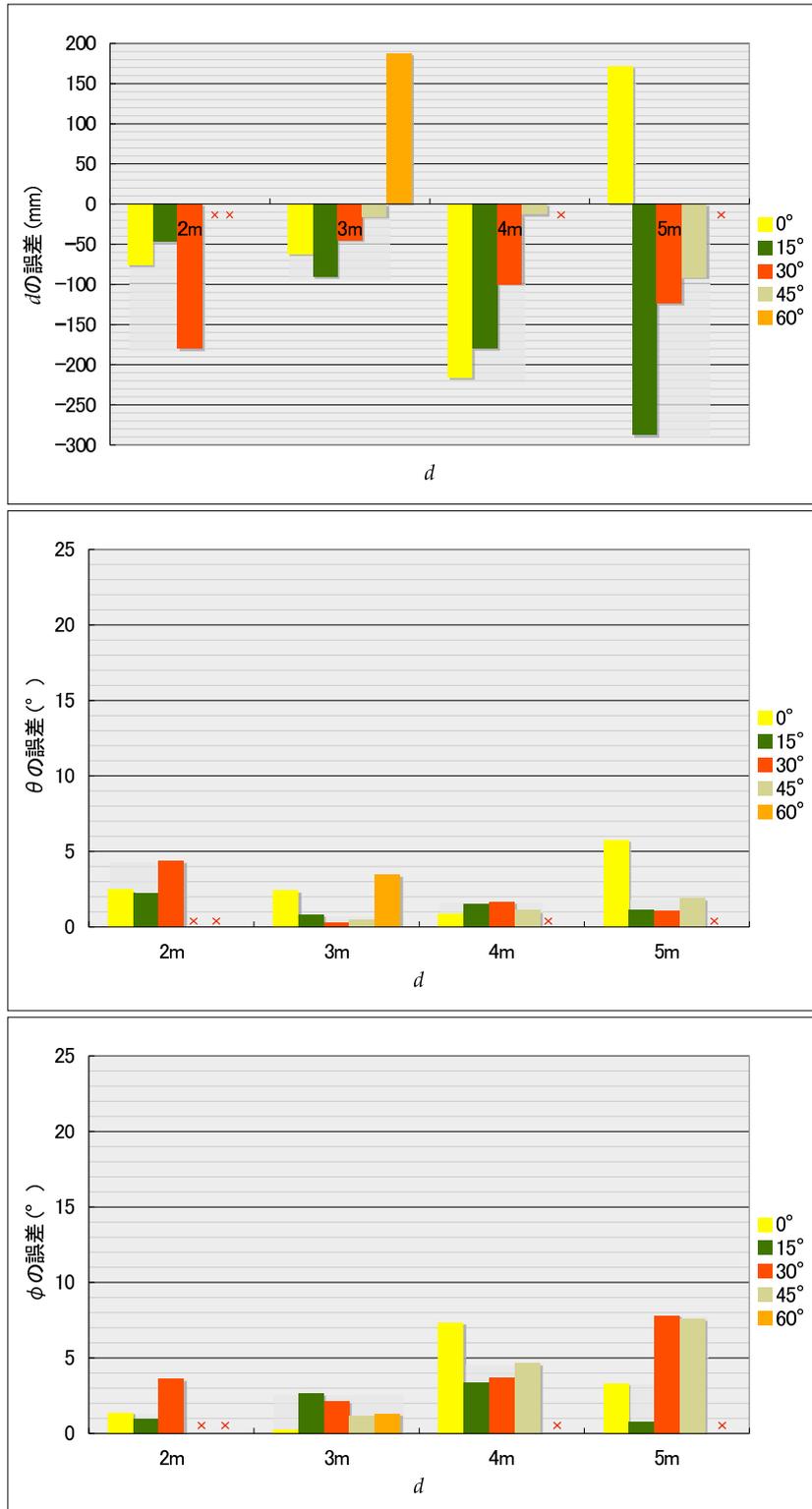


図 5.21: 条件 $l = 300\text{cm}$, $c = 2$ の結果

考察

各条件の結果で、全体的に誤差のばらつきが大きくなっている。この原因としては、実験時にバーコードマーカの映る位置が一定でなかったことがあげられる。特に、視野の周辺部ではレンズの歪みの影響を受けやすく、カメラの内部パラメータのキャリブレーションが完全に行えていないために、その誤差が完全に補正されていない可能性がある。

以上の点を除くと、図5.14-5.21からは、次のような傾向があることが分かる。

1. d が伸びるにつれて、 d の精度は悪化する。
2. θ, ϕ ともに、 $\theta = 0^\circ$ 付近では精度が悪いが、 θ が大きくなるにつれ、改善される。
3. θ は、 l が大きくなるほど精度が良くなる。
4. 一方、 ϕ は、 l が変化してもさほど変化は見られない。
5. d の精度は $c = 1$ よりも $c = 2$ の時の方が良い。
6. θ, ϕ ともに、 $c = 1$ の時の方が精度が良い。

傾向1は、 d が大きくなると画像内のバーコードマーカの大きさが小さくなり、カメラの量子化誤差の影響が大きくなるためである。

また、傾向2は、次のような理由による。 θ, ϕ が 0° 付近の場合、すなわち仮想正方形マーカを正面から撮影している場合には、斜めから撮影している場合と比べ、仮想正方形マーカの角度が変化した際の画像上の変化が少ない。このために、僅かな撮影時のノイズの影響や量子化誤差が、大きな角度変化として検出されてしまい、これが θ, ϕ の精度の低下に繋がる。

傾向3は、 l が大きくなるにつれて仮想正方形マーカの1辺も長くなり、それによってカメラの量子化誤差の影響を受けにくくなるためである。一方、傾向4は、もともと ϕ が 0° に近いために傾向2で説明した影響を受けやすく、この影響が l が大きくなることによる精度向上の効果を上回っているためと考えられる。

傾向5は、次のような理由による。 $c = 2$ 条件の場合、 $\phi = 0$ の場合でも、図5.7に示すように仮想正方形マーカとカメラが正対しない配置となる。このために、傾向2の影響が緩和され、精度向上に寄与していると考えられる。

一方、傾向6が見られるのは、 $c = 1$ 条件ではカメラの外部パラメータのキャリブレーション誤差の影響を受けないためと考えられる。

ただし、 d の誤差は大きくとも10%程度であり、この程度ならば情報の重畳表示位置にはほとんど影響を与えない。 d の誤差は仮想物体の大きさには影響を与えるが、作業

指示を重畳表示する場合、その情報の大きさに 10%程度の誤差があっても特に問題はないと考えられる。

一方、 θ, ϕ の誤差は情報の表示位置に影響を与えるため、比較的高い精度が求められる。2本のバーコードマーカの中心(原点)から x [mm] 離れた場所に情報を重畳表示する場合、 θ, ϕ の誤差をそれぞれ $\delta_\theta, \delta_\phi$ とすると、重畳表示位置の、カメラ距離 1 m あたりのずれ ε [mm] は

$$\varepsilon = \frac{x}{d} \sqrt{\sin^2 \delta_\theta + \sin^2 \delta_\phi} \quad (5.1)$$

で見積もることができる。式(5.1)で求めた各条件の誤差の見積もりを表5.4に示す。

この表中で、誤差の見積もりが2.1.4項で述べた基準である 50mm を超えた条件を、黄色で示してある。このような条件では、2つのバーコードマーカだけでは十分な精度が得られないと言える。

これより、 l が小さく、かつバーコードマーカを正面から見ている場合やバーコードマーカのごく近くにカメラがある場合に精度が低いことが分かる。この原因としては、P4P問題の解法として用いている ARToolKit の特性^[22]や、バーコードマーカが画像上で大きく映り、基準点がカメラ画像の周辺部に近づくため、レンズの歪みを受けやすくなることが挙げられる。また、 $c=1$ の場合と比べ、 $c=2$ の場合の誤差が大きい。これは、トラッキング結果が外部パラメータのキャリブレーションの精度の影響を受けるためと考えらる。

5.2.2 多数のバーコードマーカの配置に対する精度評価実験

実験の目的

次に、前項の実験で、2本のバーコードマーカでは2.1.4項で述べた必要な精度が得られないと考えられる条件について、撮影されるバーコードマーカを3本または4本に増やすことで必要な精度でのトラッキングが可能になるかを確認する。

実験の方法と条件

前項で述べた評価実験で使用した2本のバーコードマーカに加え、図5.22に示す位置に新たにバーコードマーカを配置する。新たに追加した2本のバーコードマーカは、仮想正方形マーカの作成には使用しないようにする(仮想正方形マーカを作成するための2つのバーコードマーカには、最も遠い位置にある2つが選択されるので、図5.22

表 5.4: 距離 1m あたりの重畳表示誤差の見積もり [mm]

$l=50\text{cm}, c=1$				
カメラ 角度 θ	カメラ距離 d			
	2m	3m	4m	5m
0°	35	50	57	35
15°	37	15	24	14
30°	16	26	20	12
45°	11	43	23	12
60°	5	3	2	3

$l=50\text{cm}, c=2$				
カメラ 角度 θ	カメラ距離 d			
	2m	3m	4m	5m
0°	116	104	91	70
15°	86	46	39	28
30°	63	38	30	23
45°	33	25	38	28
60°	27	×	×	×

$l=100\text{cm}, c=1$				
カメラ 角度 θ	カメラ距離 d			
	2m	3m	4m	5m
0°	28	28	13	27
15°	36	17	12	8
30°	13	9	0	2
45°	20	6	12	5
60°	6	6	3	3

$l=100\text{cm}, c=2$				
カメラ 角度 θ	カメラ距離 d			
	2m	3m	4m	5m
0°	95	61	48	45
15°	85	49	22	30
30°	47	28	17	11
45°	57	35	15	8
60°	30	12	16	4

$l=200\text{cm}, c=1$				
カメラ 角度 θ	カメラ距離 d			
	2m	3m	4m	5m
0°	×	13	5	17
15°	×	11	4	8
30°	×	11	12	7
45°	×	7	9	4
60°	×	16	2	×

$l=200\text{cm}, c=2$				
カメラ 角度 θ	カメラ距離 d			
	2m	3m	4m	5m
0°	42	42	31	44
15°	26	25	26	15
30°	15	14	21	8
45°	×	8	1	3
60°	×	12	5	×

$l=300\text{cm}, c=1$				
カメラ 角度 θ	カメラ距離 d			
	2m	3m	4m	5m
0°	×	×	×	8
15°	×	×	×	22
30°	×	×	5	7
45°	×	×	8	10
60°	×	×	×	×

$l=300\text{cm}, c=2$				
カメラ 角度 θ	カメラ距離 d			
	2m	3m	4m	5m
0°	25	14	32	23
15°	21	16	16	5
30°	49	13	18	27
45°	×	7	21	27
60°	×	22	×	×

の配置の場合、通常もとの2つのバーコードマーカが選択される)。これら4本のバーコードマーカのうち、表5.5に示す組み合わせのバーコードマーカのみがカメラに写る状態にする。各組み合わせに対して、前項の評価実験と同様に提案手法によるトラッキングを行ってカメラ位置推定結果を求め、レーザー計測機器で測定した実際のカメラ位置と比較する。

なお、新たに追加した2本のバーコードマーカは、 $c = 2$ の条件時には右側のカメラに映るようにした。また、バーコードマーカ4によって、他のバーコードマーカが隠蔽されないよう、必要に応じて左右に僅かに移動させた。

