

エネルギー科学研究科
エネルギー社会・環境科学専攻修士論文
拡張現実感を用いた
題目： 原子力プラントの保守作業
支援システムの開発

指導教官： 吉川 榮和 教授

氏名： 新田 和弘

提出年月日： 平成15年2月5日（水）

論文要旨

題目：拡張現実感を用いた原子力プラントの保守作業支援システムの開発

吉川榮和研究室 新田和弘

要旨：

電力自由化を背景に、原子力発電の経済性を向上させるためのプラント運転・保守技術の革新を目指して、「原子力発電所運用高度化のための次世代 HMS の技術開発」プロジェクトが開始されている。このプロジェクトの中で、本研究では、プラントの定期点検時の現場における現場監督と作業員とのコミュニケーションに着目し、拡張現実感を用いてコミュニケーションを支援するシステムを開発する。

支援システムでは、作業員の安全ヘルメットにつけた小型 CCD カメラで撮影した視界の画像（視界画像）を現場監督が持つタブレット PC の画面に表示し、複数の作業員を同時に監視できるようにする。また、現場監督が、電子ペンで視界画像の上に文字や絵を描くと、その内容が作業員の視界に重畳されるようにする。これにより、作業指示を容易に理解でき、指示対象を直感的に把握できる。このシステムを実現するには、(1) 作業員の位置推定機能、(2) 通信機能、(3) 指示対象位置の位置推定機能、(4) 情報提示機能が必要がある。

(1) 作業員の位置推定機能では、人工マーカと自然マーカを用いて作業員の 3 次元位置を求める。このとき、周囲環境が変化する保守作業の現場に対応させるため、センサを用いて位置推定の精度の向上を図る。(2) 通信機能では、作業員の視界画像を送信することで、現場監督が複数の作業員を同時に監視を行う。また、現場監督は、この機能を用いて作業指示を絵や文字で表現した情報画像を作成し、作業員に送信する。(3) 指示対象位置の位置推定機能では、現場監督からの作業指示の対象を推定し、情報画像を重畳する指示対象位置を求める。(4) 情報提示機能では、先に求めた作業員の位置と指示対象位置との関係を求め、情報画像を作業指示の対象上に重畳表示する。

以上の機能を統合し支援システムを試作し、作業員の位置推定機能の動作確認と現場監督と作業員のインタフェースの主観的評価を行った。

動作確認の結果、人工マーカの場合、正常に動作することを確認した。一方、既存の自然マーカの場合、(a) 視界画像の偏った範囲から 4 つのマーカを選別したため、(b) 映像が揺らぎにより自然マーカの照合が正確でなかったため、大きく誤差が生じた。また、センサによるマーカの評価は、精度の向上に有効であった。

インタフェースの評価では、現場監督の場合、電子ペンによる入力は容易に行えたが、タブレット PC に視界画像を大きく表示するなどの改善が必要であると示唆された。一方、作業員の場合、重畳表示による作業指示は、作業指示を理解しやすく、指示対象の場所を直感的に理解できると評価された。しかし、本研究で使用した片目 HMD では、左眼と右眼の視界に違和感があるなどの改善点が指摘された。

以上の結果より、作業員の位置推定を行う際、既知の自然マーカを画面上から距離を離して選び出す方法と、画像の揺らぎに対応させたマーカの照合方法を考案し、精度を向上させる必要がある。そして、センサから得られるデータをさらに利用することで、精度の向上が期待できる。また、現場監督、作業員のインタフェースを改良する必要があると分かった。

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 原子力発電所運用高度化のための次世代 HMS の技術開発	3
2.2 拡張現実感とその応用	7
2.2.1 拡張現実感	7
2.2.2 拡張現実感技術を用いた作業支援	11
2.3 研究の目的	14
第 3 章 拡張現実感技術を用いた保守作業支援システムの設計	15
3.1 次世代原子力プラントにおける保守作業	15
3.2 保守作業支援システムの設計	16
3.2.1 設計の概要	16
3.2.2 システムの意義	18
3.2.3 必要な機能	19
3.3 保守作業支援システムのハードウェア	21
3.3.1 作業員のハードウェア	23
3.3.2 現場監督のハードウェア	24
3.4 作業員の位置推定機能	25
3.4.1 保守作業の現場における作業員の位置推定	25
3.4.2 既存の位置推定の方法	25
3.4.3 本研究で用いる位置推定の方法	27
3.5 通信機能	38
3.6 指示対象位置の位置推定機能	40
3.7 情報提示機能	45
3.8 まとめ	46
第 4 章 保守作業支援システムの開発	49

4.1	作業員の位置推定機能の開発	49
4.1.1	開発の概要	49
4.1.2	画像取得部	49
4.1.3	人工マーカ抽出部	51
4.1.4	自然マーカ抽出部	51
4.1.5	自然マーカ照合部	51
4.1.6	自然マーカ評価部	52
4.1.7	人工マーカを用いた作業員の3次元位置推定部	52
4.1.8	既知の自然マーカを用いた作業員の3次元位置推定部	53
4.1.9	自然マーカの位置推定部	53
4.2	通信機能の開発	54
4.2.1	作業員の視界画像の送信	54
4.2.2	現場監督の監視および作業指示の書込み	55
4.2.3	作業員の情報画像の受信	56
4.3	指示対象位置の位置推定機能の開発	56
4.3.1	3次元直線取得部	57
4.3.2	自然マーカ検索部	57
4.3.3	指示対象位置の3次元位置推定部	58
4.4	情報提示機能の開発	59
4.5	試作システム	59
4.5.1	ハードウェア構成	61
4.5.2	ソフトウェア構成	69
第5章	保守作業支援システムの評価	75
5.1	作業員の位置推定機能の動作確認	75
5.2	試作システムの評価	80
5.2.1	現場監督のインタフェース	80
5.2.2	作業員のインタフェース	81
5.3	評価のまとめと今後の展望	83
第6章	結論	85
	謝辞	87

目 次

2.1	衛星運用・保守センター	4
2.2	次世代原子力プラントの保守時の人員構成	5
2.3	次世代原子力プラントの定期点検の流れ	6
2.4	拡張現実感のイメージ図	8
2.5	拡張現実感の位置付け	8
2.6	HMD を用いた拡張現実感の実現方法	9
2.7	プロジェクタを用いた拡張現実感の実現方法	9
2.8	対象の直観的理解	10
2.9	情報内容の容易な理解	11
2.10	航空機ワイヤーハーネス作成支援システム	12
2.11	KARMA	12
2.12	レーザー光を用いた拡張現実感による作業支援環境の構築	13
3.1	現場作業員と作業員の役割	15
3.2	保守作業支援システム	17
3.3	作業員の位置推定機能	19
3.4	通信機能	20
3.5	作業員、視界画像、指示対象位置の位置関係	21
3.6	指示対象位置の位置推定機能	22
3.7	情報表示機能	22
3.8	作業員のインタフェース	24
3.9	現場監督のインタフェース	25
3.10	AR tool kit で使用するマーカの例	28
3.11	AR tool kit によるデモンストレーション	29
3.12	照明環境の違いによる色抽出例（明るい環境）	29
3.13	照明環境の違いによる色抽出例（暗い環境）	30
3.14	Harris オペレータ	30
3.15	作業員の3次元位置の取得の流れ	31

3.16	マーカの一対一関係	32
3.17	自然マーカの3次元位置の取得方法	33
3.18	自然マーカの3次元位置の計算方法	34
3.19	現場監督と作業員との画像の送受信	39
3.20	現場監督が携帯するタブレットPCの画面	40
3.21	2次元座標を用いた指示対象位置	41
3.22	2枚の画像の対応関係	42
3.23	指示対象位置を含んだ直線と平面から求める指示対象位置の位置推定	42
3.24	指示対象位置の位置推定機能の概要	43
3.25	指示対象位置の位置推定機能の処理の流れ	44
3.26	情報提示機能の処理の流れ	46
3.27	HMDの表示画面	47
4.1	作業員の位置推定機能の処理	50
4.2	通信機能の処理	54
4.3	タブレットPCの画面構成	55
4.4	タブレットPCによる入力作業	56
4.5	指示対象位置の位置推定機能の処理部	57
4.6	3次元直線取得部のイメージ	58
4.7	情報提示機能の処理部	59
4.8	HMDの表示画面	60
4.9	試作システムの対象とした小型ポンプ	60
4.10	ハードウェアを装着した作業員	62
4.11	HMD (Data Glass 2) の概観	62
4.12	小型CCDカメラ (KEYENCE CK-200) の概観	63
4.13	センサ箱の中身	64
4.14	マイコン	66
4.15	作業員の使用するハードウェアの接続	67
4.16	ハードウェアを携帯した現場監督	68
4.17	タブレットPC	69
4.18	4つの機能の統合	72
4.19	作業員に提示するHMDの画面	73
4.20	現場監督のタブレットPCの画面 (監視モード)	73

4.21	現場監督のタブレットPCの画面（作業指示モード）	74
4.22	作業員からみた作業指示	74
5.1	動作確認でを使用した画像	76
5.2	動作確認でを使用した画像を撮影した場所	77
5.3	センサの評価によって排除したマーカ	79

表目次

2.1	次世代原子力プラントの保守時の各人員役割	4
3.1	マーカの分類	28
3.2	視界画像のマーカの状態	36
3.3	各状態における作業員の位置推定方法	37
4.1	作業員の移動方向と視界画像中の自然マーカの移動方向の関係	53
4.2	作業員のハードウェア構成	61
4.3	HMD (Data Glass 2) の仕様	63
4.4	小型 CCD カメラの仕様	64
4.5	ジャイロセンサの仕様	65
4.6	加速度センサの仕様	65
4.7	ウェアラブルコンピュータの仕様	66
4.8	現場監督のハードウェア構成	68
4.9	タブレット PC の仕様	69
4.10	無線アクセスポートの仕様	70
5.1	動作確認の結果	78
5.2	各画像中の自然マーカの個数	78
5.3	センサによる評価の有無による作業員の位置推定の違い	79
5.4	現場監督のインタフェースの評価	82
5.5	作業員のインタフェースの評価	83

第 1 章 序論

近年、CO₂などの温室効果ガスによる地球温暖化問題が深刻化している。そのため、産業界では、環境に有害な物質の排出を抑制するなど、環境にやさしい操業が求められている。電力分野でも、例外ではなく、CO₂を多量に排出する火力発電などの使用を控え、その代わりに環境にやさしい新エネルギーを用いた発電や、原子力発電を使用する傾向にある。しかし、太陽光発電や風力発電などの新エネルギーでは、発電量が少なく、気候などの要因によって発電量が変動するため、現在のわが国の電力需要を賄うことができない。そのため、環境に有害な物質を排出せず、気候などに依存せず発電量が多く得られる原子力発電は欠くことのできない重要な電力源である。

しかし、原子力発電は安全性の確保が問題で、例えば、運転員や保守作業員の誤操作・誤判断で、TMI事故やJCO事故のような、重大な被害が発生する大事故に繋がる可能性がある。そのため、運転時には多数の人員が1つの原子力プラントを監視し、保守時には十分な安全を確保できるよう膨大なコストと人員で作業を行う。

一方、1990年代から始まった欧米諸国での電力自由化の流れをうけ、わが国でも1995年に発電分野での部分的自由化や2000年に小売分野の自由化が行われ、今後も自由化が進められる。この自由化の流れにより、電力を安価に確保することが必要となり、原子力発電の発電コスト削減が求められている。

原子力発電の発電コストを削減する方法としては、(1)原子力プラントで使用する機器(プラント機器)の延命化、(2)原子力プラントの操業に携わる人員の効率の向上、の2つがある。(1)の方法では、例えば、これまで1年間しか使用しなかったプラント機器を、2年以上使用できるようにすることでプラント機器を交換する回数を減らせるなど、プラント機器の使用効率が向上し、コスト削減を行うことができる。この方法を実現するには、プラント機器の延命化・高性能化のための技術の開発や、プラント機器の状態を調べ交換時期を把握するための高度な点検技術の開発が必要となる。一方、(2)の方法では、例えば、複数の原子力プラントの運転や保守を遠隔地からができるようにし、人員を一極集中化することで、原子力プラント1基ごとに考えれば従来と変わらない人数ではあるが、全体的には少ない人員で運転・保守を行えるようになり、人員効率が向上する。また、プラント機器に関する知識を豊富に持った熟練作業員や製造メーカーの関係者も集中化し、知識を一カ所に集約することで、異常発生

時に適切な処置を即座に行うことができる。

本研究では、この2つの発電コストの削減方法の中で(2)の方法に注目する。(2)の方法を想定した研究・開発として、「原子力発電所運用高度化のための次世代 HMS (Human Machine System) の技術開発^[1]」プロジェクトがある。このプロジェクトは、情報技術 (Information Technology:IT) を用いて、原子力プラントの運転・保守を一極集中化するサテライト運転・保守センタを設置した次世代原子力プラントを想定し、集中化するために必要となる基盤技術の開発と、サテライト運転・保守センタの導入によって考えられる安全レベルの低下を抑えるための技術の開発を目的としている。本研究では、このプロジェクトの中の、定期点検時の現場における作業員と現場監督とのコミュニケーションに着目し、コミュニケーションの失敗によるヒューマンエラーを未然に防ぐための支援を、新しいヒューマンインタフェースである拡張現実感を用いて行う支援システムを設計し、開発を行う。

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、「原子力発電所運用高度化のための次世代 HMS の技術開発」と、本研究で用いる拡張現実感について述べる。そして、本研究での目的を述べる。第3章では、現場監督と作業員のコミュニケーションを支援するシステムの設計について、システム実現に必要な機能を4つに分けて説明する。第4章では、第3章の設計を踏まえて、実際に4つの機能を開発する手法について述べる。そして、4つの機能を統合した試作システムについて述べる。第5章では、第4章で試作したシステムの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、今後の課題について述べる。

第 2 章 研究の背景と目的

原子力プラントの経済性の向上を目標に「原子力発電所運用高度化のための次世代 HMS の技術開発」プロジェクトが進められている。本研究では、このプロジェクトの中で定期点検における現場監督と作業員とのコミュニケーションに着目し、新しいインタフェースである拡張現実感を用いた連携型保守作業支援技術を開発する。

本章では、まず、本研究が関わっている「原子力発電所運用高度化のための次世代 HMS の技術開発」について述べる。次いで、本研究で使用する拡張現実感技術について説明し、その応用例について述べる。最後に本研究の目的について述べる。

2.1 原子力発電所運用高度化のための次世代 HMS の技術開発

「原子力発電所運用高度化のための次世代 HMS の技術開発」プロジェクトでは、図 2.1 に示すように、原子力発電の運転・保守をサテライト運転・保守センタに IT を用いて集中化することが提案されている。これにより、運転時には、従来はプラントごとで行っていた運転・監視を、プラントの場所によらず一カ所で行える。そのため、従来よりも少ない人員で運転・監視が期待できる。また、日常点検や定期点検の保守作業時には、点検の進捗状況の管理を一元化して行えるため、保守作業のスケジュール管理が容易になり、保守作業に携わる作業員の割り振りを最適化できる。そのため、点検に要する時間の短縮が可能となる。

また、最近の少子化や高学歴化に伴って、現場で働く作業員が敬遠され、現場での作業に関する豊富な知識を持った熟練作業員が育ちにくい。そのため、原子力プラントごとに熟練作業員が配置されている現行の保守体制では、熟練作業員を確保することが難しく、不足することが考えられる。そこで、サテライト運転・保守センタを導入し、熟練作業員やプラント内の機器の製造メーカーの関係者をセンタに集めることが考えられる。これにより、原子力プラントに関する専門的な知識をセンタに集約でき、少ない熟練作業員でも従来どおりの点検の質の維持が可能であると期待できる。

次世代原子力プラントで行われる定期点検は、サテライト運転・保守センタにいるサテライト点検責任者とサテライトアドバイザー、原子力プラント内の保守作業を行う

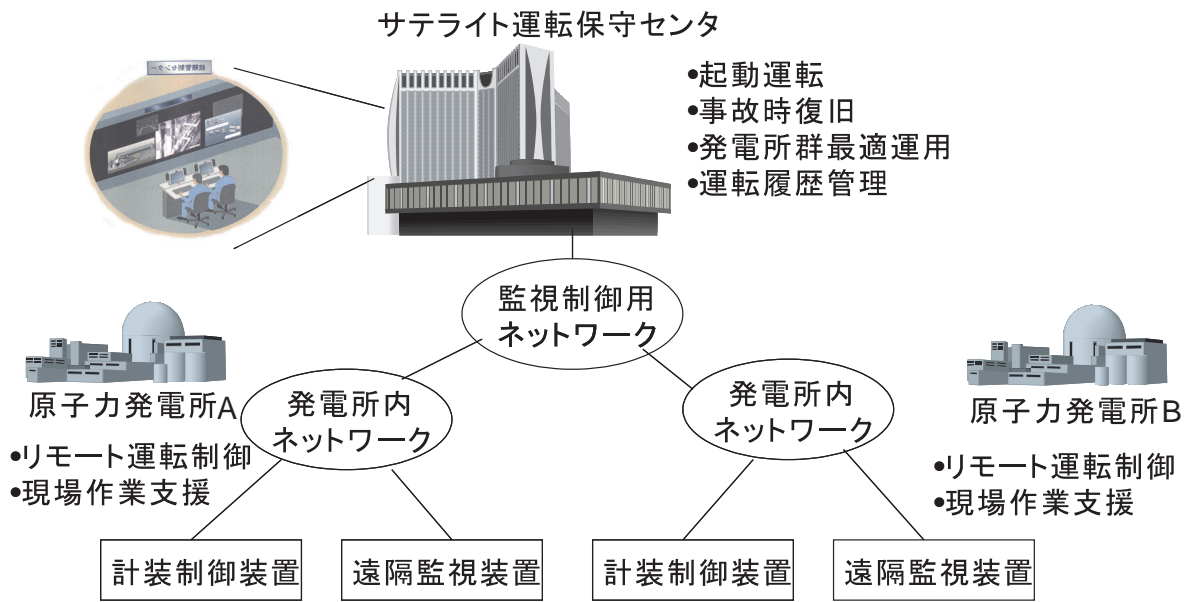


図 2.1: サテライト運転・保守センター

場所（現場）にいる現場監督と作業員で作業を行うと想定する。それぞれの人員構成を図 2.2 に示し、各人員の役割を表 2.1 に示す。

表 2.1: 次世代原子力プラントの保守時の各人員役割

人員	役割
衛星点検責任者	<ul style="list-style-type: none"> 現場監督に点検の指示を出す 定期点検全体の進捗状況を把握し、スケジュールの管理を行う
現場監督	<ul style="list-style-type: none"> 作業員に作業の指示を出す 作業員が行っている作業を監視する
作業員	<ul style="list-style-type: none"> プラント機器に対して実際に作業を行う
衛星アドバイザー	<ul style="list-style-type: none"> 現場監督や作業員から点検中に発生した問題について相談を受け付け、アドバイスする

このような人員構成による定期点検の流れを図 2.3 に示す。まず、衛星点検責任者が、現場監督に点検を行う対象のプラント機器と、そのプラント機器に対して行う点検の内容を指示する。現場監督は、衛星点検責任者の点検指示をもとに、数名の作業員を連れて点検対象のプラント機器に誘導する。その後、それぞれの作業員に、プラント機器に対して行う作業を指示する。作業員は、現場監督からの作業指示

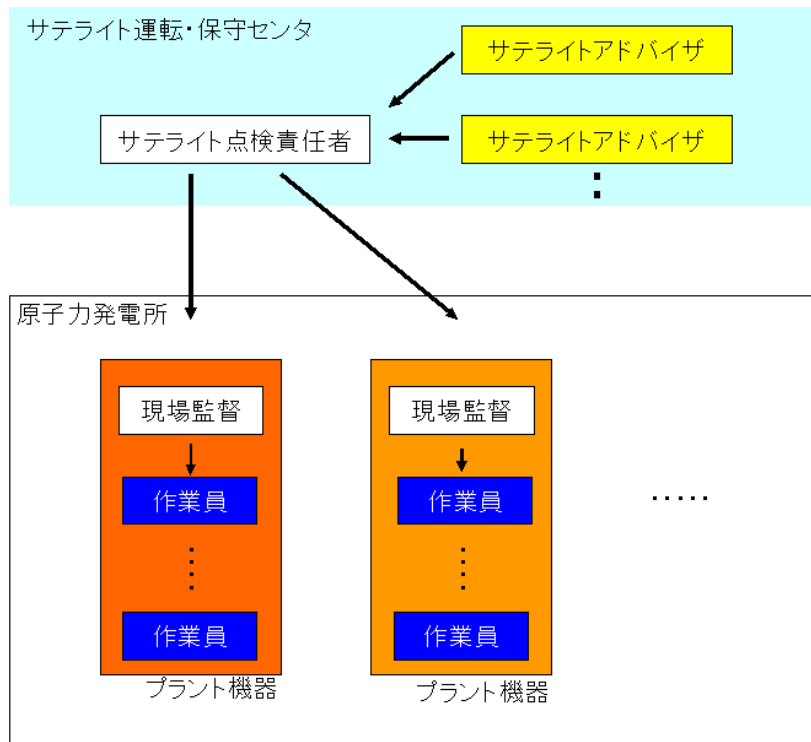


図 2.2: 次世代原子力プラントの保守時の人員構成

をもとに、実際に作業を行う。作業が終了すると、作業員は、計器類の読みや点検の経過など作業の報告を現場監督に行う。現場監督は、作業が終了した作業員に、再び別の作業を指示する。この手順をプラント機器全体の点検が終了するまで、現場監督と作業員との間で繰り返し行う。また、この作業の間に、現場監督や作業員はサテライトアドバイザーから作業のアドバイスを受けることができる。点検が終了すると、現場監督は、サテライト点検責任者に、プラント機器の点検が終了した旨の点検報告を行う。

このような定期点検の保守体制では、サテライト点検責任者と現場監督、現場監督と作業員とのコミュニケーションが重要である。そこで、本研究では、次世代原子力プラントにおける定期点検時のコミュニケーションについて考えることにする。

保守作業の現場でのコミュニケーションでは、以下の内容を確実に伝えることが求められる。

- 保守作業対象
作業を行う対象の場所を明確に伝える必要がある
- 保守作業内容・手順

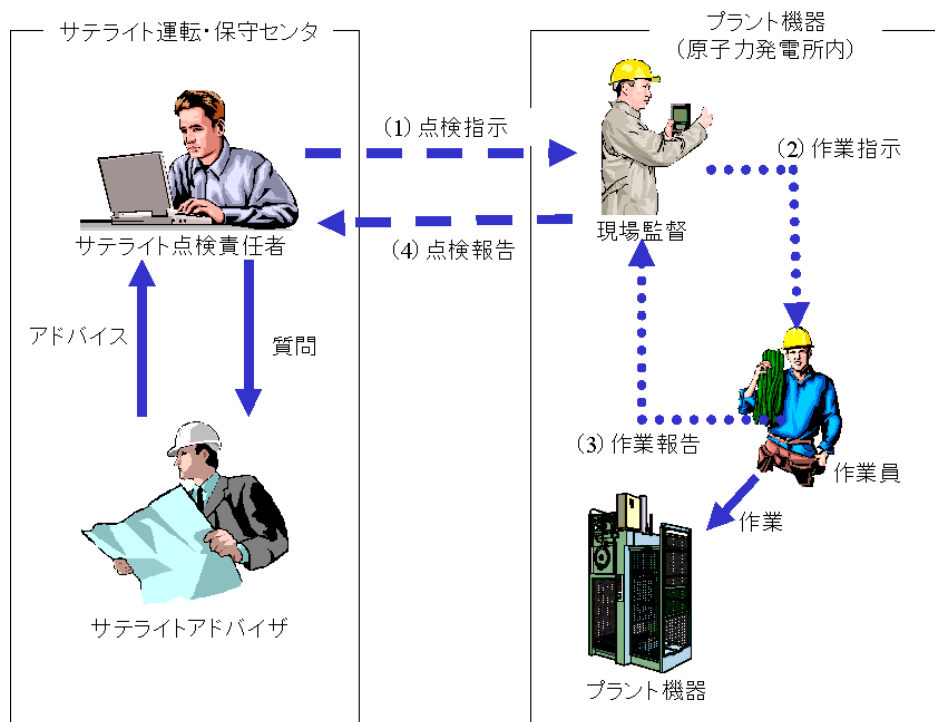


図 2.3: 次世代原子力プラントの定期点検の流れ

作業対象に対して行う作業の内容を伝え、その作業の手順を明確に伝える必要がある

- 保守作業の重要性

作業に対して、作業中に注目すべき箇所や絶対してはならない作業方法など伝え、作業の重要性を伝える必要がある

以上の内容が正しく伝わらず、コミュニケーションが失敗すると、例えば、原子力プラントの1号機と2号機を取り違えて作業を行う（平成8年3月15日 高浜発電所2号機）やレバーを戻す順番を取り違える（平成4年2月4日 高浜発電所1号機）のようなヒューマンエラーが発生し、原子炉停止など重大な事態になる可能性がある。

しかし、衛星運転・保守センタを導入することで、コミュニケーションを円滑に行うことが、従来よりも難しくなると考えられる。例えば、衛星点検責任者と現場監督、衛星アドバイザーと現場監督や作業員のコミュニケーションでは、双方が遠方になるため、音声を用いてコミュニケーションを行うことが考えられる。しかし、音声を用いると絵や地図を用いたプラント機器の説明や現場の状況の説明ができないため、作業の内容などを即座にかつ確実に理解できるように伝えることは難し

い。また、現場監督と作業員とのコミュニケーションでは、音声のみで多数あるプラント機器の部品の中から保守作業対象を作業員が特定することは難しく、作業員の側に現場監督が出向いて指示を与えることが考えられる。これにより、現場監督の負担が大きくなり、また、作業員が指示を受けるまでに時間がかかる。

そのため、次世代原子力プラントでは、コミュニケーションをITによって支援し、サテライト点検責任者、サテライトアドバイザ、現場監督、作業員のそれぞれの間で、遠方でも、内容を即座かつ確実に理解できるコミュニケーションが可能な保守作業環境を構築する必要がある。

2.2 拡張現実感とその応用

前節で述べたように、次世代原子力プラントの定期点検では、サテライト点検責任者、サテライトアドバイザ、現場監督、作業員間のコミュニケーションを、遠方からでも内容を即座かつ確実に理解できるようにITを用いて支援する必要がある。このようなコミュニケーション支援方法の1つとして、拡張現実感を用いてコミュニケーションを支援する方法が考えられる。

本節では、まず拡張現実感について述べ、次いで拡張現実感を用いた支援システムについて述べ、支援システムとしての特徴と問題点について述べる。

2.2.1 拡張現実感

最近、新しいヒューマンインタフェースとして、拡張現実感 (Augmented Reality:AR) が注目され、研究、開発が盛んに行われている。拡張現実感とは、現実空間と仮想空間を融合した複合現実感 (Mixed Reality:MR) の1種で、図 2.4 に示すように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。コンピュータで仮想世界を生成し、その中に人間を没入させる仮想現実感 (Virtual Reality:VR) や現実世界との関係は図 2.5 に示すようになり、拡張現実感は現実世界に近い「実世界志向」のインタフェースである。

拡張現実感を実現する方法としては、ヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display:HMD) を用いた方法やプロジェクタを用いた方法がある。

HMD を用いた方法の例を図 2.6 に示す。ユーザは光学シースルー型のHMDを装着し、HMDの画面を通して現実世界を見る。HMDの画面には、コンピュータで作成した記号や文字で表現された付加情報を表す画像を、現実世界に重畳させるように表示



図 2.4: 拡張現実感のイメージ図

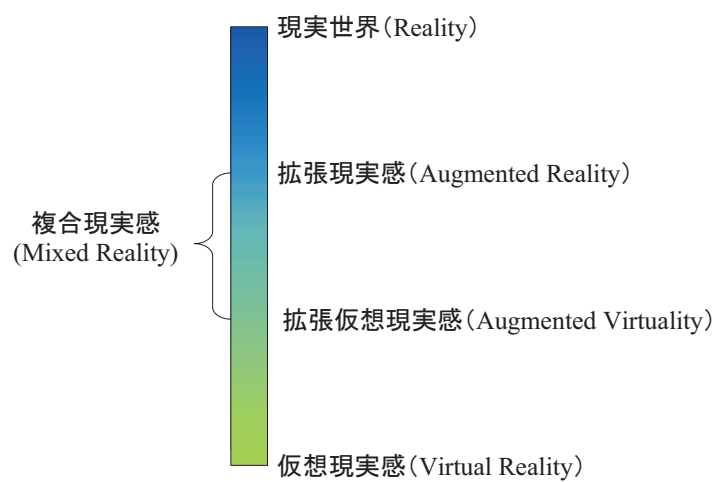


図 2.5: 拡張現実感の位置付け

する。この表示により、ユーザは、付加情報が現実世界と重なった状態で見ることができる。HMD を用いた方法では、付加情報を表示するデバイスである HMD をユーザが装着するため、ユーザの場所に関係なく付加情報を重畳表示が可能である。

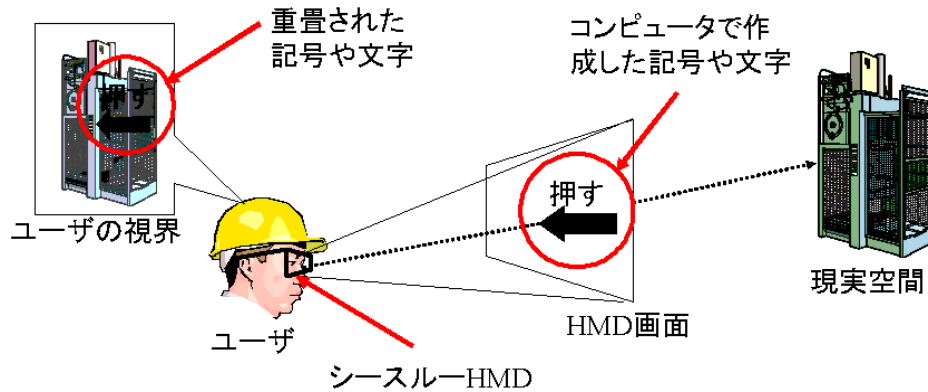


図 2.6: HMD を用いた拡張現実感の実現方法

プロジェクタを用いた方法の例を図 2.7 に示す。現実世界にプロジェクタを用いて付加情報を投影することで、ユーザに現実世界に付加情報を重畳した状態で見ることができる。この方法は、ユーザがいる空間全体に対して付加情報を投影できるため、一度に複数のユーザが同じ付加情報を見ることができる。

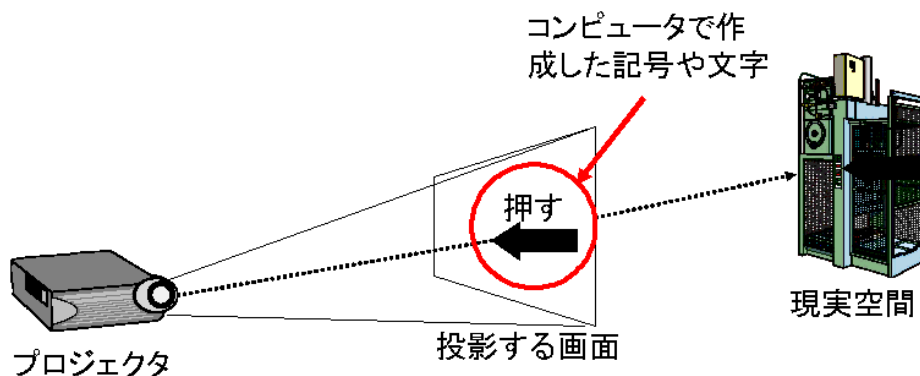


図 2.7: プロジェクタを用いた拡張現実感の実現方法

以上のような方法で実現された拡張現実感には、次のような特徴がある。

1. 対象の直観的理解

付加情報は、情報が指し示している対象の上に重畳表示するため、情報の対象を

ユーザは直観的に理解できる。例えば、図 2.8 に示すように、機器のレバーを上げる操作を行う際、従来のマニュアルでは、マニュアルと実物を見比べて操作の対象となるレバーを特定する。そのため、ユーザは、視線移動を繰り返す必要があり、容易に操作対象の場所を特定できない。また、レバーを間違える可能性も大きくなる。一方、拡張現実感を用いると、矢印や文字でレバーの操作を表現した付加情報を現実空間に重畳表示するため、ユーザは機器を見るだけで操作するレバーを特定でき、間違える可能性も小さくなる。

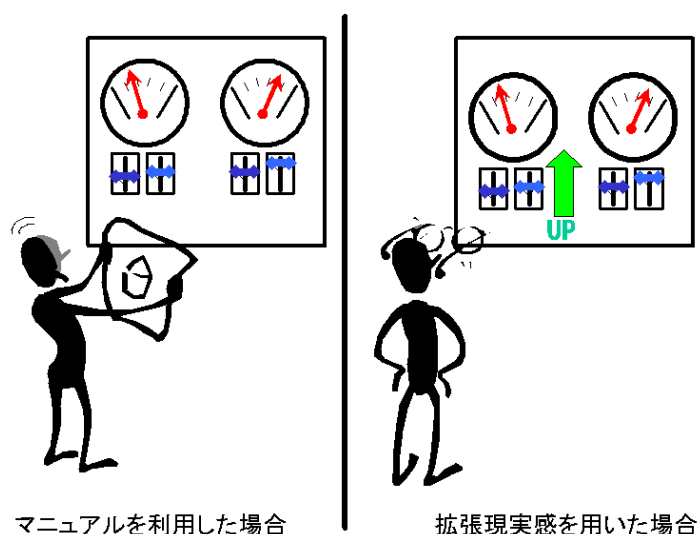


図 2.8: 対象の直観的理解

2. 情報内容の容易な理解

付加情報は、文字だけでなく絵も用いて表現できるため、ユーザは情報の内容を容易に即座に理解でき、また、情報の内容を確実に理解できる。例えば、図 2.9 に示すように、レバーを上げる操作において、文字のみの情報では、ユーザはレバーを動かす方向をすべての文字を読んで理解する。一方、情報の内容を矢印の記号で表現した情報では、矢印を見たユーザは即座にレバーを動かす方向を理解できる。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、文字と絵を併用することで、文字の情報を明確化できる。

以上の特徴から、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である。しかし、拡張現実感技術を用いた作業支援システムを構築する際、常に付加情

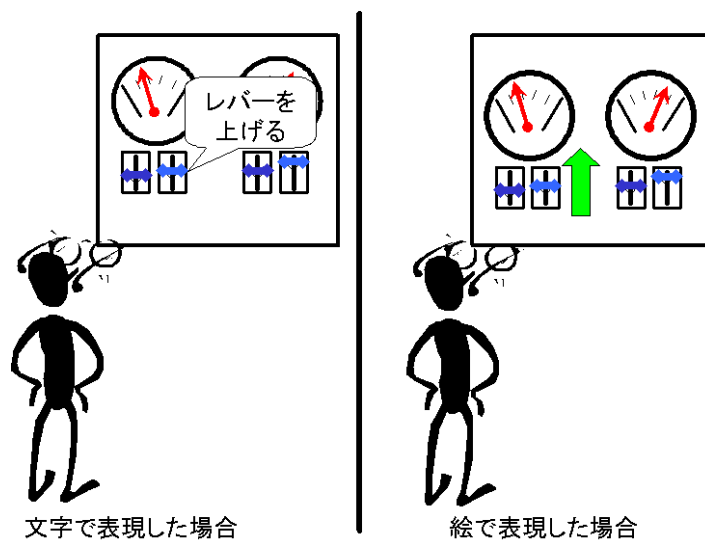


図 2.9: 情報内容の容易な理解

報をその対象上に重畳表示して、1の特徴を実現する必要がある。そのため、HMDを装着したユーザの位置や付加情報を投影するプロジェクタの位置と、付加情報の対象の位置との相対関係をリアルタイムで求め、ユーザの動きや対象位置の移動に応じて、付加情報を重畳表示する位置を変化させていかなければならない。そのため、さまざまな状況に適応したユーザや対象位置の位置計測方法が研究・開発されている。

