

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
自然特徴点を用いた
題目： 広域トラッキングのための
環境モデルの更新手法

指導教員： 下田 宏 教授

氏名： 顧 穎成

提出年月日： 平成26年2月7日(金)

論文要旨

題目：自然特徴点を用いた広域トラッキングのための環境モデルの更新手法

下田研究室，顧 穎成

要旨：

運転を終了した原子力発電プラントを安全に解体するため、様々な研究が行われている。その中で、拡張現実感を用いた作業支援は、解体作業の効率や安全性を高めることができると期待されている。

拡張現実感を実現するためには、ユーザの視野を撮影しているカメラの位置と方向をリアルタイムで計測するトラッキングと呼ばれる手法が必要である。環境整備の労力や運用の手間を考慮すると、原子力発電プラント内の環境にもとから存在する物体の角などの特徴的な点(自然特徴点)を用いた広域トラッキングを利用することが望ましい。しかし、従来の自然特徴点を用いた広域トラッキング手法では、解体作業の進行により環境が変化しても、事前に計測した自然特徴点から生成した三次元点群モデル(環境モデル)を自動的に更新できないため、トラッキングを継続できない可能性が高い。本研究では、この問題を解決するため、環境の変化を自動的に認識する手法、および、変化した領域の環境モデルを自動的に更新する手法を実現することにより、解体中の原子力発電プラントのような動的に変化する広い環境でも、自然特徴点を用いた広域トラッキングを安定して長時間利用可能にすることを目的とする。

本研究では、事前に計測した自然特徴点から生成した環境全体の三次元点群モデル(グローバル環境モデル)を用いて広域トラッキングを実行すると同時に、環境中の自然特徴点の分布状況を分析することで環境の変化を認識する。環境が変化すると認識された場合、変化した部分とその周辺の自然特徴点を自動的に計測し、局所的な三次元点群モデル(ローカル環境モデル)を生成する。ローカル環境モデルには、比較的大きな誤差が含まれるため、そのままではグローバル環境モデルの更新には利用できない。そこで、変化した部分の周辺の自然特徴点の情報を利用してローカル環境モデルの精度を向上させた後、グローバル環境モデルを更新する。提案手法に対し、解体作業現場において評価実験を行った。その結果により、提案手法を用いることにより、環境の変化を正しく認識できること、環境が変化した場合に環境モデルを適切に更新し、トラッキングを継続できることを確認した。また、マーカを用いたトラッキング手法と提案手法の安定性を評価した結果、提案手法の方が安定性が高いことを確認した。

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 原子炉廃止措置研究開発センターにおける解体作業の現状	3
2.2 拡張現実感を用いた解体支援の現状と課題	4
2.2.1 拡張現実感	4
2.2.2 拡張現実感を用いた解体支援	9
2.3 自然特徴点を用いたトラッキングの関連研究	12
2.4 研究の目的	13
第 3 章 トラッキングに用いられる環境モデルの更新手法の提案	15
3.1 手法の概要	15
3.2 グローバル環境モデルの生成	21
3.2.1 グローバル環境モデルの構成要素	22
3.2.2 自然特徴点の計測	24
3.3 環境変化の認識	26
3.3.1 環境変化の認識手法の概要	26
3.3.2 自然特徴点分布画像の生成	29
3.3.3 自然特徴点分布画像を用いた環境変化の認識	32
3.4 ローカル環境モデルの生成	35
3.5 グローバル環境モデルの更新	36
3.5.1 更新手法の概要	36
3.5.2 重複点の検索	38
3.5.3 ローカル環境モデルの誤差低減	39
3.5.4 ローカル環境モデルとグローバル環境モデルの統合	40
第 4 章 解体作業現場における提案手法の有効性の評価実験	46
4.1 実験の目的	46

4.2	実験の方法	46
4.2.1	実験の手順	46
4.2.2	実験の機材と実験用システム	48
4.2.3	実験の環境	50
4.2.4	実験環境の画像の取得	52
4.2.5	変化認識・環境モデル更新処理に必要なパラメータの設定	54
4.3	実験結果と考察	56
4.3.1	変化認識の結果と考察	57
4.3.2	トラッキングの結果と考察	59
4.3.3	まとめ	63
第 5 章 解体作業現場における提案手法とマーカによるトラッキング手法の比較実験		65
5.1	実験の目的	65
5.2	実験の方法	65
5.2.1	実験の手順	65
5.2.2	実験の機材と実験用システム	66
5.2.3	実験の環境	66
5.2.4	実験環境の画像の取得	70
5.2.5	変化認識・環境モデル更新処理に必要なパラメータの設定	72
5.3	実験結果と考察	72
第 6 章 結論		83
謝 辞		85
参 考 文 献		86
付録 A 自然特徴点		90
A.1	SIFT 特徴点	90
A.2	FAST 特徴点	91

目 次

2.1	解体作業シミュレーションシステム ^[10]	4
2.2	拡張現実感の位置づけ ^[11]	5
2.3	拡張現実感を用いた放射線の可視化 ^[12]	5
2.4	ARToolKit のマーカ ^[18]	8
2.5	遠近両用マーカ ^[19]	8
2.6	自然特徴の例	9
2.7	拡張現実感を用いた解体作業支援システム ^[20]	10
2.8	拡張現実感を用いた解体作業計画立案支援システム ^[21]	11
2.9	拡張現実感を用いた仮置・運搬作業シミュレーションシステム ^[22]	11
2.10	自然特徴点を用いたトラッキングの例 ^[25]	13
2.11	想定する解体対象	14
3.1	環境の変化	15
3.2	提案手法の処理手順	16
3.3	トラッキングのための事前処理	17
3.4	環境変化の認識	18
3.5	環境変化がない場合の処理	19
3.6	環境変化がある場合の処理	20
3.7	システムの構成	21
3.8	パッチの例	23
3.9	水平・垂直ベクトル	23
3.10	三次元復元の結果	25
3.11	三次元復元のエラー	25
3.12	三次元復元のエラーの検出	26
3.13	画像の差分処理による変化の認識 ^[27]	27
3.14	環境変化の認識処理	28
3.15	誤差を含んだ再投影	29
3.16	自然特徴点の認識問題	31