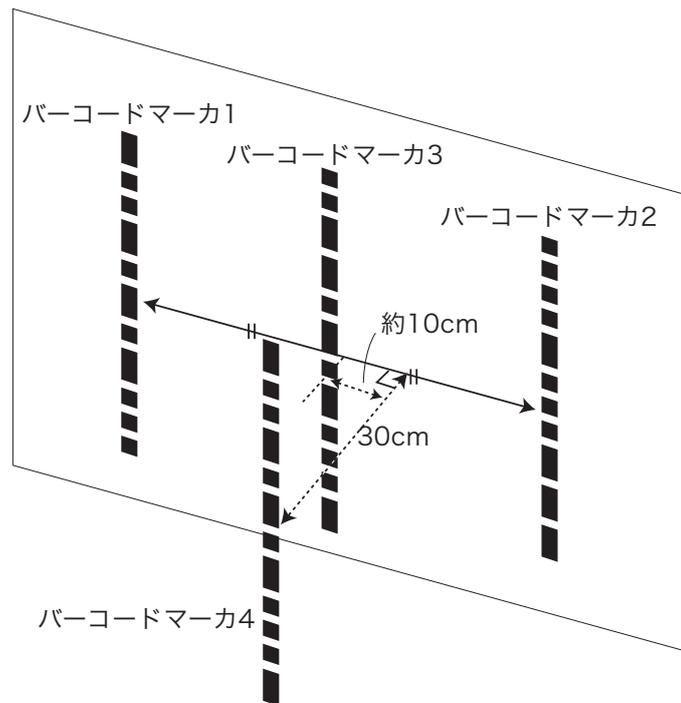


図 5.22: 精度評価実験のバーコードマーカ配置

表 5.5: バーコードマーカの組み合わせ条件

番号	使用するバーコードマーカ
配置-A	バーコードマーカ 1, 2のみ
配置-B	バーコードマーカ 1, 2, 3
配置-C	バーコードマーカ 1, 2, 4
配置-D	バーコードマーカ 1, 2, 3, 4全て

この評価実験を、以下の各条件について行う。

- $l = 50 \text{ cm}, c = 1, \theta = \{0, 15, 30, 45, 60\}^\circ, d = 0 \text{ m}$
- $l = 50 \text{ cm}, c = 2, \theta = \{0, 15, 30, 45, 60\}^\circ, d = 0 \text{ m}$
- $l = 50 \text{ cm}, c = 2, \theta = 0^\circ, d = \{2, 3, 4, 5\} \text{ m}$
- $l = 100 \text{ cm}, c = 2, \theta = \{0, 15, 30, 45, 60\}^\circ, d = 0 \text{ m}$
- $l = 100 \text{ cm}, c = 2, \theta = 0^\circ, d = \{2, 3, 4, 5\} \text{ m}$

実験の結果

図5.23-5.26に、各条件での撮影画像の例を示す。この例のように使用しないバーコードマーカの一部を紙で覆い隠すことで、他のバーコードマーカに影響を与えずに認識されないようにすることができた。また、マルチカメラで撮影した画像の例を図5.27に示す。

実験を行った各条件について、前項の実験と同様、図5.13に示した指標で推定位置の3自由度の誤差を表したものを、図5.28-5.32に示す。

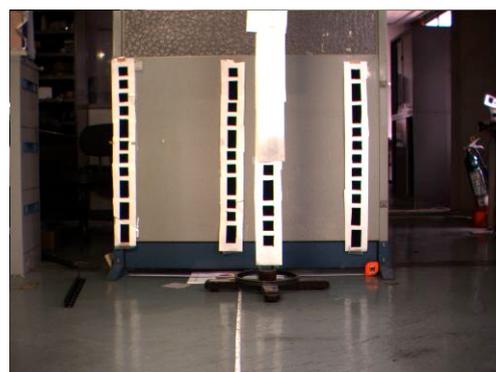
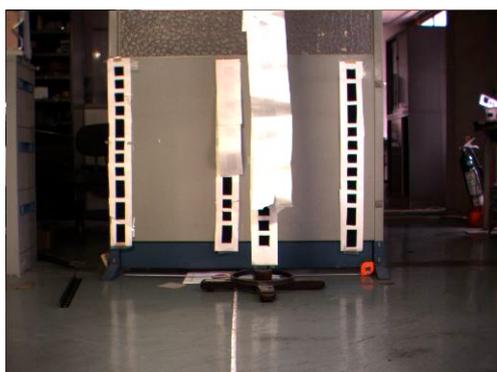


図 5.23: 撮影画像例 ($l = 100 \text{ cm}, \theta = 0^\circ, d = 3 \text{ m}, c = 1$, 配置-A) 図 5.24: 撮影画像例 ($l = 100 \text{ cm}, \theta = 0^\circ, d = 3 \text{ m}, c = 1$, 配置-B)

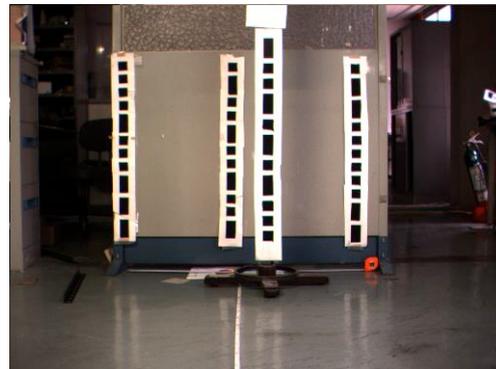
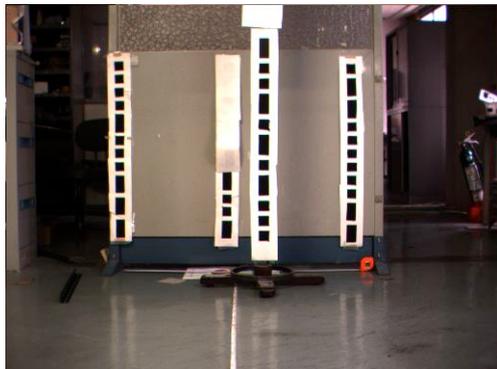


図 5.25: 撮影画像例 ($l = 100 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 1$, 配置-C)

図 5.26: 撮影画像例 ($l = 100 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 1$, 配置-D)



(a) カメラ 2 で撮影された画像



(b) カメラ 1 で撮影された画像

図 5.27: 撮影画像例 ($l = 100 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$, $d = 3 \text{ m}$, $c = 2$, 配置-D)