2.2.2 拡張現実感技術を用いた作業支援

拡張現実感技術を用いた作業支援として、ボーイング社の航空機ワイヤーハーネス作成支援システム^[2]が実用化されている。このシステムは、航空機の電子機器配線ハーネスの配線を行う際、図 2.10 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、作業効率の向上が図られている。このシステムでは、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し、作業台とユーザの位置の相対関係をリアルタイムで計測している。

レーザプリンタのメンテナンスの支援を目的とした支援システムとして、KARMA^[3]がある。このシステムは、図 2.11 に示すように、対象となるプリンタの主要なパーツにあらかじめマーカを貼り付けておき、そのマーカから各パーツの位置と方向を検出して、目的の作業を行うには、パーツをどのように動かせば良いかを HMD を介して

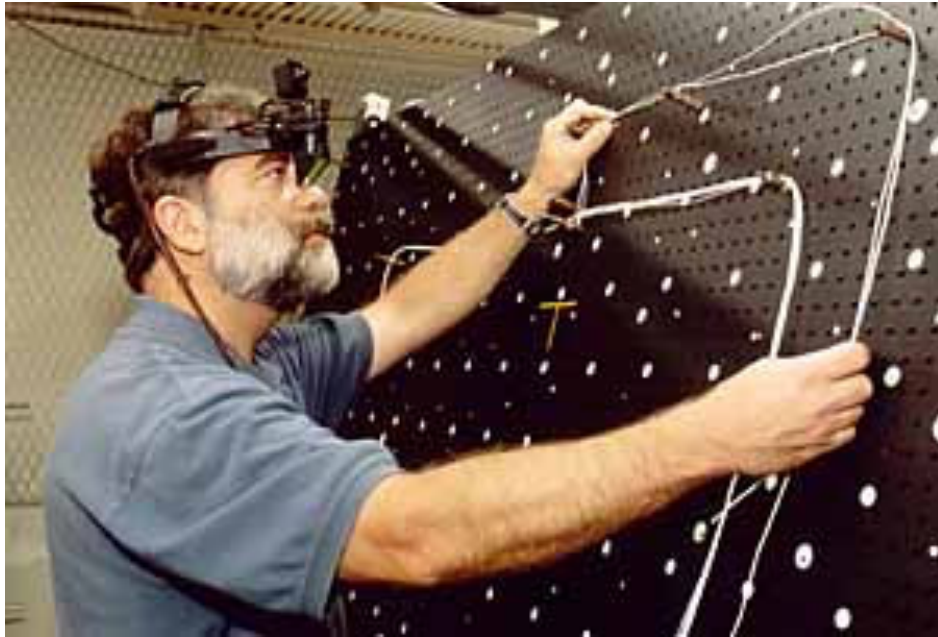


図 2.10: 航空機ワイヤーハーネス作成支援システム

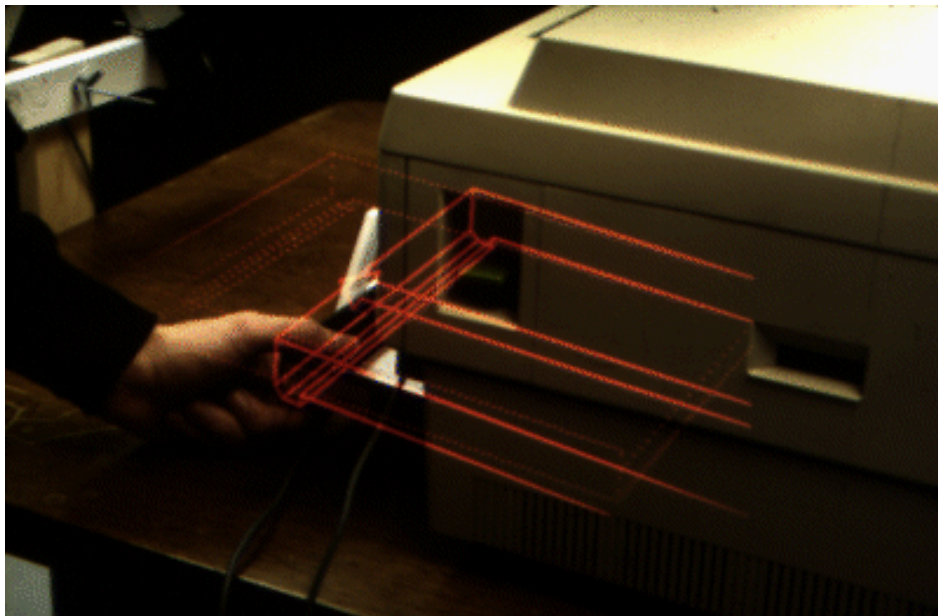


図 2.11: KARMA

提示する。

また、本研究室でも、レーザ光を用いてプリント基板の面実装作業を支援する、拡張現実感による作業支援環境の構築^[4]の研究を行っている。このシステムは、図 2.12 に示すように、工場の製造ラインを流れるプリント基板に対して電子部品を取り付ける位置を、レーザ光で投影して指示を出す支援システムである。このシステムでは、ラインを流れている基板の位置を、ラインの上から撮影したカメラの画像を画像処理して計測し、付加情報を提示する位置を求めている。

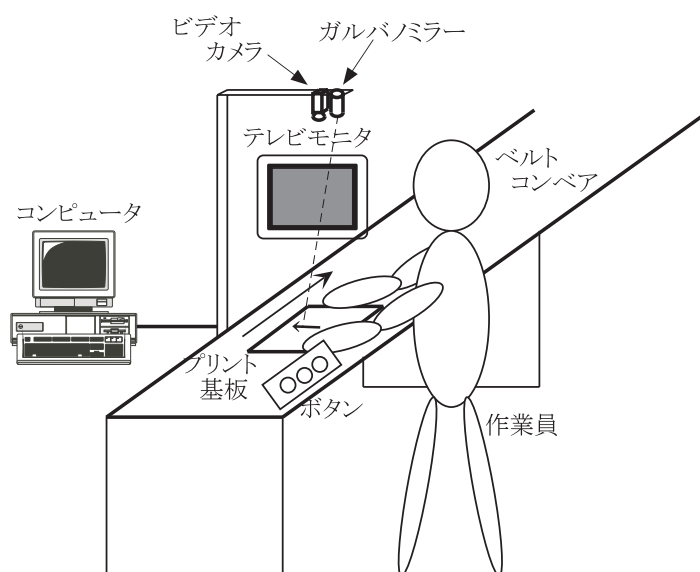


図 2.12: レーザ光を用いた拡張現実感による作業支援環境の構築

以上の支援システムの例では、情報提示を行う位置とユーザの位置との相対関係を求める際、ユーザがあらかじめ定めた場所に立って利用することや、付加情報を表示する位置に目印（マーカ）を貼り付けることを前提として実現されており、ユーザが任意の場所に移動すると情報が表示できなくなる。また、マーカを貼れない環境では、利用できない。

一方、保守作業の現場では、大きなプラント機器の周囲を作業員は動き回って作業を行い、また、プラント機器の様子もカバーが外されるなど時々刻々と変化するため、マーカを貼ることは難しい。そのため、上述の支援システムをそのまま応用することはできず、ユーザが任意に移動を行う環境でマーカを利用せずに、付加情報を所定の位置に表示できる技術が必要である。

2.3 研究の目的

本研究では、保守作業時におけるコミュニケーションを拡張現実感を用いて支援する保守作業支援システムを実現することを目指し、システムに必要となる連携型保守作業支援技術の基盤技術開発を行う。保守作業の現場では、さまざまな場面のコミュニケーションが考えられるが、本研究では、特に、現場監督と作業員とのコミュニケーションに着目し、現場監督と作業員が離れた場所においても、現場監督からの指示を作業員が確実にかつ即座に理解できるコミュニケーションを行うための支援システムを開発する。

開発するシステムは、現場監督が作業員に出した作業の指示を、絵や文字で表現し、作業を行う対象上に重畳表示して伝える。これにより、作業を行う場所や対象を間違えるヒューマンエラーを未然に防ぐことができ、また、コミュニケーションの失敗によって作業内容を勘違いするヒューマンエラーを減らすことが可能となる。

本研究では、この支援システムを開発するにあたり、保守作業の現場に適した作業員の位置計測の手法として、作業員の視界を撮影した画像（視界画像）を用いて計測する手法を提案する。このとき、現場にはマーカを貼ることができないため、マーカの代わりとして画像中の物体の角などの特徴的な部分を使用する。また、保守作業の現場では、作業員の視界画像中のマーカの位置は、作業員の移動の要因のほかに、プラント機器の移動など作業員の周囲環境の変化によって変化する。そのため、センサを用いて作業員の移動を監視し、視界画像中のマーカが変化した要因を求め、位置計測の精度を向上させる。

その後、提案した手法を用いて、支援システムのプロトタイプを作成し、システムの評価を行う。

第 3 章 拡張現実感技術を用いた保守作業支援システムの設計

本章では、まず、次世代原子力プラントの保守作業について述べる。次いで、本研究で開発する試作システムについて、設計の概要と使用するハードウェア、システムに必要な 4 つの機能の設計について述べる。

3.1 次世代原子力プラントにおける保守作業

次世代原子力プラントにおける保守作業の現場では、ポンプやモータなどのプラント機器 1 基に対して 1 名の現場監督と数名の作業員が作業を行うと想定する。

現場監督と作業員の役割を図 3.1 に示す。現場監督は、作業員の作業の割り振りを行い、作業員に作業の指示を出しながら、点検の進捗状況とスケジュールを管理する。また、作業中の作業員に対して、適切に作業を行っているかを監視する。一方、作業員は、現場監督からの指示に従って作業を行い、作業の結果を現場監督に報告する。

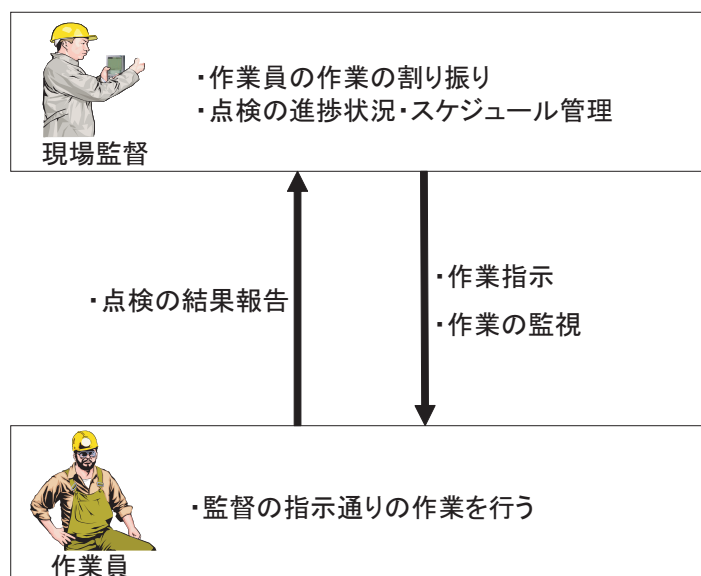


図 3.1: 現場作業員と作業員の役割

このような保守体制では、現場監督と作業員とのコミュニケーションが重要となるが、次のような問題点がある。

- 現場監督による監視が難しい
作業を行うためにさまざまな場所に移動する複数の作業員に対して、1名の現場監督が監視をしなければならない。
- 作業指示を与えることが難しい
現場監督と作業員とのコミュニケーション手法として音声を用いる方法が考えられる。しかし、音声で作業指示を伝えるとき、作業の対象の場所などの説明に時間がかかってしまう上、聞き間違いなどが発生する可能性がある。

これらの問題を解決しなければ、コミュニケーションが原因となって、保守作業自体が従来よりも時間が必要になる。また、作業員に作業指示が伝わらず、指示した作業内容以外の作業を行ってしまうヒューマンエラーや、指示した作業対象とは異なる部分に対して作業を行うヒューマンエラーが増加する。また、すべての作業員を同時に監視することが難しく、現場監督が作業員の犯したヒューマンエラーを発見できない可能性がある。

3.2 保守作業支援システムの設計

本研究では、3.1節で述べたような次世代原子力プラントを導入するときに生じるコミュニケーションの問題を、拡張現実感を用いて支援することで解決させる保守作業支援システムを設計する。

本節では、開発する保守作業支援システムの概要について述べ、次いでシステムの意義と実現するために必要となる機能について述べる。

3.2.1 設計の概要

現場での現場監督と作業員とのコミュニケーションを支援するシステムとして、図3.2に示すようなシステムを考える。

このシステムでは、各作業員の安全ヘルメットに小型 CCD カメラを取り付ける。このカメラは、作業員の視界を撮影しており、この視界の画像（視界画像）を現場監督が携帯しているタブレット PC の画面に表示する。これにより、現場監督は動き回る作

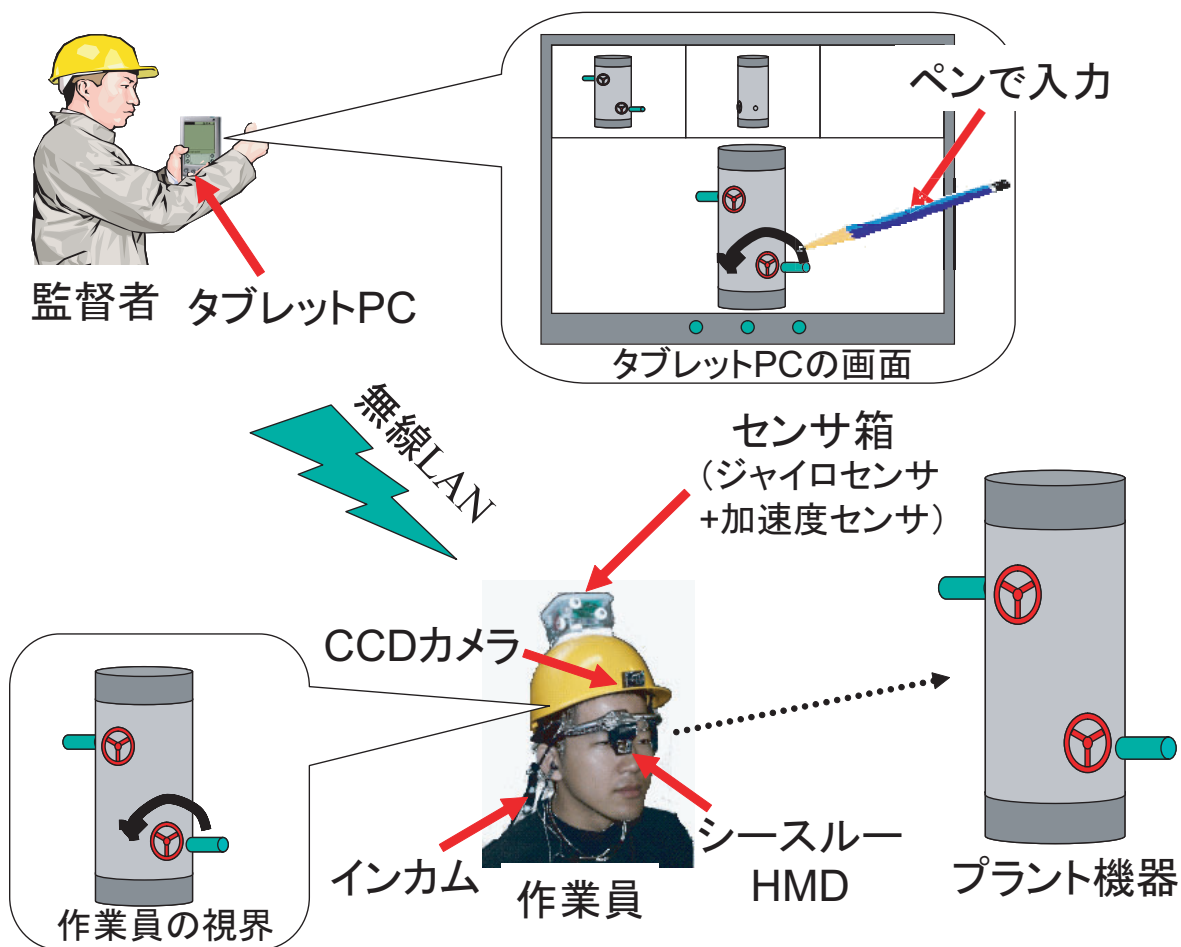


図 3.2: 保守作業支援システム

業員を監視できる。さらに、タブレット PC の画面は複数の作業員の視界画像を表示することで、現場監督は複数の作業員を同時に監視できる。

また、現場監督は、作業員への作業指示の内容や対象機器についての情報を、電子ペンなどを用いて視界画像上に文字や絵で書き込む。この書き込まれた内容は、作業員の視界には、作業対象などの上に重畳されるように HMD を利用して表示する。これにより、現場監督から作業員へ、作業対象機器の位置や、注意すべき箇所、作業方法などを伝えることができる。

また、本システムを保守作業の手順をデータベース化した作業手順データベースと連携させることで、現場監督による作業指示をシステムが行うことが可能となる。これにより、現場監督の負担が低減される。また、現場監督が複数の作業員に作業指示を出す場合、現場監督が 1 名ずつ順番に入力していかなければならない。それに対して、システムが作業指示を出すようにすると、入力作業を行う必要がないため、複数の作業員に同時に作業指示を出すことができ、作業員が作業指示を受けるまでの時間の短縮が可能となる。

3.2.2 システムの意義

本システムを利用することによって、以下のような利点が得られる。

- 作業指示を文字や絵で表現するため、作業員は作業指示の内容を理解しやすくなる
- 作業指示の対象に重畳して作業指示を表示するため、作業員は直観的に対象を理解できる
- 視界画像が現場監督に送信するため、離れた場所にいる作業員を監視できる
- 複数の作業員の視界画像が現場監督に表示するため、複数の作業員を同時に監視できる

これらの利点によって、作業員の作業内容の理解不足や対象の勘違いなどのヒューマンエラーを未然に防ぐことができる。また、現場監督が作業員の作業が適切に行われているかを容易に把握できるため、作業員がヒューマンエラーを犯しても早期発見が可能となり、ヒューマンエラーによる事故を未然に防ぐことができる。

3.2.3 必要な機能

本システムでは、拡張現実感を用いて作業員に指示を与えるため、作業員の位置や現場監督からの作業指示を表示する位置を求める必要がある。また、作業員の監視や作業指示を行うために、現場監督と作業員との間で通信と、作業手順データベースの連携を行う必要がある。そのため、本システムを実現するためには、次の5つの機能が必要となる。

1. 作業員の位置推定機能

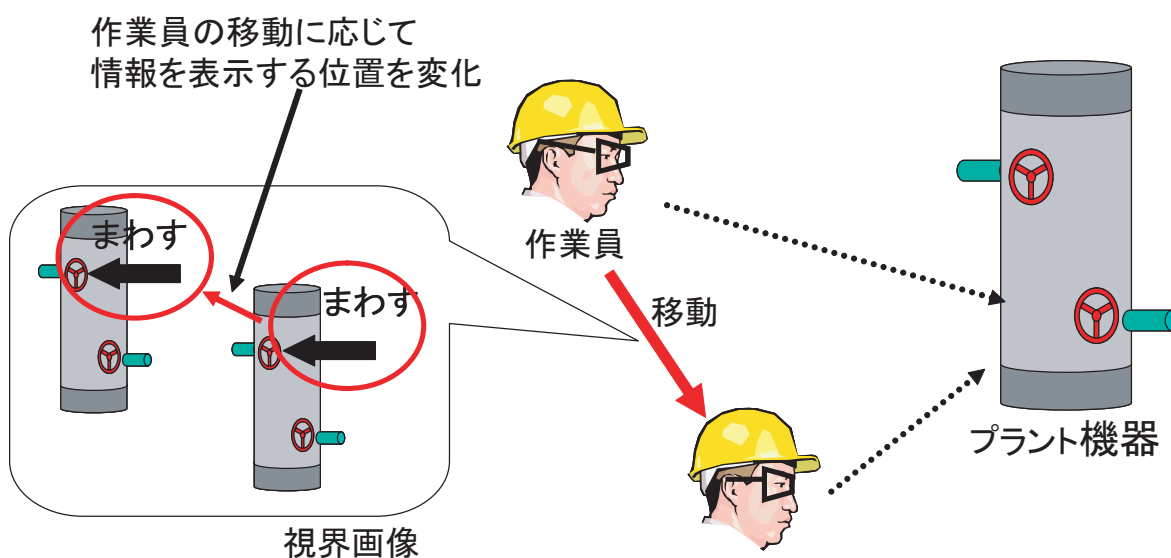


図 3.3: 作業員の位置推定機能

本システムでは、図 3.3 に示すように、作業員が任意の場所から任意の方向を見ている場合でも、現場監督からの作業指示を見ることができるようにならなければならない。そのためには、作業員の位置をリアルタイムで求め、作業員の移動などに応じて、作業指示を表示する位置を変化させる必要がある。そこで、作業員の位置推定機能を用いて、作業員の位置、特に作業員の頭の位置をリアルタイムに求める。

2. 通信機能

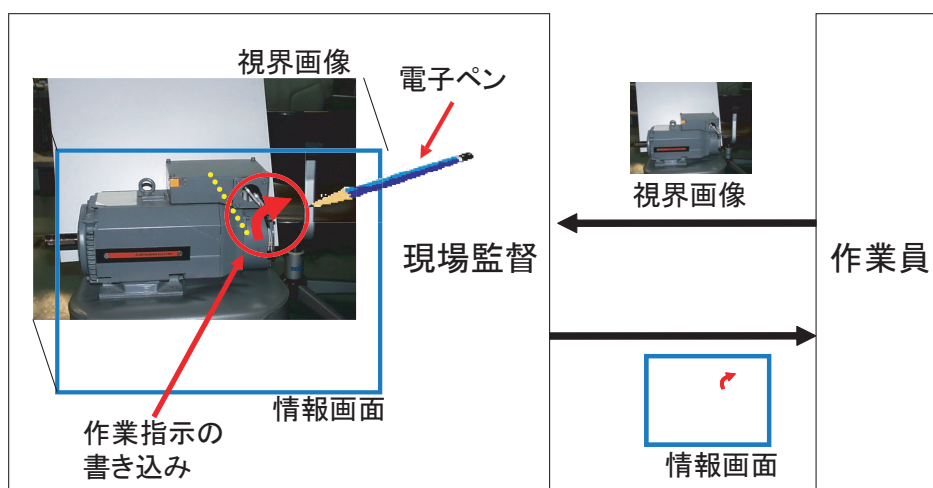


図 3.4: 通信機能

現場監督と作業員との間には、従来の音声以外に、作業員の視界画像や現場監督から作業員への作業指示を表した文字や絵の画像（情報画像）の2種類の画像を通信する必要がある。そのため、膨大な量の通信を行う必要があり、通信機能を用いて、図 3.4 に示すように、画像データを円滑に送受信できるようにする。

また、現場監督による作業員の視界画像の監視や作業指示を書き込みを容易に行えるインターフェースが必要である。そこで、通信機能を用いて、現場監督が容易に使用できるインターフェースを実現する。

3. 指示対象位置の位置推定機能

現場監督から作業員への作業指示は、指示の対象である位置（指示対象位置）を正確に指定できるよう、3次元位置を入力する必要がある。しかし、3次元位置を入力できるデバイスは大きく、操作が複雑であるため、現場監督が保守作業の現場で使用することは難しい。そのため、本システムでは、2の通信機能で述べたように、視界画像を用いて作業指示を行う。しかし、視界画像は2次元の情報しかもっていないため、作業員が別の角度から作業指示を見ると、指示対象位置からズレてしまう。

そこで、視界画像は3次元空間を正射影した画像であり、作業員と視界画像、プラント機器の位置関係は図 3.5 に示すようになることから、指示対象位置の位置推定機能を用いて、この位置関係から指示対象位置の3次元位置を求め、図 3.6 に示すように作業員がどの角度から見ても、指示対象位置が正確に表示できるよう

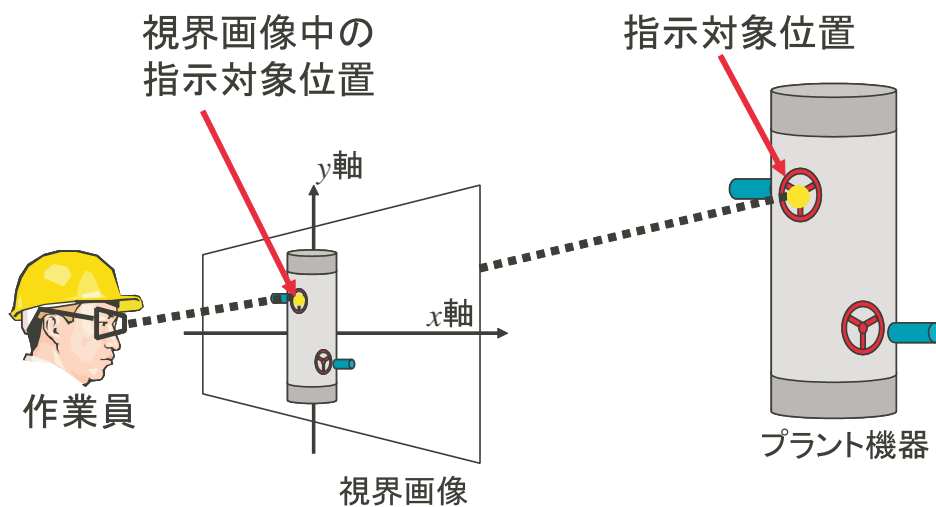


図 3.5: 作業員、視界画像、指示対象位置の位置関係

にする。

4. 情報表示機能

この機能は、1と3の機能によって求めた、作業員の位置と指示対象位置から、HMDの画面上に情報を表示する位置を求め、図3.7に示すように作業員に表示する。

5. データベース連携機能

事前に作成した作業手順データベースをもとに、システムが作業員への作業指示を行うとき、作業員が指示された作業が完了したかの進捗状況を判断し、次の指示する作業手順をデータベースから検索して、作業員に表示する必要がある。そこで、データベース連携機能を用いて、システムが作業指示を行えるようにする。

本研究では、この5つの機能の中で、1の作業員の位置推定機能を中心に研究・開発を行い、1から4の機能をもつ保守作業支援システムを構築する。

3.3 保守作業支援システムのハードウェア

本節では、システムを利用する際、現場監督と作業員が使用するハードウェアについてそれぞれ述べる。

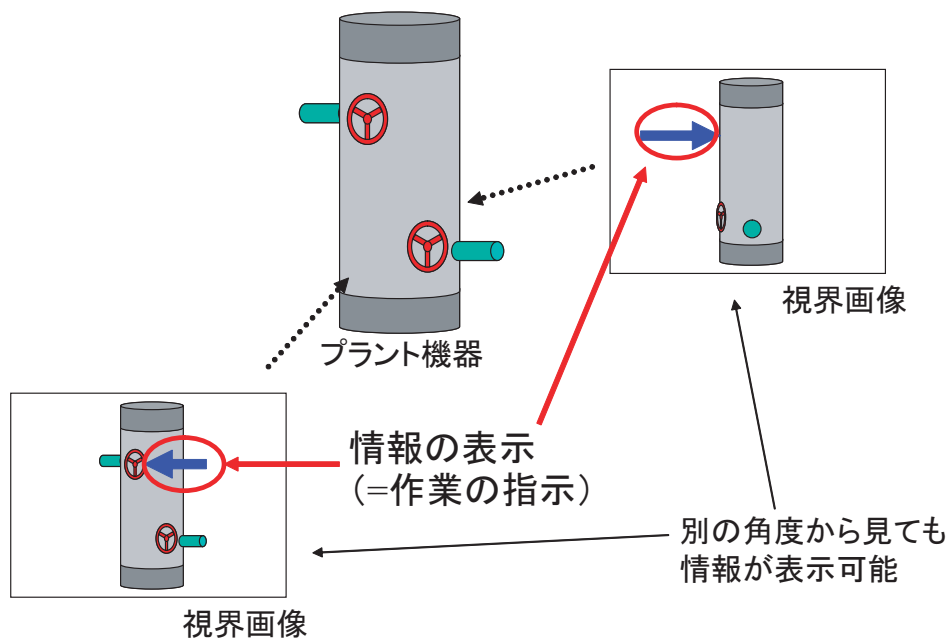


図 3.6: 指示対象位置の位置推定機能

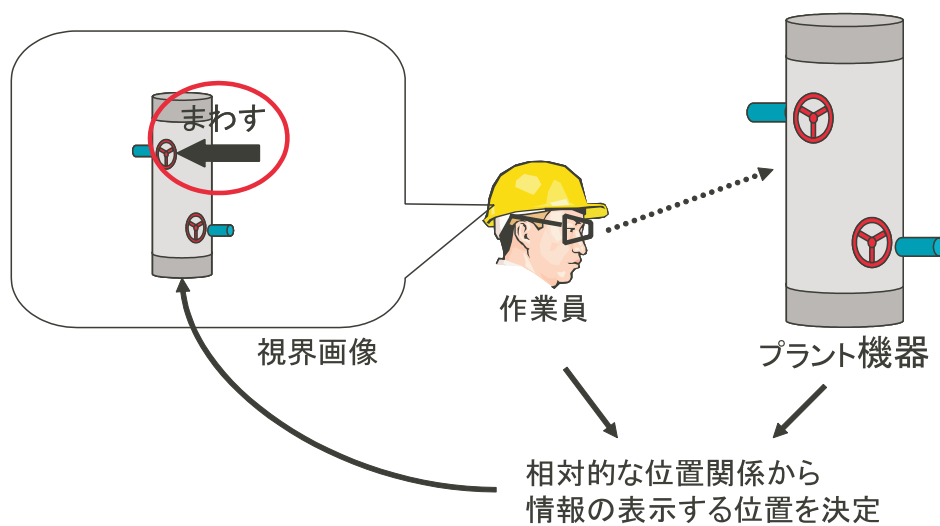


図 3.7: 情報表示機能

3.3.1 作業員のハードウェア

本システムを利用する上で、作業員が装着するハードウェアは作業の支障にならないようにする必要がある。そのため、小型、軽量、どこでも使用可能である必要がある。また、装着しても安全であり、装着しても両手が自由に使えるようにしなければならない。

一般的に拡張現実感で情報を表示する際、表示に使用するインタフェースとして、HMDのほかに小型テレビ（Handheld Display）やプロジェクタが使われる^[5]。小型テレビは、カメラで取り込んだ画像に情報を重畳させてテレビ画面に表示するが、ユーザが小型テレビを携帯しなければならないため、保守作業の現場で作業員が使用すると、少なくとも片手を自由に使うことができない。また、プロジェクタは現実空間に情報を投影して重畳させるが、ユーザのいる場所にプロジェクタを設置する必要があり、さまざまな場所で作業を行う作業員が使用するためには、多数のプロジェクタを設置しなければならない、コストが高くなる。そこで、本研究ではHMDを使用することにする。

HMDにはビデオ型HMDと光学シースルー型HMDの2種類がある。ビデオ型HMDは、不透明な画面に映像を表示する方式で、HMDを装着したユーザは現実空間を直接見ることができない。そのため、ユーザが現実空間を見るときは、例えば、ユーザの視界画像をHMDの画面に表示して間接的に見るようにする。一方、光学シースルー型HMDは、透明な画面に映像を表示する方式で、装着したユーザはHMDの画面を通じて現実世界を見ることが可能である。保守作業の現場では、安全面から現実空間を実際に見ることが望ましい。そのため、本システムでは、光学シースルー型HMDを使用することにする。

また、作業員の視界をリアルタイムで撮影するために、小型ビデオカメラを使用する。このビデオカメラは、作業員の視界と近い映像が撮影できるよう、安全ヘルメットの前方に固定する。

光学シースルー型HMDと小型ビデオカメラは、作業員が携帯しているウェアラブルコンピュータに接続する。このウェアラブルコンピュータは、作業員の位置推定などの処理を行う処理端末である。また、作業員と現場監督との通信端末の役割なども果たす。ウェアラブルコンピュータは、作業員が携帯しても、作業に支障がないようにリュックサックなどに入れ背中に背負うようにする。

以上から、作業員のインタフェースを図3.8に示す。

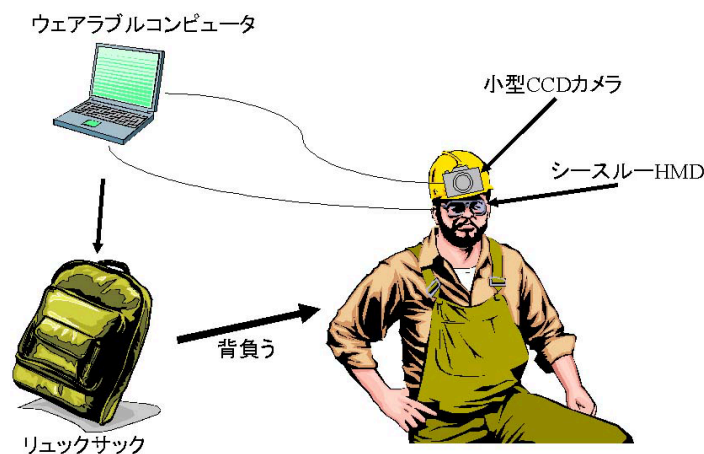


図 3.8: 作業員のインタフェース

3.3.2 現場監督のハードウェア

現場監督のインタフェースは、作業員の監視や作業指示の際に使用する情報端末である。この情報端末には、作業員から送られる視界画像を表示し監視できるように十分大きな表示画面と、作業員への指示の書き込みが容易にできるような入力インタフェースが必要である。

情報端末としては、携帯用情報端末 (Personal Data Assistant:PDA) やノートパソコンが考えられる。しかし、PDA は、表示画面が小さいため、複数の作業員の視界画像を表示できず、同時に監視することは難しい。また、ノートパソコンは、入力方法がキーボードやマウス、タッチパッドであり、現場監督が携帯した状態で入力作業を行うことが難しい。そこで、タブレットPCを使用する。タブレットPCは、ノートパソコン程の大きな表示画面を持っており、入力方法としては電子ペンで直接表示画面に書き込むことができるため、携帯した状態でも入力できる。そのため、監視に必要な大きな表示画面と、容易な入力インタフェースという要求仕様を満たしており、現場で使用するのに最適である。