3.17 再投影条件の計算	32
3.18 Structure-From-Motion による誤差	33
3.19 自然特徴点の数の差	33
3.20 画像のブレによる自然特徴点分布の変化	34
3.21 ローカル環境モデルの例	35
3.22 重複点	36
3.23 グローバル環境モデルの更新処理	38
3.24 重複点の中の外れ値	39
3.25 修正グループ	41
3.26 周辺領域	42
3.27 区域の分割	42
3.28 更新領域の仮定	43
3.29 自然特徴点の更新	45
4.1 手法の有効性の評価実験の手順	47
4.2 実験用カメラ	48
4.3 実験用バルブ	49
4.4 実験用レール	50
4.5 実験用システムのハードウェアの構成	50
4.6 純水装置室の一部の概略図	51
4.7 実験環境の様子	52
4.8 カメラの移動経路 (変化がない環境)	53
4.9 解体作業で起こる環境変化の模擬	53
4.10 カメラの移動経路 (変化がある環境)	54
4.11 環境変化がない場合の自然特徴点分布の差異	57
4.12 環境変化がない場合の画像	57
4.13 環境変化がある場合の自然特徴点分布の差異	58
4.14 環境変化がある場合の画像	58
4.15 照明の影響による環境変化認識の問題	60
4.16 照明の影響による問題の解決案	60
4.17 修正した画像で計算した自然特徴点分布の差異	60
4.18 環境変化がない場合のトラッキング結果 (認識・更新機能無効)	61
4.19 環境変化がない場合のトラッキング結果 (認識・更新機能有効)	62

4.20 環境変化がある場合のトラッキング結果 (認識・更新機能無効)	62
4.21 環境変化がある場合のトラッキング結果 (認識・更新機能有効)	63
5.1 比較実験の手順	67
5.2 実験用遠近両用マーカ	68
5.3 実験用 ARToolKitPlus マーカ	68
5.4 実験用遠近両用マーカの設置	69
5.5 実験用 ARToolKitPlus マーカの設置	69
5.6 レールの設置	71
5.7 カメラの移動経路	71
5.8 環境変化がない場合の提案手法によるトラッキング結果	74
5.9 環境変化がある場合の提案手法によるトラッキング結果	74
5.10 環境変化がない場合の円形マーカによるトラッキング結果	75
5.11 環境変化がある場合の円形マーカによるトラッキング結果	75
5.12 環境変化がない場合の ARToolKitPlus マーカによるトラッキング結果	76
5.13 環境変化がある場合の ARToolKitPlus マーカによるトラッキング結果	76
5.14 環境変化がない場合の提案手法によるトラッキング誤差	77
5.15 環境変化がある場合の提案手法によるトラッキング誤差	78
5.16 環境変化がない場合の円形マーカによるトラッキング誤差	79
5.17 環境変化がある場合の円形マーカによるトラッキング誤差	80
5.18 環境変化がない場合の ARToolKitPlus マーカによるトラッキング誤差	81
5.19 環境変化がある場合の ARToolKitPlus マーカによるトラッキング誤差	82
A.1 SIFT 特徴点	90
A.2 FAST 特徴点	91

表 目 次

2.1	トラッキング技術の利点と欠点 ^[14]	6
4.1	トラッキングの評価実験の条件	48
4.2	実験用カメラの仕様	49
4.3	実験用カメラの歪補正パラメータ	49
4.4	実験用パソコンの仕様	49
4.5	実験用バルブの仕様	49
4.6	実験用レールの仕様	50
4.7	外部ライブラリ	51
4.8	自然特徴点分布画像の生成に必要なパラメータの設定値	54
4.9	環境変化の認識に必要なパラメータの設定値	55
4.10	重複点の検索に必要なパラメータの設定値	55
4.11	信頼度の設定値	55
4.12	環境モデルの統合に必要なパラメータの設定値	56
4.13	手法の有効性の評価実験に用いた画像シーケンス	56
5.1	比較実験に用いた画像シーケンス	72

第 1 章 序論

産業革命以降、我々の生活が益々豊かになると同時に、大量生産および大量消費に伴い、多くのエネルギーも消費されている。世界的なエネルギー不足問題を解決するために、1954年に世界初の原子力発電プラントの運転が始まって以来、多くの国で原子力エネルギーが利用されている。しかし、原子力エネルギーを利用することでエネルギー不足問題が一部緩和できたと同時に、我々が考える必要がある新たな課題も生まれた。高経年化や事故などにより運転を終了した原子力発電プラントの解体はこれらの課題の中の1つである。

原子力発電プラントの解体は、放射化された構造物等の放射性物質を扱うため一般的なプラントの解体より難易度が大幅に高い。原子力発電プラントを安全に解体するため、これまでに様々な研究が行われている^[1-3]。その中で、拡張現実感を用いた作業支援は、解体作業の効率や安全性を高めることができると期待されている。拡張現実感を実現するためには、ユーザの視野を撮影しているカメラの位置と方向をリアルタイムで計測するトラッキングと呼ばれる処理が必要である。特に、作業環境整備の労力や運用の手間を考慮すると、原子力発電プラント内にもとから存在する物体の角などの特徴的な点（以下「自然特徴点」）を用いたトラッキングを利用することが望ましい。

従来の自然特徴点を用いたトラッキング手法^[4-7]では、事前に計測した自然特徴点をもとに、広範囲でも高精度のトラッキングを実現できるが、環境にある物体が増減することにより環境が変化しても、トラッキングに必要な自然特徴点情報を自動的に更新しないため、トラッキングが継続できない問題がある。そのため、機器や構造物などの解体で頻繁に環境が変化する解体作業現場では従来の手法が利用できない。

上述の問題を解決するため、本研究では、事前に計測した自然特徴点をもとに広域トラッキングを実行すると同時に環境の変化を認識し、変化に応じて新たに自然特徴点を計測して既存のデータを自動的に更新する手法を提案する。加えて、提案手法を評価するために2つの実験を行い、手法の有効性および実用性を確かめる。解体中の原子力発電プラントで自然特徴点を用いた広域トラッキングが安定して実行できるようになれば、より有用な解体作業支援システムを開発することができるようになると期待される。

本論文は序論を含め、全6章で構成されている。第2章では原子力発電プラントの解体作業の現状と問題点について述べる。次に、これを研究の背景として本研究の目的と意義を述べる。第3章では、本研究で提案する広域かつ変化する環境で自然特徴点を用いたトラッキングを安定して実行する手法について述べる。第4章では解体作業現場で実施した提案手法の有効性の評価実験について述べる。第5章では解体作業現場で実施した提案手法とマーカを用いたトラッキング手法の比較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、原子力発電プラントにおける解体作業の現状について述べる。そして、拡張現実感を用いた解体支援の現状と問題について述べる。最後に、関連研究および本研究の目的について述べる。

2.1 原子炉廃止措置研究開発センターにおける解体作業の現状

施設の老朽化や事故などで運転を終了した原子力発電プラントの廃止措置は、我々が回避できない課題の一つとして世界中から注目されている。原子力発電プラントの廃止措置とは、使用が終了した原子力発電プラントから放射能を取り除き、安全に解体することである^[8]。現在、日本にも解体・廃止中の原子力発電プラントがある。その内、原子炉廃止措置研究開発センター（旧「新型転換炉ふげん発電所」、以下「ふげん」）は、2003年3月に運転を終了してからこれまでの約10年間に原子炉廃止措置計画の立案を行うと同時に、研究所として原子炉廃止措置に必要な技術やシステムの研究開発を進めている^[9]。