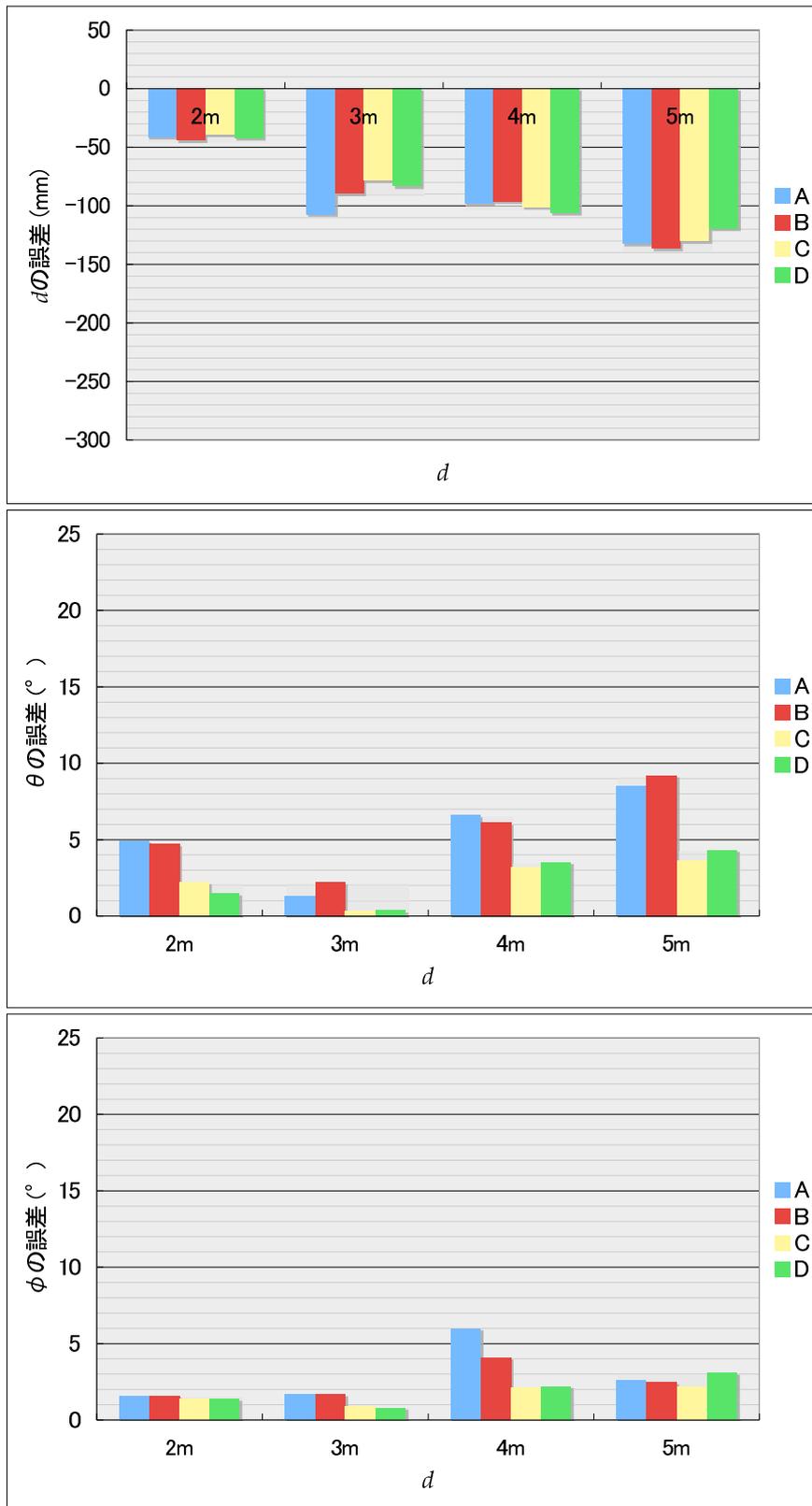


図 5.28: 条件 $l = 50\text{cm}$, $\theta = 0^\circ$, $c = 1$ の結果

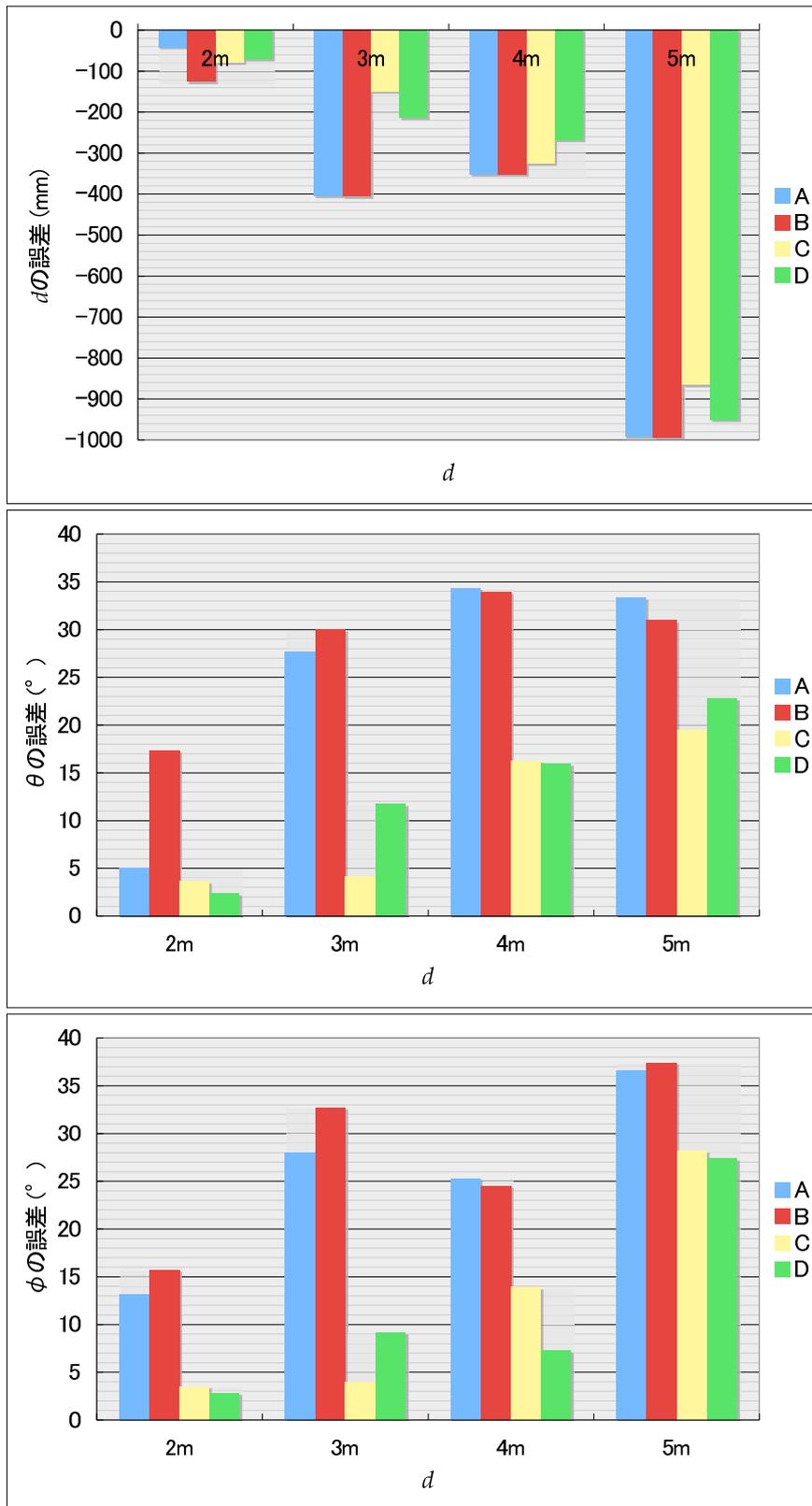


図 5.29: 条件 $l = 50\text{cm}$, $\theta = 0^{\circ}$, $c = 2$ の結果

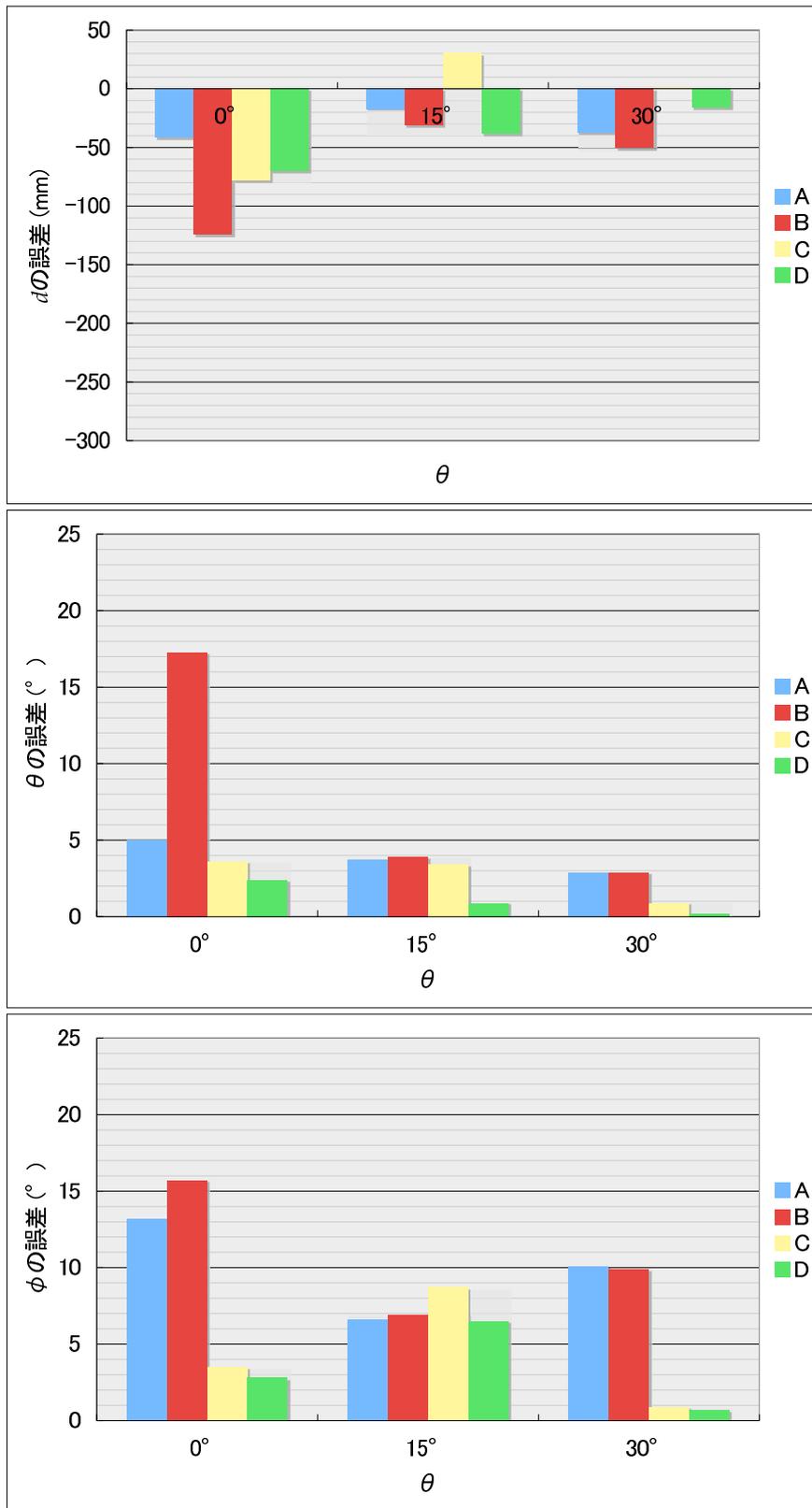


図 5.30: 条件 $l = 50\text{cm}$, $d = 2\text{m}$, $c = 2$ の結果

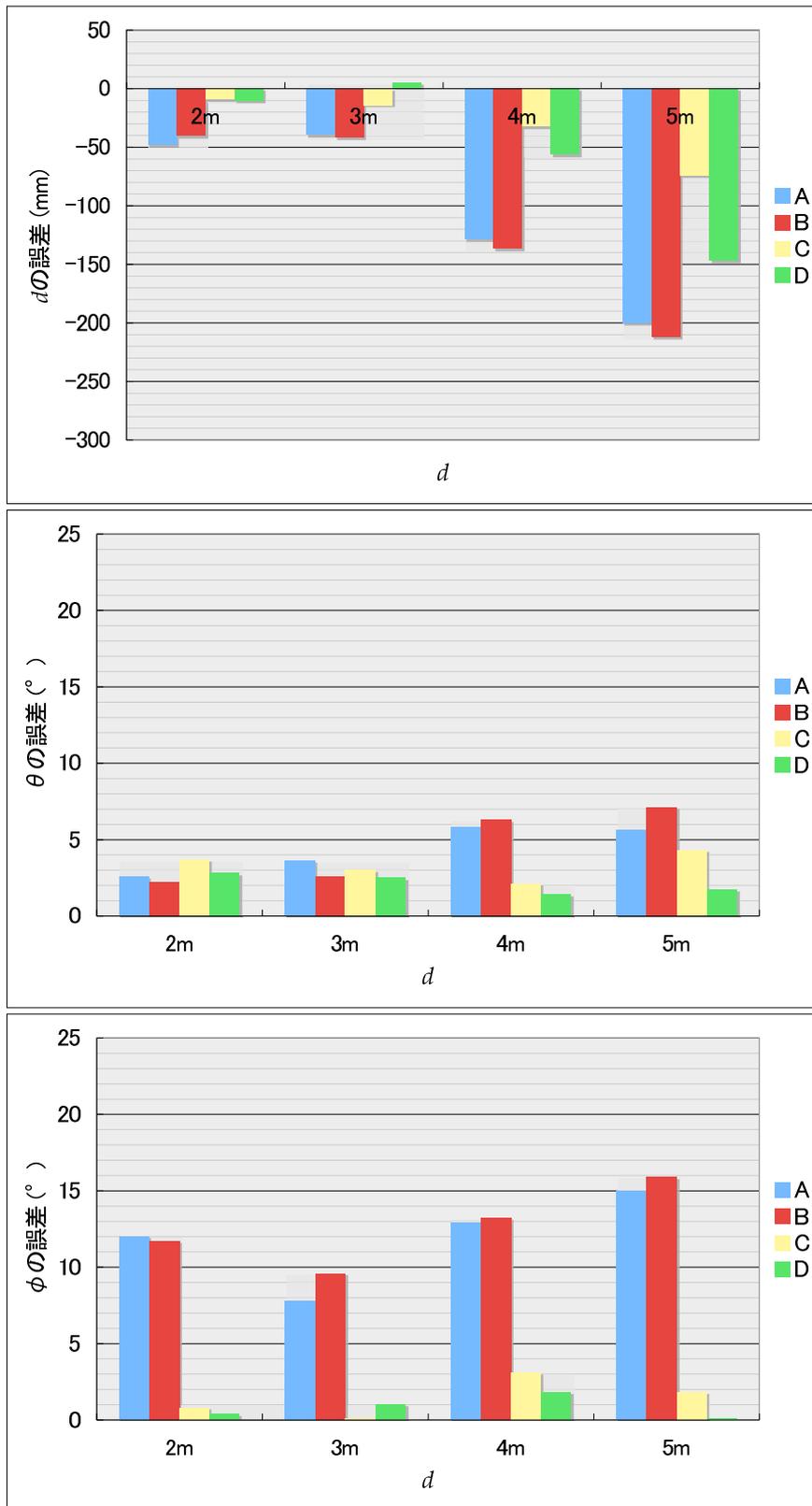


図 5.31: 条件 $l = 100\text{cm}$, $\theta = 0^\circ$, $c = 2$ の結果

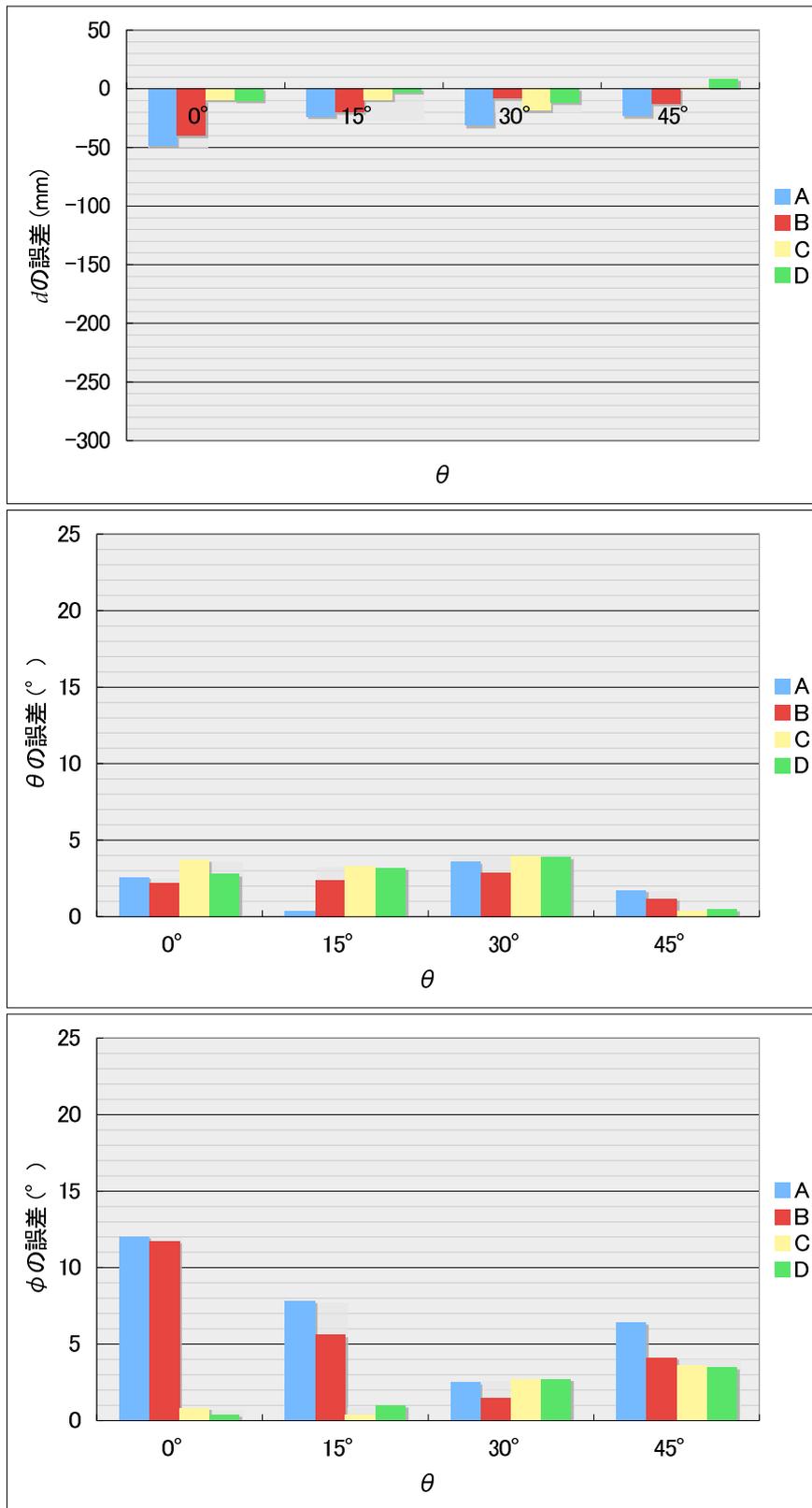


図 5.32: 条件 $l = 100\text{cm}$, $d = 2\text{m}$, $c = 2$ の結果

考察

実験を行ったほとんどの条件において、配置-C,-Dの結果は全ての指標において配置-A,-Bと比べてトラッキング精度が向上した。特に、バーコードマーカを正面から見た場合($\theta = 0$)には、 θ, ϕ のトラッキング精度が改善された。配置-C, -Dには、バーコードマーカ4が含まれており、全てのバーコードマーカが同一平面上にならない。このため、誤差関数の非線形最小化の過程で、このバーコードマーカのスクリーン座標を基に、角度の精度が改善されたと考えられる。一方、配置-Bは配置-Aと同程度の精度しか得られておらず、同一平面上にあるバーコードマーカでは非線形最小化の効果が低いことが分かる。

$l = 100$ cmの場合、配置-C, -Dではいずれの場合も式(5.1)によって求められるカメラ距離1mあたりの誤差の見積もりが50mmを下回り、作業情報を提示するのに十分な精度が得られることが分かった。従って、作業情報を提示する等、精緻なトラッキング精度が必要な場合は、情報を提示したい場所の付近に基準となるバーコードマーカを2本、距離を100cm以上空けて配置し、さらに立体的な配置になるよう、角度補正用のバーコードマーカを配置すれば確実であると言える。

逆に、放射線可視化などそれほど精度の必要としないアプリケーションの場合は、200-300cm程度の広い間隔を空けてバーコードマーカを配置すれば十分な精度でトラッキングを行えると考えられる。

5.3 ふげん発電所における本手法の可用性評価実験

実験の目的

前節までの実験はいずれも実験室内の、理想的なバーコードマーカの配置のもとで行った。しかし、実際の作業現場環境にバーコードマーカを貼付する場合には、貼付できる場所に制限があり、パイプやその他の機器によってバーコードマーカが隠蔽されることも考えられる。そのような状況下でも提案手法が有効に機能することを確認すること、および本手法が適用可能な範囲の検証を行うことを目的とする評価実験を行う。

実験の方法と条件

評価実験を行う場所は、ふげん発電所構内の純水装置室と呼ばれる一室であり、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。本実験はふげん発電所の責任者の了承を得、同意の下で行った。実験環境を図 5.33 に示す。室内は蛍光灯照明で、200 - 500Lux 程度の明るさがあり、容易にバーコードマーカを視認できる。