以上から、監督者のインタフェースは、図3.9に示すようにタブレットPCを利用することにする。

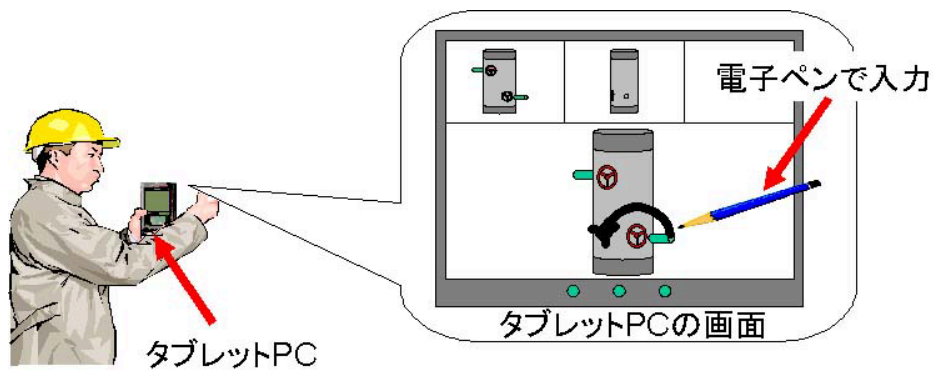


図 3.9: 現場監督のインタフェース

3.4 作業員の位置推定機能

本節では、作業員の位置推定機能について説明する。まず、作業員の位置推定機能を実現するときの保守作業の現場での制約条件について述べる。次いで、既存の位置推定方法について述べ、最後に本研究で提案する位置推定機能について述べる。

3.4.1 保守作業の現場における作業員の位置推定

現場監督からの作業指示を表した絵や文字の付加情報を HMD を用いて重畳表示するとき、重畳表示する対象の位置と、その情報を見る作業員の位置の相対的な関係が必要になる。そのため、作業員の位置、特に頭の位置をリアルタイムで求める必要がある。作業員の位置が正しく求められない場合、情報の表示する位置が狂ってしまう。そのため、作業員の位置は、ズレが数 cm 以内になる精度で推定する必要がある。

また、保守作業の現場において、作業員の周囲環境は、例えば、別の作業員が動き回り、プラント機器が移動するなど大きく変化する。また、作業員の位置推定のために、現場全体にマーカを貼るなど、大幅に周囲環境を変えることは、安全面とコスト面から考えて望ましくない。そのため、周囲環境に依存した位置推定の方法は使用できない。

3.4.2 既存の位置推定の方法

既存の位置推定の手法としては、画像データベースを用いる方法やセンサを用いる方法、画像処理で行う方法が研究されている。

画像データベースを用いる方法^[6]では、あらかじめにユーザの移動範囲内の景色を

カメラで撮影しておき、撮影した画像と撮影した位置のデータベースを作成する。そして、ユーザに取り付けられたカメラから撮影した画像を基準に、データベースの画像の中で最も類似している画像を検索し、その画像を撮影した位置を、ユーザの位置であると推定する方法である。この方法では、画像と位置のデータベースを作成する必要があるが、プラント内は広大であり、また、周囲環境が変化するため、画像のデータベース作成は不可能である。そのため、この方法を保守作業の現場で使用することはできない。

センサを用いる方法は、加速度センサやジャイロセンサ、磁気センサなどを用いてユーザの位置を測定する方法である。しかし、センサ類は一般的にドリフト誤差が発生し、その誤差が蓄積する。そのため、長時間使用すると、ズレが大きくなり、正確にユーザの位置を測定できなくなる。本研究でも加速度センサとジャイロセンサの精度に関する実験を行い、付録 A-1 と付録 A-2 のような実験結果が得られた。この実験から、「作業員が右に移動した」や「頭を上を倒した」などの移動方向は測定が可能であるが、移動した変位を正確に得ることは難しいことがわかった。

また、センサ類と画像処理を併用し、センサでユーザの移動を計測し、その際に生じるドリフト誤差を画像処理によって検出し補正する方法^[8]が研究されている。この方法は、精度もよく長時間の使用しても生じるズレは微小であった。しかし、この方法では、ユーザの立っている場所が固定され、頭のみを動かす場面を想定しており、ユーザの移動に対応していない。保守作業の現場では作業員は動き回るため、この方法を適用することができない。

一方、画像処理を用いて行う方法として、マーカを利用する方法がある。これは、壁や天井などに形と大きさが既知のマーカ(人工マーカ)を張り、この人工マーカをユーザの頭に取り付けたカメラで撮影し、得られた画像を画像処理して位置を求める方法である。この方法では、センサ類を用いる方法より高い精度が得られ、また長時間の使用が可能である。しかし、この方法では、ユーザの周囲環境に人工マーカを多数貼り付けるため、プラント内の環境を大幅に変更しなければならない。また、この人工マーカを利用する方法を応用し、画像中にある特徴的な部分をマーカの代わりに利用する方法^[7]がある。この方法は、最初に人工マーカでキャリブレーションを行う。その際、カメラから得られた画像から、特定の色の領域や物のエッジなどの特徴的な部分を抽出し、3次元位置を求めてマーカ(自然マーカ)として利用する。その後、この3次元位置が既知となった自然マーカを用いてユーザの3次元位置を求める。これを繰り返して利用することで、広範囲に渡ってユーザの位置計測が可能である。しかし、こ

の方法は、周囲の環境が変化しない場面を想定しており、カメラ画像中の自然マーカの移動は、ユーザの移動によってのみに限られている。そのため、機器が移動するなど周囲環境の変化によっても自然マーカの移動のある保守作業の現場に適用することはできない。

3.4.3 本研究で用いる位置推定の方法

本研究では、保守作業の現場での作業員の位置推定を、人工マーカと自然マーカを捉えた視界画像を画像処理して行う。このとき、保守作業の現場では、プラント機器の移動や他の作業員の移動によって、作業員の周囲の環境が変化するため、視界画像中のマーカの2次元座標は、作業員自身の移動以外の要因でも変化する。そこで、本研究では、作業員の頭部に装着したセンサを用いて作業員の移動した方向を監視し、作業員自身の移動が要因で2次元座標が変化したマーカのみを抽出して利用することにより、位置推定の精度を向上させる。

本研究で使用するマーカは、表3.1に示すように3種類に分類でき、このうち、3次元位置が既知である人工マーカや既知の自然マーカを視界画像に捉え、視界画像中のマーカの2次元座標と、マーカの3次元位置の関係から作業員の位置を推定する。人工マーカは、あらかじめ形状や大きさが既知であり、事前に決めた保守作業の現場内の場所に貼り付ける。自然マーカは、保守作業の現場内を捉えた視界画像を画像処理して抽出した特徴的な部分を使用する。そのため、事前にマーカの形状や大きさや3次元位置は未知である。表3.1の中で「未知の自然マーカ」は、3次元位置が求まっていないマーカで、作業員の位置推定で使用するためには、事前に3次元位置を求める必要がある。一方、「既知の自然マーカ」は、既にマーカの3次元位置が求まったマーカで、このマーカを利用して作業員の位置推定を行うことが可能である。それぞれのマーカの詳細については後述する。

作業中の作業員の位置を常に推定するには、次の4つの要素技術が必要である。

- (1) 人工マーカを用いた作業員の位置推定
- (2) 自然マーカの抽出
- (3) 既知の自然マーカを用いた作業員の位置推定
- (4) 未知の自然マーカの位置推定

表 3.1: マーカの種類

マーカの種類		形状や大きさ	3次元位置	特徴
人工マーカ				規定の場所に貼る 位置推定に使用可能
自然マーカ	未知の自然マーカ	×	×	位置推定に使用不可
	既知の自然マーカ	×		位置推定に使用可能

.....既知の状態、×.....未知の状態、位置推定=作業員の位置推定

以下では、まず、作業員の位置推定に必要な4つの要素技術について説明し、次いで、要素技術を用いた位置推定方法について述べる。

(1) 人工マーカを用いた作業員の位置推定

人工マーカを用いた位置推定は、加藤らによって提供されている AR tool kit^[9] を用いて行う。AR tool kit は、人工マーカを利用してユーザの3次元位置を取得するライブラリである。人工マーカは、図 3.10 に示すような2次元バーコードのような模様を含んでおり、周りには黒色の四角形で囲まれた構造をしている。AR tool kit では、カメラで撮影した人工マーカの画像を処理して、カメラの3次元位置、カメラの向きを表す3次元ベクトルを計算し、図 3.11 に示すように人工マーカ上に3次元形状の物体などの情報を付加できる。本システムでは、プラント機器に人工マーカを数個貼る。



図 3.10: AR tool kit で使用するマーカの例

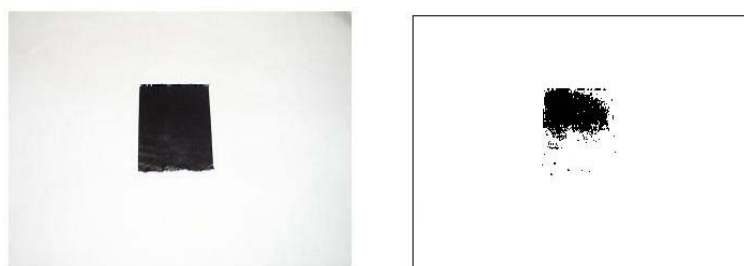
(2) 自然マーカの抽出

視界画像から特徴的な部分を抽出し、自然マーカとして使用する。特徴的な部分の抽出方法として、特定の色の領域を抽出する方法が考えられる。しかし、この方法では、



図 3.11: AR tool kit によるデモンストレーション

図 3.12 と図 3.13 に示すように、照明環境の変化によって抽出する領域の大きさが異なるなど、照明環境の影響を受けてしまう。そのため、保守作業の現場では、プラント機器の移動により生じた影などに照明環境が変化するため、マーカが抽出できなくなる。

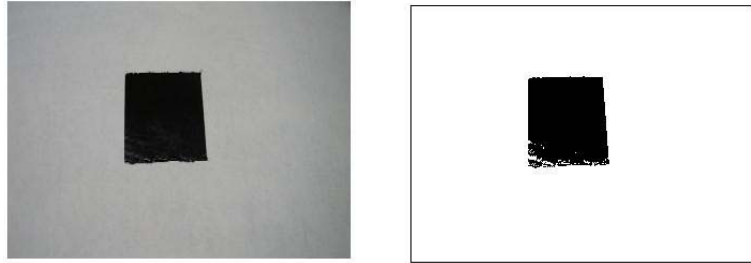


(a) カメラで撮影した画像 (b) 黒色を抽出した画像

図 3.12: 照明環境の違いによる色抽出例 (明るい環境)

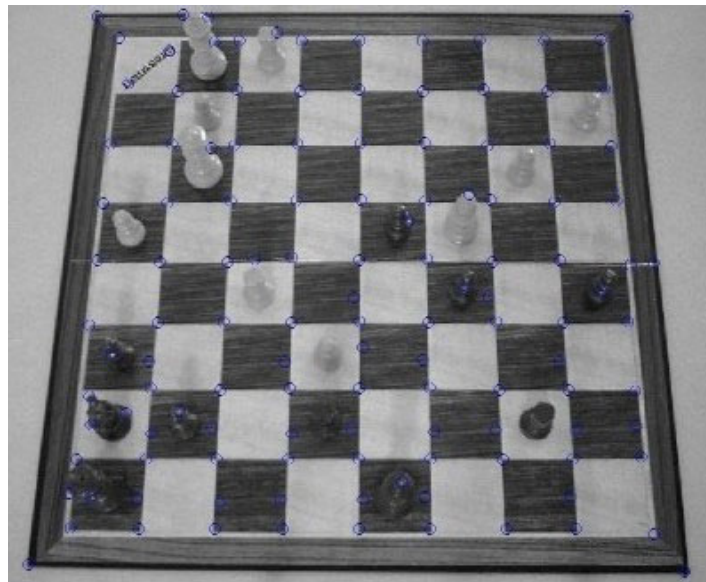
そこで、本研究では、視界画像を Harris オペレータ^[10]で走査して、自然マーカとなる部分を抽出する。Harris オペレータは、画像中の画素の値 (画素値) を水平方向、垂直方向に微分した値を用いて演算を行い、この演算結果を閾値で分離する。これにより、図 3.14 に示すように画像中の物体の角を抽出できる。Harris オペレータは、画素値の微分した値を用いるため、照明の変化に影響を受けにくくなり、安定して角を抽出できる。

本システムでは、Harris オペレータで求めた領域を自然マーカとする。また、視界画像中における自然マーカの 2 次元座標は、抽出した領域の重心座標とする。



(c) カメラで撮影した画像 (d) 黒色を抽出した画像

図 3.13: 照明環境の違いによる色抽出例 (暗い環境)



(青の丸が角として抽出された部分)

図 3.14: Harris オペレータ

(3) 既知の自然マーカを用いた作業員の位置推定

3次元位置が既知の自然マーカを用いて、作業員の位置を計算によって推定する。このとき、作業員の頭部に装着した加速度センサとジャイロセンサからのデータを用いて、自然マーカ中から作業員の移動を反映しているマーカを選別し、位置推定の精度を向上させる。

一般的に3次元位置が既知の3つのマーカをカメラで撮影することで、撮影したカメラの3次元位置を求めることができる。しかし、この方法では、非線形方程式を解く必要があり、解を推定して3次元位置を求めなければならない。そのため、非線形方程式の解法に処理時間がかかり、また、解を間違える可能性もある。そこで、4つ以上のマーカを用いて3次元位置を求める方法がよく使われている。これにより、非線形方程式を線形方程式にすることができ、また解が一意に決定できる。

本システムでも、3次元位置が既知の4つのマーカを用いて作業員の位置を求める。処理の流れを図3.15に示す。

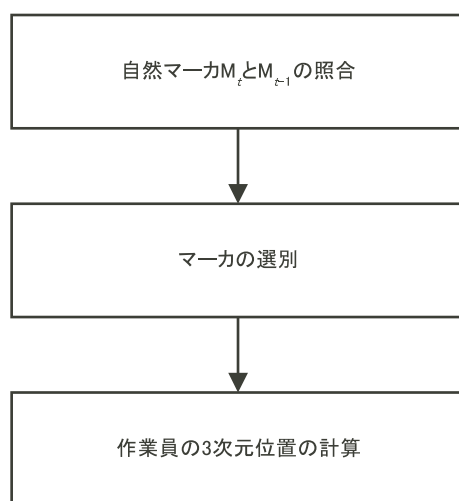


図 3.15: 作業員の3次元位置の取得の処理の流れ

まず、時刻 t に撮影した視界画像 Img_t 中の自然マーカの集合を M_t とし、時刻 $t-1$ に撮影した視界画像 Img_{t-1} 中の自然マーカの集合を M_{t-1} とする。 M_{t-1} の中には、時刻 $t-1$ までに3次元位置が既知になった既知の自然マーカの集合 M_{t-1}^k と、3次元位置が未知である未知の自然マーカの集合 M_{t-1}^u が含まれている。このうち、 M_{t-1}^k と M_t を照合し、図3.16に示すように、 Img_{t-1} と Img_t の2つの画像間におけるマーカの一対一関係を求める。そのとき、2つのマーカがどの程度類似しているかを表す類似度も求

める。類似度の求め方は、後述する。

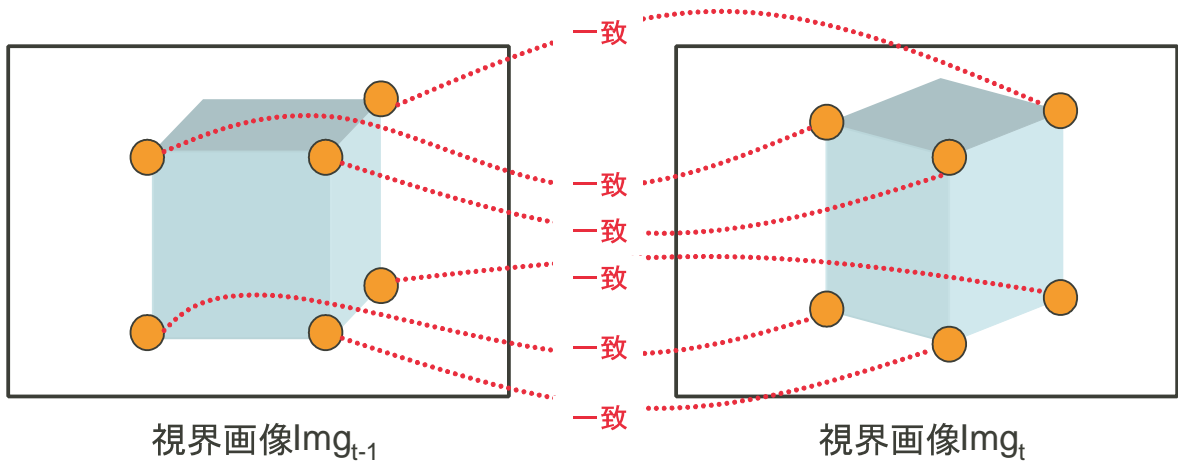


図 3.16: マーカの一対一関係

次に、作業員の移動を最も反映しているマーカを4つ選別する。選別する方法は、加速度センサとジャイロセンサから得られた作業員の移動方向から視界画像が移動する方向を求め、その方向と時刻 $t-1$ から t に視界画像中を移動した自然マーカの移動方向が一致しているか調べる。その後、一致しているマーカのうち、類似度の高いマーカを4つを選別する。

そして、4つのマーカを用いて作業員の位置を計算する。作業員の位置の計算は AR tool kit で行えるため、これを利用する。AR tool kit に4つのマーカの3次元位置と視界画像中の2次元座標とを代入すると、作業員の3次元位置と、カメラの向きを3次元ベクトルを得ることができる。

以上により、作業員に関する必要な3次元情報を取得する。

(4) 未知の自然マーカの位置推定

未知の自然マーカの3次元位置を計算によって推定する。このとき、(3)の既知の自然マーカを用いた作業員の位置推定と同様に、センサを用いて未知の自然マーカを評価し、作業員の移動方向と視界画像中のマーカの移動方向が一致している未知の自然マーカの3次元位置を推定する。

一般的に、1枚の画像を画像処理して得られる位置の情報は2次元である。そのため、自然マーカの3次元位置を求めるためには、2枚以上の画像を用いて行う必要がある。2枚の画像から3次元位置を求める方法として、両眼ステレオカメラ法^[11]がある。

両眼ステレオカメラ法は、ユーザに2台以上のカメラを取り付け、これらのカメラで3次元位置を求めたい対象物を撮影する。そして、撮影した2枚の画像をもとに、対象物の3次元位置を計算する方法である。この方法を本研究で使用するためには、作業員の安全ヘルメットに2台のカメラを取り付ける必要があり、安全ヘルメットが重くなるため、作業員の負担が大きくなってしまう。

そこで、本研究では、1台のカメラを用いて撮影した、2枚の視界画像を画像処理して自然マーカの3次元位置を取得する。

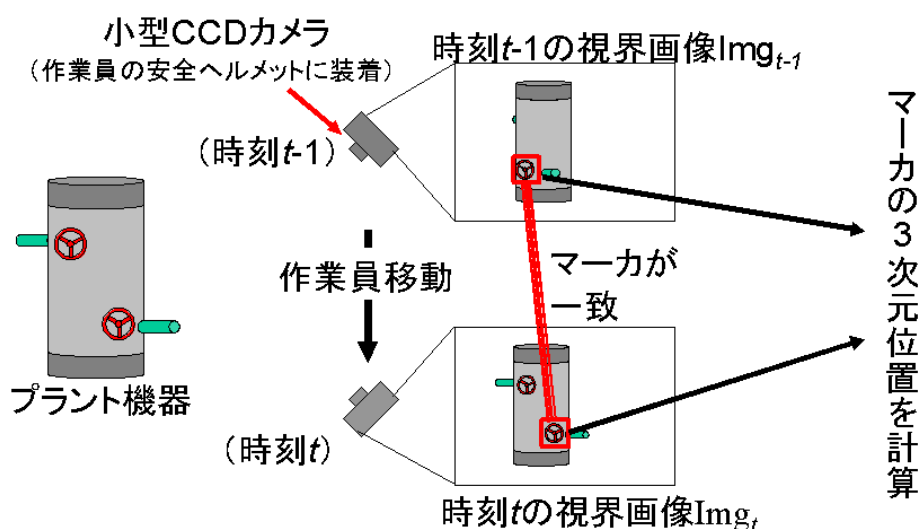


図 3.17: 自然マーカの3次元位置の取得方法

自然マーカの3次元位置の取得方法を図 3.17 に示す。時刻 $t-1$ に撮影した視界画像 Img_{t-1} から得られた自然マーカの集合 M_{t-1} のうち3次元位置が未知のマーカの集合 M_{t-1}^u と、時刻 t に撮影した視界画像 Img_t から得られた自然マーカの集合 M_t を、照合してマーカの一対一関係を求める。そして、視界画像 Img_{t-1} 内の M_{t-1}^u の2次元座標と、視界画像 Img_t 内の M_t の2次元座標から自然マーカの3次元位置を計算する。その計算方法は、ステレオカメラ法を応用し、以下の方法^[12]を用いる。

時刻 t のとき、空間中において、人工マーカか既知の自然マーカを用いて求めた作業員の3次元位置が O_t であり、図 3.18 に示すように、視線の向きが3次元ベクトル k_t 、視界画像 Img_t の x 方向が3次元ベクトル i_t 、 y 方向が3次元ベクトル j_t であるとする。このとき、ある自然マーカ M が視界画像 Img_t に撮影され、視界画像中の2次元座標の点 $\vec{P}_t = (x_t, y_t)$ にあるとする。このとき、 \vec{P}_t は空間中の3次元座標 P_t には、カメラの焦点距離 f を用いて、

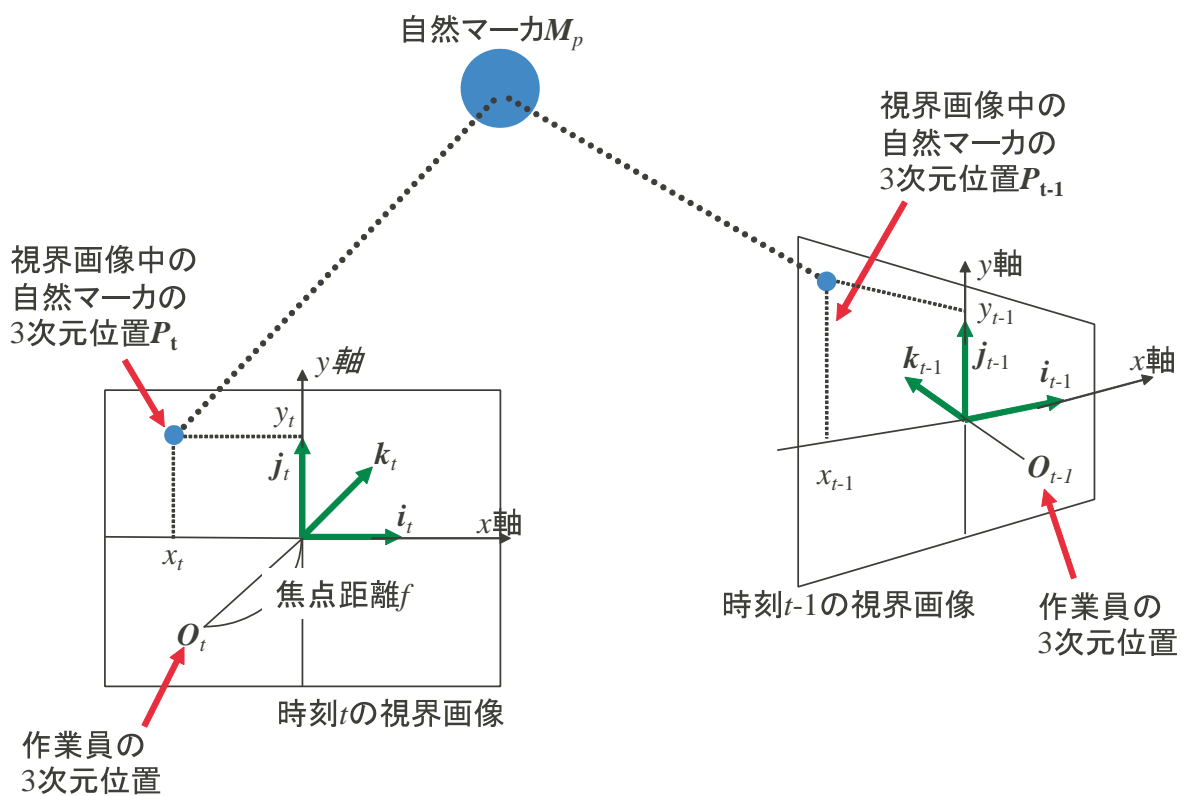


図 3.18: 自然マーカの3次元位置の計算方法

$$P_t = O_t + x_t \cdot \mathbf{i}_t + y_t \cdot \mathbf{j}_t + f \cdot \mathbf{k}_t \quad (3.1)$$

となる。時刻 $t-1$ のときも、自然マーカ M が視界画像 Img_{t-1} 中にあるとすると、

$$P_{t-1} = O_{t-1} + x_{t-1} \cdot \mathbf{i}_{t-1} + y_{t-1} \cdot \mathbf{j}_{t-1} + f \cdot \mathbf{k}_{t-1} \quad (3.2)$$

となる。ここで、3次元ベクトル \mathbf{v}_t と \mathbf{v}_{t-1} を次のように定義する。

$$\mathbf{v}_t = P_t - O_t = x_t \cdot \mathbf{i}_t + y_t \cdot \mathbf{j}_t + f \cdot \mathbf{k}_t \quad (3.3)$$

$$= \begin{pmatrix} v_{tx} \\ v_{ty} \\ v_{tz} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{v}_{t-1} = P_{t-1} - O_{t-1} = x_{t-1} \cdot \mathbf{i}_{t-1} + y_{t-1} \cdot \mathbf{j}_{t-1} + f \cdot \mathbf{k}_{t-1} \quad (3.5)$$

$$= \begin{pmatrix} v_{t-1x} \\ v_{t-1y} \\ v_{t-1z} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

また、時刻 $t-1$ から t の作業員の移動を表すベクトル \mathbf{d}_t を、次のように定義する。

$$\mathbf{d}_t = O_t - O_{t-1} \quad (3.7)$$

$$= \begin{pmatrix} d_{tx} \\ d_{ty} \\ d_{tz} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

以上のパラメータから、自然マーカ M の3次元位置 M_p は、次のように表せる。

$v_{t-1x}v_{ty} - v_{tx}v_{t-1y} \neq 0$ のとき

$$M_p = O_t + \frac{d_{tx}v_{ty} - v_{tx}d_{ty}}{v_{t-1x}v_{ty} - v_{tx}v_{t-1y}} \cdot \mathbf{v}_t \quad (3.9)$$

$$= O_{t-1} + \frac{d_{tx}v_{t-1y} - v_{t-1x}d_{ty}}{v_{t-1x}v_{ty} - v_{tx}v_{t-1y}} \cdot \mathbf{v}_{t-1} \quad (3.10)$$

$v_{t-1x}v_{ty} - v_{tx}v_{t-1y} = 0$ かつ $v_{t-1y}v_{tz} - v_{ty}v_{t-1x} \neq 0$ のとき

$$M_p = O_t + \frac{d_{ty}v_{tx} - v_{ty}d_{tz}}{v_{t-1y}v_{tz} - v_{ty}v_{t-1x}} \cdot \mathbf{v}_t \quad (3.11)$$

$$= O_{t-1} + \frac{d_{ty}v_{t-1z} - v_{t-1y}d_{tz}}{v_{t-1y}v_{tz} - v_{ty}v_{t-1x}} \cdot \mathbf{v}_{t-1} \quad (3.12)$$

$$v_{t-1x}v_{ty} - v_{tx}v_{t-1y} = 0 \text{ かつ } v_{t-1y}v_{tz} - v_{ty}v_{t-1x} = 0 \text{ のとき}$$

$$M_p = \infty \quad (3.13)$$

(自然マーカ M が無限遠方に存在することを意味する)

以上の計算を用いて、時刻 t における、自然マーカの 3 次元位置を求める。

作業員の位置推定方法

以上の 4 つの要素技術を用いて、視界画像中に捉えた人工マーカと自然マーカから作業員の 3 次元位置を推定する。

視界画像中に捉えるマーカの種類によって、表 3.2 に示すような 8 つの状態があり、作業員の位置を常に推定するためには、これらの状態において作業員の位置推定が可能である必要がある。各状態での作業員の位置推定の処理を表 3.3 に示す。

表 3.2: 視界画像のマーカの状態

状態	人工マーカ	自然マーカ	
		未知の自然マーカ	既知の自然マーカ
状態 A		×	×
状態 B			×
状態 C		×	
状態 D			
状態 E	×	×	
状態 F	×		
状態 G	×		×
状態 H	×	×	×

...存在する、×...存在しない

状態 A は、人工マーカのみを視界画像に捉えた状態で、システムを使用する際の初期状態である。この状態での位置推定の方法は、(1) の人工マーカを用いた作業員の位置推定の方法で行う。また、(2) の自然マーカの抽出を行い、得られたマーカを未知の自然マーカとする。

表 3.3: 各状態における作業員の位置推定方法

<p>人工マーカを用いた位置推定</p> <p>↓</p> <p>自然マーカの抽出</p>	<p>人工マーカを用いた位置推定</p> <p>↓</p> <p>自然マーカの抽出</p> <p>↓</p> <p>未知の自然マーカの位置推定</p>	<p>人工マーカを用いた位置推定</p>	<p>人工マーカを用いた位置推定</p> <p>↓</p> <p>自然マーカの抽出</p> <p>↓</p> <p>未知の自然マーカの位置推定</p>
<p>状態 A</p>	<p>状態 B</p>	<p>状態 C</p>	<p>状態 D</p>
<p>既知の自然マーカを用いた位置推定</p>	<p>既知の自然マーカを用いた位置推定</p> <p>↓</p> <p>自然マーカの抽出</p> <p>↓</p> <p>未知の自然マーカの位置推定</p>	<p>エラーメッセージを出す</p>	<p>エラーメッセージを出す</p>
<p>状態 E</p>	<p>状態 F</p>	<p>状態 G</p>	<p>状態 H</p>

状態 B は、人工マーカと未知の自然マーカを視界画像に捉えた状態であり、状態 A から遷移した状態である。この状態では、作業員の位置を人工マーカを用いて推定する。また、(4) の未知の自然マーカの位置推定を用いて、未知の自然マーカの 3 次元位置を求める。

状態 C および状態 D は、既知の自然マーカと人工マーカを視界画像に捉えた状態である。この状態では、既知の自然マーカを用いて作業員の位置を推定する方法より、マーカの正確な情報をもつ人工マーカを用いる方法の方が推定する位置の精度が高いため、(1) の人工マーカを用いて作業員の位置を推定する。また、状態 D では、(4) の未知の自然マーカの位置推定を用いて、未知の自然マーカの 3 次元位置を求める。

状態 E および状態 F では、既知の自然マーカを視界画像に捉え、人工マーカは捉えていない状態である。この状態では、(3) の既知の自然マーカを用いた位置推定を用いて作業員の位置を推定する。また、状態 F では、(4) の未知の自然マーカの位置推定を用いて、未知の自然マーカの 3 次元位置を求める。

状態 G では、視界画像に既知の自然マーカと人工マーカの両方のマーカを捉えていないため、作業員の位置を求めることができない。また、作業員の 3 次元位置などが不明のため、未知の自然マーカを既知の自然マーカにできない。そのため、この状態以後は、作業員の位置を推定することは不可能であるため、作業員に警告を与え、状態 A の初期状態に戻すように促す。

状態 H では、視界画像にマーカを捉えていないため、作業員の位置を求めることができない。そのため、状態 G と同様に、作業員に警告を与え、状態 A の初期状態に戻すように促す。

本システムでは、まず、人工マーカのみを捉えた状態 A から始め、状態 B に遷移する。その後、状態 A から状態 F までの遷移を繰り返しながら、作業員の位置をリアルタイムに推定する。また、状態 G および状態 H になると作業員に警告を与え、状態 A に戻るよう促す。

3.5 通信機能

現場監督と作業員との通信機能は、現場での作業の支障にならないことが求められるため、無線を用いた通信を行う。無線で通信を行う方法には、PHS (Personal Handyphone System) や赤外線通信、Bluetooth、無線 LAN がある。しかし、PHS や赤外線通信、Bluetooth は、通信速度が遅く、画像の送受信を頻繁に行う本システムに向かない。そ

ここで、無線 LAN を利用して、通信を行う。現場監督と作業員との間では、図 3.19 に示すように視界画像と情報画像の 2 つの画像と、それに付随するデータの通信を行う。

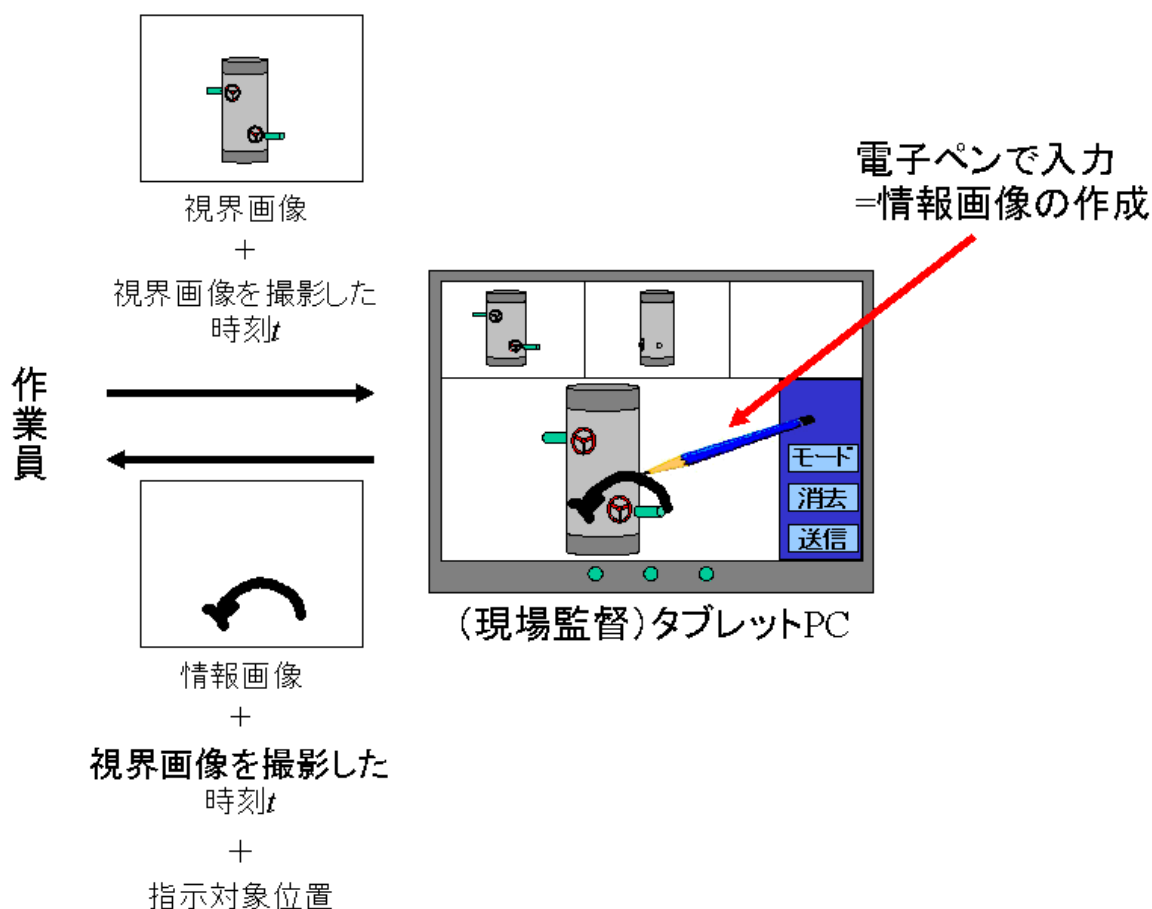


図 3.19: 現場監督と作業員との画像の送受信

作業員から現場監督に送信された視界画像は、現場監督が携帯してるタブレット PC に表示する。タブレット PC の画面は、図 3.20 に示すように、複数の作業員を同時に監視できるように、複数の視界画像を同時に表示する小さな監視用画面と、作業指示を書き込むことができる作業指示用画面から構成される。監視用画面は、作業員をリアルタイムに監視できるように、視界画像が更新される。作業指示用画面には、監視モードと作業指示モードの 2 つのモードがある。監視モードでは、監視用画面に表示されている視界画像の中から 1 つの画像を拡大して表示する。この視界画像は、リアルタイムに更新され、現場監督が大きな視界画像で監視できる。一方、作業指示モードは、作業員 1 名に対して視界画像上に電子ペンで情報画像を作成し、作業指示を行う。このとき、作業指示をしている最中に、作業員が移動し視界画像が変化すると、現場監