一般的なプラントと異なり、原子力発電プラントには人間や環境に有害な放射性物質がある。そのため、火薬や重機などを用いた大掛かりな解体方法を利用できない。また、解体する際には、施設外へ放出する放射性物質や現場の作業員の被ばく量を低減する対策案も考案・実施しなければならない。そのため、原子力発電プラントの解体は一般的なプラントの解体より難易度が極めて高い。原子力発電プラントを安全に解体するためには、事前に解体方法や手順を工夫して綿密な解体計画を立てる必要がある。ただし、作業環境は複雑であるため、現場経験が豊富な作業員にとっても適切な計画を立てることは容易ではない。また、実行可能性のある解体計画を立てても、現場の作業員が複雑な解体方法をよく理解できず、作業を円滑に進めることができない可能性がある。さらに、間違った作業方法で事故を起こす可能性もある。このような問題を解決するため、ふげんでは図2.1に示すような人工現実感（Virtual Reality, VR）による解体作業シミュレーションシステムを開発し、作業員の被ばく量や機器同士の干渉等を事前に評価することで解体作業を支援することが試みられている^[10]。このよう



図 2.1: 解体作業シミュレーションシステム [10]

な作業支援により、解体作業の効率や安全性を高めることができるが、問題も残っている。例えば、図 2.1 に示したシステムでは複雑な現場環境を完全には再現できないため、間違った情報を提供する可能性がある。また、人工現実感に基づく解体支援システムは現場に入る前の事前計画検討用であり、現場での情報支援には使えない。すなわち、現場での作業支援は十分ではないと考えられる。

原子力発電プラントの解体作業の効率、安全性および利便性を高めるためには、作業に関する情報を正確に提供するだけでなく、その情報を直感的に理解できる形式で作業員に提供することも重要である。そこで、拡張現実感を用いた解体支援が期待されている。

2.2 拡張現実感を用いた解体支援の現状と課題

2.2.1 拡張現実感

拡張現実感（Augmented Reality, AR）とは、コンピュータが作り出した文字や三次元オブジェクトなどのデジタル情報を現実世界に融合させ、現実世界の情報を拡張する技術である [11]。図 2.2 に示すように、拡張現実感とは複合現実感（Mixed Reality, MR）の一種である。人工現実感と異なり、拡張現実感とは図 2.3 に示すように現場で直感的に理解できる情報を提供できる。

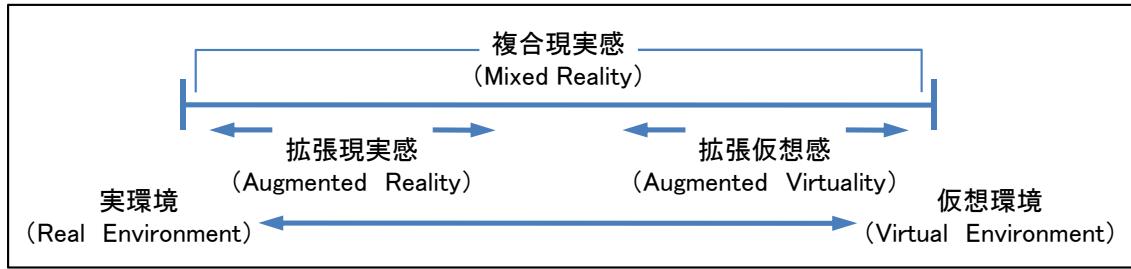


図 2.2: 拡張現実感の位置づけ ^[11]

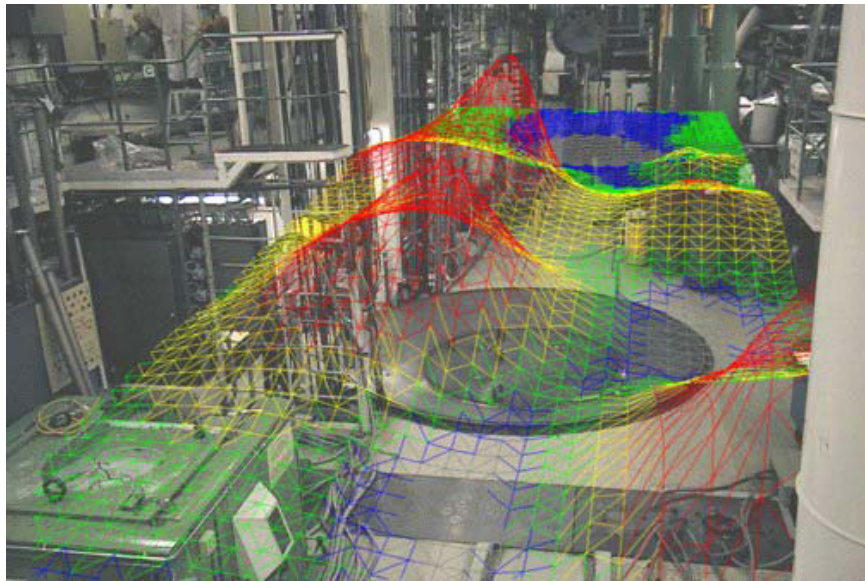


図 2.3: 拡張現実感を用いた放射線の可視化 ^[12]

拡張現実感を実現するには、以下の3ステップの処理が必要である。

- (1) ユーザの位置と方向を計測する。
- (2) 取得した位置と方向に応じてコンピュータが作り出したデジタル情報を現実空間に重畳描画する。
- (3) 処理の結果をユーザに提示する。

ここで、位置と方向の情報を正しく取得するため、トラッキングと呼ばれる技術が不可欠となる。トラッキングは拡張現実感の重要な基礎技術として、さまざまな研究開発が行われている ^[13]。現在利用可能な主なトラッキング技術とその利点・欠点を表 2.1 にまとめる。

表 2.1: トラッキング技術の利点と欠点 ^[14]

トラッキング技術	利点	欠点
GPS	・十分な衛星が利用可能であれば安定 ・屋外環境で簡単に利用できる	・屋内環境で利用できない ・方向を得られない
無線 LAN	・十分な無線 LAN 基地が利用できれば安定 ・十分な無線 LAN 基地がある場合に新たに機器を設置する必要がない	・低精度 ・方向を得られない
慣性センサ	・新たに機器を設置する必要がない ・計算負荷が非常に低い	・ドリフトに起因する誤差が蓄積することで精度が低下 ・位置と方向の絶対値を得るには他の方法との併用が必要
磁気センサ	・制御された環境では安定で高精度	・磁気源の設置が必要 ・金属など磁場を乱す要因があれば精度が低下 ・広範囲で利用するには大量の磁気トランスミッタの設置が必要
超音波センサ	・制御された環境では安定で高精度	・超音波源の設置が必要 ・複雑な環境では精度が低下 ・比較的高価
ビジョンセンサ (マーカ)	・安価 ・拡張性が高い ・マーカが認識できる範囲では安定で高精度	・マーカを貼るスペースが必要 ・マーカの位置と方向の計測が必要 ・マーカが認識できる範囲のみ利用可能 ・広範囲で利用するには大量のマーカが必要 ・遠距離で利用するには大きなマーカが必要
ビジョンセンサ (自然特徴)	・安価 ・拡張性が高い ・新たに機器を設置する必要がない ・十分な自然特徴が認識できる範囲では安定で高精度 ・オンラインでトラッキング可能な範囲を拡張できる (SLAM)	・計算負荷が高い ・環境によって精度と安定性が異なる