実験の手順は以下の通りである。まず、パイプやタンクなどの機器もしくは壁に適当な密度で、垂直になるようバーコードマーカを貼付する。そして、図 5.33 中に示したように世界座標系を設定し、バーコードマーカの位置をレーザー計測機器によって測定し、評価用システムに登録する。そして、InertiaCube³ を取り付けた状態のマルチカメラユニットを持ち、評価用システムを動作させながら、図中のまたは 2 に沿って歩く。コース上で○印で示した部分では、その場でゆっくりと左右を振り向く動作（見回し動作）をする。このとき撮影された画像、認識されたバーコードマーカの ID とそのスクリーン座標、InertiaCube³ の出力を記録しておく。そして、その記録を用いて提案手法によるトラッキングをオフラインで行い、その結果を分析する。

実験の結果と考察

(1) バーコードマーカの配置による影響に関する考察

バーコードマーカを貼付した位置を図 5.33 に示す。また、バーコードマーカの ID、符号と、レーザー計測機器で計測した上端の空間座標、およびバーコードマーカのバーコードが見える面の向きを表 5.6 に示す。なお、表 5.6 の矢印は、図 5.33 中での向きである。

コース 1 上は比較的密度が高く、マーカの間隔はほぼ同一の位置にある ID2 と ID3 のバーコードマーカを除いて 1.0 - 2.7 m となっている。一方、コース 2 上は比較的密度の低い配置となっており、マーカの間隔は 2.3 - 3.5 m である。特に、コース 2 の最初は、周囲にわずかなバーコードマーカしか存在しない状態が含まれている。コース 1、2 それぞれのマルチカメラによる撮影画像例を図 5.34, 5.35 に示す。

コース 1 では、前節の実験結果を踏まえると、バーコードマーカの間隔や撮影される角度から考えて、2 本以上のバーコードマーカが撮影されているという条件下では、コース上のほとんどの部分において高い精度でトラッキングが可能である。特に十分な数のバーコードマーカが撮影されている状況であれば、作業指示情報の提示にも耐

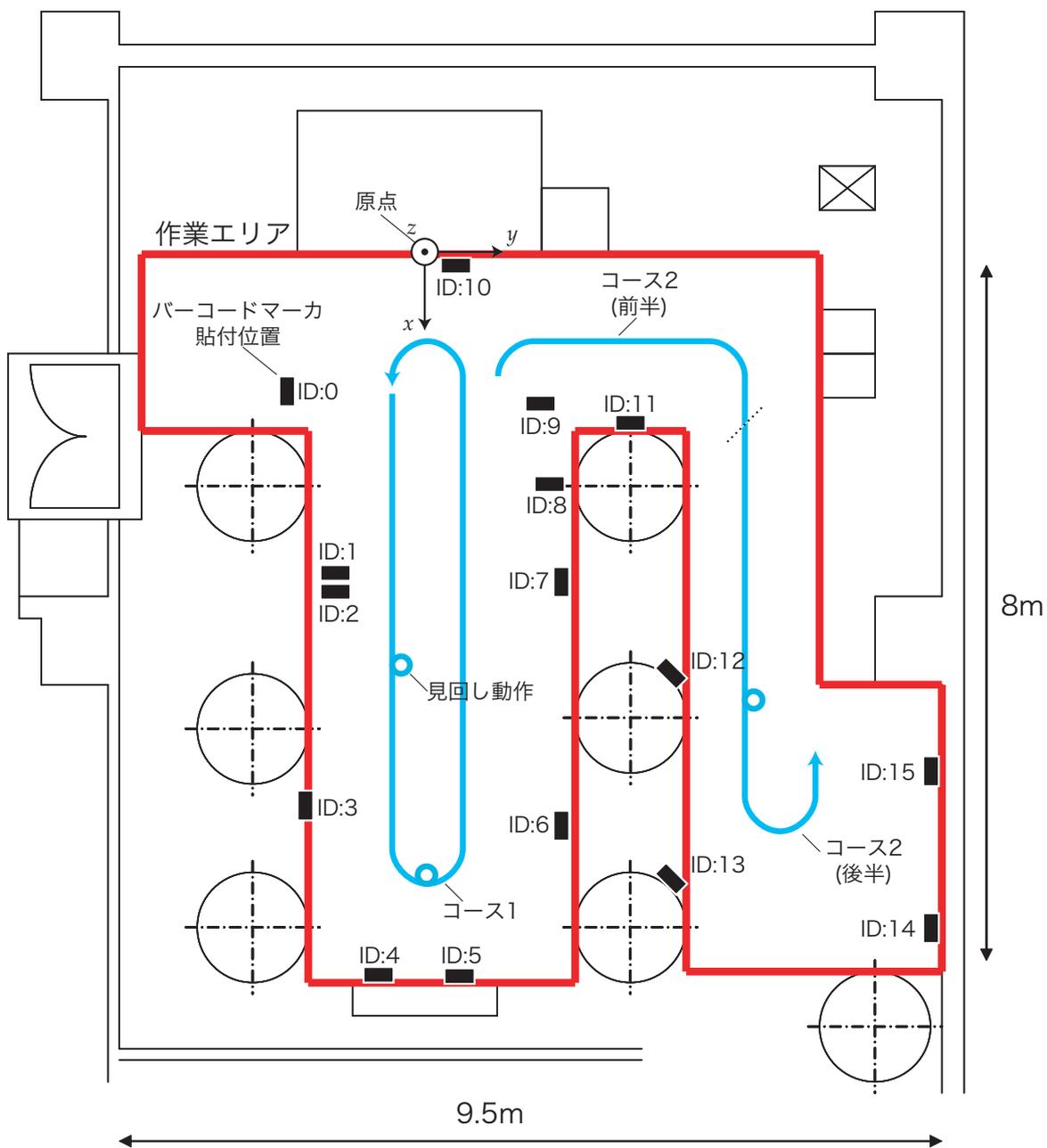


図 5.33: ふげん発電所内における実験環境

表 5.6: バーコードマーカの貼付位置

ID	コード	座標 [mm]			向き
		x	y	z	
0	00010001011	2211	-1832	1712	→
1	00000010011	5224	-1260	1810	↑
2	00011110000	5269	-1218	1792	↓
3	01100000011	7199	-1645	2046	→
4	00001010100	9030	-950	1627	↑
5	00001000111	9030	32	1653	↑
6	01001001001	7504	788	1794	←
7	01000110001	5240	355	1781	←
8	10010101000	3962	643	887	↓
9	00100001101	2613	593	1164	↓
10	01010000101	3	30	1239	↓
11	00010011000	2986	1843	1587	↑
12	10000110000	5601	2208	1673	↗
13	10001001000	7893	2154	1726	↗
14	11000000001	7127	5596	1635	←
15	10010000100	4512	4848	1599	←

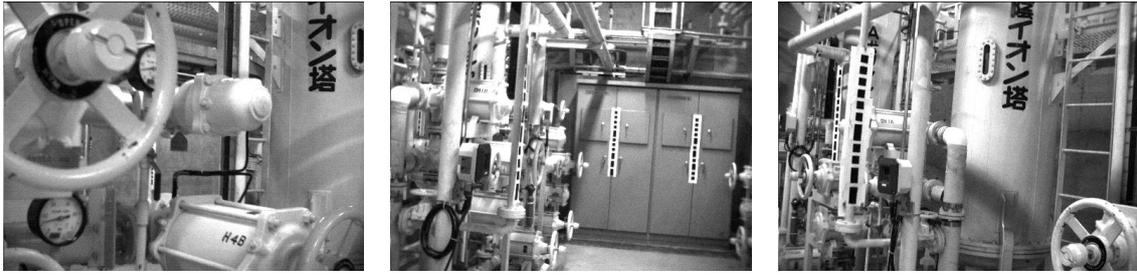


図 5.34: コース 1 の撮影画像例



図 5.35: コース 2 の撮影画像例

えうる精度でトラッキングが行えると考えられる。また、マルチカメラと InertiaCube³ によるハイブリッドトラッキングを行えば、認識できるバーコードマーカの本数が一時的に減った場合であっても、放射線可視化などを行うには十分と思われる精度でトラッキングが継続可能であると考えられる。図 5.36 に青色の直方体を重畳表示した例を示す。なおこの図の場合には、1 台のカメラ画像内に複数のバーコードマーカが映っており、シングルカメラでもトラッキングが行えるが、マルチカメラを用いなければトラッキングができない場合も多々見られた。