督は文字や記号を電子ペンで入力することが難しくなる。そこで、作業指示モードに移った瞬間の視界画像が静止画として作業情報画面に表示される。また、このとき、現場監督が書き込んだ指示は、視界画像中のどの部分を対象に書き込まれた情報であるかを明確にするため、視界画像中の対象の位置（指示対象位置）を電子ペンで入力するようにする。現場監督は情報画像の作成が書き終わり、送信ボタンを押すと、情報画像と情報画像中の指示対象位置の2次元座標を作業員へ送信する。

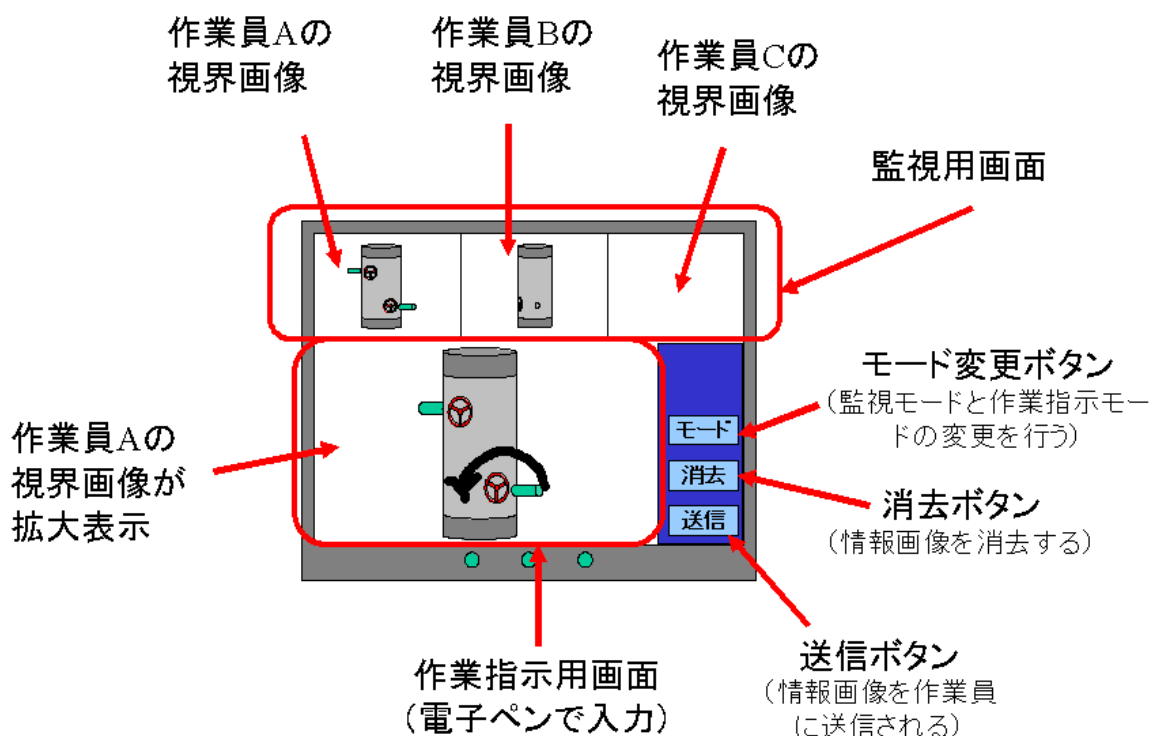


図 3.20: 現場監督が携帯するタブレットPCの画面

現場監督から作業員へ送信された情報画像は、3.6の指示対象の位置推定機能で処理され、3.7の情報提示機能を通じて作業員に表示される。

3.6 指示対象位置の位置推定機能

現場監督からの作業指示は、送信された情報画像を指示対象位置の上に表示することで行う。このとき、現場監督からの指示対象位置の情報は、3.5で述べたように、視界画像の2次元座標であり、別の角度から指示対象位置を見たときに、図3.21に示すようにズレが生じてしまう。そのため、指示対象位置の3次元位置を求める必要がある。

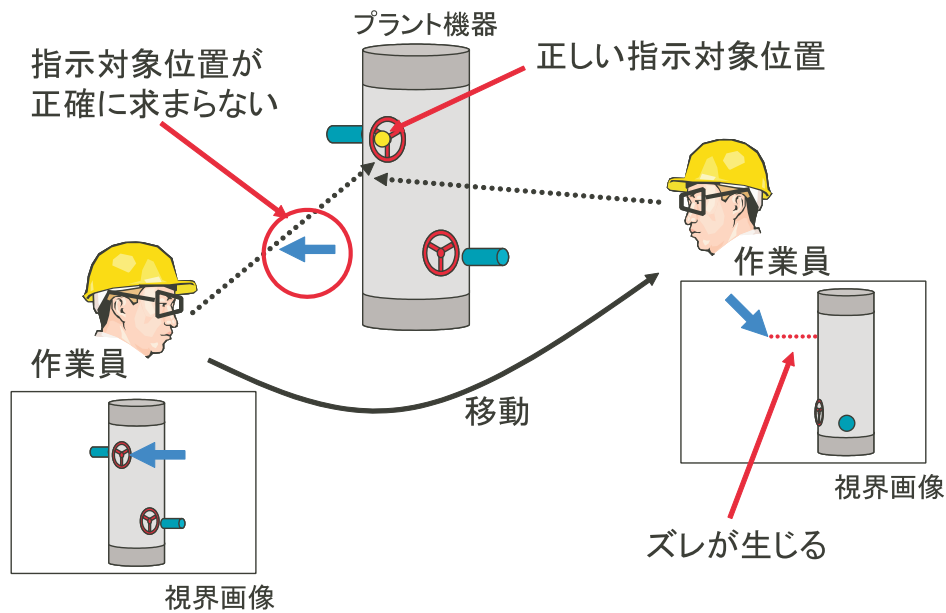


図 3.21: 2次元座標を用いた指示対象位置

指示対象位置の3次元位置を求める方法としては、3.4.3の「自然マーカの3次元位置の取得」で述べたように、1枚の画像から計算によって3次元位置を求めることは不可能であり、「自然マーカの3次元位置の取得」では2枚の画像を用いて3次元位置を求める。

一般的に、2枚の画像を処理して3次元位置を求める際、例えば、図3.22に示すように画像A中の領域1に相当する部分が画像B中のどの部分にあたるかを検索し、2枚の画像中における領域1の座標の関係を正確に求める必要がある。「自然マーカの3次元位置の取得」では、領域の検索方法として、自然マーカを抽出して領域となる候補を求め、その候補の中から検索を行って自然マーカの一対一関係を求める。そのため、マーカの数だけ検索を行うだけで、一対一関係を求めることができる。

しかし、指示対象位置の3次元位置を求める際、指示対象位置は自然マーカ上にあるとは限らないため、2枚の視界画像中で指示対象位置を検索する範囲は画像全体となる。そのため、処理時間が大幅に必要になりリアルタイムで実現することが難しくなる。

そこで、本研究では、視界画像中の3次元位置が既知の自然マーカを用いて指示対象位置の位置推定を行うことにする。視界画像中の自然マーカは物体の角を示しており、自然マーカの中で3次元位置が既知のマーカから3次元空間中の物体の3次元形状を大まかに求めることができる。一般的に、指示対象位置は物体の表面を指し示す

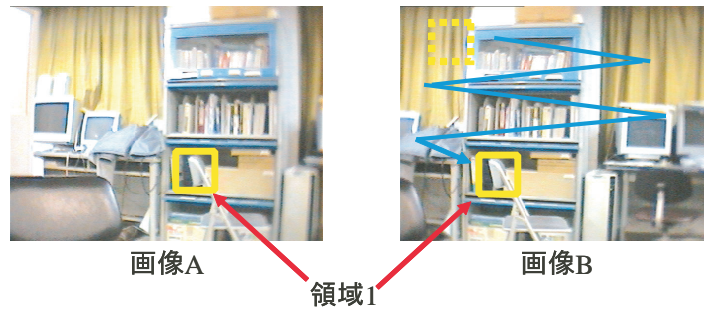


図 3.22: 2枚の画像の対応関係

ことから、この3次元形状によって得られる3次元平面上に指示対象位置が存在する。また、作業員の位置、視線方向と視界画像中の指示対象位置の2次元座標から、3次元空間中における作業員と指示対象位置を結ぶ直線を求めることができる。この直線上に、指示対象位置が存在することになる。以上より、図 3.23 に示すように、自然マーカによって求めた平面と、作業員の位置と指示対象位置の2次元座標から求めた直線の交点が指示対象位置と推定できる。

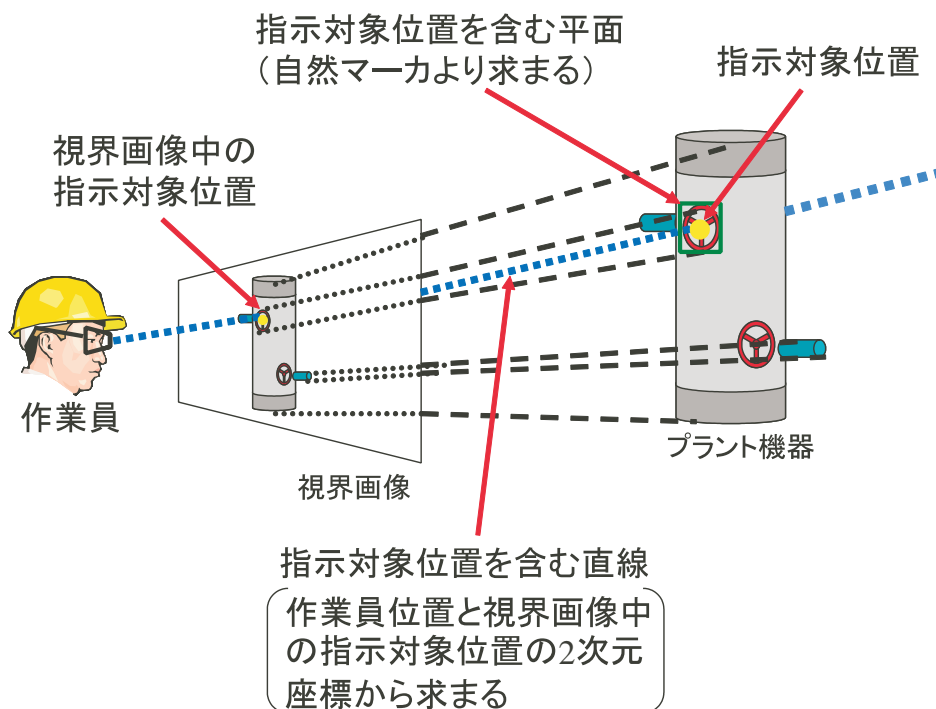


図 3.23: 指示対象位置を含んだ直線と平面から求める指示対象位置の位置推定

しかし、この方法では、全ての自然マーカから3次元形状を導き、平面を計算するた

め、膨大な量の計算を行う必要があり、処理時間がかかってしまう。そこで、本研究では、この方法を簡単化し、直線に最も近い自然マーカを求め、その自然マーカの近辺に指示対象位置があると仮定し、自然マーカの位置と作業員との位置との距離をもとに指示対象の3次元位置を求ることにする。これにより、視界画像中のマーカを検索する処理と計算だけで実現できるため、処理時間が短く、リアルタイムで実現できる。

時刻 t の視界画像 Img_t をもとに、現場監督が情報画像 Ifm_t を作成し、そのときの指示対象位置の2次元座標 $\vec{S}_t = (x_t, y_t)$ であるときの、指示対象位置の位置推定機能の概要を図 3.24 に示し、処理の流れを図 3.25 に示す。まず、3次元直線の取得で、作業員の3次元位置から、 Img_t にある指示対象位置の点の3次元位置 S_t^{img} を求め、作業員の位置と S_t^{img} との関係から空間中における直線 L を求める。この直線 L は、指示対象位置の3次元位置 S_t を通る直線となる。そして、自然マーカの検索で、 Img_t 中で抽出された自然マーカの集合 M_t の中で3次元位置が既知であり、直線 L との距離が最小のマーカ m_t を求める。最後に、指示対象位置の3次元位置推定で、直線 L とマーカ m_t から指示対象位置の3次元位置を推定する。

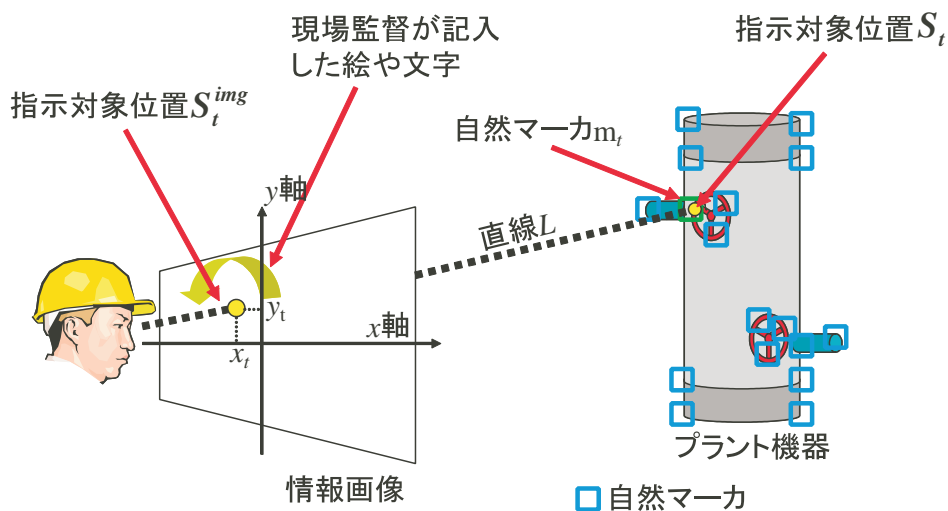


図 3.24: 指示対象位置の位置推定機能の概要

以下で、各処理について説明する。

3次元直線の取得

視界画像 Img_t にある指示対象位置の点 $\vec{S}_t = (x_t, y_t)$ の、3次元空間における3次元座標 S_t^{img} を、次のようにして求める。

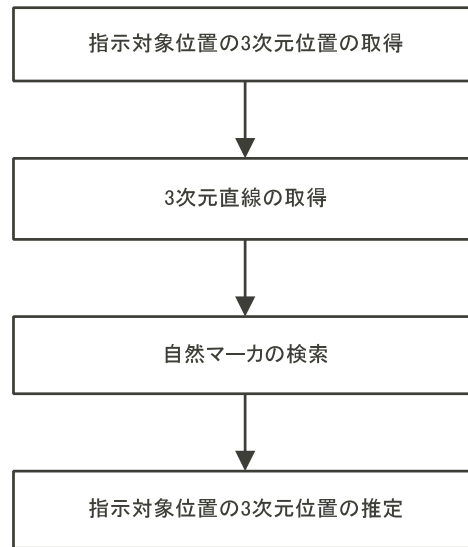


図 3.25: 指示対象位置の位置推定機能の処理の流れ

作業員の3次元位置が $O_t = (o_{tx}, o_{ty}, o_{tz})$ 、視線方向の3次元ベクトルを k_t とし、 Img_t の x 方向、 y 方向の3次元ベクトルをそれぞれ i_t 、 j_t とする。このとき、 S_t^{img} は、カメラの焦点距離 f を用いて、

$$S_t^{img} = O_t + x_t \cdot i_t + y_t \cdot j_t + f \cdot k_t \quad (3.14)$$

となる。

これより、作業員の位置 O_t と S_t^{img} を結ぶ直線 L の式は、

$$\frac{x - o_{tx}}{\alpha} = \frac{y - o_{ty}}{\beta} = \frac{z - o_{tz}}{\gamma} \quad (3.15)$$

となる。ただし、

$$S_t^{img} - O_t = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

とする。

自然マーカの検索

視界画像 Img_t 中の自然マーカ M_t の中で、直線 L と距離 d が短いマーカを検索して求める。

式 (3.15) のように求めた直線 L と 3 次元位置を $M_{ti} = (x_m, y_m, z_m)$ とする自然マーカ M_t の距離 d_l は、次のように求める。

$$d_l = \sqrt{(O_{tx} + k\alpha - x_m)^2 + (O_{ty} + k\beta - y_m)^2 + (O_{tz} + k\gamma - z_m)^2} \quad (3.17)$$

ただし、

$$k = \frac{\alpha(x_m - O_{tx}) + \beta(y_m - O_{ty}) + \gamma(z_m - O_{tz})}{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} \quad (3.18)$$

このようにして求めた距離 d_l が M_t の中での最小となるマーカを、指示対象位置に最も近いマーカ m_t とする。

指示対象位置の 3 次元位置の推定

前の過程で得られたマーカ m_t と直線 L の関係から、指示対象位置の 3 次元位置を推定する。

このとき、マーカ m_t の近辺に指示対象位置がある仮定しているため、作業員と指示対象位置との距離 d は、作業員とマーカ m_t との距離 d_{m_t} とほぼ等しいと仮定することができる。これより、直線 L 上で、作業員の位置からマーカ m_t の方向に距離 d_{m_t} 離れた 3 次元位置を指示対象位置の 3 次元位置 $S = (x_S, y_S, z_S)$ とする。すなわち、式 (3.19) を用いて、3 次元位置の推定を行う。

$$S = O_t + d_{m_t} \left(\frac{S_t^{img} - O_t}{\|S_t^{img} - O_t\|} \right) \quad (3.19)$$

3.7 情報提示機能

現場監督からの作業指示を、作業員に表示する。このとき、3.4 で求めた作業員の 3 次元位置と、3.6 で求めた指示対象位置の 3 次元位置から、3 次元空間内での位置の相対関係を計算し、情報画像が対象上に重畳して表示するように作業員に HMD に表示をする。

ここでの処理の流れを、図 3.26 に示す。以下では、処理の流れに沿って各処理を説明する。

座標計算

ここでの処理は、各機能で求めた作業員の 3 次元位置と指示対象位置の 3 次元位置から、作業員から見た指示対象の位置を計算する。位置の計算は、3 次元グラフィック

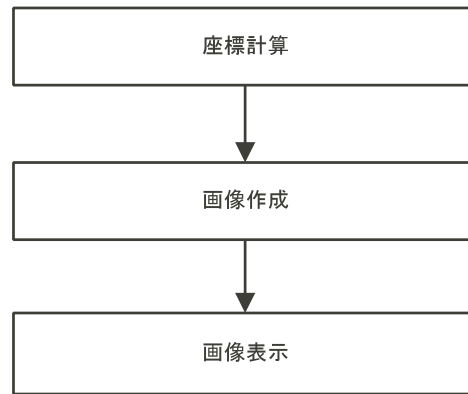


図 3.26: 情報提示機能の処理の流れ

ライブラリーである OpenGL を使用して行えるため、これを利用する。

画像作成

ここでは、HMD に表示するための画像を作成する。座標計算によって求めた位置に情報画像中の指示対象位置が重なるように、情報画像を合成して、作業員に表示するための画像を作成する。

作業員は、光学シースルー HMD を装着し、HMD を通じて現実空間を見ている。そのため、HMD のディスプレイの表示が明るいと、眩しくなり現実世界が見づらくなってしまう。そこで、背景は黒色とし、黒色の画像に情報画像を合成して画像を作成する。

画像表示

ここでは、画像作成で作成した画像を実際に HMD に表示する。HMD に表示した画面を、図 4.8 に示す。

3.8 まとめ

本章では、次世代原子力プラントの定期点検時において、保守作業の現場での現場監督と作業員とのコミュニケーションを拡張現実感を用いて支援する保守作業支援システムの設計について述べた。

まず、次世代原子力プラントで想定される定期点検時の保守体制について述べた。

次に、現場監督と作業員とのコミュニケーションを支援する保守作業支援システムの概要について述べ、このシステムを実現するために必要な、1. 作業員の位置推定機

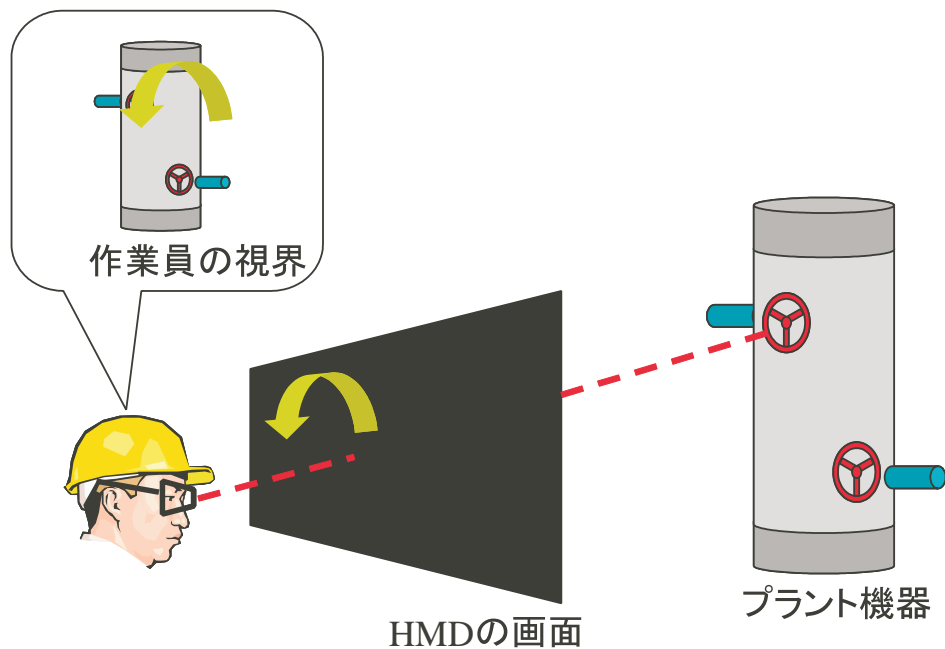


図 3.27: HMD の表示画面

能、2. 通信機能、3. 指示対象位置の位置推定機能、4. 情報表示機能、5. データベース連携機能の5つの機能について述べ、本研究では、1を中心に研究を進め、1から4の機能をもつ支援システムを構築することについて述べた。

次いで、現場監督と作業員がシステムを使用する際に必要となるハードウェアについて述べた。

そして、本システムの各機能の設計について述べた。

1. 作業員の位置推定機能では、視界画像に自然マーカと人工マーカを捉え、これを画像処理することで位置推定を行う。このとき、視界画像中のマーカの移動が、作業員の移動によるものか、周囲環境の変化によるものかを判別するため、作業員の頭部に装着した加速度センサとジャイロセンサを用いてマーカを選別することにした。

2. 通信機能では、現場監督と作業員との通信手段として無線LANを使用することにした。また、現場監督が携帯するタブレットPCの画面は、複数の作業員の視界画像が表示される監視用画面と、視界画像上の作業指示が記入できる作業指示用画面の2つの画面から構成するようにした。

3. 指示対象位置の位置推定機能では、情報画像を重畳表示する位置である指示対象位置は自然マーカの近辺にあると仮定し、自然マーカの位置から指示対象位置の3次元位置を求めるようにした。

4. 情報提示機能では、1で求めた作業員の3次元位置と3で求めた指示対象位置の3次元位置から、作業員が装着しているHMDに表示する画像を作成し、表示するようにした。

以上のような4つの機能の設計をもとに、次章で各機能を開発し、試作システムを構築する。

第 4 章 保守作業支援システムの開発

本章では、3章で述べた4つの機能の設計をもとに、具体的な各機能の開発方法について述べる。次いで、開発した各機能を利用し、試作したシステムについて述べる。

4.1 作業員の位置推定機能の開発

本節では、3.4節で述べた作業員の位置推定機能の開発方法について述べる。まず、作業員の位置推定機能の開発方法の概要を述べ、次いで機能を実現するために必要な各処理について述べる。

4.1.1 開発の概要

作業員の位置推定機能では、表3.2の8つの状態の中で、まず、人工マーカのみを捉えた状態Aから始め、状態Bに遷移する。その後、状態Cから状態Fまで遷移しながら、作業員の位置推定を行う。作業員の位置推定機能の処理を、図4.1に示す。次項から、時刻 t における各処理部について説明する。なお、本研究では、求める作業員の3次元位置を小型CCDカメラの位置とする。

4.1.2 画像取得部

小型CCDカメラからの映像は、映像ライブラリであるMicrosoft Direct XのDirect Showを用いて静止画 Img_t としてキャプチャし、システムに取り込む。取り込まれた静止画は、大きさが320pixel × 240pixelのカラー画像である。1pixelごとの画素の色は、赤色(R)、緑色(G)、青色(B)をそれぞれ0から255までの256段階で表し、3つの色の配色で表現している。例えば、黒色は $(R, G, B) = (0, 0, 0)$ であり、白色は $(R, G, B) = (255, 255, 255)$ 、赤色は $(R, G, B) = (255, 0, 0)$ で表現される。

画像 Img_t は、視界画像として視界画像データベースに取り込まれた時刻 t とともに記録するとともに、次の自然マーカ抽出部に送られて処理する。視界画像データベースに記録した視界画像 Img_t は、指示対象位置の位置推定機能と通信機能で使用する。

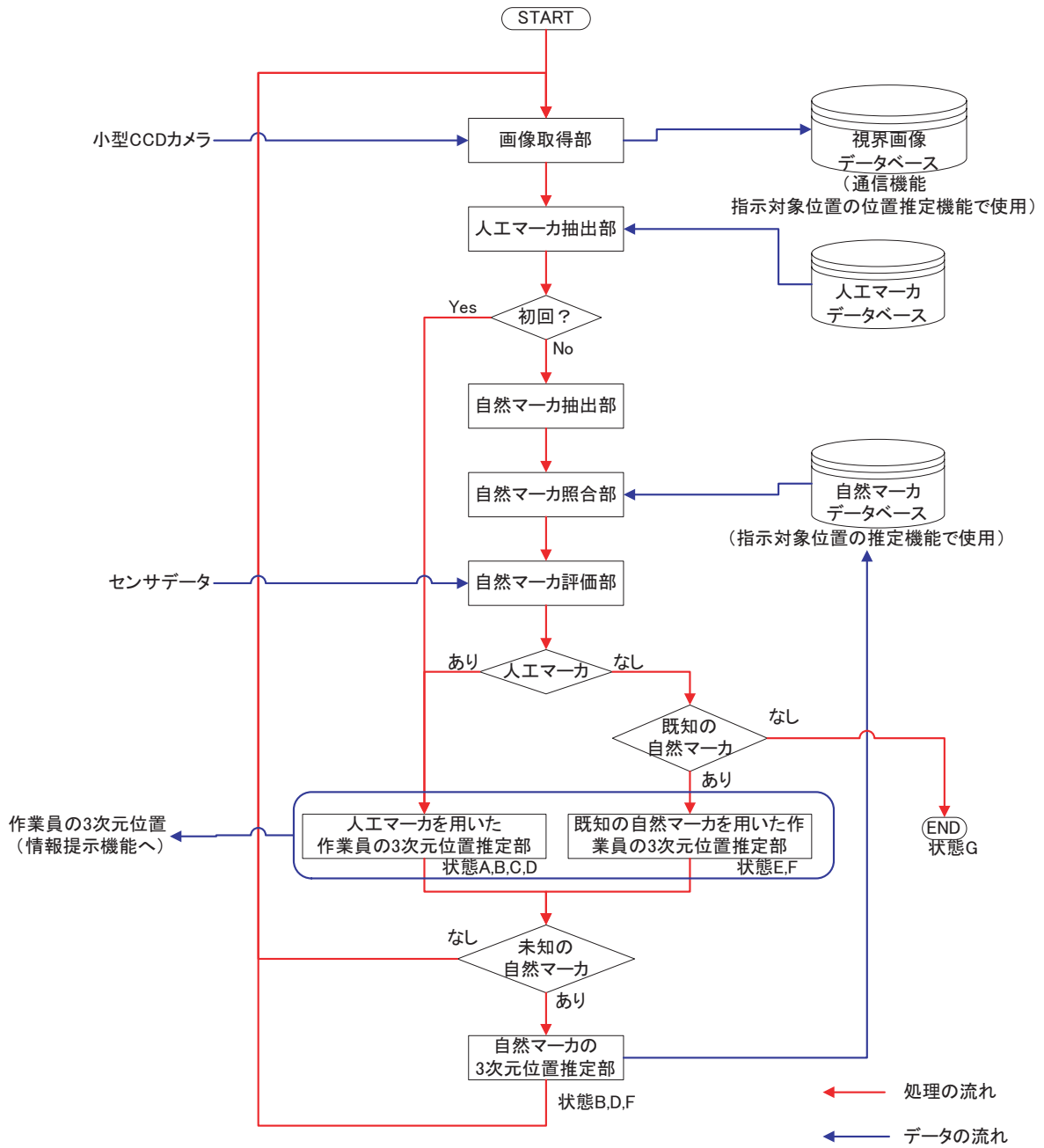


図 4.1: 作業員の位置推定機能の処理

4.1.3 人工マーカ抽出部

視界画像 Img_t の中に、人工マーカが含まれているかを調べる。プラント機器に貼られている人工マーカの情報は、事前に作成した人工マーカデータベースに登録されている。このデータベースをもとに、AR tool kit を用いて視界画像中の人工マーカを検索する。

視界画像中に人工マーカがあれば、そのマーカの大きさ、形状などのデータと3次元位置の情報を取得し、4.1.7の人工マーカを用いた作業員の3次元位置推定部の処理へ向かう。

視界画像中に人工マーカが無ければ、4.1.8の既知の自然マーカを用いた作業員の3次元位置推定部で処理を行う。

4.1.4 自然マーカ抽出部

視界画像 Img_t を、まずモノクロ化する。モノクロ化は、各画素の赤色 (R)、緑色 (G)、青色 (B) を値を以下の式^[13]を用いて計算する。

$$0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (4.1)$$

次に、Harris オペレータを用いて画像処理を行い、マーカとなる領域を閾値を設定して抽出する。このとき、抽出する領域の数が多い場合、自然マーカ照合部などで処理時間が大幅に必要なになってしまう。逆に、抽出する領域の数が少ない場合、作業員の動きによって視界画像中からマーカが消失し、作業員の位置推定ができなくなる。そこで、抽出マーカの数あらかじめ定めた範囲内になるように閾値を設定し、その条件を満たさない場合は、閾値を変えて、再度 Harris オペレータを用いて抽出を行う。本システムでは、抽出するマーカの数 n の範囲を、経験上 $80 \leq n \leq 120$ とした。

その後、ラベリング処理を行い、個々のマーカに分け、自然マーカの集合 M_t とする。

4.1.5 自然マーカ照合部

自然マーカデータベースに登録している時刻 $t-1$ の視界画像 Img_{t-1} 中のマーカ M_{t-1} と M_t において、マーカを中心にテンプレートを作成しマッチングを行う。マッチングの方法としては、作業員の頭の動きを考慮して、テンプレートの拡大・縮小、回転に対応した「方向ヒストグラムの自己回帰モデルに基づく回転不変画像照合」^[14]を用いて行う。この方法を用いて、 M_t と M_{t-1} の類似度を求め、類似度の最も大きな値のマー

カ同士が対応しているマーカであるとする。また、この類似度は、作業員の3次元位置推定部で、マーカの選別に使用する。なお、作成するテンプレートの大きさは、経験上11pixel × 11pixelとした。

4.1.6 自然マーカ評価部

後述するように、作業員は、加速度センサとジャイロセンサを取り付けた安全ヘルメットを装着し、マイコンを携帯している。加速度センサとジャイロセンサは作業員の頭の動きを測定し、得られたデータをマイコンで処理して、作業員の移動方向を求める。

加速度センサは、物体の移動時の加速度を測定できるセンサで、本研究では3軸加速度センサを利用し、作業員が前後・左右・上下に移動したときの加速度を測定する。また、ジャイロセンサは、物体の回転する角加速度を測定できるセンサであり、本研究では、1軸のジャイロセンサを3つ取り付け、頭を前後に倒す、左右に傾ける、左右に回すの3つの回転角加速度を測定する。加速度センサやジャイロセンサから得られたデータは、マイコンを用いて積分演算を行って、作業員の頭を移動させた方向や回転させた方向を求める。積分演算は、作業員が携帯しているウェアラブルコンピュータでも行うことができるが、センサからのデータは一定時間間隔ごとに正確に処理する必要があり、負荷が大きい処理であるため、マイコンで行う。そして、得られた結果から視界画像中のマーカの移動方向 \vec{d}_s を求める。

作業員の頭を移動させた方向や回転させた方向と視界画像中のマーカの移動方向との関係は表4.1に示すようになると考えられる。このとき、例えば、作業員が右に進みながら頭を左に向ける動作を行うときは視界画像中のマーカの移動方向が打ち消しあい、変化がないと考える。

その後、視界画像中で時刻 $t - 1$ から t の間に M_{t-1} から M_t に移動した方向 \vec{d}_i を求め、 \vec{d}_s と比較し、一致しないものは、マーカの移動が作業員の移動を反映していないため、マーカを M_t の中から排除する。

4.1.7 人工マーカを用いた作業員の3次元位置推定部

4.1.3の人工マーカ抽出部で、人工マーカが視界画像 Img_t の中にあった場合、AR tool kit を用いて、作業員の3次元位置を推定する。

この処理部は、表3.2の8つの状態の中で、状態A、B、C、Dにおいて作業員の位

表 4.1: 作業員の移動方向と視界画像中の自然マーカの移動方向の関係

作業員の移動方向 (センサ類のデータ)		視界画像中の自然マーカの移動方向
平行移動	前に進む	変化なし
	後ろに進む	変化なし
	右に進む	左方向に移動
	左に進む	右方向に移動
	上に移動	下方向に移動
	下に移動 (しゃがむ)	上方向に移動
回転移動	右にかしげる	画像の中央を中心に左回転
	左にかしげる	画像の中央を中心に右回転
	前に倒す	下方向に移動
	後ろに倒す	上方向に移動
	右を向く	左方向に移動
	左を向く	右方向に移動

置推定を行う。

4.1.8 既知の自然マーカを用いた作業員の3次元位置推定部

自然マーカ M_{t-1} の中の、既知の自然マーカ M_{t-1}^k を用いて作業員の位置推定を行う。 M_{t-1}^k の中で、 M_t とのマッチングで得た類似度の大きいマーカを4つ選び出す。その後、マーカの3次元位置と、 Img_t 中の2次元座標から AR tool kit を用いて作業員の位置を計算する。

この処理部は、表 3.2 の8つの状態の中で、状態 E、F において作業員の位置推定を行う。

4.1.9 自然マーカの位置推定部

自然マーカ M_{t-1} の中で未知の自然マーカ M_{t-1}^u の3次元位置を求める。これは、視界画像 Img_{t-1} 中の M_{t-1}^u の2次元座標と、 Img_t 中の2次元座標を用いて、3.4.3 で述べた計算を行うことで、自然マーカの3次元位置を求める。