GPSによるトラッキング^[15]は屋外の広範囲で、簡単にユーザの位置を取得できる。ただし、屋内やビルの谷間のような衛星信号が届かない場所では利用できない。また、この手法ではユーザの方向は得られない。

無線LANによるトラッキング^[16]はユーザの位置を取得でき、さらに、環境に既に十分な無線LAN基地が設置されている場合、新たに機器を設置する必要がないという利点がある。ただし、この手法でも方向を得ることはできない。また、取得したデータは精度が低い。

慣性センサ（加速度センサ・ジャイロセンサ等）によるトラッキング手法を用いる場合は、環境に特別な機器を設置することなく、センサだけで位置と方向の情報を取得できる。ただし、慣性センサから位置と方向を得る場合、時間の経過と共にドリフトに起因する誤差が蓄積することで精度が低下するという問題がある。また、慣性センサは単位時間あたりの相対的な位置・方向の変化しか得られないため、絶対的な位置・方向を得るためには、別の手法と併用する必要がある。

磁気・超音波センサによるトラッキング^[17]は、十分に制御された環境では安定して高精度の位置と方向を得ることができる。しかし、このような手法を利用する場合、環境内に新たに機器を設置する必要がある。また、複雑な環境や金属機器の多い環境では精度が低下する。

ビジョンセンサによるトラッキングは大きく2種類に分けられる。一つは図2.4および図2.5に示すような人工マーカを利用して位置と方向を推定する手法である。このような手法では、カメラで捉えた画像からマーカを認識できる場合には、カメラの位置と方向を高精度で推定できる。ただし、トラッキングする前に全てのマーカの位置と方向を計測する必要がある。また、広範囲で利用する際には、大量のマーカを環境に張り付けなければならない。もう1つは、図2.6に示すような環境にもとから存在する物体の角やエッジのような自然特徴を利用して位置と方向を推定する手法である。このような手法を利用する場合では、環境に新たに機器や人工物を設置する必要はない。また、十分な自然特徴が認識できる範囲では、カメラの位置と方向を安定して精度よく推定できる。ただし、自然特徴によるトラッキングは計算が複雑であるため、安定してリアルタイムで実行できるトラッキングの実装は容易ではない。また、環境によってトラッキングの精度と安定性が異なる。



図 2.4: ARToolKit のマーカ [18]

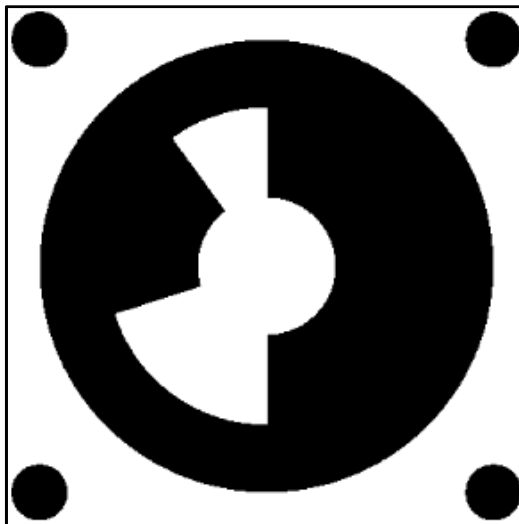


図 2.5: 遠近両用マーカ [19]

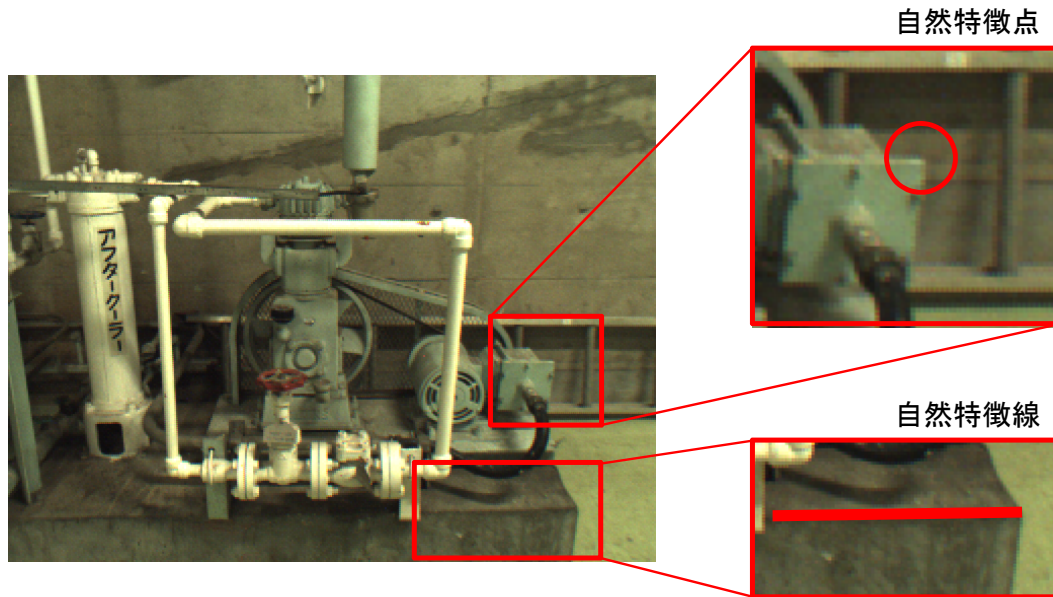


図 2.6: 自然特徴の例

2.2.2 拡張現実感を用いた解体支援

ふげんでの解体作業はまず屋内にある機器から行われる。この場合、解体作業現場の環境は多数の配管やタンクが存在しているため複雑に入り組んでおり、金属機器も多く存在している。そのため、解体支援のための拡張現実感を実現する際には、GPS によるトラッキングや磁気・超音波センサによるトラッキングは利用できないと考えられる。無線 LAN によるトラッキングおよび慣性センサによるトラッキングは精度が低いため、細かな作業をする場合の支援に用いることができない。解体作業により、現場環境における自然特徴点の配置が頻繁に変化するため、従来の自然特徴点を用いたトラッキングは十分安定ではない。以上の理由から、これまでにふげんで行われた拡張現実感を用いた解体支援の評価実験ではマーカを用いたトラッキング手法が用いられてきた。