コース 2 前半では、マルチカメラによるトラッキングが長時間行えない期間が存在した。歩行する場合、2-3 s を超えてマルチカメラによるトラッキングが行えないと、ハイブリッドトラッキングを行った場合でも、重畳表示が正しい位置に表示されたり全く異なる位置に表示されたりを繰り返す、または全く重畳表示できない等、正しく重畳表示を行うことができなかった。これは歩行による平行移動が含まれることに加え、バーコードマーカが 1 本も認識できない状況があるためであると考えられる。後半は、適当な密度でバーコードマーカがあるため、比較的安定してトラッキングが行えた。特にバーコードマーカの間隔が広いため、2 本以上のバーコードマーカが撮影されれば作業指示情報の提示を行うのに十分な精度でトラッキングが行えると考えられる。しかし実際に作業指示を提示するには、より多くのバーコードマーカを貼付し、より広いカメラの位置・姿勢の範囲においてトラッキングが安定して行えるようにす

る必要があると思われる。

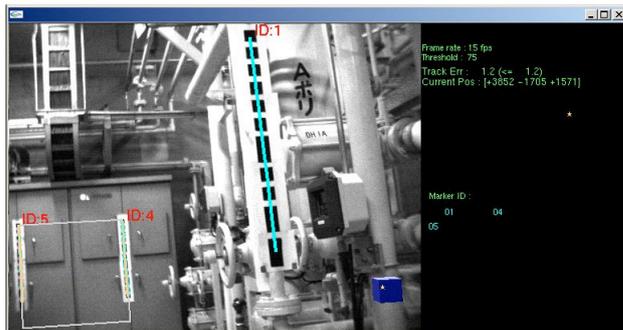


図 5.36: カメラ 1 台でのトラッキング例



図 5.37: ブラーによる影響の例

見直し動作をした場合、図 5.37 に示すように撮影した画像にブラーが発生し、バーコードマーカの抽出が行えなくなることがあった。このようなブラーはシャッタースピードをより高速にすることで軽減することができる。ブラーによって一時的にバーコードマーカが認識できなくなった場合でも、ハイブリッドトラッキングを併用すれば重畳表示を続けることができた。しかし、カメラ画像の移動と仮想情報の移動に時間的にずれがあり、重畳表示した情報がカメラ画像に先行して動いて重畳位置がずれる現象が見られた。これは、マルチカメラと InertiaCube³ の間でより精緻にデータ取得の同期をとることで解消できると考えられる。

また全体に渡って、仮想正方形マーカを作成するために選択された 2 本のバーコードマーカが前フレームと異なる場合に、推定位置・姿勢が大きく変化するという現象が見られた。これは、レンズの歪みやキャリブレーションの誤差の他、バーコードマーカの 3 次元位置の計測誤差によるトラッキングの誤差の影響であると考えられる。このために、重畳表示される情報の位置が突然変わったり、変化を繰り返すジッタが発生する。これを抑制するためには、原因となる誤差をより厳密な測定・補正によって軽減するほか、可能な限り前フレームと同一のバーコードマーカを選択するようになる必要がある。また、トラッキング結果の時間変化に対してフィルタリング処理を行う方法も考えられる。

(2) マルチカメラの効果の定量的評価

マルチカメラの効果を定量的に評価するため、それぞれのコースにおいて、シングルカメラ・マルチカメラのそれぞれで撮影を行った場合、各フレームで何本のバーコードマーカが認識できるかをオフラインで調べた。各コースにおいて撮影された画像の

うち、認識されたバーコードマーカが n 本であるフレームの割合を、図 5.38 に示す。なおこれは、マルチカメラで撮影した画像のうち、中央のカメラから抽出されたバーコードマーカのみを計数した結果をシングルカメラとして求めた結果である。また全体フレーム数は、コース 1 は 411、コース 2 は 330 であった。なお、画像データのハードディスクドライブへの保存を行ったため、通常動作時よりもフレームレートは低下し、データ取得時の平均フレームレートは約 5 fps となった。

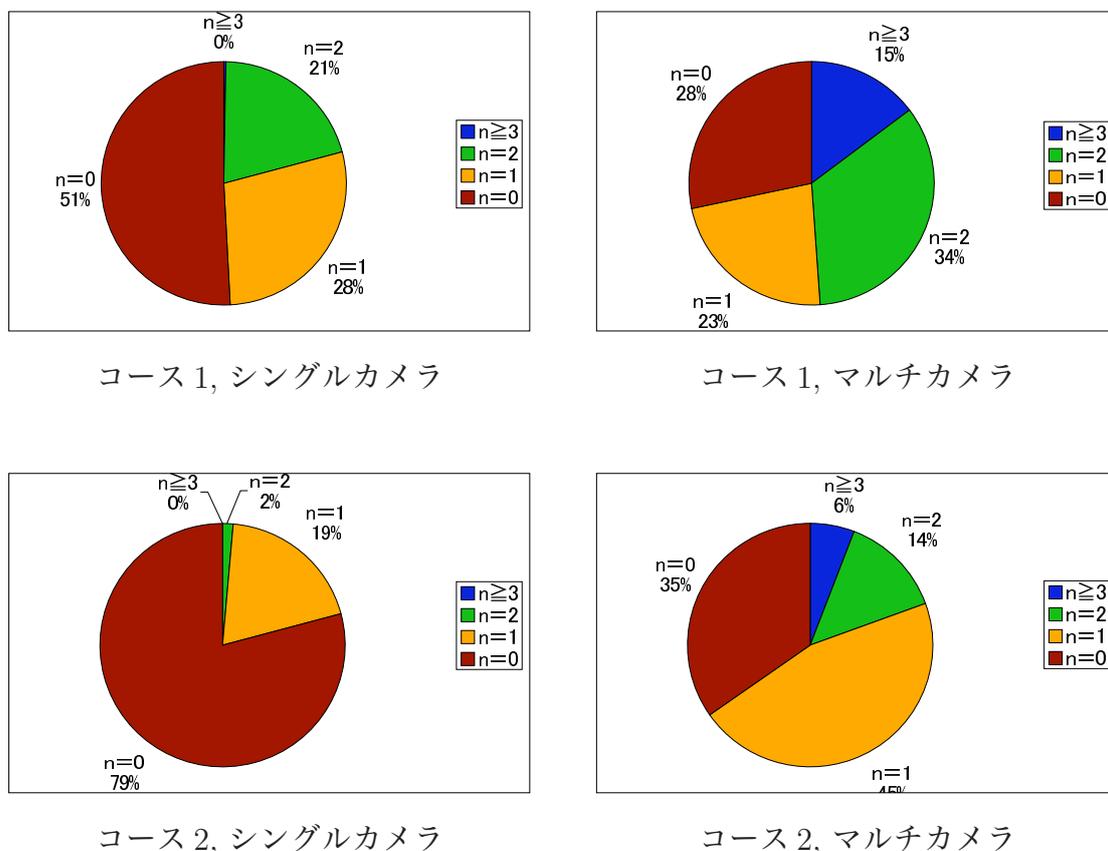


図 5.38: バーコードマーカの認識数

コース 1 では、シングルカメラでは 21% のフレームでしかトラッキングが行えないが、マルチカメラでは 49% のフレームでトラッキングが行えるようになった。コース 2 では、シングルカメラでは 2% のフレームでしかトラッキングが行えないが、マルチカメラでは 20% のフレームでトラッキングが行えるようになった。この結果から、マルチカメラを用いることで大きくバーコードマーカの認識数が増加していることが分かる。

しかしながら、バーコードマーカを用いたトラッキング手法単独では全てのフレームで重畳表示を行うことはできておらず、ハイブリッドトラッキングの必要性が改め

て明らかになった。

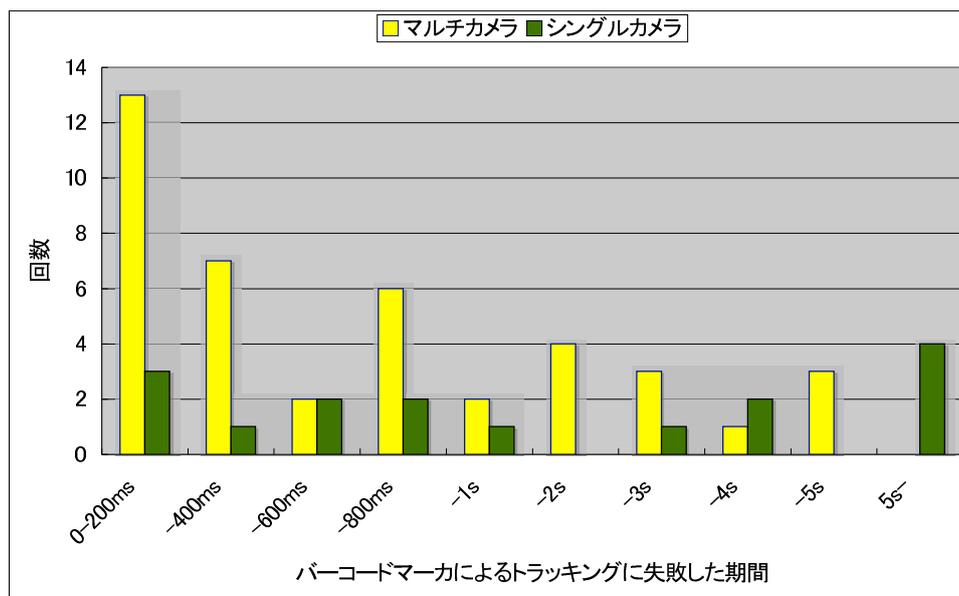


図 5.39: バーコードマーカによるトラッキングに失敗した時間の分布

(3) マルチカメラによるトラッキングが行えない時間の評価

次に、コース1のトラッキング結果に関して、マルチカメラによるトラッキングに連続して失敗した期間、すなわち連続してバーコードマーカが2つ以上認識できない時間がどの程度あるかを調べた。トラッキングが断続した時間ごとに分けて断続の回数を数えた結果を、上述のシングルカメラ・マルチカメラのそれぞれの場合について図5.39に示す。

200msまでの断続に関しては、その大半が上述のブラーによる影響であると考えられる。このように短い断続であれば、ハイブリッドトラッキングによって十分補うことができると考えられる。

一方5s以上の長時間に渡ってトラッキングが行えない状況はマルチカメラを用いた場合には見られなかったが、その分短い時間の断続回数が増加していた。これはハイブリッドトラッキングは、5sといった長時間の断続に対しては誤差の蓄積によって精度が悪化してしまうため効果が低いが、短時間の断続に対しては効果が高い。このことから、マルチカメラとハイブリッドトラッキングを併用することで、より安定してトラッキングができると言える。

(4) ハイブリッドトラッキングによる効果の定量的評価

実際にふげんで記録されたデータに対してハイブリッドトラッキングによって正しく重畳表示が行えるフレーム数の見積もりを行った。ここでは、マルチカメラによるトラッキングが行えている状態から、バーコードマーカが認識できなくなった場合にも、300ms以内であればトラッキングが継続可能であると仮定した。加えて、500ms以内と仮定した場合についても見積もりを行った。

マルチカメラによるトラッキングまたはハイブリッドトラッキングによって正しくトラッキングが行えると想定されるフレーム数の割合を、コース1,2のそれぞれについて図5.40に示す。図中の $n=2$, $n \geq 3$ はそれぞれ、バーコードマーカが2本または3本以上認識され、これによってトラッキングが可能なフレームを表す。 $t < 300\text{ms}$, $t < 500\text{ms}$ はそれぞれ、バーコードマーカが認識できなくなってからも300msあるいは500ms以内であればトラッキングが継続可能と仮定したときに、ハイブリッドトラッキングが行える状態となるフレームを表す。この結果、マルチカメラを用い、500msの間トラッキング継続可能であると仮定した場合には、コース1では全体の69%、コース2では全体の35%でトラッキングが可能と推定された。すなわち、ハイブリッドトラッキングによって、マルチカメラによるトラッキングのみの場合と比べてそれぞれ1.4倍、1.8倍のフレームにおいてトラッキングができるようになる可能性が示唆された。