その後、 M_t は、自然マーカデータベースに記録しておく。

4.2 通信機能の開発

現場監督と作業員は、無線 LAN を用いて通信を行う。その際、必要となる通信機能の処理を、図 4.2 に示す。以下では、この機能を、大まかに、作業員の視界画像の送信、現場監督の監視および作業指示の書込み、作業員の情報画像の受信の 3 つの部分に分けて説明する。

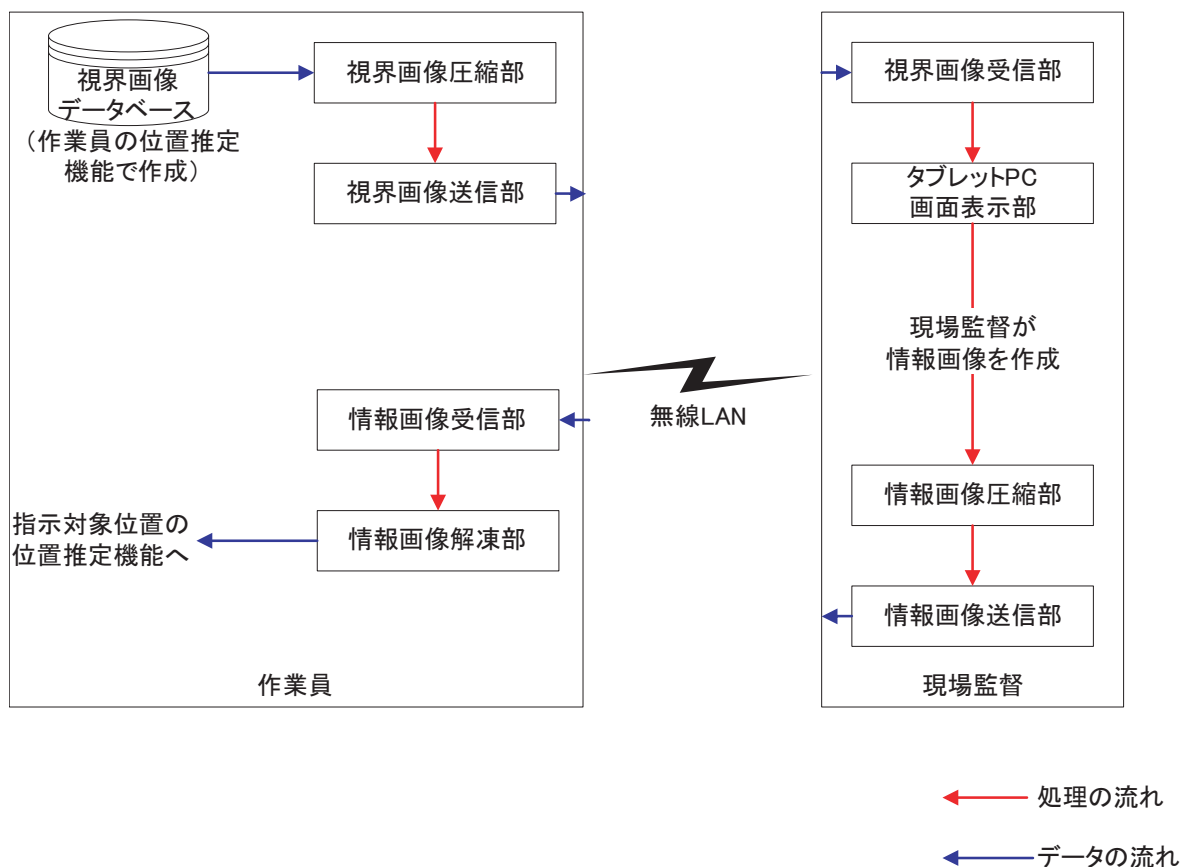


図 4.2: 通信機能の処理

4.2.1 作業員の視界画像の送信

この部分では、作業員の視界画像を圧縮して、現場監督に送信する。

まず、視界画像圧縮部で、作業員の視界画像が記録されている視界画像データベースから作業員の最新の視界画像 Img_t を取得し、現場監督に送信する際の通信負荷を低減するために、視界画像 Img_t を JPEG 圧縮し、画像のデータ量を小さくする。その後、視界画像送信部で、圧縮された Img_t と、その画像を撮影した時刻 t を通信プロトコル

TCP/IP で送信する。

4.2.2 現場監督の監視および作業指示の書込み

この部分では、作業員から送信された視界画像を受信し、現場監督が携帯しているタブレットPCの画面上に表示する。そして、現場監督が作業指示を文字や絵で表し、情報画像を作成し、作業員に送信する。

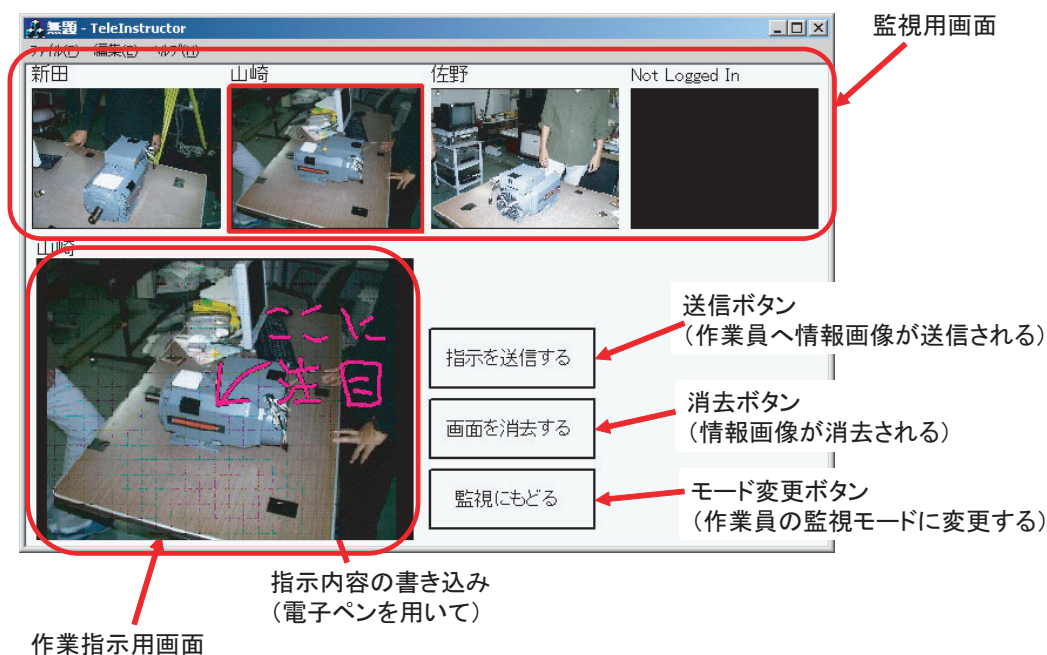


図 4.3: タブレット PC の画面構成

まず、視界画像受信部で、作業員から送信された視界画像 Img_t と Img_t を撮影した時刻 t を受信する。そして、タブレット PC 画面表示部で、タブレット PC 上に Img_t を表示する。

タブレット PC 上の画面構成を図 4.3 に示す。監視用画面では、複数の作業員の視界画像が表示されている。また、作業指示用画面は作業の指示を書き込むための画面である。作業指示を出したい作業員の監視用画面を電子ペンで触れると、触れた瞬間の監視用の視界画像が作業指示画面に拡大表示される。そして、現場監督は、作業指示画面に電子ペンで文字や絵を書き込む。このとき、視界画像中のどの部分に対して指示を書き込んだかが分かるように、電子ペンで指示対象を右クリック* して指定し、指

* 電子ペンに取り付けられたボタンを押しながら画面を指し示す

定した位置を指示対象位置とする。その後、書込みが終了し、現場監督が送信ボタンを押すと情報画像圧縮部での処理が始まる。情報画像圧縮部では、視界画像上に書き込まれた文字や絵を視界画像 Img_t と分離し、情報画像 Ifm_t を作成する。現場監督による入力の様子を図 4.4 に示す。



図 4.4: タブレット PC による入力作業

その後、 Ifm_t を JPEG 圧縮する。そして、情報画像送信部で、圧縮された Ifm_t と、 Ifm_t を書き込んだ視界画像を撮影した時刻 t 、指示対象位置の 2 次元座標 \vec{S}_t を送信する。

4.2.3 作業員の情報画像の受信

この部分では、現場監督から送信された情報画像を受信する。

まず、情報画像受信部で、現場監督から送信された情報画像 Ifm_t と、視界画像の撮影した時刻 t 、指示対象位置の 2 次元座標 \vec{S}_t を受信する。その後、情報画像解凍部で、圧縮された情報画像を解凍する。そして、元に戻した情報画像は、 t とともに指示対象位置の位置推定機能に送る。

4.3 指示対象位置の位置推定機能の開発

通信機能から得られる情報画像から指示対象位置の 3 次元位置を求めるための処理を、図 4.5 に示す。

通信機能から取得した時刻 t のときの視界画像 Img_t に対して、現場監督が情報画像 Ifm_t を作成し、そのときの画像中の指示対象位置を \vec{S}_t とする。このとき、まず、3 次元直線取得部で、時刻 t における作業員の位置 O_t と \vec{S}_t から、3 次元空間内で指示対象

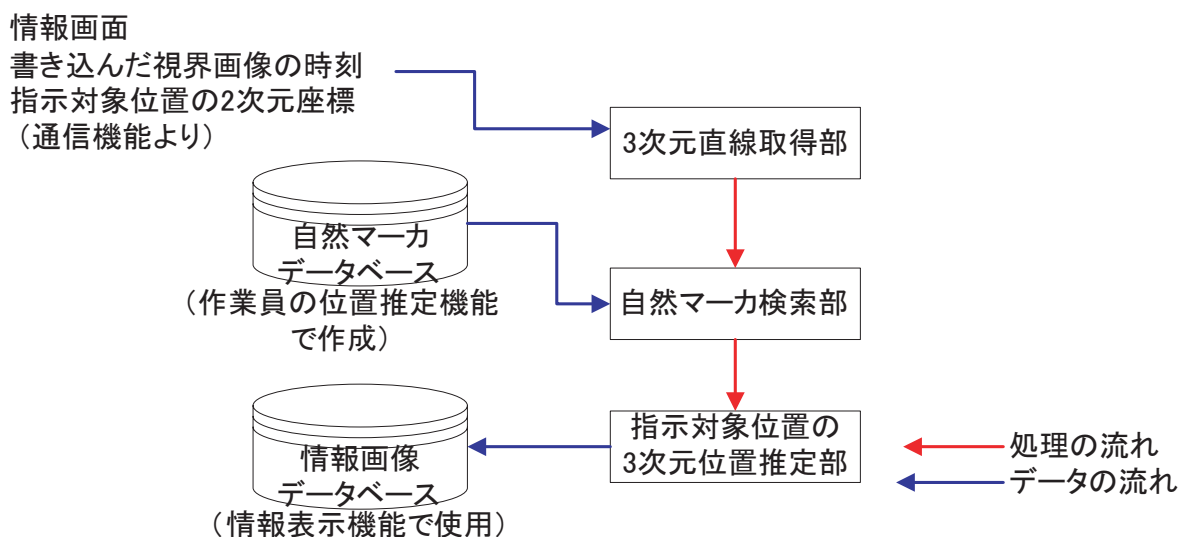


図 4.5: 指示対象位置の位置推定機能の処理部

位置の3次元位置 S_t を通る直線 L を求める。次に、自然マーカ検索部で、時刻 t に抽出された自然マーカ M_t の中から、直線 L との距離が最も小さいマーカを検索し、 m_t とする。そして、指示対象位置の3次元位置推定部で、自然マーカ m_t と作業員との距離から、指示対象位置の3次元位置 S_t を求める。

以下で、それぞれの部分について説明する。

4.3.1 3次元直線取得部

通信機能によって得られた、視界画像中の指示対象位置を2次元座標 \vec{S}_t から、視界画像における指示対象位置の3次元位置 S_t^{img} を計算する。図 4.6 に示すように、作業員の3次元位置 O_t と、視線方向 k_t 、視界画像中の x 軸の3次元ベクトル i_t 、 y 軸の3次元ベクトル j_t とする。これらから、小型 CCD カメラの焦点距離 f を用いて S_t^{img} を計算する。その後、 S_t^{img} と O_t から、3次元空間内の直線 L を計算する。このようにして求めた直線 L は、3次元空間中にある指示対象位置を通る。具体的な計算方法は、3.6 で述べた方法で行う。

ここで求めた直線 L は、次の自然マーカ検索部で使用する。

4.3.2 自然マーカ検索部

時刻 t の視界画像中の自然マーカ M_t と3次元直線取得部で取得した直線 L との距離を求め、最も小さい値のマーカを検索する。

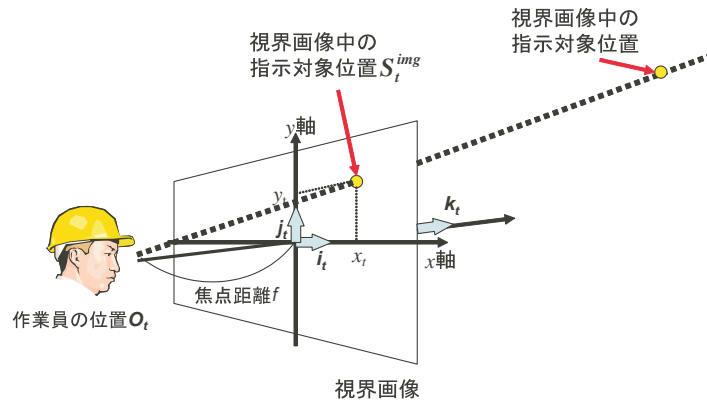


図 4.6: 3次元直線取得部のイメージ

4.1.9 で作成した自然マーカデータベースから、時刻 t の視界画像中の自然マーカ M_t を取得し、マーカ M_t の中で 3次元位置が既知であるマーカ M_t^k と 3次元位置が未知のマーカ M_t^u に分ける。その後、マーカ M_t^k 内の全てのマーカに対して、マーカの 3次元位置と直線 L との距離を計算し、その中で最小の距離となるマーカ m_t を求める。距離の計算方法は、3.6 で述べた方法で行う。

このようにして求めたマーカ m_t は、次の指示対象位置の 3次元位置推定部で使用する。

4.3.3 指示対象位置の 3次元位置推定部

マーカ m_t の 3次元位置 m_t と作業員の 3次元位置 O_t との距離から、指示対象位置の 3次元位置 S_t を推定する。このとき、

$$\| m_t - O_t \| \sim \| S_t - O_t \| \quad (4.2)$$

であると仮定するため、直線 L 上の点で O_t から距離 $\| m_t - O_t \|^2$ だけ離れている点を求める。このようにして求まる点の中で m_t との距離が小さい点の 3次元位置を S_t と推定する。

以上のようにして求めた指示対象位置の 3次元位置 S_t と情報画像 I_{fm_t} は、情報画像データベースに記録する。

4.4 情報提示機能の開発

作業員の位置推定機能で求めた作業員の3次元位置と、指示対象位置の位置推定機能で求めた指示対象位置の3次元位置から、HMDに情報画像を表示する処理を、図4.7に示す。

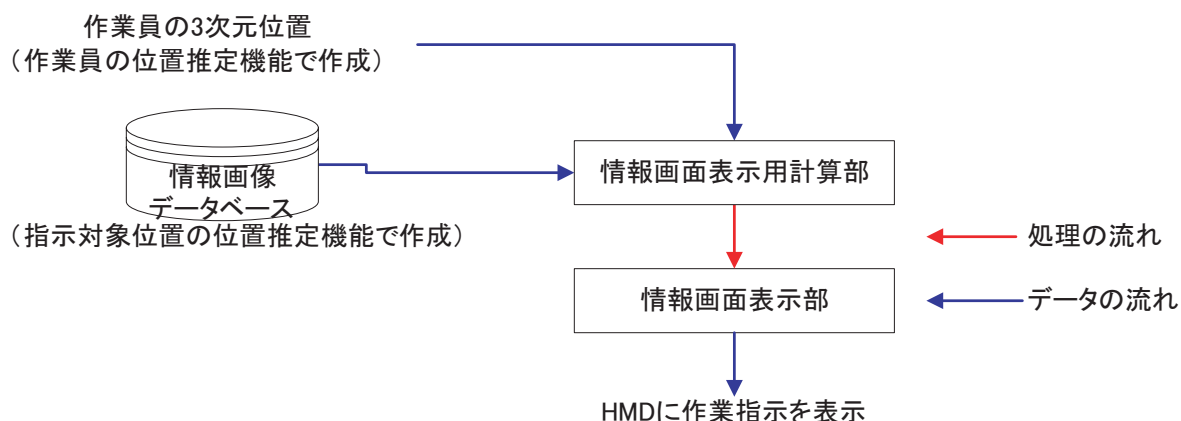


図 4.7: 情報提示機能の処理部

まず、情報画像表示用計算部では、まず、情報画像データベースから、現在の作業指示を表す情報画像と指示対象位置の3次元位置を検索する。また、作業員の位置推定機能から作業員の3次元座標を取得する。次いで、3次元グラフィックライブラリであるOpenGLを用いて、現在の視界画像中における指示対象位置の2次元座標を計算する。

つぎに、情報画像表示部では、計算によって求めた指示対象位置の2次元座標に情報画像中の指示対象位置の2次元座標が重なるように画像を合成し、HMDの画面に表示する。このとき、HMDの情報画像中の現場監督の指示を表した絵や文字以外の部分は、全て黒にする。

以上のようにして、HMDに図4.8に示すように表示し、作業員に現場監督からの指示を伝える。

4.5 試作システム

4.1から4.4で開発した機能を統合し、試作システムを作成した。試作システムは、図4.9に示す小型ポンプの解体・組み立てを想定し、現場監督1人が作業の手順を指示し、作業員1人が小型ポンプに対して作業を行う環境で動作するように構築した。

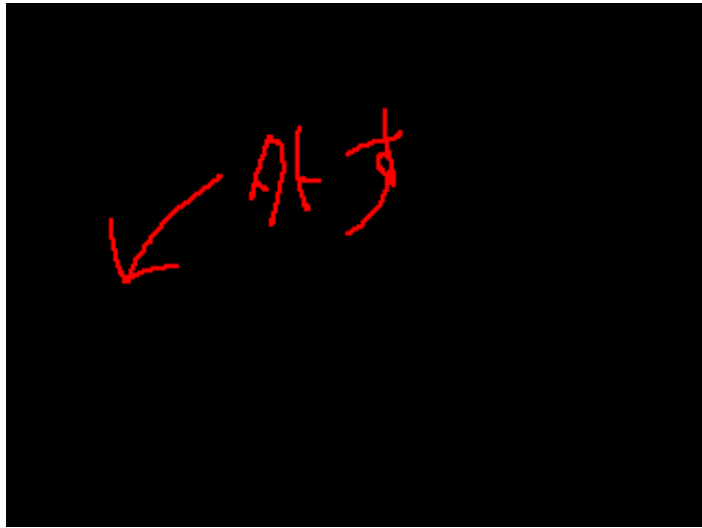


図 4.8: HMD の表示画面



図 4.9: 試作システムの対象とした小型ポンプ

以下で、試作システムのハードウェア構成とソフトウェア構成について述べる。

4.5.1 ハードウェア構成

本システムを使用するとき、作業員が利用するハードウェアを、表 4.2 に示し、実際に装着すると図 4.10 に示すようになる。

表 4.2: 作業員のハードウェア構成

ハードウェア	機材
ウェアラブルコンピュータ	Dell Inspiron 8100
HMD 出力用グラフィックスカード	I O DATA CBMLX2
無線 LAN カード	ELECOM Lanced LD-WL52/CB
ビデオキャプチャーカード	I O DATA USB-CAP2
ジャイロセンサ	村田製作所 圧電振動ジャイロ SK-GYRO
加速度センサ	CROSSBOW ADXL105 EM-3
マイコン	AKI-H8
小型 CCD カメラ	KEYENCE CK-200
HMD	島津製作所 Data Glass2
インカム	マイクとヘッドホンが一体とのもの

作業員が装着する安全ヘルメットには、小型 CCD カメラと、HMD、センサ箱、インカムがネジや接着剤を用いて固定されている。これらの装置を固定した安全ヘルメットの重さは、ヘルメット自身も含めて約 570g (ケーブル類も含める) である。HMD は、作業員に情報画像を表示するために使用し、図 4.11 に示す片目光学シースルー HMD を使用する。この HMD の仕様を表 4.3 に示す。ウェアラブルコンピュータから映像を出力するときは、HMD 出力用グラフィックスカードを使用して行う。小型 CCD カメラは、作業員の視界画像を撮影するために図 4.12 に示すカメラを使用する。このカメラの仕様を、表 4.4 に示す。撮影した視界画像は、ビデオキャプチャーを使用してウェアラブルコンピュータに取り込む。センサ箱は、作業員の移動方向を測定するための 3 つのジャイロセンサと 1 つの加速度センサが図 4.13 に示すように取り付けられている。ジャイロセンサおよび加速度センサの仕様を、それぞれ表 4.5、表 4.6 に示す。インカムは、現場監督との音声による通信を行うときに使用する。

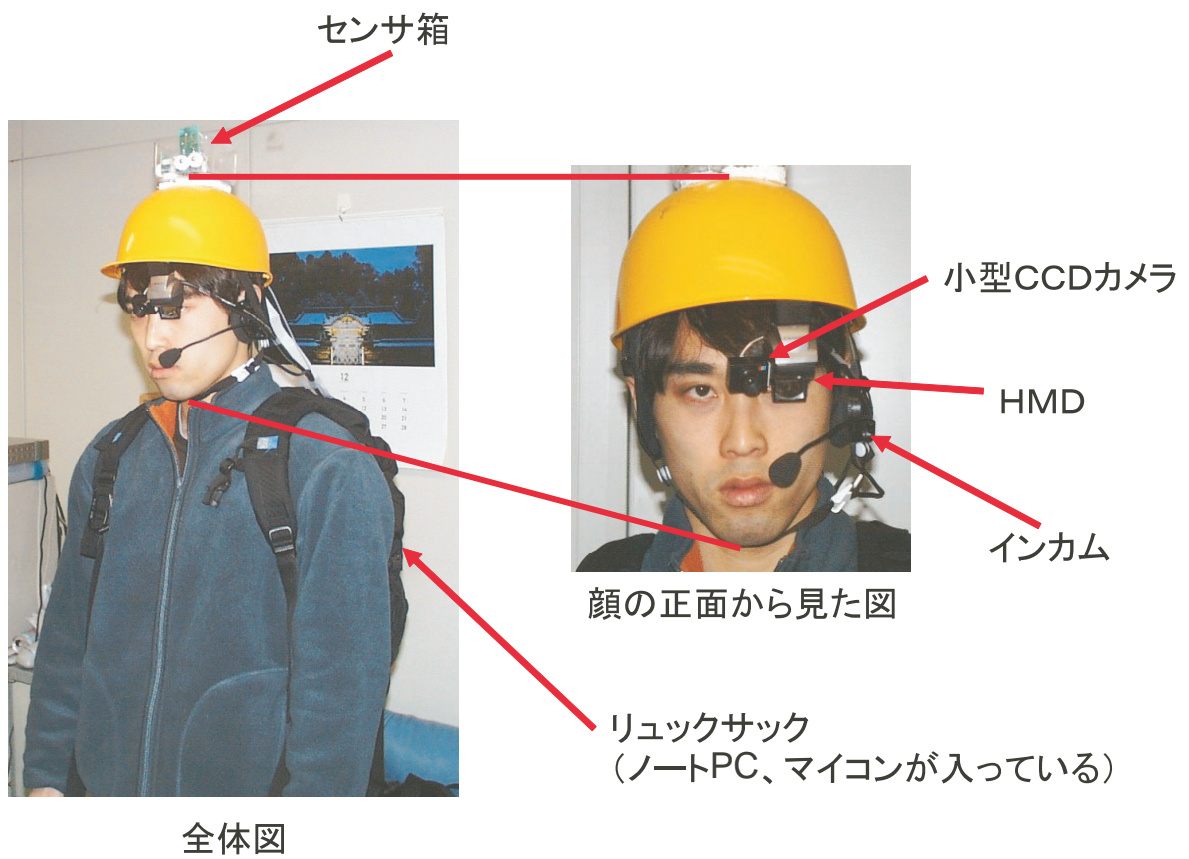


図 4.10: ハードウェアを装着した作業員



図 4.11: HMD (Data Glass 2) の概観

表 4.3: HMD (Data Glass 2) の仕様

全体質量	約 70g(ケーブルは除く)
解像度	800 × 600 ドット SVGA フルカラー (18bits)
画角	60cm 先に約 13inch のモニターを見ているイメージ (対角 30 度) 参考:B5 サイズの PC モニターを 60cm 離れて片目で見るイメージ
電源	DC 5V(USB ポート使用)
入力信号	デジタル RGB ビデオ信号 (RGB 24bits、同期信号) 参考:インタフェースユニットは DFP 規格に準拠
その他の機能	表示器左右切り替え用にロレット式の着脱機能



図 4.12: 小型 CCD カメラ (KEYENCE CK-200) の概観

表 4.4: 小型 CCD カメラの仕様

CCD	有効 25 万画素 NTSC 方式
映像出力	コンポジット出力
最低照度	10 ルクス
レンズ	標準 F2.8 水平画角 44 度
フォーカス	手動調整 ~ 1.5cm
電源電圧	DC4.8 ~ 6.0V
温度範囲	使用可能 -10 ~ 50
性能保証	5 ~ 35 ただし結露なきこと
連続動作時間	付属 AC アダプタ使用時は制限なし 約 15 時間 (単 3 アルカリ乾電池 × 4 本使用) 約 4 時間 (単 3 マンガン乾電池 × 4 本使用)
外形寸法	31mm(W) × 25mm(H) × 15mm(D)

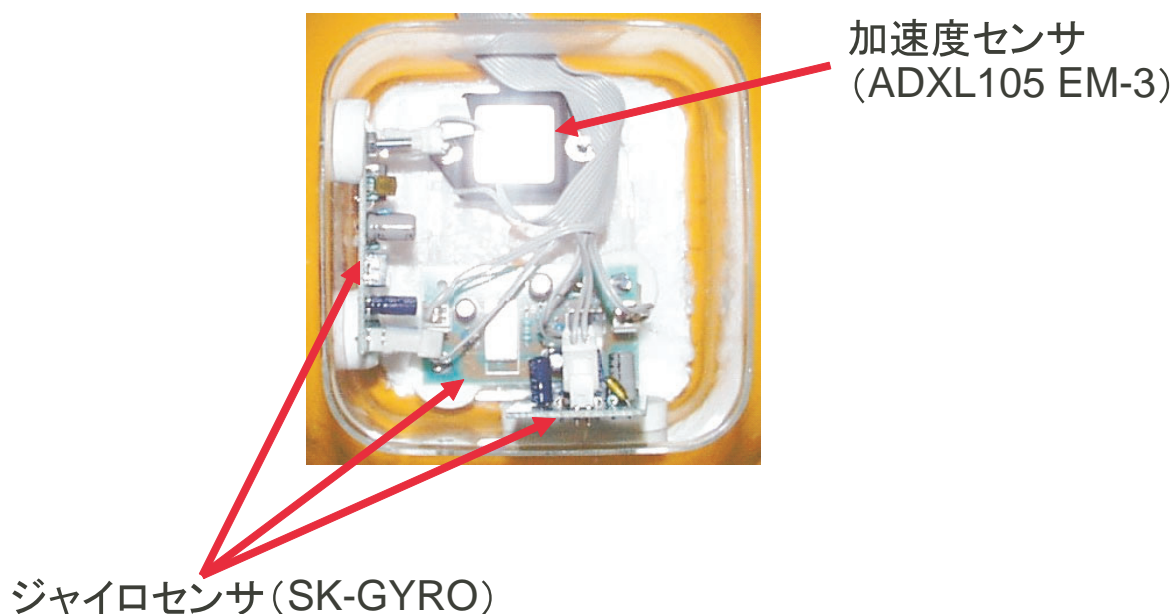


図 4.13: センサ箱の中身

表 4.5: ジャイロセンサの仕様

項目	値
供給電圧	+2.7 ~ 5.5VDC
消費電流	5mA 以下
検出範囲	$\pm 300^\circ /S$
静止時出力	+1.35VDC
感度	$0.67mV/^\circ /S$
感度温度変動	$\pm 20\%$
リニアリティ	$\pm 5\%$ FS
応答性	50Hz 以下
使用温度範囲	-5 ~ +75
保存温度範囲	-30 ~ +85
外形	15.5 × 8.0 × 4.3 (mm) 1.0g 以下

表 4.6: 加速度センサの仕様

項目	値
供給電圧	+2.7 ~ 5.5VDC
消費電流	0.6mA
加速度範囲	$\pm 2g$
静止時出力	(x 軸)2.483V (y 軸) 2.449V (z 軸) 2.435V
感度	312mV/g
感度温度変動	$\pm 20\%$
リニアリティ	$\pm 3.5\%$ FS
外形	47.63 × 25.4 × 19.05 (mm)

作業員が背負うリュックサックには、マイコンとウェアラブルコンピュータを入れる。マイコンは、加速度センサとジャイロセンサから得られたデータを処理するために使用する。マイコンの概観を、図 4.14 に示す。ウェアラブルコンピュータは、作業員の位置推定機能などの処理を行う情報端末であり、その仕様を表 4.7 に示す。また、現場監督との通信を行うために、ウェアラブルコンピュータに無線 LAN カードを装着してある。

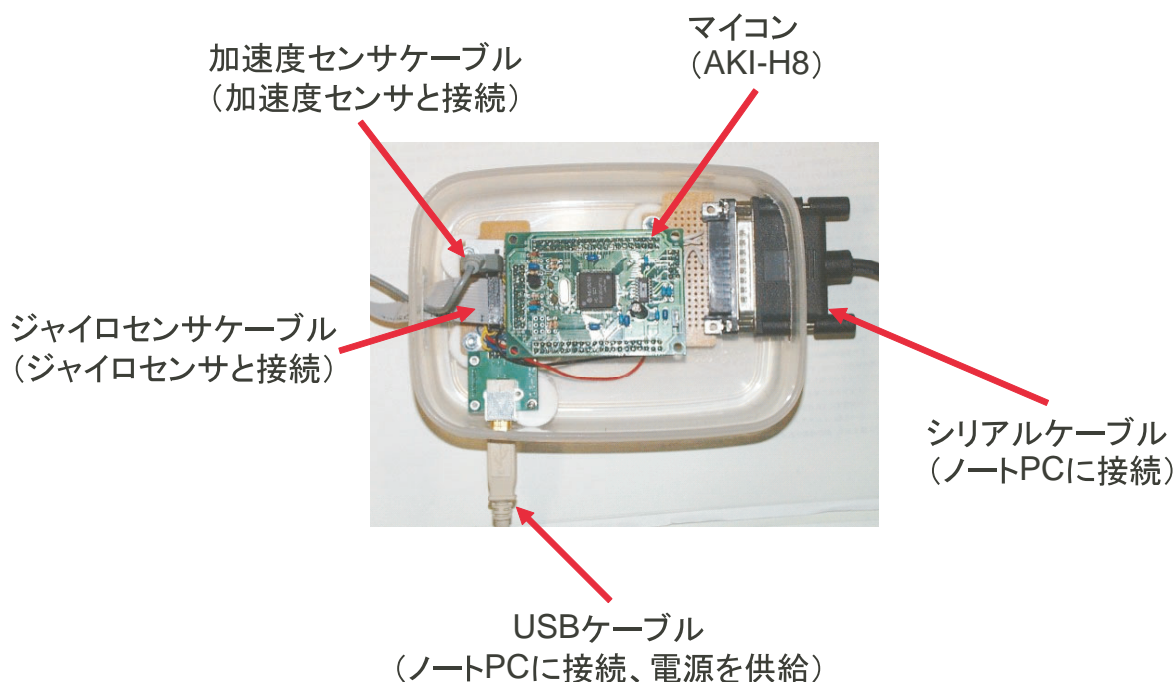


図 4.14: マイコン

表 4.7: ウェアラブルコンピュータの仕様

項目	仕様
CPU	Intel Pentium Mobile III 1.33GHz
Memory	256MB
OS	Microsoft Windows2000 professional

作業員が使用するハードウェアの接続方法を、図 4.15 に示す。

一方、現場監督が使用するハードウェアを、表 4.8 に示し、実際に携帯すると図 4.16 に示すようになる。

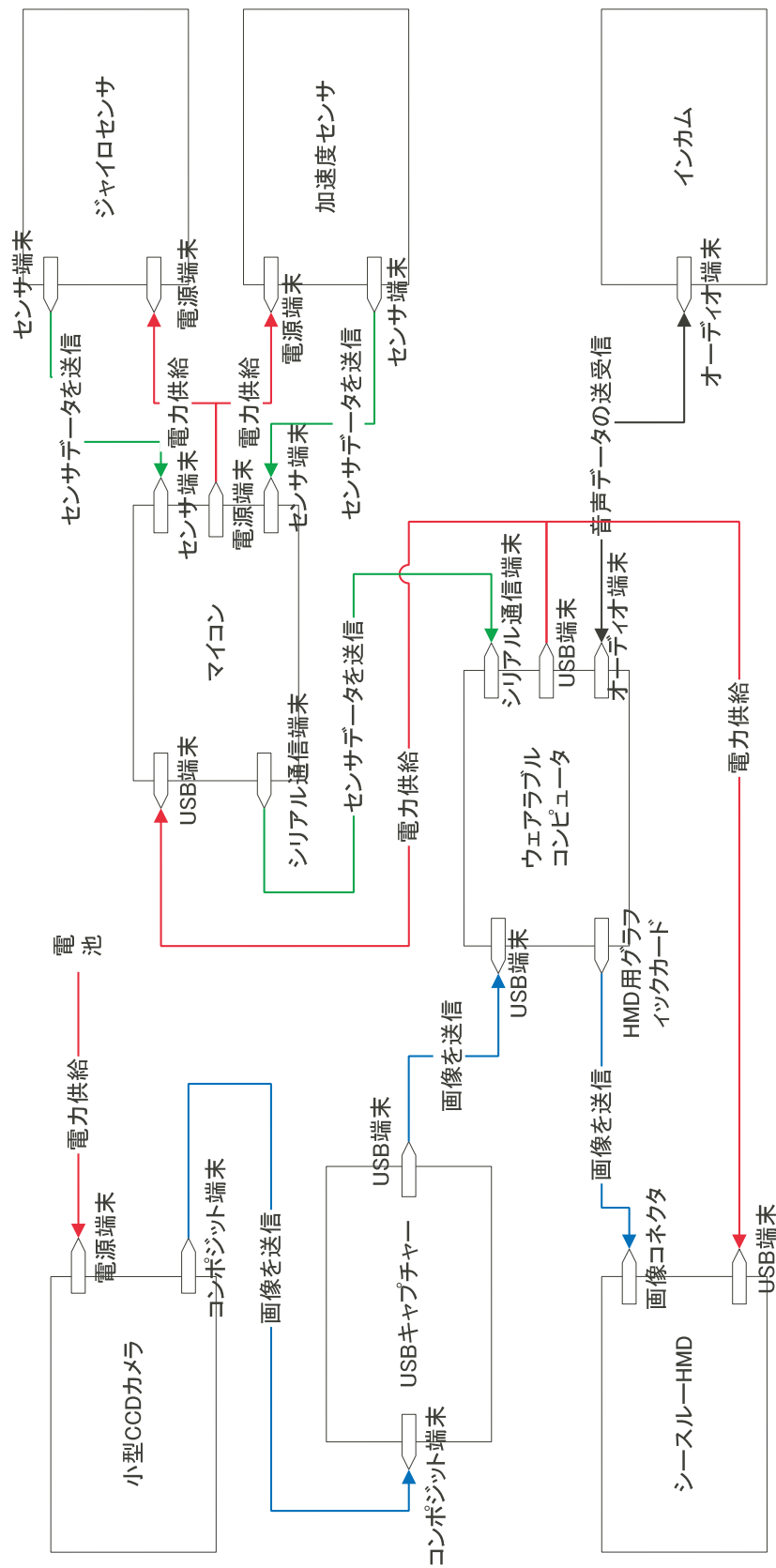


図 4.15: 作業員の使用するハードウェアの接続

表 4.8: 現場監督のハードウェア構成

ハードウェア	使用した機材
タブレット PC	Toshiba Dynabook 3500 DSIEP/2 SS
無線 LAN カード	ELECOM Lanced LD-WL52/CB
インカム	マイクとヘッドホンが一体となったもの