図 2.7 に、中井らにより開発された拡張現実感を用いた解体作業支援システムを示す^[20]。このシステムは、カメラで捉えた解体対象物の映像上に色分けした 3 次元モデルを表示することで、作業員に「既に解体した部分」「次に解体する部分」「解体する必要のない部分」等の情報を直感的に提示している。1 日の作業が終わった後、システムのカメラを作業対象物に向けると、作業を開始する前の解体対象物が 3 次元モデルと現時点の解体対象物に位置を合わせて重畳表示される。作業員が解体対象物と 3 次元モデルの異なっている箇所を電子ペンで指示することにより、作業の進捗を直感的



図 2.7: 拡張現実感を用いた解体作業支援システム [20]

に記録できる。

図 2.8 に大下らにより開発された拡張現実感を用いた解体作業計画立案支援システムを示す [21]。このシステムを利用することで、解体作業に必要な足場や防塵ハウスを現場でどこに置くべきかを直感的にシミュレーションすることが可能である。また、シミュレーションの結果により、足場や防塵ハウスの作成に必要な材料がどの程度かを求めることもできる。

図 2.9 に青山らが開発した拡張現実感を用いた仮置・運搬作業シミュレーションシステムを示す [22]。このシステムで、マーカを張り付けた箱と仮想の解体対象物で予め関連付けられており、タブレット PC に接続したカメラで作業環境と箱を撮影すると、タブレット PC 上に表示されるカメラ映像の上に解体対象機器の三次元コンピュータグラフィックスが重畳表示される。箱の位置と方向を変更すると、それに応じて仮想の解体対象物の位置と方向も変化する。その際、仮想の解体対象機器と実際の作業環境との間で接触判定が行われ、両者が接触した場合には、タブレット PC 上に表示されるカメラ映像上の該当箇所が色づけされる。作業員が観ている映像の上に直接、接触箇所が色づけされて表示されるため、運搬・仮置の際に、どの箇所が作業の障害となるのかを直感的に理解できる。

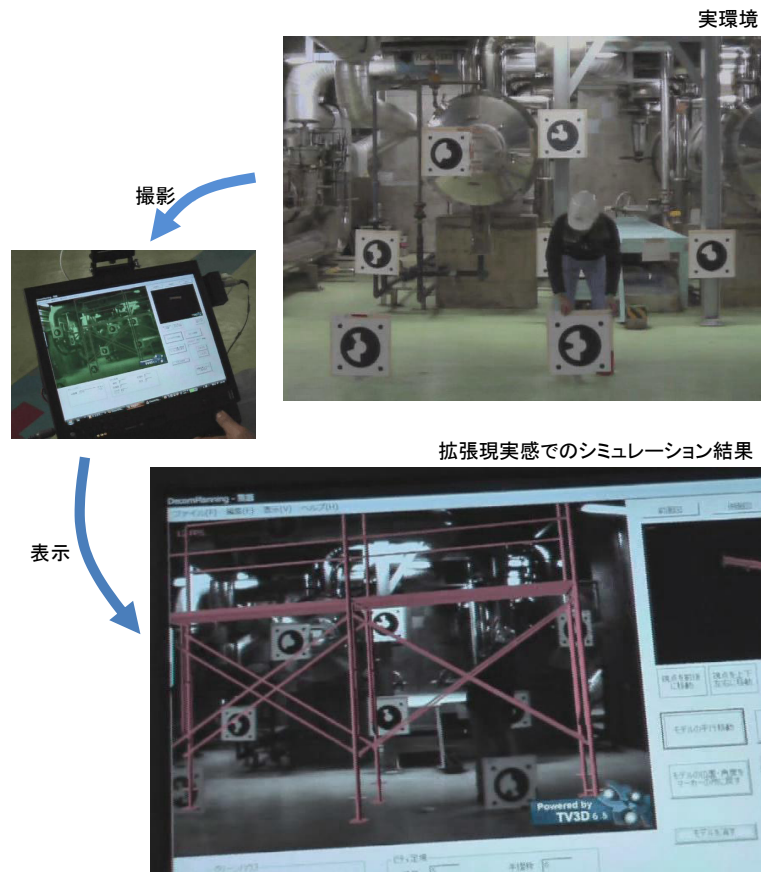


図 2.8: 拡張現実感を用いた解体作業計画立案支援システム [21]

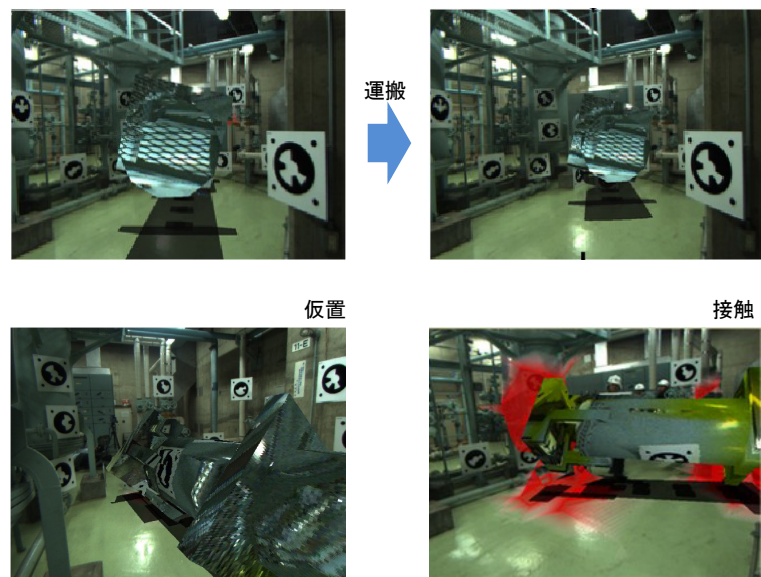


図 2.9: 拡張現実感を用いた仮置・運搬作業シミュレーションシステム [22]

このように、原子力発電プラントの解体を拡張現実感を用いて支援することで、作業情報の直感的な理解を促し、作業の効率や安全性を高めることができると考えられる。ただし、上述のシステムでは、マーカを用いたトラッキング手法を利用しており、予め作業現場にマーカを設置し、その位置と方向を計測しておく必要がある。また、実際に解体作業を実施する際に、設置されたマーカが作業を妨げるという可能性もある。環境整備の労力や運用の手間を考慮すると、上述のシステムを実用化するためには、自然特徴点を用いたトラッキングを利用することが望ましい。