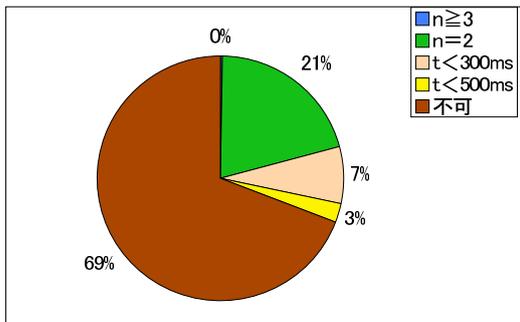
5.4 動作速度の評価実験

実験の目的

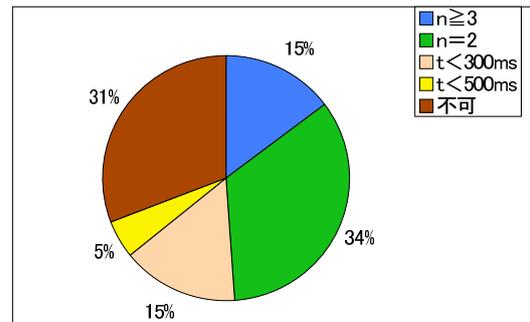
提案手法が実用上十分な速度でトラッキングが行え、またリアルタイムに拡張現実感による情報提示が行えることを確認する。

実験の方法と条件

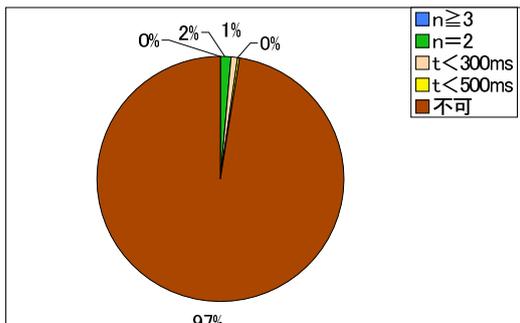
評価用システムを実際に動作させた際に、図5.2に示す各処理ステップにおいて1フレームの処理に必要となる時間を、ソフトウェアによる時間計測処理を組み込むことで計測する。なお、この測定精度は1msである。撮影された画像のラベリング領域の数、すなわち画像の複雑さによって変化することが分かっている^[23]。したがって、3



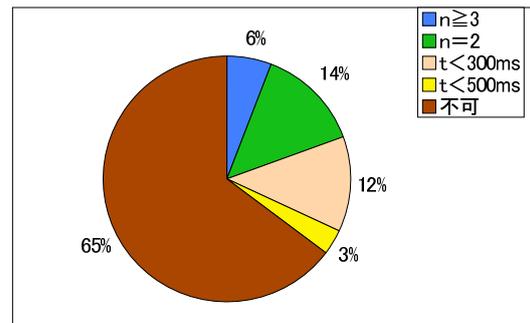
コース 1, シングルカメラ



コース 1, マルチカメラ



コース 2, シングルカメラ



コース 2, マルチカメラ

図 5.40: ハイブリッドトラッキングが行えるフレームの割合

枚の画像のラベリング処理結果の合計が約 1000, 約 1500, 約 2000 となる異なる 3 種類の撮影画像に対して時間計測を行った。これらはいずれも実験室およびふげん発電所内等で見られる典型的な値である。また、いずれの撮影画像でも、含まれるバーコードマーカは各カメラに 1 本ずつ、合計 3 本とした。なお、ここで用いたハードウェア構成は表 5.1 に示したものと同一である。

実験の結果

各撮影画像について、処理時間の計測結果を表 5.7 に示す。なお、いずれも 3 台のカメラからの 1 フレームの画像、計 3 枚の画像を処理するのにかかった合計時間である。

表 5.7: 処理時間の計測結果

画像のラベリング領域数	1050	1599	2014
カメラからの画像取得	<1ms	<1ms	<1ms
2 値化・ラベリング処理	15ms	15ms	18ms
バーコードの探索・識別	2ms	3ms	8ms
単一のスクリーン座標系への変換 仮想正方形マーカへの変換	<1ms	<1ms	<1ms
カメラ位置・姿勢の推定	11ms	11ms	11ms
誤差関数の非線形最小化	3ms	4ms	5ms
ハイブリッドトラッキング	5ms	5ms	5ms
撮影画像の画面表示・情報の重畳表示	10ms	10ms	10ms
計	47ms	49ms	58ms

考察

本研究で用いた Dragonfly カメラは、画像の転送をマルチスレッドで行うことができる。そのため画像の取得にはほとんど時間がかかっていない。一方、撮影された画像に多数のラベリング領域が含まれる場合、ラベリング処理およびバーコードマーカの探索に時間がかかり、全体の処理時間も長くなることが分かった。しかしラベリング領域数が 2000 程度までであれば、リアルタイム処理の限界である 67ms を十分下回っており、カメラのハードウェアの上限値である 15fps で情報提示が行えることが分かつ

た。なお、前節で述べたふげん発電所における検証実験では、画像データのハードディスクドライブへの保存を行ったために実行速度が低下し、15fps 未満となっている。

ただし、本研究では動作の高速なデスクトップ型 PC を用いて評価実験を行っているが、実際にトラッキングシステムを構築する際には可搬性に優れたノート PC などで動作させる必要がある。一般的に、ノート PC の処理能力はデスクトップ型と比較すると劣るため、現状では動作速度が不足する可能性がある。しかしこの問題は、今後のノート PC の処理性能の改善に伴って解消されると思われる。

第 6 章 結論

本研究では、原子力発電プラントの解体作業現場において、拡張現実感技術を用いて放射線可視化や作業指示を行うことで、ヒューマンエラーを防止するとともに解体作業を効率化し、作業員の被爆量を低減させる手法を提案した。特にそのトラッキング技術として、バーコード型の人工マーカをマルチカメラを用いて撮影し、その画像を処理してカメラ位置・姿勢を推定する方法を提案した。また、それに加えてジャイロセンサを用いたハイブリッドトラッキングを導入し、トラッキングが行える範囲を広める手法を提案した。そして、提案するトラッキング手法を実装した評価用システムを構築し、そのトラッキング精度や可用性について評価を行った。

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を述べた。そして、この問題点の解決策として、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、拡張現実感技術の機能と特徴について概説した。次いで、拡張現実感技術の実現に際してはトラッキング技術がキーテクノロジーであることを述べ、関連する従来研究、および昨年度当研究室で開発されたバーコードマーカを用いたトラッキング手法についてその概要を説明した。その中で、昨年度の手法にはバーコードマーカを環境中に非常に多量に貼付しなければならない、またその配置にも制約があるという問題点が残されていることを指摘した。そして以上を背景として本研究の目的が、より少ないバーコードマーカ数でも利用可能であり、かつより容易なバーコードマーカの配置が行えるトラッキング手法の開発とその評価であることを述べた。

第 3 章では、環境内に貼付する必要のあるバーコードマーカの数を低減するためには、より広い範囲のカメラ画像を取得できるようにする方法が有効であることを述べた。そして、3 台のカメラを角度をつけて並べて使用する方法を提案し、その利点について説明した。また、複数のカメラで検出された 2 本以上のバーコードマーカの位置関係から、P4P 問題の解法を用いてカメラの位置・姿勢を推定する手法を提案した。

第 4 章では、第 3 章で述べた手法に加えてジャイロセンサを用いる、ハイブリッドトラッキングについて述べた。そしてハイブリッドトラッキングを導入することで、2 本以上のバーコードマーカが検出できない場合にもトラッキングを継続できることを説明した。そして、本研究で用いるジャイロセンサの特徴をまとめ、具体的なハイブ

リッドトラッキングの計算方法について説明した。

第5章では、本研究で提案したトラッキング手法を実装した評価用システムを構築し、基礎的な評価実験を行った。その結果、バーコードマーカの位置関係によってトラッキング精度が大きく変わることが分かった。特に、バーコードマーカが2本のみしか撮影されていない場合、2本のバーコードマーカの間隔が狭く、かつバーコードマーカの正面にカメラがあると、カメラ位置推定結果の誤差が大きくなることが分かった。また、2本のバーコードマーカがそれぞれ異なるカメラによって撮影された場合には、1台のカメラのみで撮影された場合と比べ、各カメラのキャリブレーション誤差によって精度が悪化することが分かった。ただしこのような場合も、2本のバーコードマーカと同一平面上とならない位置に新たなバーコードマーカを追加すれば、作業情報の提示に十分耐え得る精度でトラッキングが行えることが確かめられた。

次いで、解体作業現場においても提案手法が正常に機能することを確認するとともに、提案手法が適用可能な範囲の検証を行うため、ふげん発電所の純水装置室において本システムの動作検証を行った。その結果、ふげん発電所においても提案するトラッキング手法は正常に機能することが確かめられた。また、1.0 - 2.7 m 間隔でバーコードマーカを貼付した場合、マルチカメラによるトラッキングのみでも、ふげん発電所において撮影された画像の49%のフレームでトラッキングが行えることが確認された。さらに、ハイブリッドトラッキングを併用することで、69%のフレームで正しくトラッキングが行えると見積もられた。ただし、マルチカメラの画像とジャイロセンサのデータとの間で時間的な整合がとれておらず、重畳表示の位置がずれる現象も見られ、これを改善することが今後の課題として残された。

また、動作速度の検証を行った結果、十分な性能のPCを用いれば、本研究で用いたカメラの上限値である15 fpsのフレームレートで情報の重畳表示を行えることが分かった。ただし、ノートPCなど処理能力の低いPC上で本手法を用いた拡張現実感システムを実現するためには、さらなる処理の高速化が必要である。

本研究での結果から、原子力発電プラントの解体作業現場において、作業に必要な情報を作業員に提示することによって作業支援を行うための拡張現実感技術用トラッキング技術を実現できることが期待できる。

今後の課題としては、ハイブリッドトラッキングにおけるデータの同期など本研究で見られた課題点を解決することが挙げられる。また、より精度・可用性の高いアルゴリズムの導入や処理時間の短縮を行い、実用化に向けてトラッキングシステムの更なる改良が必要である。そのためにはトラッキングのロバスト性を向上させるために、

トラッキング結果のフィルタリング処理や自然特徴点を利用したトラッキング手法の導入を検討していく必要がある。

それに加えて、本研究では取り扱わなかった、作業情報をどのように提示すれば効率的に作業を進められるか、またどのようなデバイスを用いて情報提示を行うかといった拡張現実感インタフェースについても、解体作業支援システムの実用化に向けて開発を行っていく必要がある。また運用の際には、環境内に貼付したバーコードマーカをより簡便に位置計測する方法の開発も必要となる。

また、本研究で提案したトラッキング手法は、ふげん発電所の解体作業のみならず、様々なプラントにおける保守作業や、機器の組み立て作業等、さまざまな作業支援システムに応用できる可能性を持っている。このような分野への応用も、今後の課題である。

謝 辞

吉川榮和教授には、研究科長という多忙な職務にありながら貴重な時間を割いていただき、研究の方向性や実験データの提示方法等、適切かつ暖かい御指導をいただきました。ここに深い感謝の意を表します。

また、下田宏助教授には、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。

石井裕剛助手には、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。また、正月にみんなで美味しい餅が食べられたのも、石井先生のおかげです。

日本原子力研究開発機構の森下喜嗣さん、兼平宣紀さん、泉正憲さん、および原子力安全基盤機構の井口幸弘さんには、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す。