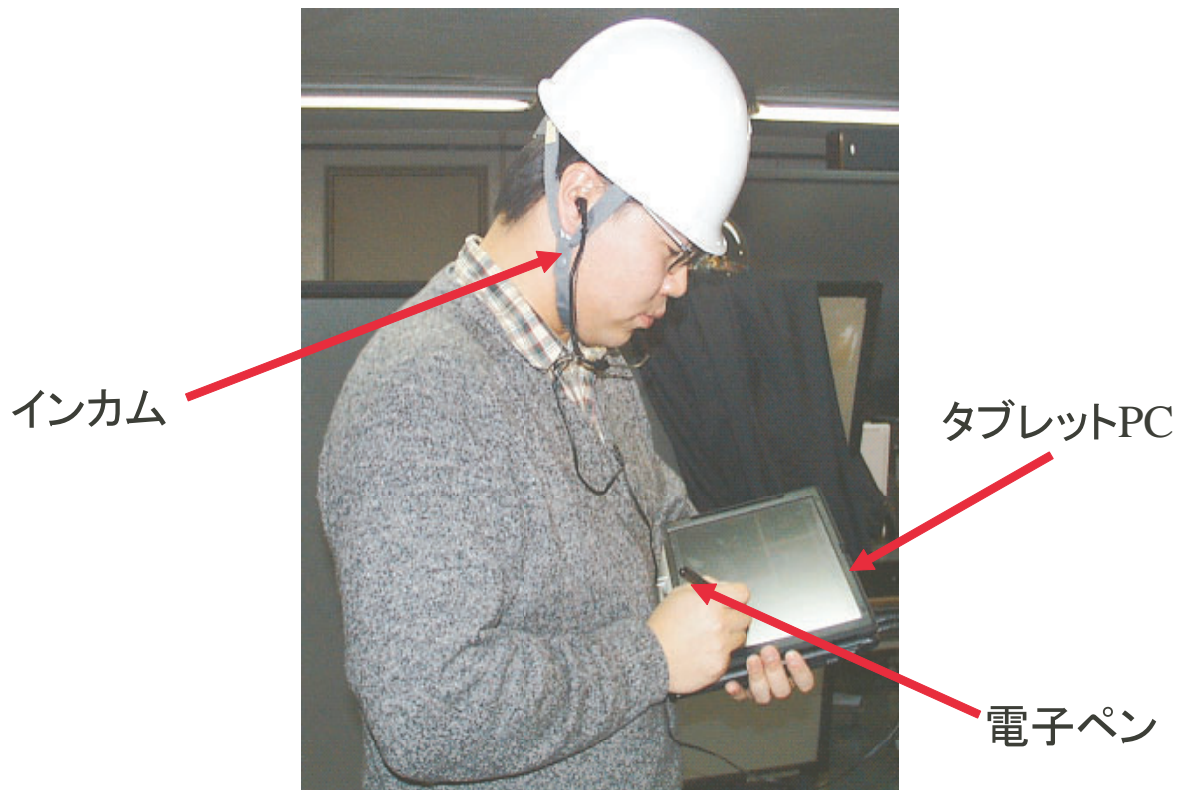


図 4.16: ハードウェアを携帯した現場監督

現場監督は、タブレットPCを携帯し、インカムを装着している。タブレットPCは、作業員への作業指示を表す情報画像を作成するのに使用し、その仕様を表4.9に示し、概観を図

reffig:タブレットPC実物に示す。タブレットPCには、パーソナルコンピュータのマウスに相当する電子ペンが付属されていて、これを用いて文字や絵を入力できる。また、作業員との通信を行うために、タブレットPCには無線LANカードが装着されている。インカムは、作業員との音声による通信を行うときに使用する。

表 4.9: タブレット PC の仕様

項目	仕様
CPU	Intel Mibile Pentium III 1.33GHz
Memory	256MB
OS	Microsoft Windows Xp TabletEdition



図 4.17: タブレット PC

また、作業員のウェアラブルコンピュータと現場監督のタブレットPCに装着した無線LANカード間の通信を制御する無線アクセスポートとして、ELECOM LANEED LD-WL5411/APを使用する。この機器を使用することで、54Mbpsの通信速度で各端末間の通信を行うことができる。この機器の仕様を、表4.10に示す。無線アクセスポイントは、原子力プラント内に事前に設置しておき、機器に必要な電源は原子力プラント内の電源コネクタから供給する。

4.5.2 ソフトウェア構成

試作したシステムは、Microsoft Windows上で動作する機能を開発し、また、開発環境は、Microsoft Visual C++6.0を利用した。

表 4.10: 無線アクセスポートの仕様

項目	仕様
規格	有線部:IEEE802.3/IEEE802.3u/IEEE802.3x 無線部:IEEE802.11/IEEE802.11a/IEEE802.11b/ RCR STD-33 ARIB STD-66/STD-71
周波数帯域	5.2GHz (5.15 ~ 5.25GHz) 2.4GHz (2.412 ~ 2.4835GHz)
チャンネル	5.2GHz:34/38/42/46ch 2.4GHz:1ch ~ 14ch
伝送方式	5.2GHz:OFDM 方式 2.4GHz:DS-SS 方式
伝送速度	5.2GHz:54/48/36/24/18/12/9/6Mbps 2.4GHz:11/5.5/2/1Mbps
伝送距離 (5.2GHz)	54Mbps (約 42m)・48Mbps (約 54m)・36Mbps (約 72m)・ 24Mbps (約 78m) 18Mbps (約 80m)・12Mbps (約 82m)・ 9Mbps (約 82m)・6Mbps (約 85m)
伝送距離 (2.4GHz)	屋内 : 11Mbps (約 80m)・5.5Mbps (約 83m) 2Mbps (約 85m)・1Mbps (約 87m) 屋外 : 11Mbps (約 270m)・5.5Mbps (約 275m) 2Mbps (約 283m)・1Mbps (約 308 m)(周囲の条件による)
アクセス方式	インフラストラクチャ
アンテナ方式	ダイバシティアンテナ
電源	DC5V 2.5A
消費電力	8.5W (最大)
寸法・重量	W230 × D135 × H45mm 480g

4.1 から 4.4 で開発した機能を統合し、図 4.18 に示すようにした。なお、作業員の位置推定機能、指示対象位置の位置推定機能、情報表示機能は作業員が携帯するウェアラブルコンピュータで処理し、通信機能は、ウェアラブルコンピュータと現場監督が携帯するタブレット PC で処理を行うようにした。

作業員の HMD に表示するインタフェースとして、図 4.19 に示すような画面にした。画面は HMD の表示が可能な大きさである横 800pixel、縦 600pixel とした。

次に、現場監督のインタフェースとしてタブレット PC の画面は、監視モードを図 4.20 に示すようにし、作業指示モードを図 4.21 に示すようにした。監視モードでは作業指示用画面に表示されている視界画像はリアルタイムで変化するが、作業指示モードに移行すると、視界画像を静止画になる。

試作したシステムを用いて、現場監督から作業員へ作業指示を行うと、作業員が装着している HMD には、図 4.19 に示すように表示されるが、作業指示が表示されている様子が見えるように、視界画像上に作業指示を表示すると図 4.22 の (a) に示すようになる。この図は作業員の視点から見た図に相当し、作業員が移動した場合でも図 4.22 の (b) のように情報が適切な位置に表示される。

以上のように試作したシステムを用いて、次章でその評価実験を行った。

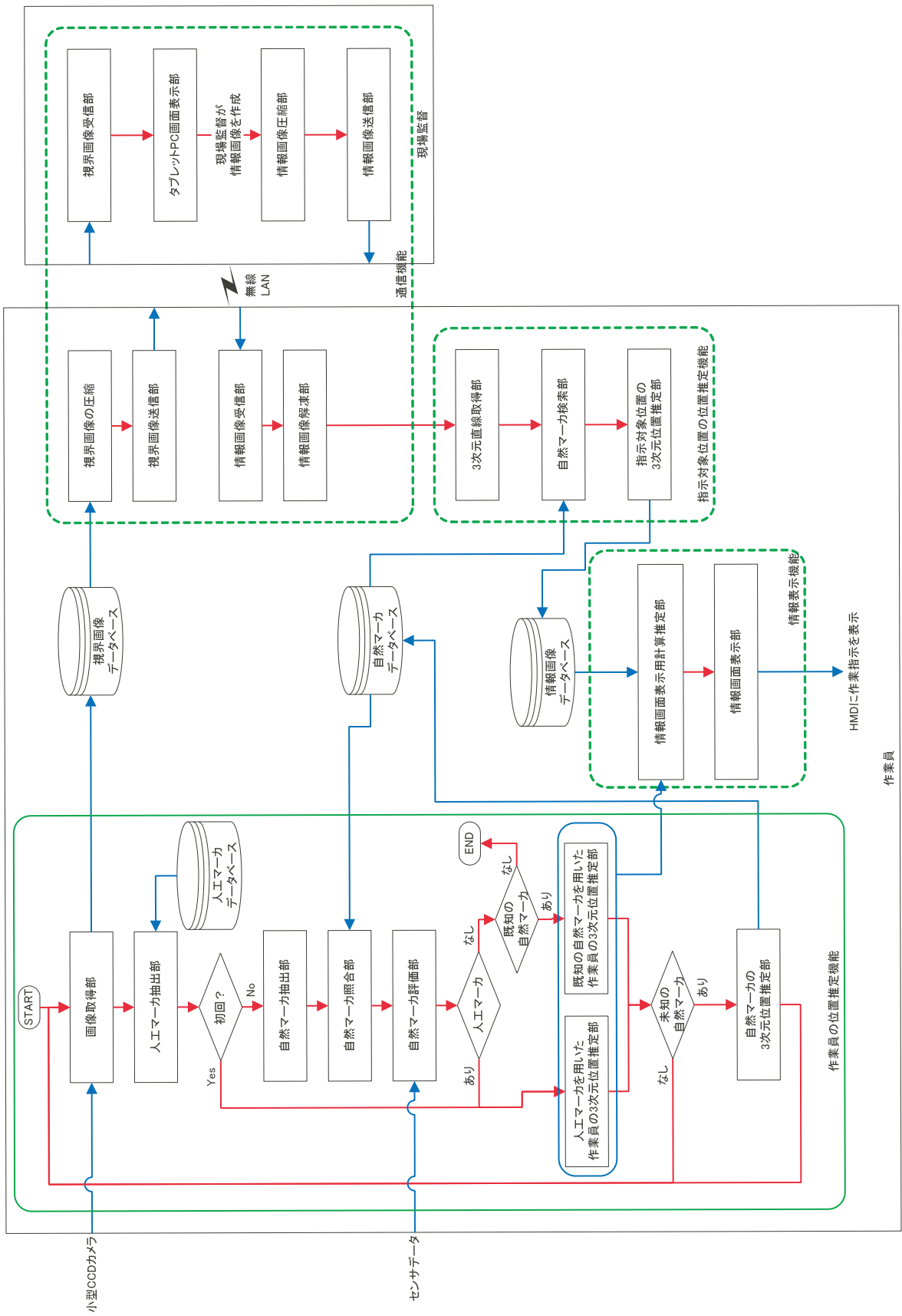


図 4.18: 4つの機能の統合

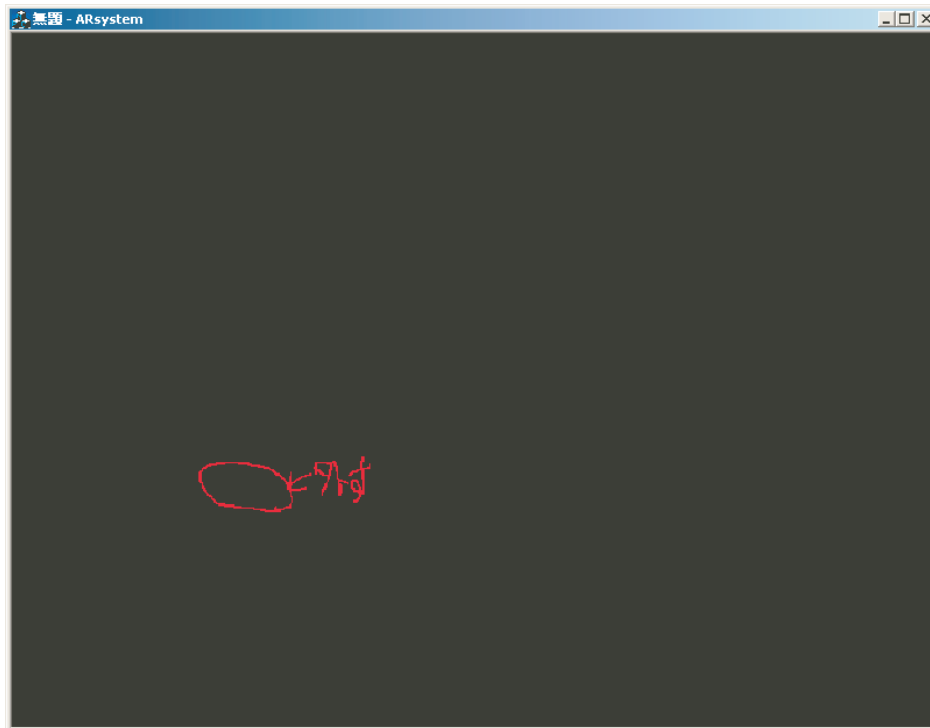


図 4.19: 作業員に提示する HMD の画面



図 4.20: 現場監督のタブレット PC の画面（監視モード）



図 4.21: 現場監督のタブレット PC の画面 (作業指示モード)



(a)



(b)

図 4.22: 作業員からみた作業指示

第 5 章 保守作業支援システムの評価

本章では、まず、4章で試作したシステムの動作確認について述べる。次いで、実際にシステムを使用した被験者実験について述べる。

5.1 作業員の位置推定機能の動作確認

本節では、試作したシステムに組み込まれている作業員の位置推定機能、通信機能、指示対象位置の推定機能、情報提示機能の4つの機能のうち、作業員の位置推定機能の動作確認を行った結果について述べる。

動作確認は、人工マーカと既知の自然マーカの2種類のマーカを用いてそれぞれ位置推定を行い、精度を測定した。このとき、両方のマーカの位置推定を同一条件で行うため、図5.1に示す4枚の静止画を視界画像として使用した。試作したシステムを実際に使用するときには、小型CCDカメラからの映像を入力して作業員の位置推定を行うが、動作確認を行うために2枚の静止画を入力して、映像を入力したときと同様に位置推定ができるようにした。4枚の画像は、図5.2に示すように、人工マーカから約10cm離れた場所から人工マーカを撮影した画像が画像Aであり、画像Aを撮影した場所を基準に、画像中の水平軸右方向に5cm移動した場所から撮影した画像を画像B、基準から人工マーカの方に5cm移動した場所から撮影した画像を画像C、基準から画像中の垂直軸上方向に10cm移動した場所から撮影した画像を画像Dとする。また、このとき、基準から各画像に移動したときに得られる加速度センサとジャイロセンサのデータを記録した。

動作確認の手順は、まず、システムに画像Aを入力し、人工マーカを用いて作業員の3次元位置を求めた。このとき、画像Aから自然マーカを抽出し、画像中の2次元座標を求めた。その後、画像Bをシステムに入力し、人工マーカを用いて位置推定を行い、人工マーカを用いたときの作業員の3次元位置を求めた。次に、画像Bから自然マーカを抽出し、画像Aの自然マーカと照合し、記録したセンサのデータをもとにマーカの評価を行い、画像Aと画像Bそれぞれの自然マーカの2次元座標から自然マーカの3次元位置を推定した。その後、自然マーカの3次元位置と画像Bの2次元座標から、画像Bにおける作業員の3次元位置を求めた。また、画像Cおよび画像Dを用いて同

様に動作確認を行った。



画像 A



画像 B

(カメラを水平軸右方向に 5cm 移動した画像)



画像 C



画像 D

(カメラをカメラ方向に 10cm 移動した画像) (カメラを垂直軸上方向に 5 cm 移動した画像)

図 5.1: 動作確認で使用した画像

動作確認の結果を、表 5.1 に示す。この結果から、人工マーカを用いた作業員の位置推定では、カメラの移動距離は、画像 B では 54.34mm (誤差 8.68%)、画像 C では 45.59mm (誤差 8.82%)、画像 D では 92.86mm (誤差 7.14%) であり、ほぼ正確に 3次元位置を求められることが分かった。誤差が生じた理由としては、各画像を撮影するためのカメラの設置するときに位置がズレたこと、人工マーカを用いた作業員の位置推定で使用した AR tool kit の誤差が原因であると考えられる。

一方、既知の自然マーカを用いた作業員の位置計測では、画像 B では 49.48mm (誤差 1.04%)、画像 C では 39.54mm (誤差 20.91%)、画像 D では 64.66mm (誤差 35.34%) であり、大きく誤差が生じてしまうことが分かった。このとき、使用した既知の自然マーカを調べると、使用した 4つのマーカは 10pixel × 10pixel の偏った範囲内から選別して位置推定を行ったことが分かった。偏った範囲から 4つのマーカを選別すると、

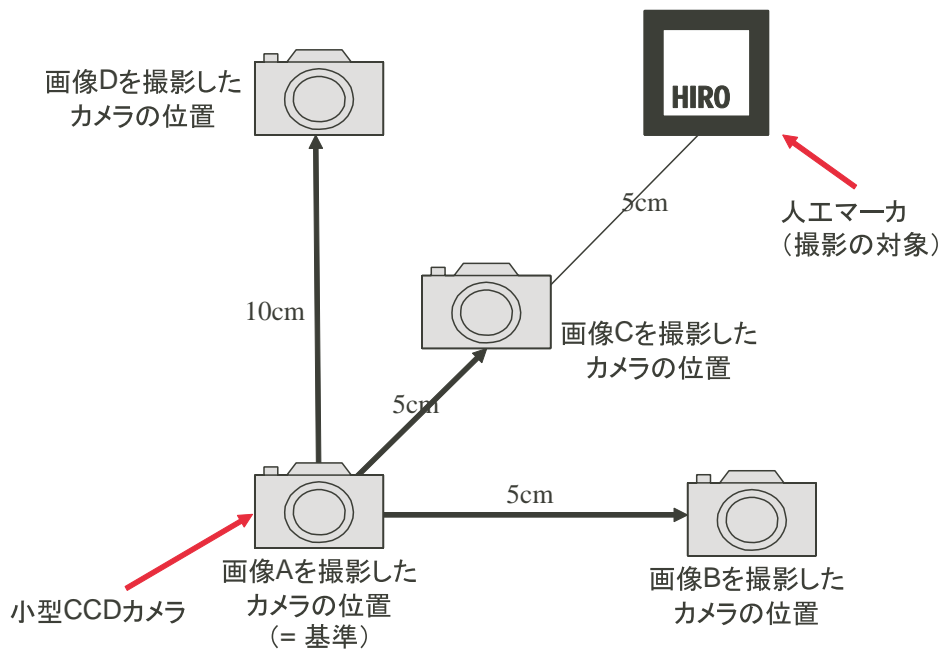


図 5.2: 動作確認で使用了画像を撮影した場所

4つのマーカの3次元空間内での距離が小さくなってしまふことがあり、3次元空間内でのマーカ間の距離をもとに作業員の位置を推定するAR tool kitで正しく計算できない。そのため、既知の自然マーカを用いた作業員の位置計測では、大きく誤差が生じてしまったと考えられる。また、2つの画像間でマーカを照合したときの類似している度合いである類似度が、予想よりも低い値であった。これは、画像をキャプチャするときに画像が揺らいでいたため、マーカの対一関係が正確に求まらず、大きな誤差の原因となったと考えられる。これより、作業員の位置を推定する際に使用する4つの既知の自然マーカを視界画像中から距離を離して選別する方法と、キャプチャによって生じる画像の揺らぎに対応した自然マーカの照合の方法を考案することが必要があると考えられる。

また、各画像中において抽出された自然マーカの個数と、基準からセンサによる評価によって、排除された自然マーカの個数を表5.2に示す。この結果から、画像Aから各画像に移動する際、センサによる評価で排除されたマーカが存在することがわかった。これは、例えば、図5.3に示すように、カメラを移動させた際、画像Aで抽出した自然マーカの中で、画像B中では消滅している自然マーカや画像Bで新たに出現した自然マーカの影響で、マーカの照合がうまく行かない場合があり、このような自然マーカをセンサによる評価で排除し、作業員の移動によって2次元座標が変化した自

表 5.1: 動作確認の結果

作業員の位置推定方法		人工マーカ	既知の自然マーカ
画像 A の 3 次元位置		(28.86, 31.98, 233.47)	—
画像 B	3 次元位置	(-25.48, 33.07, 233.40)	(9.69, -0.25, 265.73)
	カメラの移動距離	54.34	49.48
画像 C	3 次元位置	(30.01, -4.90, 206.69)	(20.31, 10.22, 201.57)
	カメラの移動距離	45.59	39.54
画像 D	3 次元位置	(31.12, -27.17, 305.02)	(5.64, -8.96, 277.79)
	カメラの移動距離	92.86	64.66

(単位:mm)

表 5.2: 各画像中の自然マーカの個数

画像	画像中の自然マーカの個数	センサによる評価で排除された個数
画像 A	111 個	—
画像 B	105 個	29 個
画像 C	85 個	30 個
画像 D	82 個	31 個

然マーカを用いて作業員の位置推定をしたと考えられる。

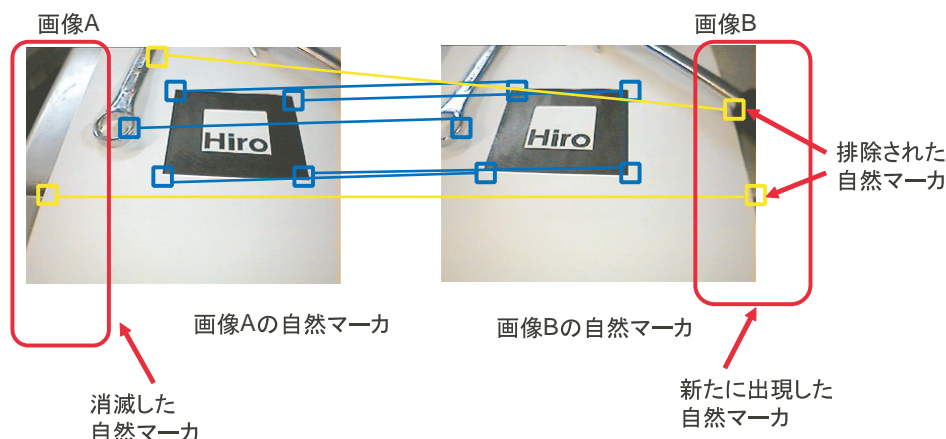


図 5.3: センサの評価によって排除したマーカ

センサによる評価を行わずに既知のマーカから作業員の位置を求めた結果を表 5.3 に示す。この結果も、先に述べたように、使用するマーカを視界画像の偏った範囲から選別して位置を推定したことと、2つの画像間でマーカを照合が正確に行われていないため、既知のマーカによる位置推定は大きな誤差が生じているが、センサによる評価によって、自然マーカが選別され、位置推定の精度が向上する可能性があることが分かった。これより、本研究では、センサから得られた作業員の移動方向と視界画像中のマーカの動きとの関係を表 4.1 に示すように分類したが、これをさらに細かく分類してマーカの絞り込むことで、作業員の位置推定の精度を向上させることが可能であると考えられる。

表 5.3: センサによる評価の有無による作業員の位置推定の違い

作業員の位置推定方法		センサによる評価なし	センサによる評価あり
画像 B	3次元位置	(6.59, 12.08, 270.24)	(9.69, -0.25, 265.73)
	カメラの移動距離	47.37(誤差 5.26%)	49.48(誤差 1.04%)
画像 C	3次元位置	(447.12, -14.66, 212.43)	(20.31, 10.22, 201.57)
	カメラの移動距離	421.38(誤差 742.75%)	39.54(誤差 20.91%)
画像 D	3次元位置	(7.59, 3.59, 262.45)	(5.64, -8.96, 277.79)
	カメラの移動距離	45.81(誤差 54.19%)	64.66(誤差 35.34%)

(単位:mm)

5.2 試作システムの評価

試作システムを実際に被験者に使用してもらい、システムのインタフェースを評価した。評価は、現場監督のインタフェースと作業員のインタフェースのそれぞれを対象とした。

以下で、現場監督のインタフェースと作業員のインタフェースのそれぞれの評価について述べる。

5.2.1 現場監督のインタフェース

被験者に、図 4.16 に示す現場監督のデバイスを装着してもらった。その後、作業員の監視と作業指示を行ってもらい、現場監督のインタフェースに関する主観評価を行ってもらった。被験者は、本研究室の大学院生 1 名とし、使用時間は約 10 分とした。評価の観点は、(a) デバイスの操作性、(b) 監視の有用性、(c) 作業指示の有用性の 3 つとし、それぞれについて良かった点と問題点などを自由記述してもらった。その結果を表 5.4 に示す。これより、以下のことが示唆された。

(a) デバイスの操作性

現場監督が携帯するタブレット PC の入力インタフェースとして、マウスやキーボードに比べ、電子ペンを用いた入力方法が、現場での入力インタフェースとして容易に入力できると評価された。しかし、タブレット PC 自体を携帯して作業員に指示を出すことは、タブレット PC の重さなどの影響で、現場監督にとって負担になることが示された。

(b) 監視の有用性

現場監督による作業員の監視では、保守作業の現場を動き回る作業員を容易に監視できることが示された。しかし、(1) 作業員の視界画像は作業員の視界の一部しか捉えていないため、作業員が行っている作業全体を監視することが難しい。(2) タブレット PC に表示される視界画像は小さいため、細部に渡る監視ができない。(3) ひとりの作業員を監視すると、他の作業員の監視が難しくなる。以上の 3 点が問題になることが示された。

(c) 作業指示の有用性

現場監督による作業員への作業指示では、モータなどの大きな部品に対して作業指示を行うことは容易に行うことができた。しかし、ネジなどの小さな部品に対

しては、視界画像からその場所を特定することが難しく、作業指示を出すことができなかった。また、図 4.8 に示す作業指示の画面構成では、[作業員へ送信] ボタンなどの操作は分かりやすいと評価された。しかし、作業指示モードに移行した後、作業監視用画面に表示されている視界画像と、作業指示用画面に表示されている視界画像が異なることから、どの作業員に対して作業指示を行っているのかを容易に把握することができなかった。

以上より、現場監督のインタフェースは、電子ペンで入力するタブレット PC の使用が有効であることが示唆された。しかし、タブレット PC に表示する視界画像を大きく表示し、細部の監視や指示を行えるようにすることが必要であると示唆された。

5.2.2 作業員のインタフェース

被験者に、図 4.10 に示す作業員のデバイスを装着してもらった。その後、現場監督の指示をもとに小型モータの解体作業を行ってもらい、作業員のインタフェースに関して主観評価を行ってもらった。被験者は、本研究室の大学院生 1 名でとし、使用時間は約 20 分とした。また、評価の観点、(a) デバイスの操作性、(b) 作業指示の有用性とし、それぞれについて良かった点と問題点などを自由記述してもらった。その結果は表 5.5 に示す。この結果より、以下のことが示唆された。

(a) デバイスの操作性

作業員が装着するデバイスとしては、HMD 自体は、照明環境によらず画面に表示された情報を取得できた。しかし、(1) HMD を装着するため、作業員の視界が狭くなってしまい、(2) 使用した片目 HMD では、左眼と右眼の視界に違和感があることが示された。また、作業員が装着する安全ヘルメットは、センサ箱などを取り付けたため、重く、頭の安定性を失うことが示された。

(b) 作業指示の有用性

作業員への作業指示では、作業指示の内容が記号で表示されるため、内容が分かりやすいと評価された。また、作業指示の対象を直観的に理解できると評価された。しかし、作業員の装着しているヘルメットがズレることがあり、矢印の位置がズレてしまう可能性があることが示された。

以上より、作業員のインタフェースとして、HMD を用いて作業指示を行うことは、指示内容の理解が容易になり、また、指示の対象を直観的に理解できるため、有効であ

表 5.4: 現場監督のインタフェースの評価

(a) デバイスの操作性

良かった点	・入力は、マウスなどに比べ、電子ペンの方が容易に入力できた
問題点	・タブレット PC が重く、長時間使用するのは難しい
	・入力時は、タブレット PC を片手で持たなければならない

(b) 監視の有用性

良かった点	・作業員の移動に関係なく、いつでも監視ができた
	・監視用の視界画像を更新するタイミングは、問題がない
問題点	・誰の画像であるか即座に判別できない
	・ひとりを監視していると、他の人の監視が難しい
	・作業員の視界画像の視野が狭い
	・表示されている視界画像の画像は小さい

(c) 作業指示の有用性

良かった点	・モータのカバーなど大きめ目の部品に対する作業指示を出すのには有効
	・[作業員へ送信] ボタンなど、画面構成がよかった
	・電子ペンを用いると、細部や文字、記号の入力が容易であった
問題点	・作業指示が作業員に伝わっているのかがチェックできない
	・誰に対する作業指示を書いているのかわかりにくい
	・モータのネジなど細部に対する指示が出しにくい

表 5.5: 作業員のインタフェースの評価

(a) デバイスの操作性

良かった点	・HMDの画面は照明環境に関係なく見ることができた
問題点	・HMDを装着するため、視野が狭まってしまう
	・片目のHMDでは、左眼と右眼の視界に違和感がある
	・デバイス全体が重く、負担になる
	・頭の安定性が保ちにくい

(b) 作業指示の有用性

良かった点	・作業を記号で表示され、分かりやすい
	・指示をあらわす場所も、直観的に理解できる
	・HMDの画面は背景が黒色がよかった
問題点	・ヘルメットがズれるため、矢印がズれる時がある
	・矢印がちらついてしまう

る可能性が示唆された。しかし、センサ箱などを取り付けた安全ヘルメットなど、デバイス自体を改善する必要があることが示された。

5.3 評価のまとめと今後の展望

以上の結果から、システムの評価をまとめる。

システムの4つ機能のなかで、作業員の位置推定機能の評価を行った。作業員の位置推定機能は、人工マーカを用いた場合は、正常に動作することが確認できた。一方、既知の自然マーカを用いた場合、(1)使用するマーカを視界画像の偏った範囲から選別して位置を推定し、(2)2つの画像間でマーカを照合が正確に行われなため、大きく誤差が生じてしまうことを確認した。そのため、視界画像から既知の自然マーカを選別する際、画像上から距離を離して選別するようにし、また、マーカの照合方法を画像をキャプチャする際に生じる画像の揺らぎに対応させ、精度を向上させる必要がある。また、マーカをセンサによって評価することは、位置推定精度を向上させるのに有効であった。そのため、今後は、センサから得られた作業員の移動方向と視界画像中のマーカの動きとの関係を細かく分類し、選別されるマーカを絞ることで、精度を向上させることができると考えられる。また、今回の動作確認では、作業員の位置

推定機能の厳密な評価や他の機能の評価を行っていないため、これを行う必要がある。

また、現場監督と作業員のインタフェースについて、被験者実験を行い、主観的に評価してもらった。現場監督のインタフェースは、電子ペンで入力するタブレットPCを用いることが有効であるが、タブレットPCの表示画面を改善する必要があることが示された。一方、作業員のインタフェースは、HMDを用いた作業指示は有効であるが、センサ箱などを取り付けた安全ヘルメットなど、デバイス自体を改善する必要があることが示された。今後の展望として、現場監督と作業員のインタフェースのさらなる改善が挙げられる。

第 6 章 結論

本研究では、原子力発電の運転時や保守時のコスト削減を目指した「原子力発電所運用高度化のための次世代 HMS の技術開発」プロジェクトの中で、定期点検時の作業員と現場監督との拡張現実感を用いたコミュニケーション支援システムを提案した。そして、この支援を実現するために必要となる「作業員の位置推定機能」、「通信機能」、「指示対象位置の位置推定機能」、「情報提示機能」を設計した。「作業員の位置推定機能」では、作業員の視界を撮影した視界画像中の自然マーカを用いた画像処理を行い、プラント内の作業員の位置と頭の向きを求めた。このとき、定期点検時の現場では、機器が解体されるなど周囲環境が大幅に変化するため、視界画像中の自然マーカの変化の要因を作業員の頭部に装着したセンサを用いて判断し、作業員の移動によって変化した自然マーカを用いることで、位置の精度を向上させた。「通信機能」では、作業員の視界画像を現場監督に送信し、この視界画像を現場監督が監視することにより監視の強化を図った。また、作業員の視界画像に現場監督が絵や文字を書き込むことにより、作業員が作業指示を理解しやすくし、機器を取り違えるなどのヒューマンエラーを未然に防ぐようにした。「指示対象位置の位置推定機能」では、視界画像と自然マーカを用いて、現場監督が作業指示を書き込んだ情報画像を表示する 3 次元位置を求めた。「情報提示機能」では、先に求めたプラント内の作業員の位置と作業指示の位置との相対関係から、指示対象位置をその対象上に重畳できるように計算し、表示した。

次に、提案した設計をもとにシステムを試作し、動作確認を行った。また、現場監督と作業員が使用するデバイスをそれぞれ被験者に実際に装着してもらいシステムを使用してもらった被験者実験を行い、インタフェースの主観的な評価を行った。

作業員の位置推定機能の動作確認の結果、人工マーカを用いた場合、正常に動作することが確認できた。一方、既知の自然マーカを用いた場合では、大きな誤差が生じてしまった。この原因として、(1) 視界画像の偏った範囲から 4 つのマーカを選別してしまった。また、カメラから映像をキャプチャするとき生じる画像の揺らぎにより、(2) 2 枚の画像間における自然マーカの照合が正確にできなかったため、と考えられる。また、マーカをセンサによって評価することは、位置推定精度を向上させるのに有効であることを確認した。

現場監督と作業員のインタフェースの主観的な評価の結果、現場監督のインタフェー

スは、作業指示を電子ペンで容易に入力できたが、タブレットPCの画面上で作業員の視界画像を大きく表示できるように画面を改善する必要があることが分かった。また、作業員のインタフェースに関しては、指示の対象となる部分に記号や文字を重畳表示する方法は、作業指示を理解しやすく、指示対象の場所を直観的に理解できるため、有効であると評価された。しかし、本研究で使用した片目HMDでは、左眼と右眼の視界に違和感があるなど、システムで使用するHMDを改善する必要があることが示された。