2.3 自然特徴点を用いたトラッキングの関連研究

自然特徴点を用いたトラッキングでは、自然特徴点の三次元位置と、それらをカメラで捉えた実世界の画像上の自然特徴点の二次元座標を用いて、PnP問題を解くことでカメラの位置と方向を推定する（自然特徴点の認識の方法には多くの手法が提案されているが、本研究では、SIFT特徴点^[23]とFAST特徴点^[24]を利用するため、この2種類の自然特徴点の説明を付録Aに示す）。既存の自然特徴点を用いたトラッキングの研究では、カメラの位置・方向の推定と自然特徴点の三次元位置の計測を同時に行い、計測した自然特徴点をもとに、トラッキング可能な範囲を拡張する手法がある^[25]。また、事前に計測した自然特徴点の三次元位置を用いてカメラの位置と方向を推定する手法もある^[4-7]。

Kleinらは、オンラインで自然特徴点の三次元位置を計測し、計測結果を用いてカメラの位置と方向を推定する手法（PTAM）を提案している^[25]。この手法では処理を2つの並列な処理に分割している。1つはカメラの位置と方向を推定する処理である。もう1つは画像から認識された自然特徴点の二次元座標と推定したカメラの位置・方向をもとに、三角測量の原理を用いて自然特徴点の三次元位置を計測する処理である。これにより、トラッキングの精度と安定性をある程度確保すると同時に、位置と方向をリアルタイムで推定することが可能になっている。この手法は、自動的に新たな自然特徴点の三次元位置を計測できるため、変化する環境でも利用可能と考えられる。ただし、計測した自然特徴点の三次元位置は、トラッキングを開始した地点から離れるにつれて精度が低下する、カメラの移動範囲が広い場合に、トラッキングの精度が低下する問題が残されている。すなわち、この手法は図2.10に示すような狭い範囲でのみ利用可能である。

広範囲での自然特徴点を用いたトラッキングを実現する際には、事前にレーザレン



図 2.10: 自然特徴点を用いたトラッキングの例 [25]

ジファインダ（LRF）あるいは Structure-From-Motion（SFM）と呼ばれる手法で計測した自然特徴点の三次元位置を利用することが多い [4-7]。これらの手法では、オフラインで計測した高精度の三次元位置を利用するため、トラッキング時にコンピュータが自然特徴点を認識できれば、カメラが広範囲を移動しても、高い精度でトラッキングを実行できる。ただし、このような手法では、環境にある物体の位置が変わるなどの環境変化があった場合には、事前に計測した自然特徴点の三次元位置をすぐに更新できないため、トラッキングを継続できない可能性が高い。

原子力発電プラントの解体作業現場は非常に広い場合が多く、機器や構造物の解体で環境が頻繁に変化する。このような環境で、既存の自然特徴点を用いたトラッキング手法をそのまま利用して解体支援のための拡張現実感を実現することは困難である。

2.4 研究の目的

本研究では、図 2.11 に示すような中型のバルブ程度の大きさの機器を解体する作業を、拡張現実感を用いて支援するシステムを実現することを想定し、そのシステムを実現する際に必要となるトラッキング手法（数 cm 程度の精度が要求される）として、原子力発電プラント内で使用することを想定した場合に、運用の手間やコストの面で最も有望な自然特徴点を用いたトラッキングに着目し、広域かつ変化する環境でも、安定して長時間利用できる手法を実現することを目的とする。既存の研究では、環境が静的で変化しないという条件のもとで、自然特徴点を用いたトラッキングの精度や安

定性を向上させることは実現されているが、動的に変化する広い環境で自然特徴点を用いたトラッキングの精度や安定性を向上させる研究はあまり行われていない。本研究では、解体作業による環境変化は、カメラ画像上で比較的大きくまとまった変化として現れるという特徴があることに注目し、その特徴を用いて環境の変化を安定して認識する手法を実現する。そして、変化した環境における自然特徴点を自動的に計測し、既存の自然特徴点の情報の精度を低下させることなく更新する手法を実現する。これにより、変化する環境でもトラッキングを安定して継続することを可能にすることを目指す。本研究により、解体中の原子力発電プラントで拡張現実感を用いて解体作業を支援する際に、より有用な支援システムを開発することが可能になると期待される。

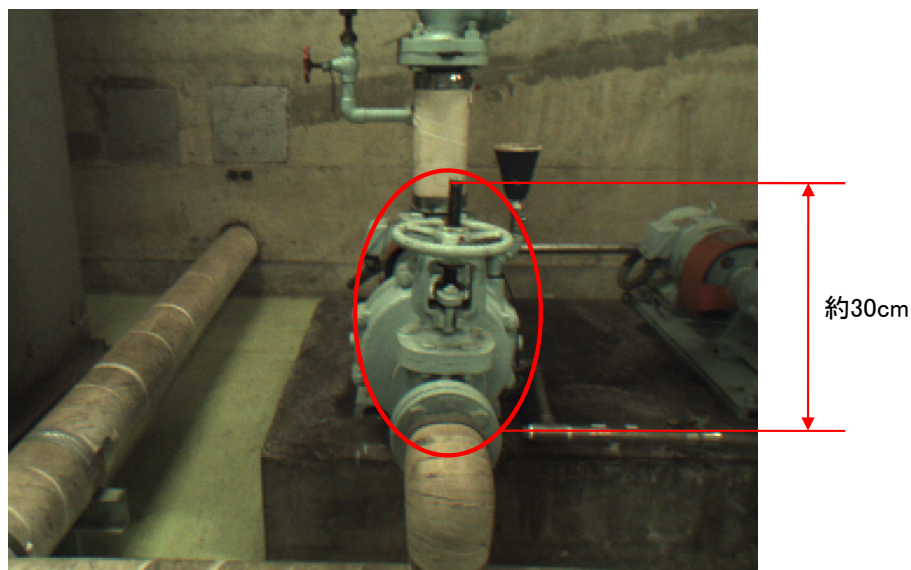


図 2.11: 想定する解体対象

第 3 章 トラッキングに用いられる環境モデルの更新手法の提案

機器や構造物の解体により、原子力発電プラントの解体現場では図 3.1 に示すような環境の変化が頻繁に起こり、自然特徴点の配置も変わる。このような広域かつ動的に変化する環境でも自然特徴点を用いたトラッキングを安定して実行可能にするため、本研究では、トラッキングを実行すると同時に環境の変化を認識し、トラッキングに必要な自然特徴点の情報を自動的に更新する手法を提案する。以下では、提案手法の概要を述べた後、提案手法の各処理の詳細を述べる。なお、本研究では、使用するカメラの歪は事前にキャリブレーションにより補正されているものとする。