ARToolKit を利用したトラッキングエンジンの作成に多大なご協力をいただきました博士2回生の Bian Zhiqiang さんに心より御礼申し上げます。

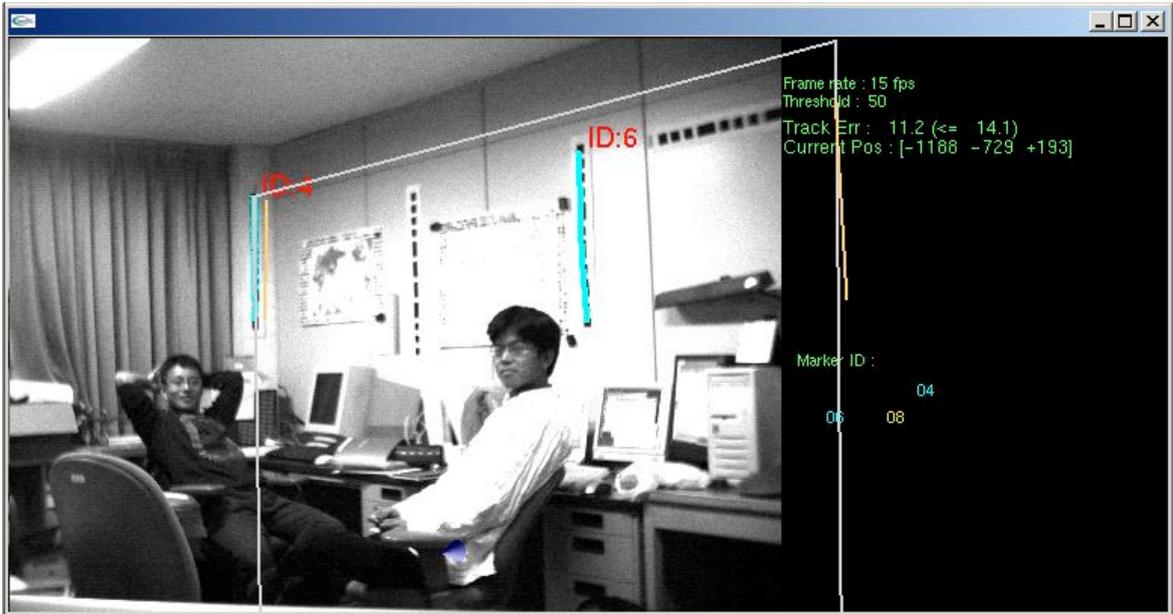
なかなか研究室に現れないながらも、いざという時には様々な要求に快く応じ、素早くプログラムの作成を行って下さいました修士1回生の中井俊憲君には幾度となく助けられました。心より感謝致します。

講義用ディベートシステムの構築や、特許データ入力作業等、研究とは無関係の結構厄介な雑務に共に巻き込まれた(私が巻き込んだ?) 修士2回生の富田和宏君、服部瑤子さんに心より感謝致します。

また、共に研究に励み、ことあるごとに「勝ち組や!」と互いを讃え(?)合い、様々な場面で支え合った、修士2回生の宇田旭伸君、米谷健司君に深く感謝致します。

さらに、日頃から何かとお世話をしていただいた、駒井遥さん、山下恵未依さん、吉川万里子さん、若林友美さんに心から御礼申し上げます。特に、いつも研究室にコーヒーがなかったら、この論文は完成していなかったに違いありません。

最後に、様々な御支援・御助力をしていただいた研究室の全ての方々に、ここに御礼申し上げます。



(a) よねっち & とみー



(b) うだっち & とりちゃん

図: スクリーンキャプチャに写った吉川研 M2 の仲間たち

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/> (2006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] P. Milgram, F. Kishino: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, IEICE Transactions of Information System E77-D, 12, pp.1321-1329 (1998)
- [6] BOEING: Mathematics and Computing Technology Focus, http://www.boeing.com/assocproducts/art/tech_focus.html (2005年1月31日現在)
- [7] Steven Feiner, Blair MacIntyre, Doree Seligman: KARMA, <http://www1.cs.columbia.edu/graphics/projects/karma/karma.html> (2005年1月31日現在)
- [8] A. Drøivoldsmo, T. Johnsen, M.N. Louka, M. Reigstad: Using wearable equipment for an augmented presentation of radiation, EPRI Wireless Conference, pp.19-21 (2002)
- [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] Bolan Jiang, Ulrich Neumann: Extendible Tracking by Line Auto-Calibration, Proc. IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, pp.97-103 (2001)
- [13] Joseph Newman, David Ingram, Andy Hopper: Augmented reality in a wide area sentient environment, Proc. IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, pp.77-86 (2001)
- [14] FASTRAK, <http://www.polhemus.com/fastrak.htm> (2005年1月31日現在)
- [15] 横小路泰義, 菅原嘉彦, 吉川恒夫: 画像と加速度計を用いたHMD上での映像の正確な重ね合わせ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.589-598 (1999)
- [16] 藤井博文, 神原誠之, 岩佐英彦, 竹村治雄, 横矢直和: 拡張現実のためのジャイロセンサを併用したステレオカメラによる位置合わせ, 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU99-192 (2000)
- [17] Greg Welch, Gary Bishop, Leandra Vicci: SCAAT: Incremental Tracking with Incomplete Information, Proc. SIGGRAPH, pp.333-344 (1997)
- [18] Bruce Thomas, Victor Demczuk, Wayne Piekarski, David Hepworth, Bernard Gunther: A Wearable Computer System with Augmented Reality to Support Terrestrial Navigation, 2ND. International Symposium on Wearable Computers, pp.166-167 (1998)

- [19] M. Appel, N. Navab: Registration of technical drawings and calibrated images for industrial augmented reality, IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (2000)
- [20] ARVIKA, <http://www.arvika.de/www/index.htm> (2005年1月31日現在)
- [21] 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 (2001)
- [22] 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)
- [23] 前嶋真行: 放射線量可視化システムにおける拡張現実感用トラッキング手法の開発, 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 (2004)
- [24] 中井俊憲: 拡張現実感技術用トラッキング技術のためのバーコード型マーカとその認識手法の開発, 工学部電気電子工学科卒業論文 (2004)
- [25] 松井康治: 系統隔離作業支援システムにおける拡張現実感用トラッキング手法の開発, 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 (2003)
- [26] Michael Kalkusch, Thomas Lidy, Michael Knapp, Gerhard Reitmayr, Hannes Kaufmann, Dieter Schmalstieg: Structured Visual Markers for Indoor Pathfinding, 1st Int'l Augmented RealityToolkit Workshop, (2002)
- [27] 出口光一郎: センシング/認識シリーズ 第5巻 画像と空間 コンピュータビジョンの幾何学, pp.128-142, 昭晃堂 (1997)
- [28] Andrei State, Gentaro Hirota, David T. Chen, William F. Garrett, Mark A. Livingston: Superior Augmented Reality Registration by Integrating Landmark Tracking and Magnetic Tracking, Proc. SIGGRAPH, pp.429-438 (1996)
- [29] Greg Welch, Gary Bishop, Leandra Vicci: SCAAT: Incremental Tracking with Incomplete Information, Proc. SIGGRAPH, pp.333-344 (1997)

- [30] Kiyohide Satoh, Mahori Anabuki, Hiroyuki Yamamoto, Hideyuki Tamura: A hybrid registration method for outdoor augmented reality, Proc. the International Symposium on Augmented Reality, pp.67-76 (2001)
- [31] Suyu You, Ulrich Neumann: Fusion of vision and gyro tracking for robust augmented reality registration, Proc. IEEE Conference on Virtual Reality, pp.71-78 (2001)
- [32] 山澤一誠: ミラーを用いた全方位カメラの原理と特徴, 情報処理学会研究報告, CVIM125-21 (2001)
- [33] 佐藤智和, 池田聖, 横矢直和: マルチカメラシステムによる全方位動画像からのカメラ外部パラメータの復元, 情報処理学会 研究報告, CVIM141-13 (2003)
- [34] S. Ikeda, T. Sato, N. Yokoya: High-resolution Panoramic Movie Generation from Video Streams Acquired by an Omnidirectional Multi-camera System, Proc. IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System, pp.155-160 (2003)

付録 A ARToolkit

A.1 ARToolkit の概要

広島市立大学の加藤氏らによって開発され、ワシントン大学 HIT Lab の WWW サーバでソースコードが公開されている ARToolkit は、正方形マーカ上に 3 次元仮想物体の重ね合わせを行う拡張現実感 (Augmented Reality :AR) システム構築用ツールである。情報端末とカメラと HMD があれば ARToolkit を利用して容易に AR システムを構築できる。表示のみではなく 3 次元での情報操作が可能なインタフェースシステムや、デスクトップ・テーブルトップでの拡張現実感アプリケーションの開発を得意としている。理論的にはマーカを設置すれば屋外環境、大規模空間でも利用可能だが、テーブル上の空間程度の大きさでの利用が現実的である。

ARToolkit は C++ 言語で記述されたマルチプラットフォームのソフトウェアであり、画像入力ライブラリ (libARVideo)、画像処理ライブラリ (libAR)、画像表示ライブラリ (libARgsub) と、光学シースルー HMD 用キャリブレーションや複数マーカによる位置計算等の補助ライブラリ (libARgsubUtil、libARMulti) によって構成される。

ARToolkit を用いて構築した AR システムでは、カメラキャリブレーション、HMD キャリブレーション、マーカ検出処理、マーカ座標系からカメラ座標系への座標変換行列を求める処理 (マーカの 3 次元位置推定)、HMD スクリーンの適切な位置への仮想物体描画処理などの処理が可能である。

ARToolkit を利用した AR システムによって仮想物体を表示している例を図 A.1 に示す。

以降に本研究で利用した ARToolkit のマーカ検出処理とマーカの 3 次元位置推定処理について述べる。

A.2 マーカ検出処理

A.2.1 取り扱う座標系

図 A.2 に ARToolkit システムが取り扱う座標系を示す。仮想物体はマーカ座標系の上で表現される。カメラ座標系は焦点位置を原点、画像平面に垂直な方向を Z 軸、画像

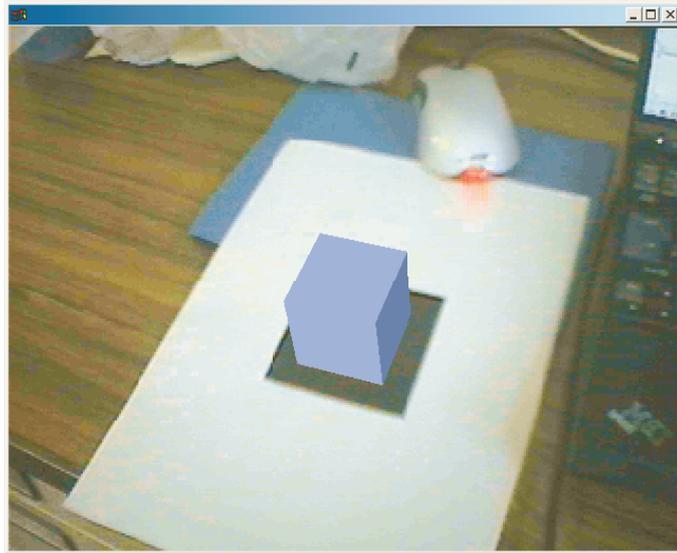


図 A.1: ARToolKit の使用例

の x, y 軸に平行な方向を各 X, Y 軸とする。マーカ座標系で表現された点 (X_m, Y_m, Z_m) は、回転・平行移動でカメラ座標系に変換可能で、その座標系では (X_c, Y_c, Z_c) と表記する。透視変換モデルによって投影される画像平面は理想スクリーン座標系と呼び、この座標系においては (x_c, y_c) に写るものとする。また、理想スクリーン座標系から歪み関数によって変換された座標系を観測スクリーン座標系とし、実際にカメラから取り込まれたデータをこの座標系で表現し、その座標値を (x_d, y_d) で表す。