今後は、既知の自然マーカを用いた作業員の位置推定の際、視界画像上の一部に片寄らないよう、距離を離してマーカを選び出す方法と、マーカの照合方法を画像をキャプチャする際に生じる画像の揺らぎに対応させ、作業員の位置推定の精度を向上させる必要がある。また、センサから得られた作業員の移動方向と視界画像中のマーカの動きとの関係の細かく分類し、選別されるマーカを絞ることで、精度を向上させることが可能であると考えられる。

また、現場監督、作業員のインタフェースを改良する必要がある。そして、本研究では作成しなかったデータベースとの連携機能を作成し、現場監督の代わりにシステムが作業員に指示を出せるようにする必要とされる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり研究全般にわたってご指導を頂きました吉川榮和教授に深く感謝いたします。吉川教授には、お忙しい身に関わらず、研究の進め方や卒業論文、修士論文の書き方に至るまで全ての研究活動に対して的確にご指導して頂きました。また、就職活動でも大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

研究室に配属されてから、インターンシップなどさまざまな研究活動に対してご指導して頂きました下田宏助教授に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、本研究の方向性やシステム開発の助言、論文の校正など、研究全般にわたって多大な御指導、御協力を頂きました石井裕剛助手に心より感謝いたします。

本研究におけるシステム開発をサポートしてくれた修士課程1回生の山崎雄一郎君、学部4回生の佐野真治君に深く感謝します。

研究を進める上で何かとお世話して頂きました谷友美秘書、吉川万里子秘書に深く感謝いたします。

研究生生活において互いに励ましあい苦楽を共にした修士課程2回生の遠藤啓介君、越智和弘君、小林隆君、鮫島良太君に感謝します。

最後に、研究室での学生生活を共に過ごした吉川研究室の学生のみんなに感謝します。そして、本研究に関わった全ての人々に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 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,p407(2002)
- [2] BOEING:MAthematics and Computing Technology Technology Focus
,http://www.boeing.com/assocproducts/art/tech_focus.html(2003 年 1 月 31 日現在)
- [3] Steven Feiner,Blair MacIntyre,Doree Seligman:KARMA,
<http://www.cs.columbia.edu/graphics/projects/karma/karma.html>(2003 年 1 月 31 日現在)
- [4] 松崎剛士, 新田和弘, 下田宏, 吉川榮和, WuWei, 中川隆志, 寺下尚孝:レーザ光とカメラを用いた作業支援環境の構築, 計測自動制御学会システム・情報部門シンポジウム 2001 講演論文集,pp.343-348(2001)
- [5] 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)
- [6] 興梠正克, 蔵田武志, 坂上勝彦:ウェアラブルシステムのためのビューベースな位置・方位取得法, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU2002-223-232〔パターン認識・メディア理解〕,101,652,pp.33-40(2002)
- [7] 神原誠之, 横矢直和, 竹村治雄:マーカと自然特徴点を併用した広範囲見回し可能なステレオビデオシースルー拡張現実感, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU2002-223-232〔パターン認識・メディア理解〕,101,652,pp.47-53(2002)
- [8] 佐藤清秀, 穴吹まほろ, 山本裕之, 田村秀行:屋外装着型複合現実感のためのハイブリット位置合わせ手法, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU2002-223-232〔パターン認識・メディア理解〕,101,652,pp.71-78(2002)

- [9] 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)
- [10] Chris Harris, Mike Stephens:A Combined Corner and Edge Detector,Proc. Alvey Vision Conf.,pp147-151(1988)
- [11] 岸野文郎, 佐藤隆夫, 横矢直和, 相澤清晴, 有川正俊:岩波講座 マルチメディア情報学 5 画像と空間の情報処理,pp.90-96, 岩波書店 (2000)
- [12] 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,pp144-150, 昭晃堂 (1997)
- [13] 日本放送協会: 増補版 カラーテレビ受信技術, 日本放送出版協会,p22(2000)
- [14] 五十嵐悟, 橋本進, 宮本敦, 金子俊一:方向ヒストグラムの自己回帰モデルに基づく回転不変画像照合, 精密工学会誌,vol.67,no.9,pp.1519-1523 (2001 年)

付録目次

付録 A 加速度センサの精度実験	付録 A-1
A.1 実験 1	付録 A-1
A.2 実験 2	付録 A-5
付録 B ジャイロセンサの精度実験	付録 B-1
B.1 実験 1	付録 B-1
B.2 実験 2	付録 B-4
B.2.1 実験結果	付録 B-5
付録 C ARToolKit	付録 C-1
C.1 ARToolKit の概要	付録 C-1
C.2 マーカ検出処理	付録 C-1
C.2.1 取り扱う座標系	付録 C-1
C.2.2 マーカ抽出	付録 C-4
C.2.3 マーカ識別	付録 C-4
C.2.4 4 頂点位置検出	付録 C-5
C.3 マーカの 3 次元位置推定	付録 C-5
C.3.1 回転移動成分 $R_{3 \times 3}$ の推定	付録 C-6
C.3.2 平行移動成分 $T_{3 \times 1}$ の推定	付録 C-8
C.3.3 変換行列 T_{cm} の修正	付録 C-8
C.4 カメラキャリブレーション	付録 C-8
付録 D Harris オペレータ	付録 D-1
D.1 Harris オペレータの概要	付録 D-1
D.2 Harris オペレータによる物体の角の検出	付録 D-2
D.2.1 MORAVEC らの方法による物体の角の検出	付録 D-2
D.2.2 Harris オペレータによる物体の角の検出	付録 D-3

付録 図目次

A.1	一定加速度における時間変化 (x 軸)	付録 A-3
A.2	一定加速度における時間変化 (y 軸)	付録 A-4
A.3	一定加速度における時間変化 (z 軸)	付録 A-4
A.4	加速度の時間変化 (x 軸)	付録 A-6
A.5	加速度の時間変化 (y 軸)	付録 A-7
A.6	速度の時間変化 (x 軸)	付録 A-7
A.7	速度の時間変化 (y 軸)	付録 A-8
A.8	変位の時間変化 (x 軸)	付録 A-8
A.9	変位の時間変化 (y 軸)	付録 A-9
B.1	ジャイロセンサの出力電圧の変化	付録 B-2
B.2	ジャイロセンサの角速度 (電圧値) の変化	付録 B-3
B.3	ジャイロセンサの角度 (電圧値) の変化	付録 B-3
B.4	ジャイロセンサを取り付ける回転軸	付録 B-4
B.5	角加速度の時間変化	付録 B-6
B.6	角速度の時間変化	付録 B-6
B.7	角度の時間変化	付録 B-7
C.1	ARToolKit の使用例	付録 C-2
C.2	システムが取り扱う座標系	付録 C-3
C.3	マーカの例	付録 C-7
C.4	格子点のフィッティング 1	付録 C-9
C.5	格子点のフィッティング 2	付録 C-10
D.1	Harris オペレータの実行例	付録 D-1

付録表目次

A.1 x 軸に関する実験結果	付録 A-2
A.2 y 軸に関する実験結果	付録 A-2
A.3 z 軸に関する実験結果	付録 A-3
A.4 各軸の基準値	付録 A-5
B.1 静止状態でのジャイロセンサの値	付録 B-2

付録 A 加速度センサの精度実験

試作システムで使用した加速度センサの精度を評価する実験を行った。

A.1 実験 1

実験のテーマ

加速度センサから得られる測定値と加速度との関係を求める。

実験概要

加速度センサの 3 軸それぞれに対して、軸を水平面に対して平行に設置した加速度 0G の状態のときと、水平面に対して垂直に設置した加速度 1G の状態のときの加速度センサの出力を求める。その後、得られた測定値と加速度との関係を求める。加速度センサからの出力は、0V から 5V の間の電圧の値で得られる。また、加速度 1G は、重力加速度であり $9.81\text{m}/\text{sec}^2$ とする。

実験手順

実験は、以下の手順で進める。なお、加速度センサの測定値は、1 秒間に 40 回 (25msec で 1 回) 測定する。

1. x 軸が水平面に平行な状態になるように、加速度センサを設置する。
2. 加速度センサを静止させたまま、約 60 個 (1.5sec 間) の電圧値を測定する。
3. x 軸が水平面に垂直な状態になるように、加速度センサを設置する。
4. 加速度センサを静止させたまま、約 60 個 (1.5sec 間) の電圧値を測定する。

以上の手順を、 y 軸、 z 軸に対しても同様に行い、電圧値を測定する。

実験結果

実験によって得られた電圧の測定値の解析した。解析は、センサの立ち上げに必要な時間は0.5secであることから、開始から0.5sec間(20個)の測定値を省いた40個の測定値を対象に行った。3軸それぞれの解析の結果を、表 A.1 から表 A.3 に示す。また、3軸それぞれの時間と測定値との関係を、図 A.1 から図 A.3 に示す。

表 A.1: x 軸に関する実験結果

	加速度 0G	加速度 1G	加速度 0G から 1G に変化したときの变化量
平均 (V)	2.474	2.996	0.522
標準偏差 (V)	0.002862	0.002579	0.003616
(参考)	2.483	2.984	0.501

(参考) は、加速度センサの製造メーカーによって測定された結果

表 A.2: y 軸に関する実験結果

	加速度 0G	加速度 1G	加速度 0G から 1G に変化したときの变化量
平均 (V)	2.478	2.998	0.5201
標準偏差 (V)	0.002133	0.002529	0.002747
(参考)	2.449	2.947	0.498

(参考) は、加速度センサの製造メーカーによって測定された結果

考察

実験結果から、各軸それぞれの、加速度 0G の電圧値と加速度 $1.0\text{m}/\text{sec}^2$ 変化させたときの電圧値の変化は表 A.4 に示すようになった。

また、図 A.1 から図 A.3 の結果から、加速度が一定であれば時間が経過しても一定の値を示すことが分かった。

表 A.3: z 軸に関する実験結果

	加速度 0G	加速度 1G	加速度 0G から 1G に変化するときの変化量
平均 (V)	2.449	2.948	0.4993
標準偏差 (V)	0.001584	0.002762	0.003376
(参考)	2.435	2.933	0.498

(参考) は、加速度センサの製造メーカーによって測定された結果

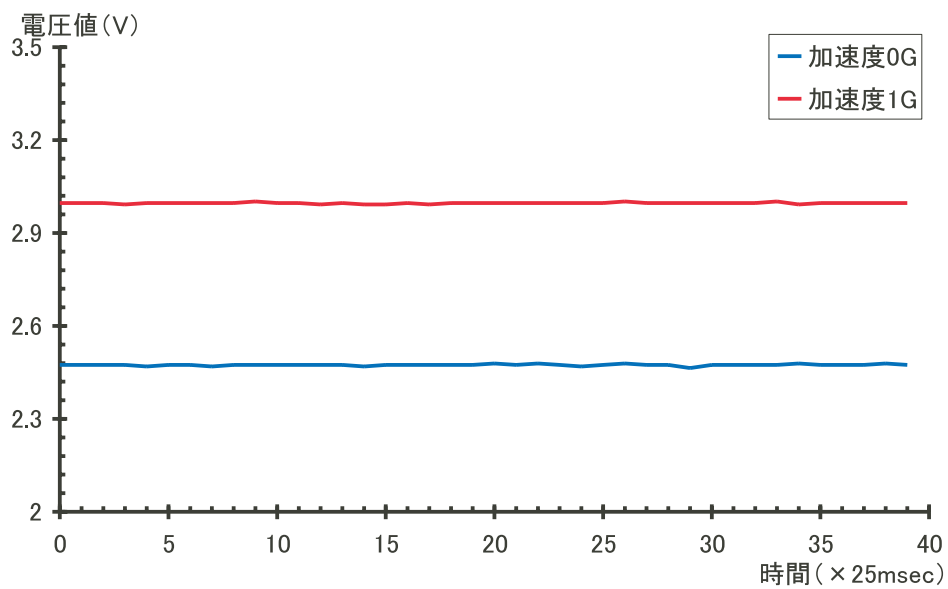


図 A.1: 一定加速度における時間変化 (x 軸)

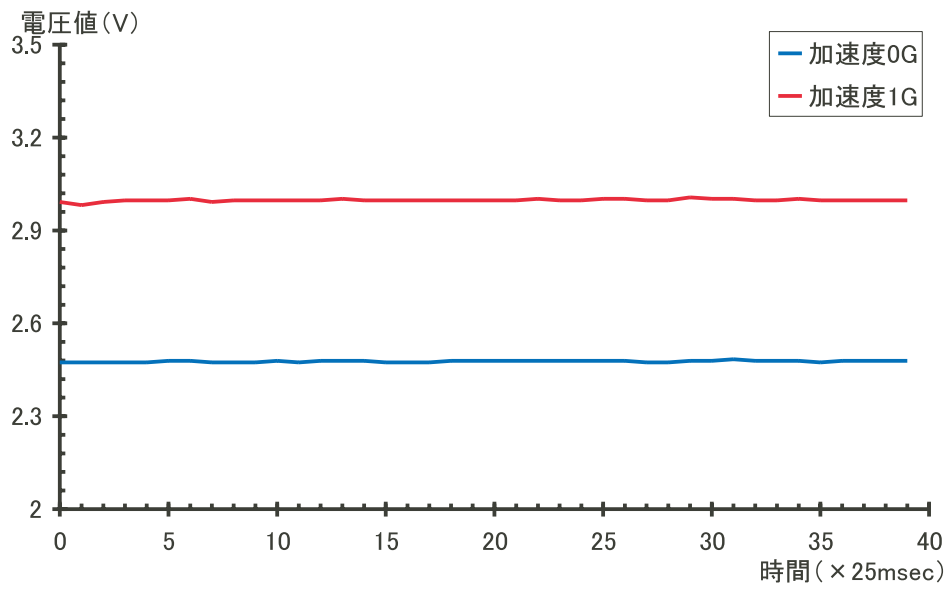


図 A.2: 一定加速度における時間変化 (y 軸)

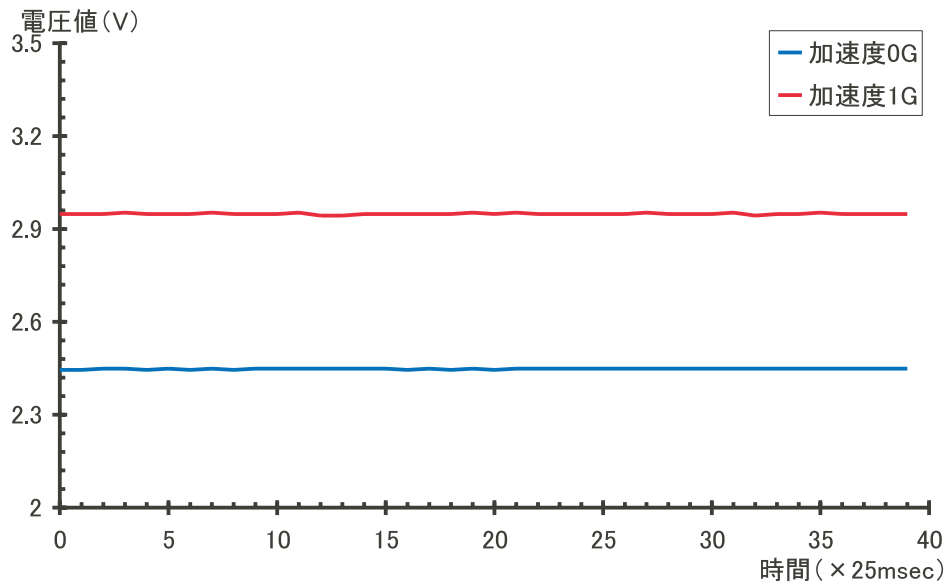


図 A.3: 一定加速度における時間変化 (z 軸)

表 A.4: 各軸の基準値

軸	加速度 0G の電圧値	加速度 $1.0\text{m}/\text{sec}^2$ 変化時の電圧値の変化
x 軸	2.474V	0.05321V
y 軸	2.478V	0.05302V
z 軸	2.449V	0.05090V

A.2 実験 2

実験のテーマ

加速度センサを頭部に装着した被験者の歩行を計測する。

実験の概要

加速度センサを被験者の頭部に装着し、頭の加速度を測定しながら、前後・左右に歩行してもらう。その後、実際に移動した距離と、加速度センサから求めた移動距離を比較し、精度を測定する。

実験の手順

被験者には以下の行動をとってもらい、その間の加速度センサの電圧値を測定する。なお、電圧値は、1秒間に100回（10msecに1回）測定を行う。

1. 被験者に数秒間静止状態でいてもらう。
2. 加速度センサの x 軸正の方向にゆっくりと 1m 歩行してもらう。
3. 被験者に数秒間静止状態でいてもらう。
4. 加速度センサの x 軸負の方向にゆっくりと 1m 歩行してもらう。

以上の手順を、 y 軸に対しても同様に行い、電圧値を測定する。

実験結果

加速度センサから得られたデータを、A.1の表 A.4 をもとに加速度を求めた。 x 軸方向、 y 軸方向において、求めた加速度の時間変化をそれぞれ、図??、図??に示す。ま

た、求めた加速度を積分して速度を求めた。 x 軸方向、 y 軸方向において、求めた速度と時間との関係をそれぞれ、図 A.6、図 A.7 に示す。さらに、速度を積分し変位を求めた。 x 軸方向、 y 軸方向において、変位と時間との関係を図 A.8、図 A.9 に示す。

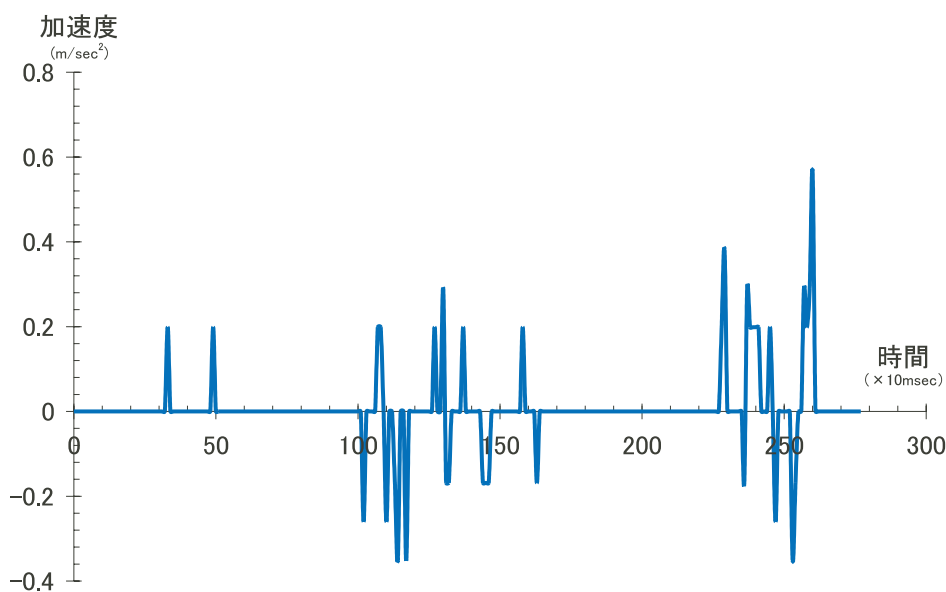


図 A.4: 加速度の時間変化 (x 軸)

考察

実験結果から、図 A.6 と図 A.6 の速度の時間変化のグラフは、ともに最初、被験者が正の方向に移動し、その後負の方向に移動したことを表している。これから、被験者の移動した方向を加速度センサで取得できることが分かった。

図 A.8 と図 A.9 の変位の時間変化のグラフは、被験者の移動した距離を表している。グラフから、 x 軸の変位は、最初、正の方向に 0.027m 進み、その後負の方向に 0.0046m 進んだ。また、 y 軸の変位は、最初、正の方向に 0.015m 進み、その後、負の方向に進み続ける状態になった。被験者は x 軸、 y 軸ともに 1m 進んだことから、大きく誤差が生じていることが分かった。誤差が生じた原因として、ドリフト誤差の影響が考えられる。

以上から、加速度センサでは、被験者の移動した方向を求めることができるが、移動した距離を求めることは難しいことが分かった。

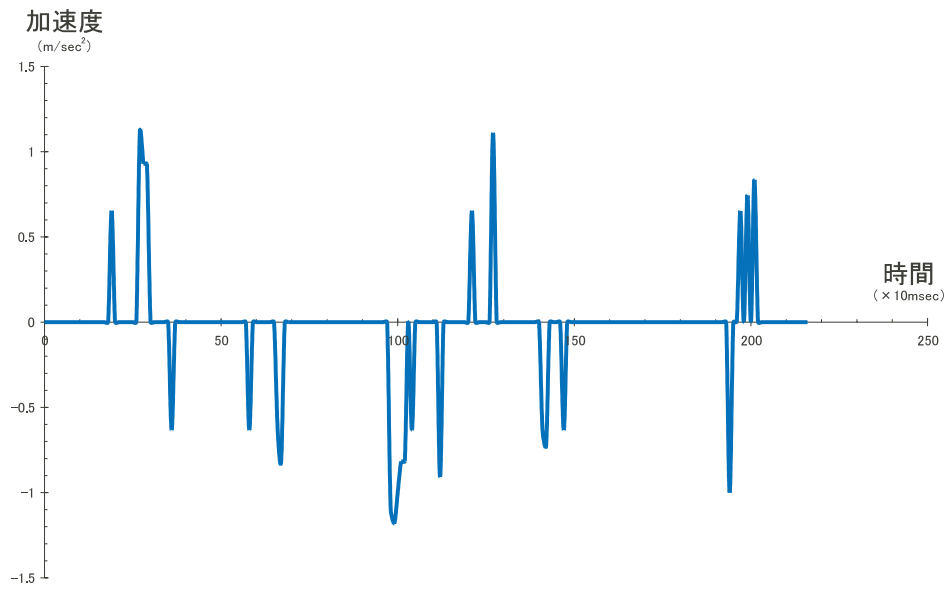


図 A.5: 加速度の時間変化 (y 軸)

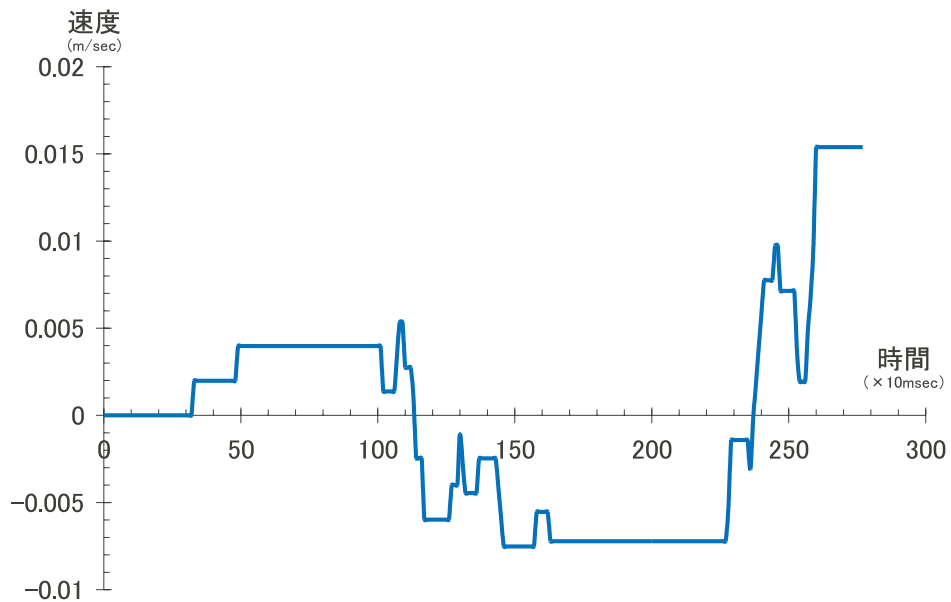


図 A.6: 速度の時間変化 (x 軸)

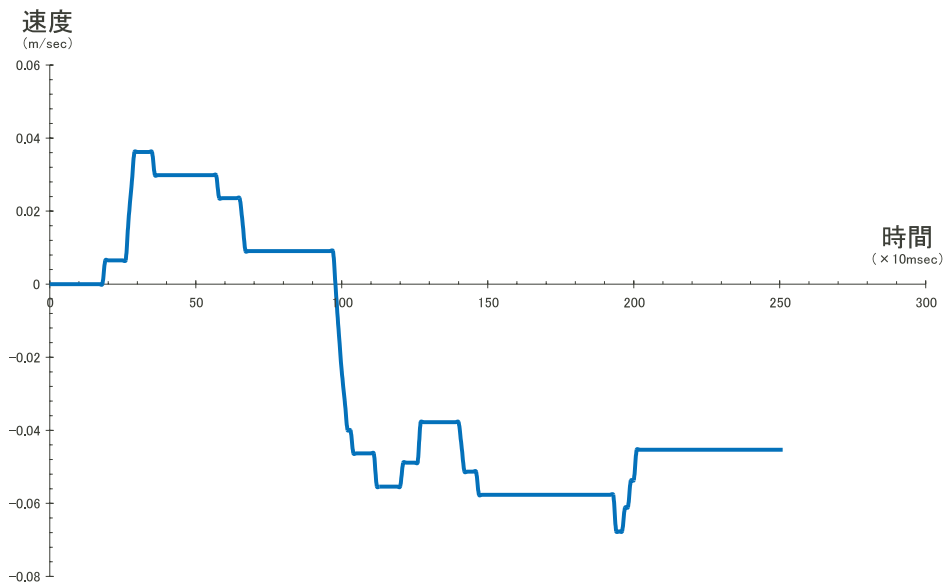


図 A.7: 速度の時間変化 (y 軸)

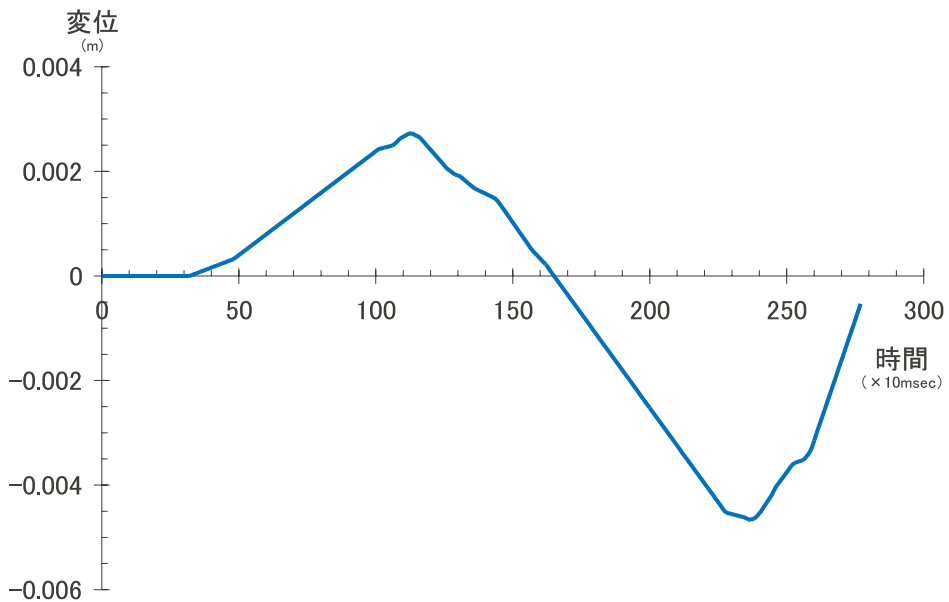


図 A.8: 変位の時間変化 (x 軸)

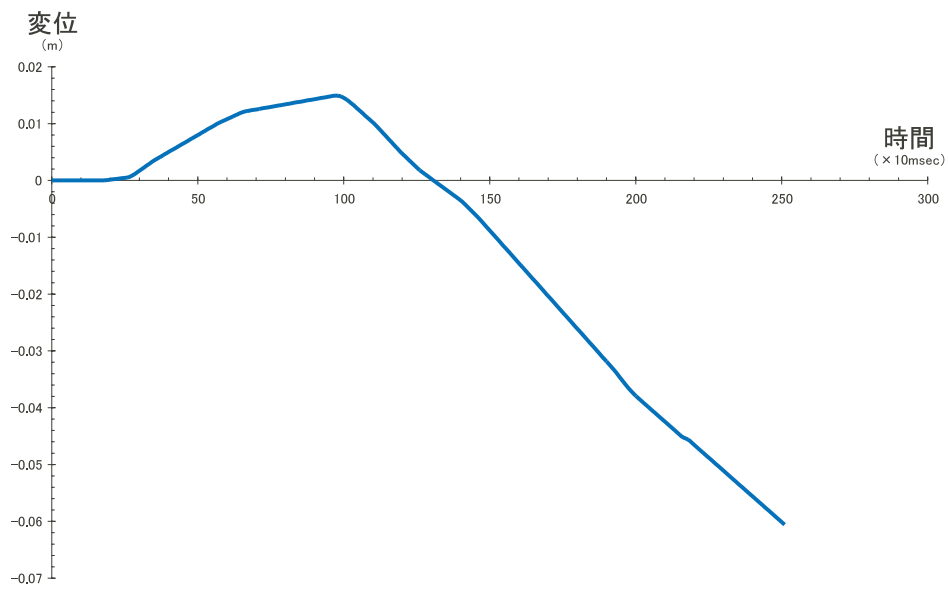


図 A.9: 変位の時間変化 (y 軸)

付録 B ジャイロセンサの精度実験

試作システムで使用したジャイロセンサの精度を評価する実験を行った。本システムでは、1軸測定用のジャイロセンサを作業員の頭部に3個装着し、3軸方向の回転を測定する。このとき、3個のセンサは同じセンサを使用するため、本実験では、使用するセンサ1個の対象とした。

B.1 実験1

実験のテーマ

ジャイロセンサの静止させた状態で出力される電圧の値を調べる。また、ジャイロセンサを90°回転させたときの電圧の値の変化を調べる。

実験概要

ジャイロセンサを水平面に対し平行に設置し、センサから出力される電圧を測定する。その後、ジャイロセンサをゆっくりと90°回転させたとき、センサから出力される電圧を測定し、変化を調べる。

実験手順

実験の手順は、以下のようになる。

1. ジャイロセンサを、水平面に対して平行に設置する。
2. ジャイロセンサを静止させた状態で、0.5sec間の電圧を測定する。
3. ジャイロセンサを、水平面に対して垂直になるまで、手でゆっくりと回転させる。
4. ジャイロセンサを静止させ、0.5sec間の電圧を測定する。

なお、電圧の測定は1sec間に100回(10msecに1回)行った。

実験結果

ジャイロセンサから出力された電圧の変化を図 B.1 に示す。また、図 B.1 の中で、最初にジャイロセンサを静止させた 0.5sec 間の値を解析した結果を表 B.1 に示す。この結果より、加速度 0G のときのジャイロセンサの出力は、1.451V であった。この結果をもとに、ジャイロセンサから得られる角加速度（電圧値）を求め、角加速度を 1 階積分を施した結果を図 B.2 に示す。図 B.2 のグラフは、角速度（電圧値）の時間変化を表している。角速度の時間変化をさらに 1 階積分を施した結果を、図 B.3 に示す。図 B.3 のグラフは、角度の時間変化を表している。

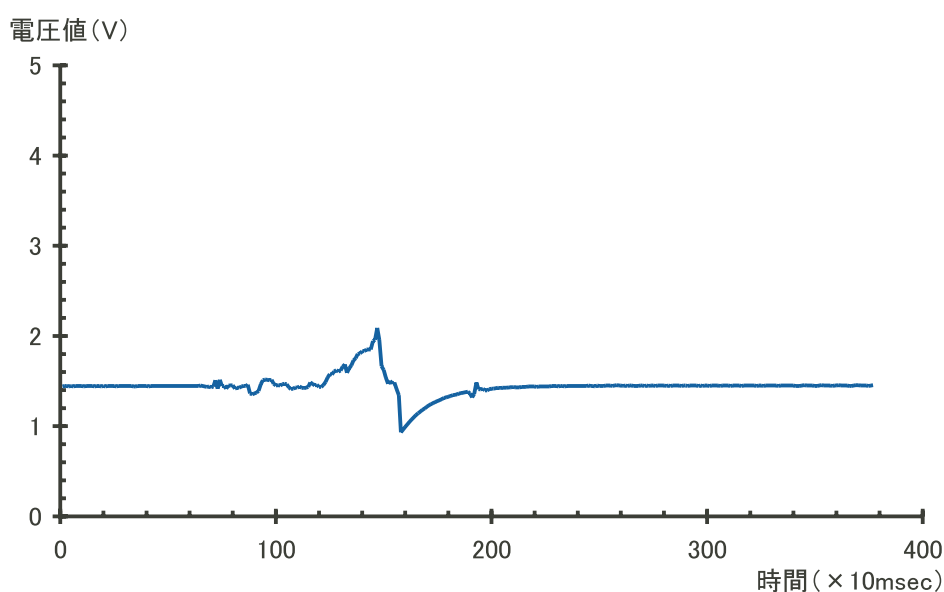


図 B.1: ジャイロセンサの出力電圧の変化

考察

図 B.2 の角速度の変化は、0.8msec 付近で上昇し 1.1msec あたりで下降に転じ、1.7sec 付近で 0 に近づいている。これは、ジャイロセンサが 0.8sec で動きはじめ、1.7sec で

表 B.1: 静止状態でのジャイロセンサの値

	値
平均 (V)	1.451
標準偏差 (V)	0.003096

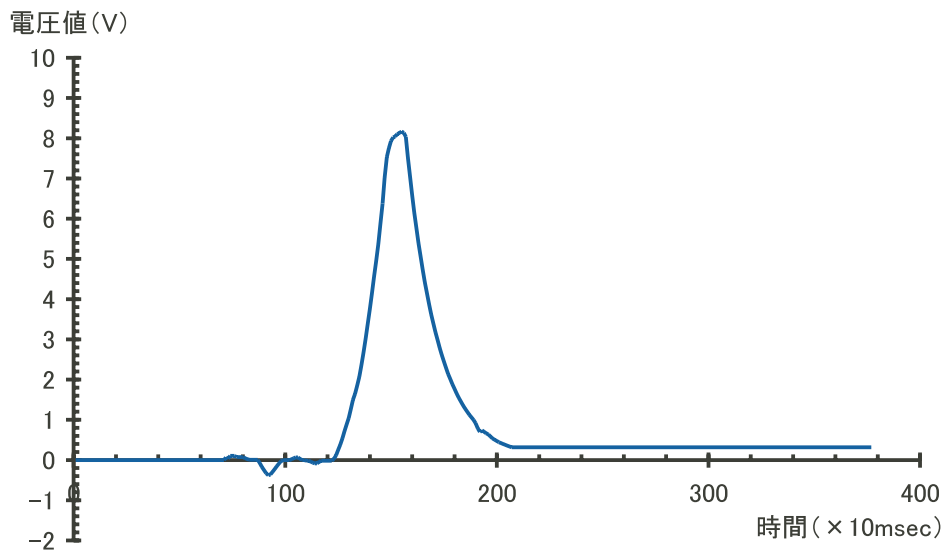


図 B.2: ジャイロセンサの角速度 (電圧値) の変化

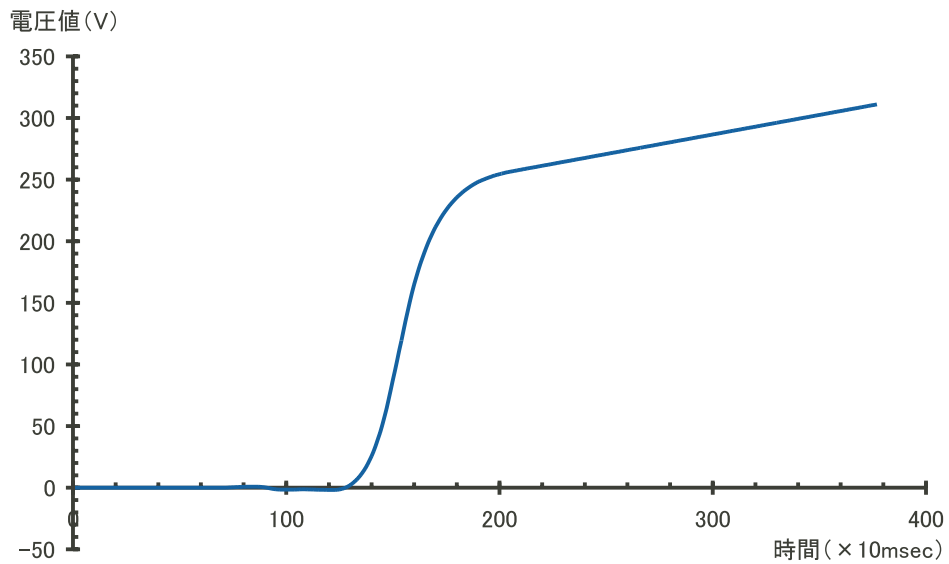


図 B.3: ジャイロセンサの角度 (電圧値) の変化

停止して静止状態になったことを意味しており、予想通りの結果が得られた。しかし、1.7sec以降の角速度が0Vになるはずが、-10V程度の値であった。これは、角加速度を求める際に、ドリフト誤差が生じたためと考えられる。図B.3の角度の変化は、予想通りの結果が得られた。この結果から、角度は電圧値252Vで90度になることが分かった。しかし、1.7sec以降では、ジャイロセンサが静止しているため、電圧値が一定になるはずであるが、下降を続けた。これは、ドリフト誤差の影響と考えられる。以上のより、ジャイロセンサのみで姿勢を計測することは、ドリフト誤差などの誤差が蓄積するため、長時間の使用には不向きであることが分かった。