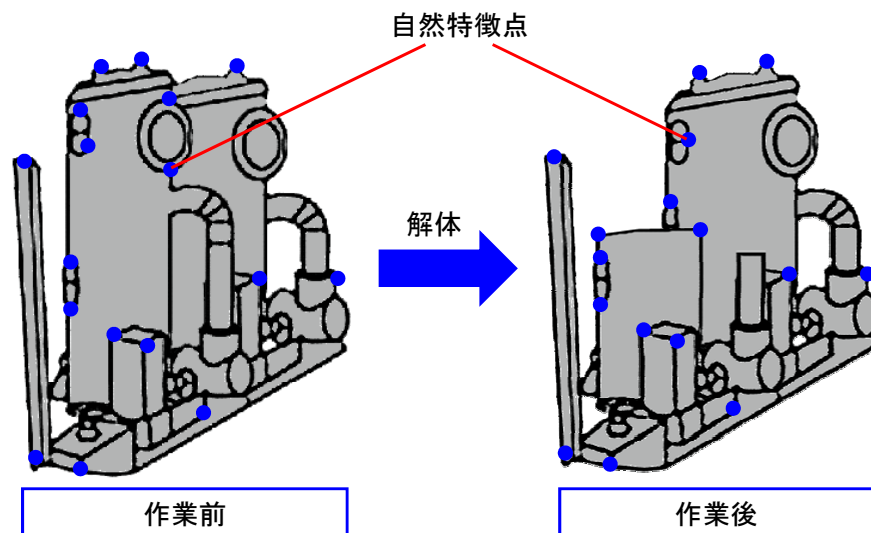


図 3.1: 環境の変化

3.1 手法の概要

本研究で提案する手法の処理手順を図 3.2 に示す。トラッキングを実行する前に、図 3.3 に示すように、トラッキングが必要な環境全体の自然特徴点を計測し、それらの三次元位置等の情報を生成する（以下、トラッキングが必要な環境全体の自然特徴点の情報を格納したデータをグローバル環境モデルと呼ぶ）。ここで生成したグローバル環