HMD と目は理想的な透視変換モデルで変換でき、HMD の映像表示面を HMD スクリーン座標系と呼び、その上の座標値を (x_s, y_s) で表す。この HMD スクリーン座標系に対し同一方向に X, Y 軸を持ち、垂直な方向に Z 軸を有する目の焦点位置を原点とする座標系を目座標系と呼び、その座標系は (X_e, Y_e, Z_e) で表す。

A.2.2 マーカ抽出

入力された画像に対して、固定閾値による 2 値化、連結領域ごとの面積・外接長方形計算を行ったのち、面積値によって巨大領域と微小領域を除外し、外接長方形情報から画像境界に接する連結領域も除外する。残された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全て記憶する。輪郭線データに対して折れ線近似を行い、4 本の線分によって十分な精度で近似できた連結領域をマーカ候補とする。このときの 4 つの折れ点の座標値を記憶しておく。

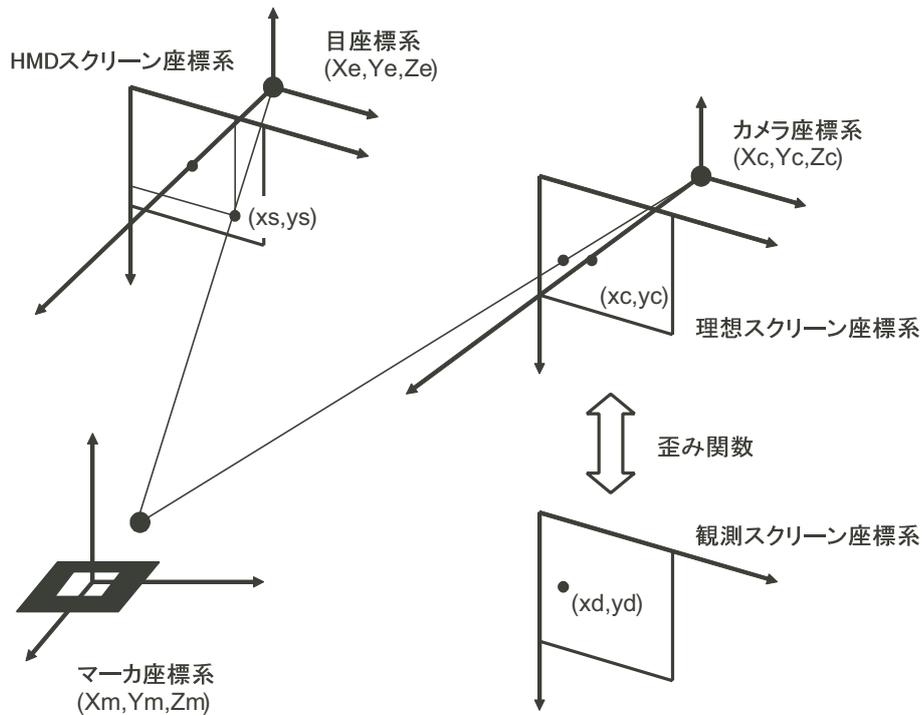


図 A.2: システムが取り扱う座標系

A.2.3 マーカ識別

図 A.3 にマーカの例を示す。マーカの中央部に識別用のパターンが描かれている。このパターンを事前に登録したパターンとのテンプレートマッチングによって識別する。マーカは透視変換モデルによって理想スクリーン座標系に投影されるので、マーカ座標系 $(X_m - Y_m, 0)$ 平面内の点 $(X_m, Y_m, 0)$ は以下の式で理想スクリーン座標系上の点 (x_c, y_c) に変換される。

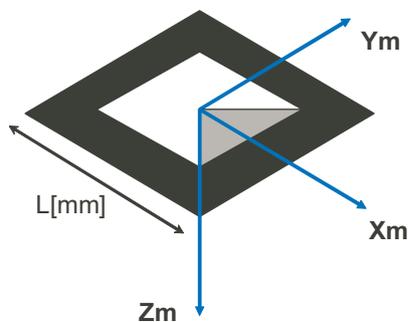


図 A.3: マーカの例

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hy_c \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

マーカの大きさは既知なので、その情報とマーカ抽出処理で求めた4頂点の座標値を用いると、この式のすべての C の値を求められる。従って、マーカ内部のパターンはこの式によって正規化できる。具体的にはマーカ内部のパターン領域を 64×64 に分割し、その領域に対する画素値を入力画像から抜き出し、 64×64 画素のパターン画像を得る。これを 16×16 に縮小しテンプレートマッチングに使用する。マーカの回転に対処するために、90度おきに回転したテンプレートを4枚作成しておき、それらと入力画像に対し以下の式で類似度を計算し、最大値をとるものをマーカの種類および方向と見なす。

$$s^{(l)} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \tilde{x}) \cdot (x_i^{(l)} - \tilde{x}^{(l)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \tilde{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i^{(l)} - \tilde{x}^{(l)})^2}} \quad (\text{A.2})$$

ここで x_i は画像ベクトルの i 番目の要素を示す。 \tilde{x} は要素の平均値で、 N は画素の階調数、この場合は256となる。 $x^{(l)}$ は l 番目のテンプレート画像を意味する。この式は明るさの正規化された2つの画像ベクトルの余弦を求めることになる。

A.2.4 4頂点位置検出

マーカの各辺に対応する輪郭線データに最小2乗法で直線当てはめを行い、それら直線の交点を頂点座標値とする。この直線当てはめの際、以下の歪み関数による変換を行い、理想スクリーン座標系における頂点座標値を求める。

$$\begin{aligned} \frac{z_d}{z_c} &= \{1 - pz_c^2\}, \\ z_c^2 &= (x_c - x_{c0})^2 + (y_c - y_{c0})^2, \quad z_d^2 = (x_d - x_{c0})^2 + (y_d - y_{c0})^2 \\ x_d &= \frac{z_d}{z_c}(x_c - x_{c0}) + x_{c0}, \quad y_d = \frac{z_d}{z_c}(y_c - y_{c0}) + y_{c0} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

ここで (x_c, y_c) は理想スクリーン座標系での座標値、 (x_d, y_d) は観測スクリーン座標値である。また、 p は歪み率、 (x_{c0}, y_{c0}) は歪み中心座標値で、この3パラメータはカメラキャリブレーションによって求めておく。ここでの計算では、式(A.3)の逆変換が必要となるが、その計算は初期値を (x_d, y_d) としたニュートン法の4回の繰り返しで十

分な精度が得られる。観測された正方形マーカ画像では樽型歪みでの影響でその辺は曲線となるが、この変換によって辺は直線として扱うことができる。

A.3 マーカの3次元位置推定

これはマーカ座標系からカメラ座標系への変換行列 \mathbf{T}_{cm} を推定する問題である。この変換行列は回転移動成分 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ と平行移動成分 $\mathbf{T}_{3 \times 1}$ からなる。理想スクリーン座標系とカメラ座標系の間は透視変換モデルで変換でき、その具体的な変換行列は事前のキャリブレーションにより求めておく。これらの座標系はの関係は式 (A.4), (A.5) のように表現できる。式 (A.1) は、マーカ座標系の $X_m - Y_m$ 平面内座標値と理想スクリーン座標系の関係式であるが、以下の式はマーカ座標系の3次元座標値を取り扱うものである。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} &= \mathbf{T}_{\text{cm}} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hy_c \\ h \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$

マーカ座標系におけるマーカの4頂点の座標値は図 A.3 に示すように設定されており、これらに対応する理想スクリーン座標系における座標値もこれまでの処理で得られている。これらの情報から式 (A.4) における \mathbf{T}_{cm} を求めるが、その手順は、

1. 回転移動成分 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ の推定
2. 平行移動成分 $\mathbf{T}_{3 \times 1}$ の推定

3. 変換行列 \mathbf{T}_{cm} の修正

となる。

A.3.1 回転移動成分 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ の推定

理想スクリーン座標系におけるマーカの頂点位置から向かい合う 2 辺の直線の方程式が得られる。それを式 (A.6) のように表し、式 (A.5) の x_c, y_c をこれに代入することで式 (A.7) が得られる。

$$a_1x + b_1y + c_1 = 0, \quad a_2x + b_2y + c_2 = 0 \quad (\text{A.6})$$

$$a_1P_{11}X_c + (a_1P_{12} + b_1P_{22})Y_c + (a_1P_{13} + b_1P_{23} + c_1)Z_c = 0 \quad (\text{A.7})$$

$$a_2P_{11}X_c + (a_2P_{12} + b_2P_{22})Y_c + (a_2P_{13} + b_2P_{23} + c_2)Z_c = 0$$

この式はカメラ座標系によって表現される 3次元空間中の平面の方程式であり、3次元空間中のマーカの辺がこの平面内に存在することを意味する。マーカの向かい合う 2 辺は平行なのでその方向ベクトルは一致し、式 (A.7) の 2 平面の面内方向となる。つまり、式 (A.7) の 2 平面の各法線ベクトルの外積として計算されるベクトルが、平行 2 辺のカメラ座標系における方向ベクトルとなる。この計算を 2 組の平行 2 辺に対して行うことでマーカの隣り合う 2 辺の方向ベクトル $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2$ を求めることができる。

A.3.2 平行移動成分 $\mathbf{T}_{3 \times 1}$ の推定

式 (A.4)(A.5) を結合し、マーカの 4 頂点のマーカ座標系での座標値、理想スクリーン座標系での座標値を代入すると、 T_1, T_2, T_3 に関する i 次方程式が 8 個得られる。行列 \mathbf{P}, \mathbf{R} が既知なので、これらの式から T_1, T_2, T_3 を計算できる。

A.3.3 変換行列 \mathbf{T}_{cm} の修正

以上の計算で \mathbf{T}_{cm} は計算されるが、回転行列の計算において大きな誤差を伴う。そこで再度画像情報を利用し回転行列の修正を行う。

A.4 カメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションでは 4×6 の格子点を持つ板を使用する。この板をカメラで撮影し、図 A.4, A.5 のようにキーボード操作で各格子点に対してフィッティングを行

う。この作業を数回繰り返して、観測される全ての格子点に対してその3次元座標値と観測スクリーン座標系での座標値を式(A.9)に代入することで、パラメータ C_{ij} に関する一次方程式が多数得られ、その値を計算できる。この行列 \mathbf{C} は式(A.9)に示すように透視変換成分と回転・平行移動成分に分割することができ、 \mathbf{R} の回転行列としての制約を用いることで、透視変換行列 \mathbf{P} を計算できる。

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hx_y \\ h \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

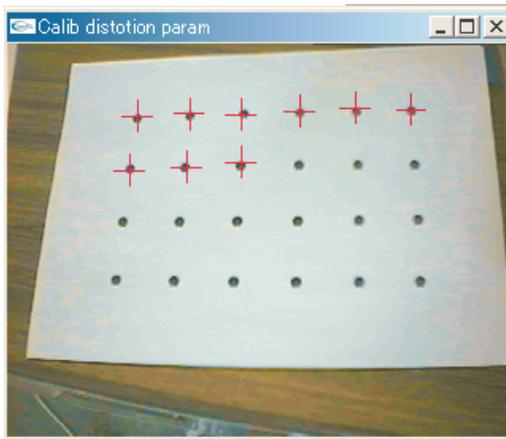


図 A.4: 格子点のフィッティング1

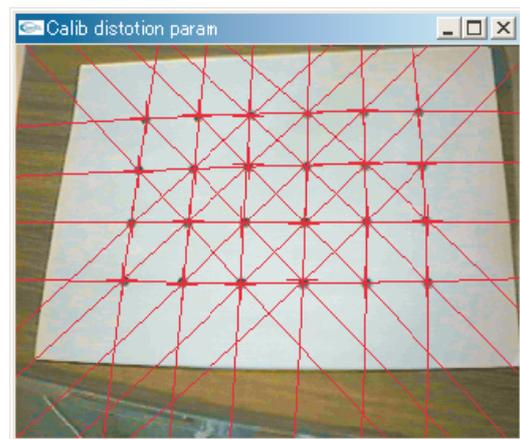


図 A.5: 格子点のフィッティング2