B.2 実験2

実験のテーマ

ジャイロセンサを被験者の頭部に装着し、頭の回転を計測する

実験の概要

ジャイロセンサを、被験者に装着する。このとき、ジャイロセンサの回転軸を、図B.4に示すような軸にあうように装着する。これにより、被験者の頭を左右に回転させる動きを計測できる。その後、被験者に頭を左右に回転してもらい、この間のジャイロセンサの挙動を調べる。

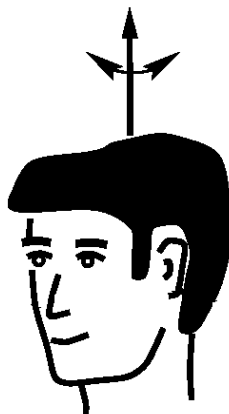


図 B.4: ジャイロセンサを取り付ける回転軸

実験手順

被験者には以下の行動をとってもらい、その間のジャイロセンサの電圧値を測定する。なお、電圧値は、1秒間に20回（50msecに1回）測定を行う。

1. 頭を真正面から左側に回転させる。
2. 頭を右を向くまで回転させる。
3. 頭を左を向くまで回転させる。
4. 2.～3.を2回繰り返し替える。
5. 頭を右に向くまで回転させる。
6. 正面を向くように頭を回転させる。

以上の動作を、被験者が椅子に座った状態で行ってもらった。

B.2.1 実験結果

加速度センサから得られた電圧値から、B.1の実験結果をもとに、角度に換算した結果を図B.5に示す。また、求めた角加速度を積分し、補正を施して角速度を求めた結果を図B.6に示す。さらに、角速度を積分し角度を求めた結果を図B.7に示す。図B.5から図B.7のグラフは、 y 軸正の方向が被験者が左に頭を回転させたときで、負の方向は被験者が右に頭を回転させたときである。

考察

実験結果から、図B.6のグラフは、被験者の頭の回転方向を表している。これから、被験者の移動した方向を加速度センサで取得できることが分かった。

図B.7のグラフは、被験者が頭を回転させた角度を表している。グラフから、正面を基準として左右に 15° 回転させていることが分かった。しかし、実際に測定すると 30° 以上回転していることが分かった。そのため、データをそのまま利用して角度を求めることは難しいが、データを補正すれば、角度を求めることができる可能性があることが分かった。

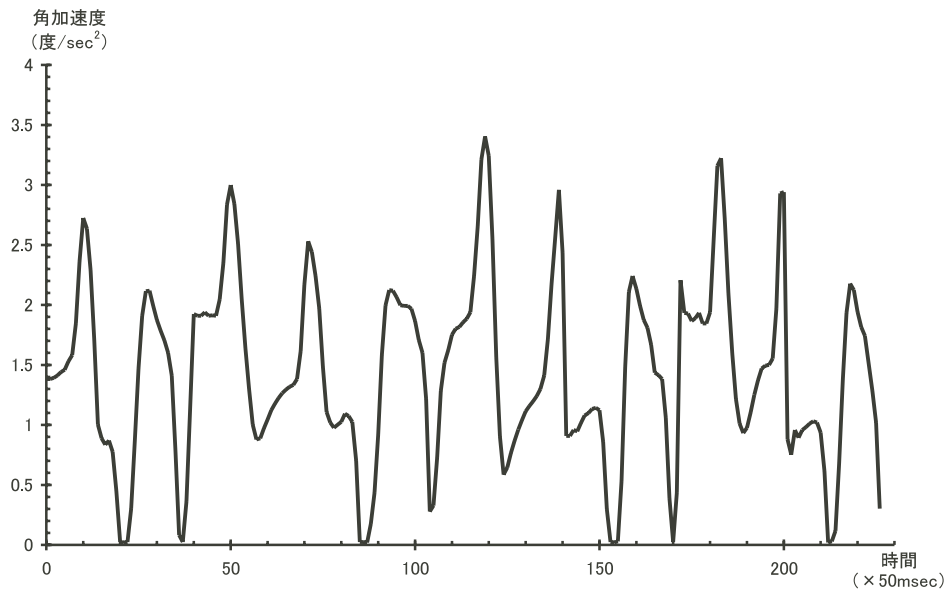


図 B.5: 角加速度の時間変化

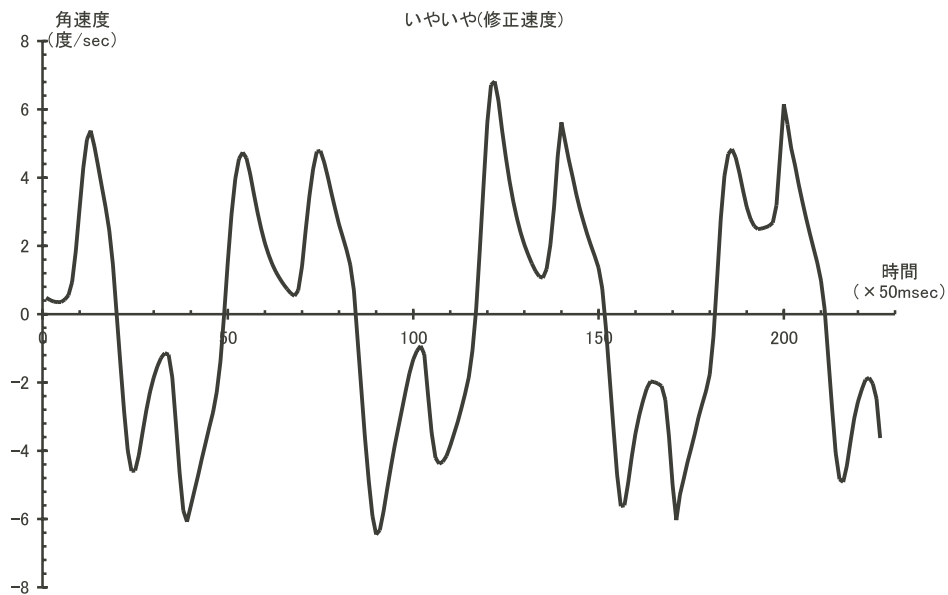


図 B.6: 角速度の時間変化

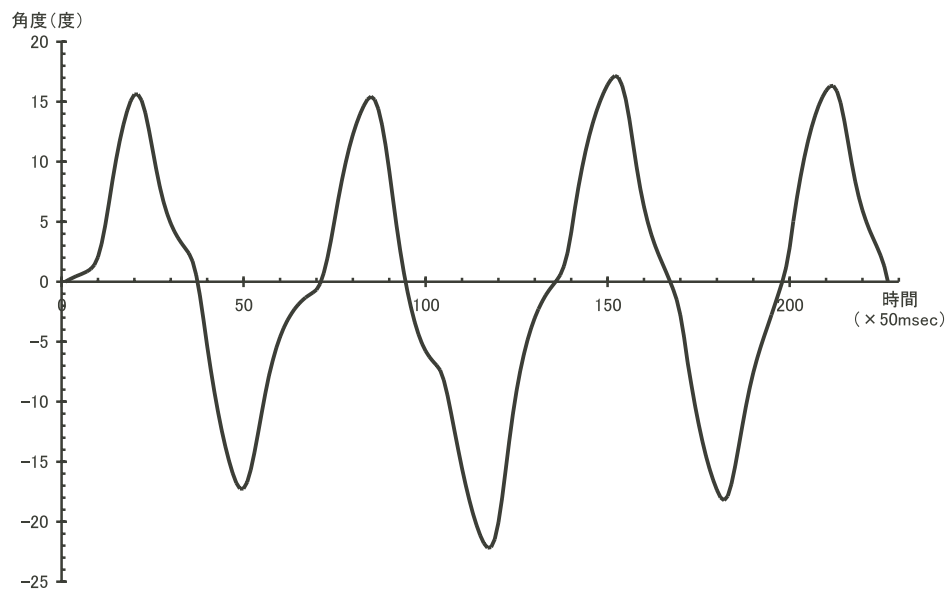


図 B.7: 角度の時間変化

付録 C ARToolKit

C.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 C.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。

C.2 マーカ検出処理

C.2.1 取り扱う座標系

図 C.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、画像の

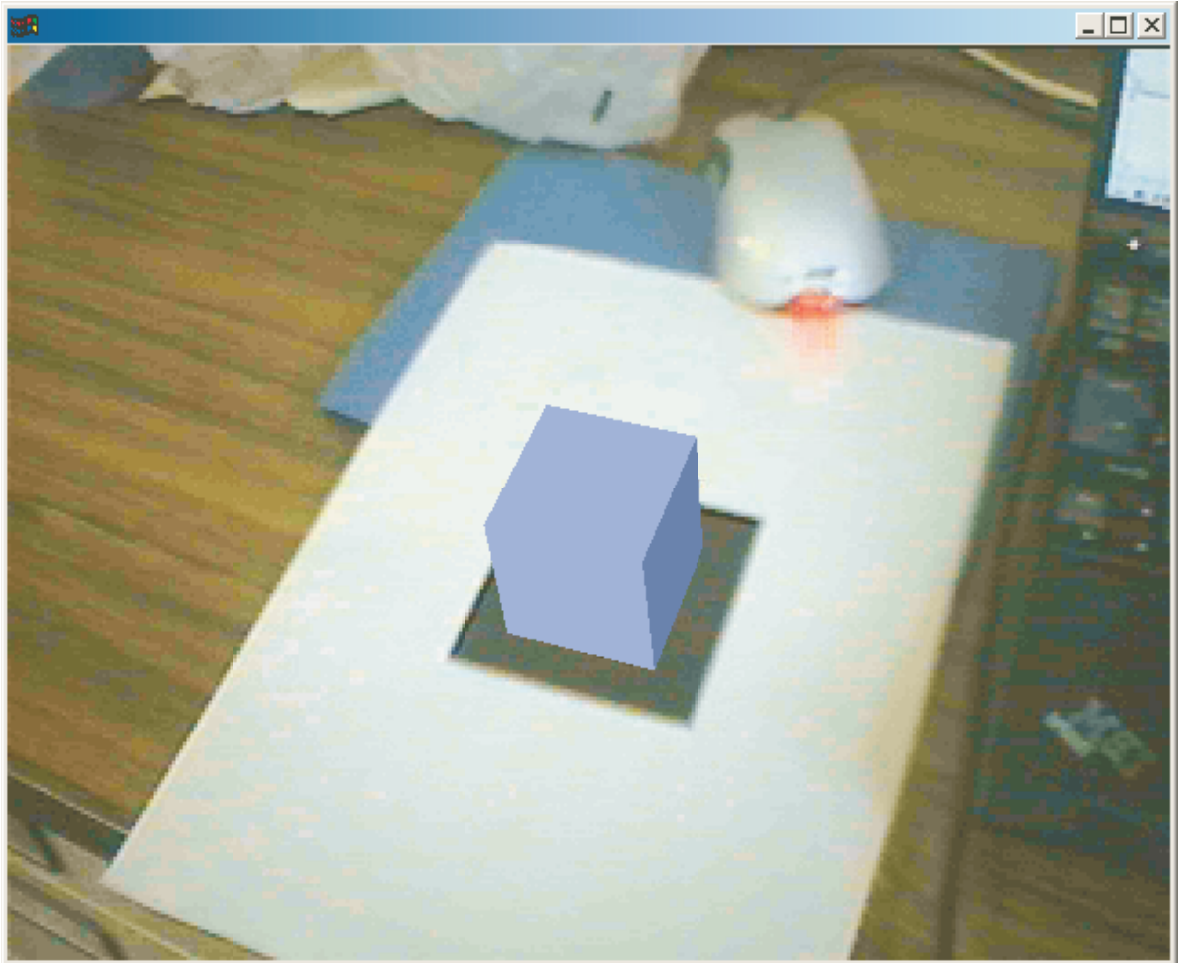


図 C.1: ARToolKit の使用例

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。

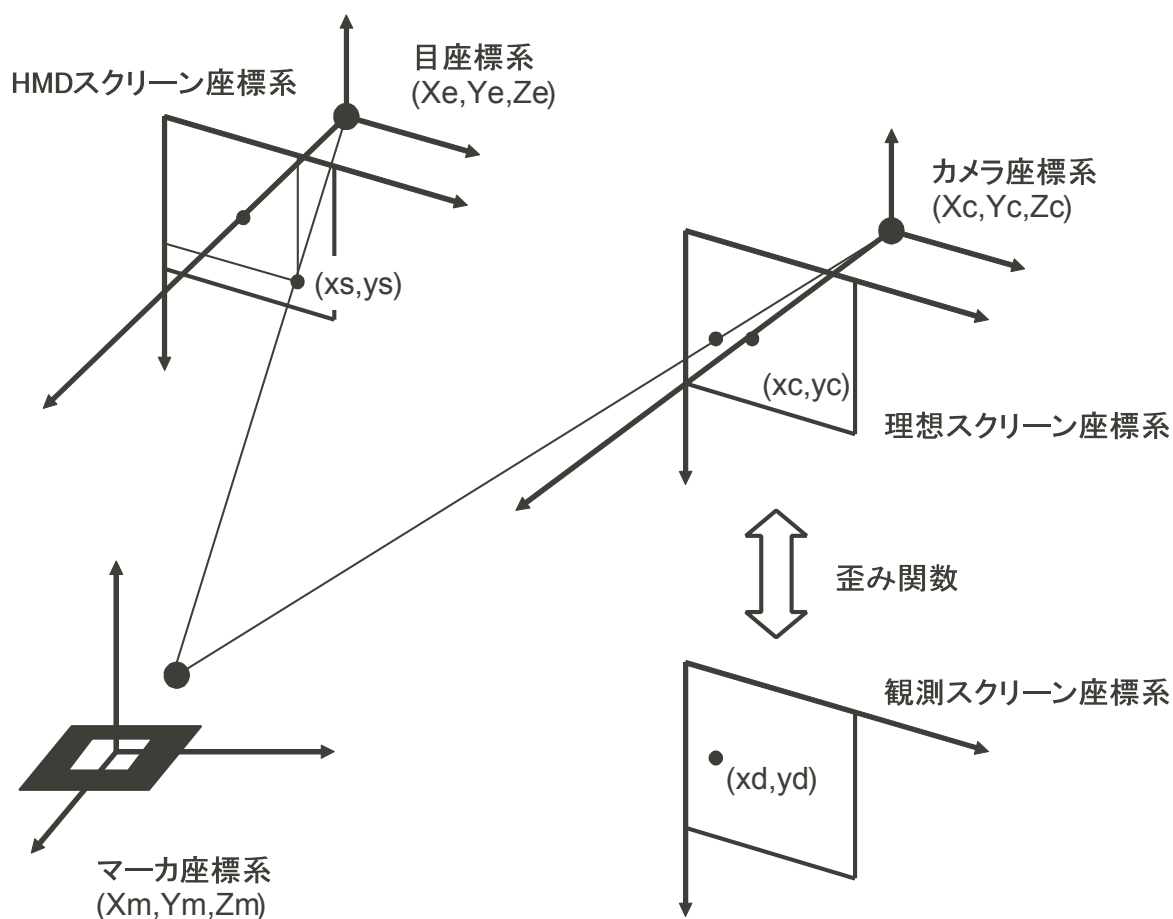


図 C.2: システムが取り扱う座標系

C.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。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。

C.2.3 マーカ識別

図_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。

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

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。

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

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 は次元数、

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。

C.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。

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

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 () 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。

C.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 (C.4),(C.5) のように表現できる。式 (C.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との関係式であるが、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。

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{cm} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{C.4})$$

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

マーカ座標系におけるマーカの4頂点の座標値は図 C.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 (C.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。

C.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 (C.6) のように表し、式 (C.5) の x_c, y_c をこれに代入することで式 (C.7) が得られる。

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

$$\begin{aligned} a_1P_{11}X_c + (a_1P_{12} + b_1P_{22})Y_c + (a_1P_{13} + b_1P_{23} + c_1)Z_c &= 0 \\ a_2P_{11}X_c + (a_2P_{12} + b_2P_{22})Y_c + (a_2P_{13} + b_2P_{23} + c_2)Z_c &= 0 \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

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 (C.7) の2平面の面内方向となる。つまり、式 (C.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 $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_1$ を求めることができる。

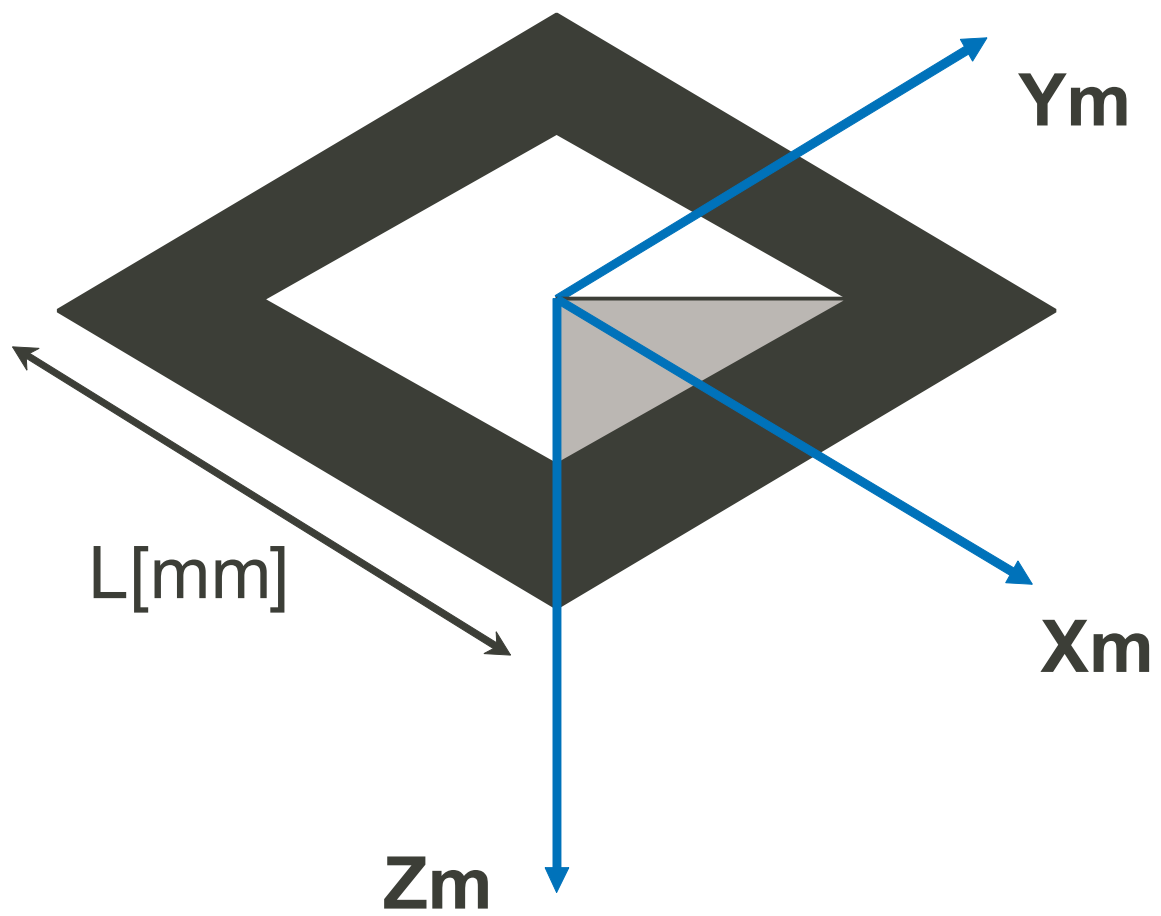


図 C.3: マーカの例

C.3.2 平行移動成分 $T_{3 \times 1}$ の推定

式 (C.4)(C.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 1 次方程式が 8 個得られる。行列 P, 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。

C.3.3 変換行列 T_{cm} の修正

以上の計算で 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。

C.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 C.4, C.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す、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 (C.8) 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 C は式 (C.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、 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 P を計算できる。

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

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

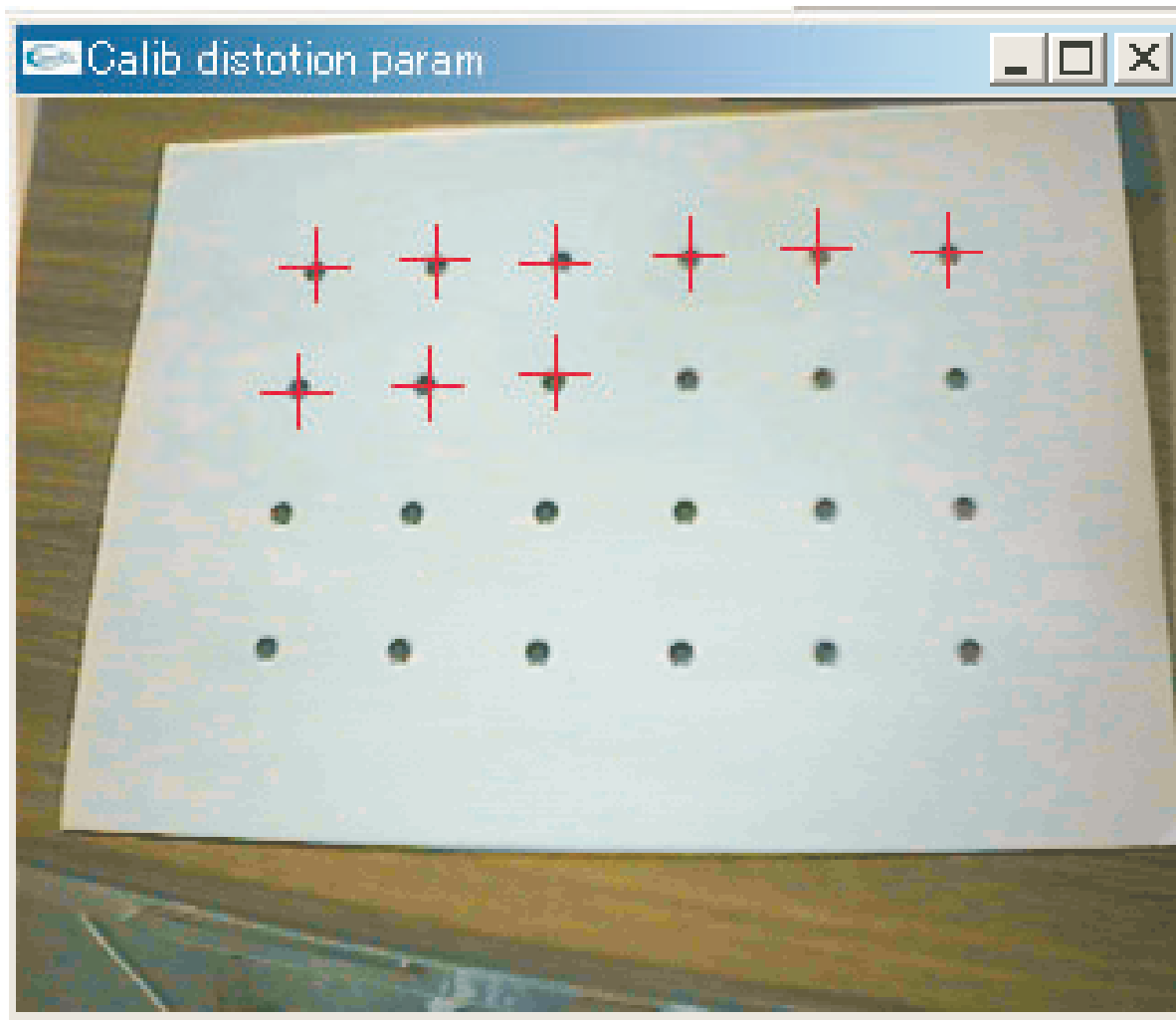


図 C.4: 格子点のフィッティング 1

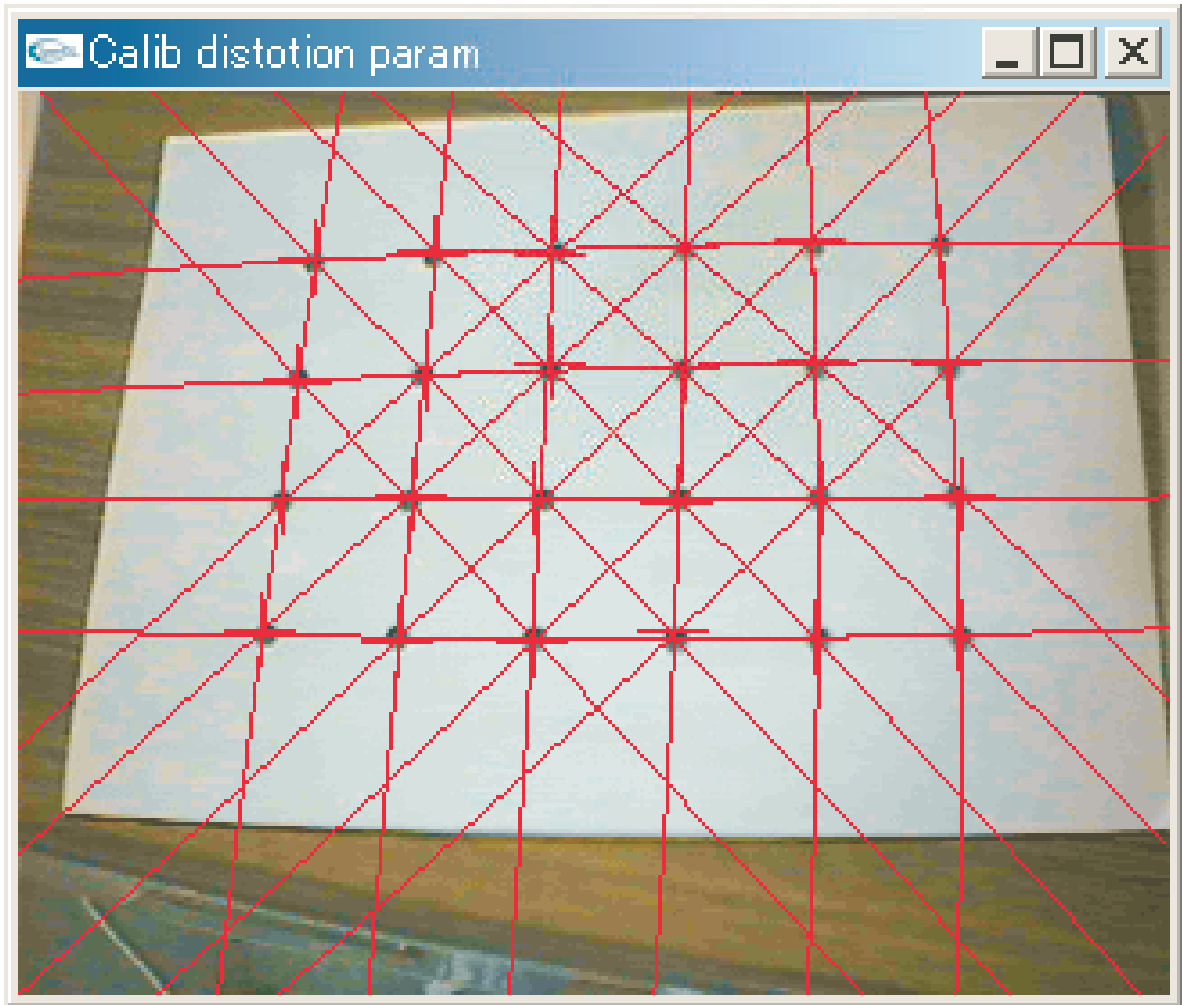


図 C.5: 格子点のフィッティング 2

付録 D Harris オペレータ

本付録では、本研究で開発するシステムの作業員の位置推定機能で使用する Harris オペレータについて、まず Harris オペレータの概要について述べ、次いで画像中で Harris オペレータの使用する方法について述べる。

D.1 Harris オペレータの概要

Harris オペレータは、画像中から物体の角やエッジを検出する演算子であり、検出された物体の角やエッジは、2次元の画像から3次元形状を求める目的で考案された。また、検出した物体の角は、画像中の特徴的な部分であるため、目印（マーカ）として利用されることもある。本研究でも、Harris オペレータを用いて物体の角を検出し、自然マーカとして利用する。

Harris オペレータを実際に求めた例を図 D.1 に示す。図 D.1 の (a) の元画像に対して、Harris オペレータを用いて物体の角を検出すると (b) の検出画像の黄色の領域になる。(b) の検出画像の結果を分かりやすくするため、(a) と (b) を合成した画像が (c) の合成画像である。

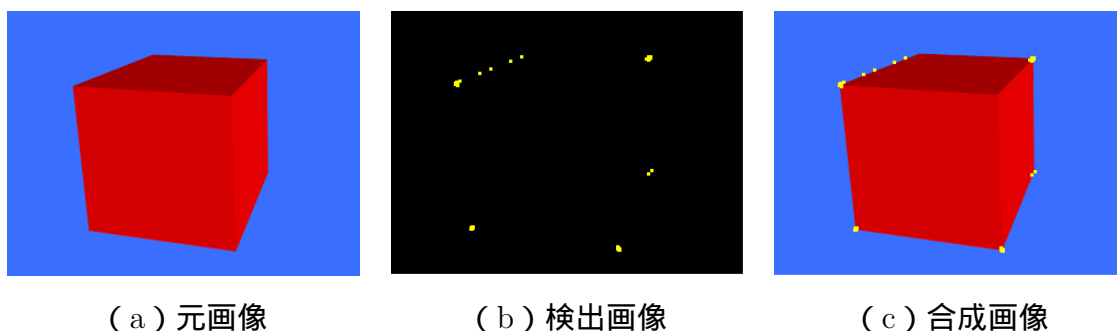


図 D.1: Harris オペレータの実行例

次節では、Harris オペレータによる画像中の物体の角の検出方法について述べる。

D.2 Harris オペレータによる物体の角の検出

本節ではについて、まず、物体の角の検出する方法として MORAVEC らの方法を説明する。次いで、Harris オペレータによる物体の角を検出する方法

D.2.1 MORAVEC らの方法による物体の角の検出

画像中の物体の角を検出するアルゴリズムに、MORAVEC らの方法がある。

MORAVEC らの方法は、以下のようにして物体の角を検出する。

縦 U pixel、横 V pixel の画像において、その画像中の (u, v) の画素の値を $I_{u,v}$ と表す。このとき、画素 (u, v) に対しての評価値 $E_{x,y}$ を次の式で求める。

$$E_{x,y} = \sum_{u,v} w_{u,v} |I_{x+u,y+v} - I_{u,v}|^2 \quad (\text{D.1})$$

なお、 $w_{u,v}$ は窓関数であり、任意の領域 K に対して、

$$w_{u,v} = \begin{cases} 1 & (u, v) \in K \\ 0 & (u, v) \notin K \end{cases} \quad (\text{D.2})$$

が成り立つ。

評価値 $E_{x,y}$ の (x, y) の値を、 $(x, y) = \{(1, 0), (1, 1), (0, 1), (-1, 1)\}$ と変化させたときの最小値 E_{min} を、画像中の全画素に対して求め、その中で閾値によって物体の角の部分と、それ以外の部分に分ける。

このようにして求める MORAVEC らの方法では、以下の問題がある。

- $E_{x,y}$ を求めるために累乗の計算を行う必要があり、計算の処理に時間を要する
- 画像中の四角い領域を窓関数と設定すると、雑音を多く入る
- E_{min} を 4 つの $E_{x,y}$ から単純に選ぶため、閾値によっては雑音が入りやすく、閾値の設定が難しい

以上の問題を解決する方法として、MORAVEC らの方法を応用した Harris オペレータが提案された。次項で、Harris オペレータによる物体の角の検出手法について述べる

D.2.2 Harris オペレータによる物体の角の検出

Harris オペレータは、MORAVEC らの方法で生じる問題点を解決するために、以下の方法を用いる。

- 画像値を微分した値を用いることで累乗の計算を無くし、処理時間の短縮を図る
- 窓関数を円形のガウス関数にすることで、雑音が入らないようにする
- (x, y) の値をさまざまに変化させた $E_{x,y}$ を閾値を用いて 2 値化することで閾値設定を容易にする

以上の方法を用いた Harris オペレータの手順は、以下のようになる。画像中の、画素 (u, v) における画素値を $I_{u,v}$ とする。まず、画像全体に対して、 x 軸、 y 軸に方向に微分を行い、 $\frac{\partial I_{u,v}}{\partial x}$ と $\frac{\partial I_{u,v}}{\partial y}$ を求める。それぞれの求め方は次の式のようにになる。

$$\frac{\partial I_{u,v}}{\partial x} = I_{u+1,v} - I_{u-1,v} \quad (\text{D.3})$$

$$\frac{\partial I_{u,v}}{\partial y} = I_{u,v+1} - I_{u,v-1} \quad (\text{D.4})$$

このようにして求めた微分値を用いて、3 つの実数 A 、 B 、 C を次の式で求める。

$$A = w_{u,v} \times \left(\frac{\partial I_{u,v}}{\partial x} \right)^2 \quad (\text{D.5})$$

$$B = w_{u,v} \times \left(\frac{\partial I_{u,v}}{\partial y} \right)^2 \quad (\text{D.6})$$

$$C = w_{u,v} \times \left(\frac{\partial I_{u,v}}{\partial x} \right) \cdot \left(\frac{\partial I_{u,v}}{\partial y} \right) \quad (\text{D.7})$$

この 3 つの次数をもとに、評価値 R を次の式で求める。

$$R = (AB - C^2) - \kappa(A + B)^2 \quad (\text{D.8})$$

となる。この評価値 R を、閾値を用いて分類すると、物体の角を検出できる。