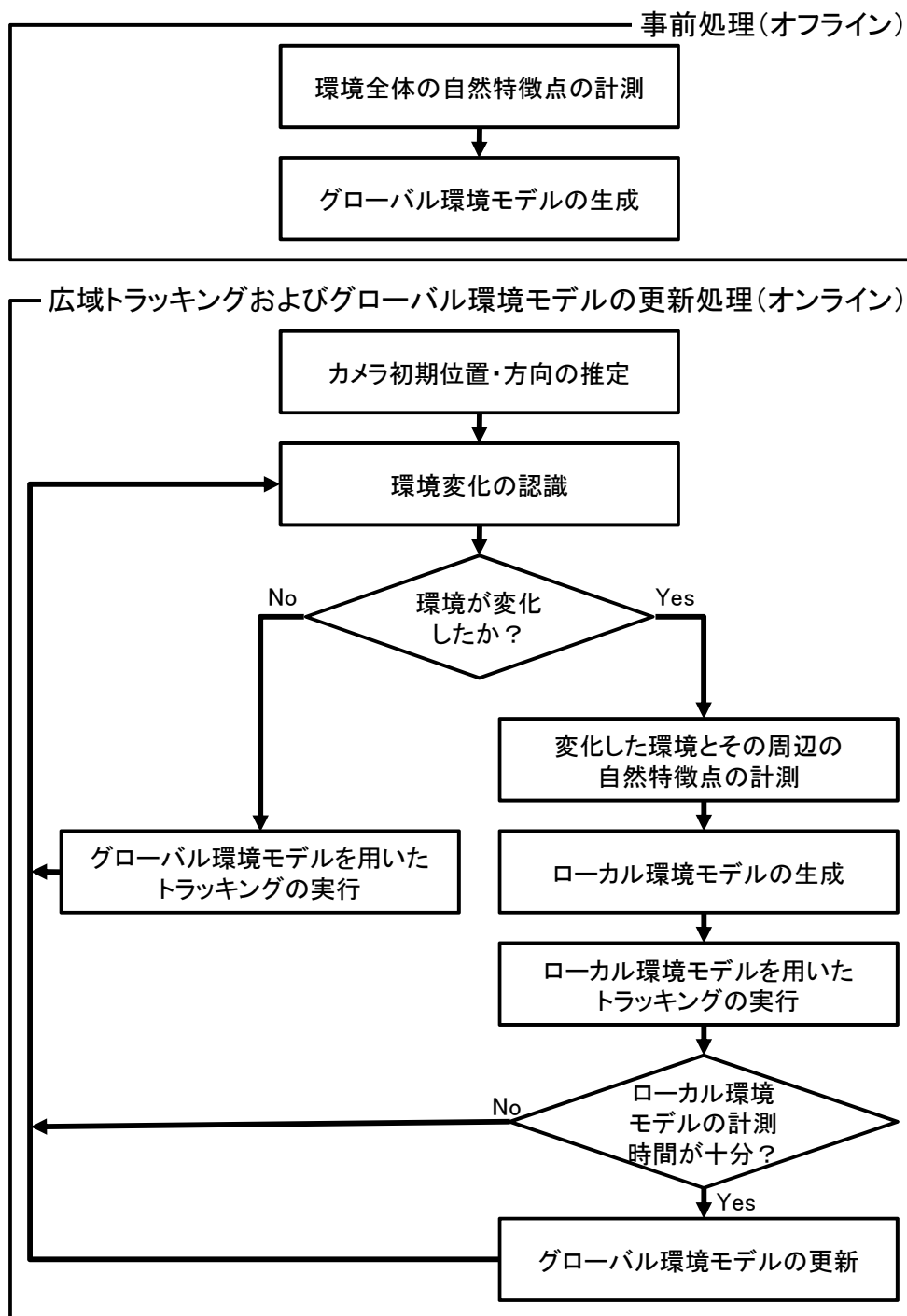


図 3.2: 提案手法の処理手順

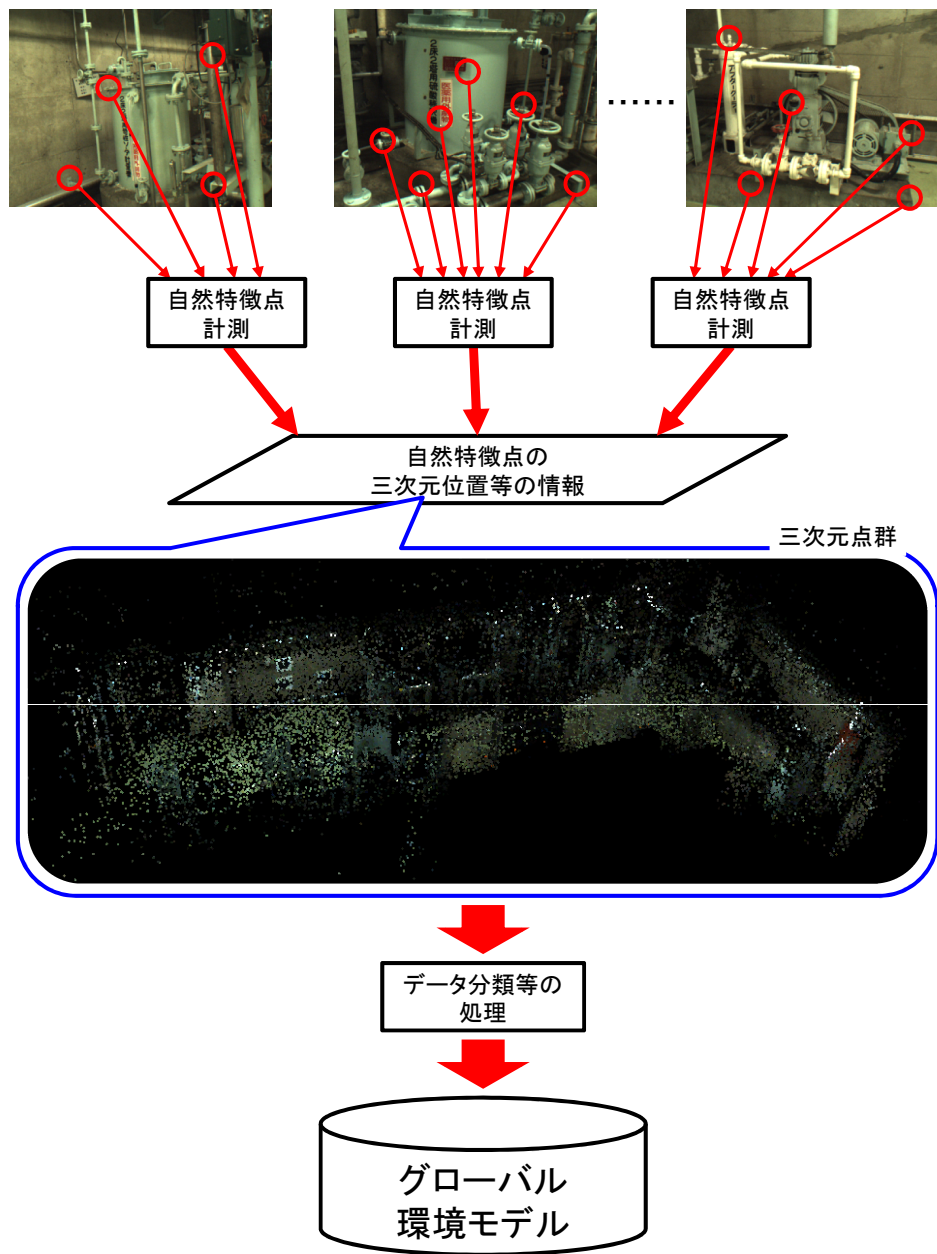


図 3.3: トラッキングのための事前処理

境モデル内には、光の反射などによって見え方が変化するために不安定な自然特徴点も存在する可能性があるが、そのような点は安定して認識できる自然特徴点と比べて十分少ないことが予想されるため、本研究では、それらはトラッキングを継続するのに支障がないとして、そのような不安定な自然特徴点を除かない。グローバル環境モデルを生成した後、それを用いてトラッキングを実行すると同時に、図 3.4 に示すようにコンピュータが現在の環境の自然特徴点とグローバル環境モデルに保存されている特徴点を比較し、環境が変化したかどうかを認識する。環境が変化していないと認識された場合、図 3.5 に示すようにグローバル環境モデル内の自然特徴点とカメラで捉えた画像から認識された自然特徴点の対応付けを行う。自然特徴点の対応付けの方法には多くの手法が提案されているが、本研究では、グローバル環境モデルを生成する際に取得した画像から得られる、各自然特徴点の外観（自然特徴点周辺の輝度情報）

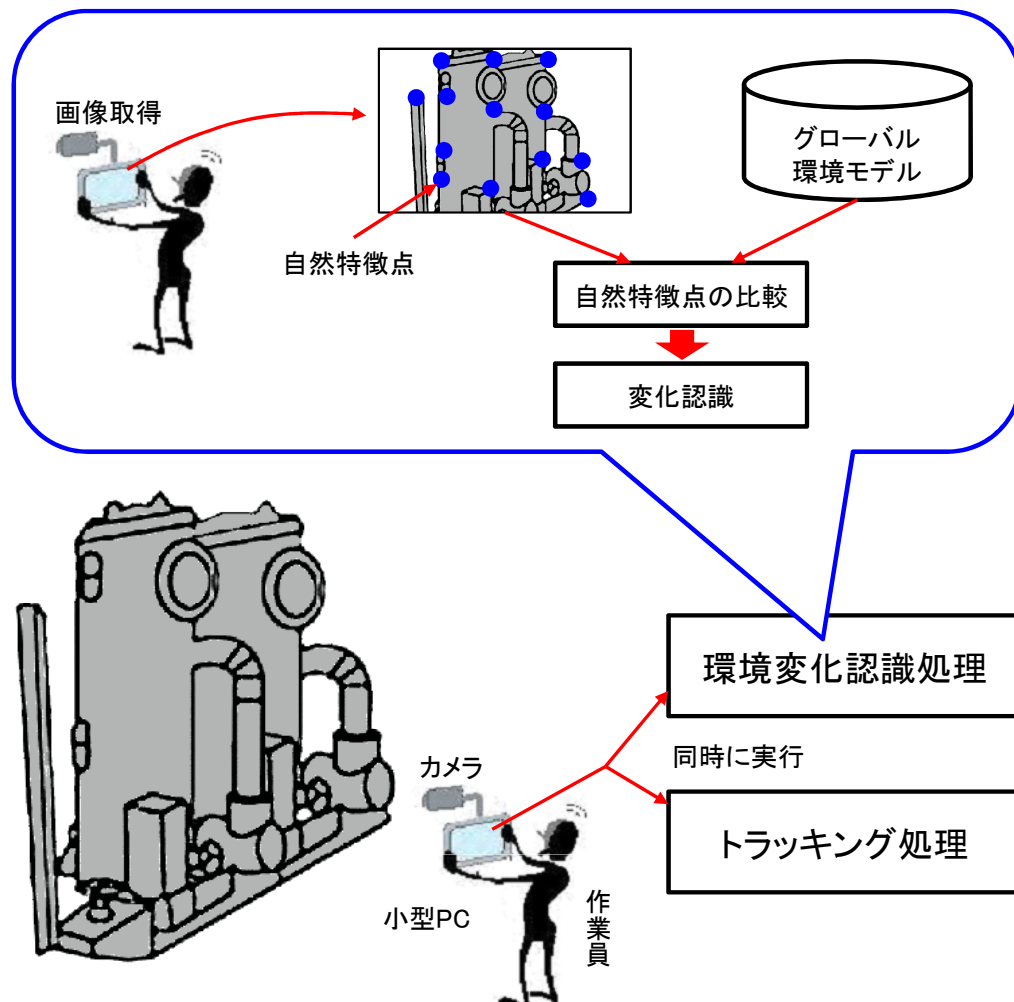


図 3.4: 環境変化の認識

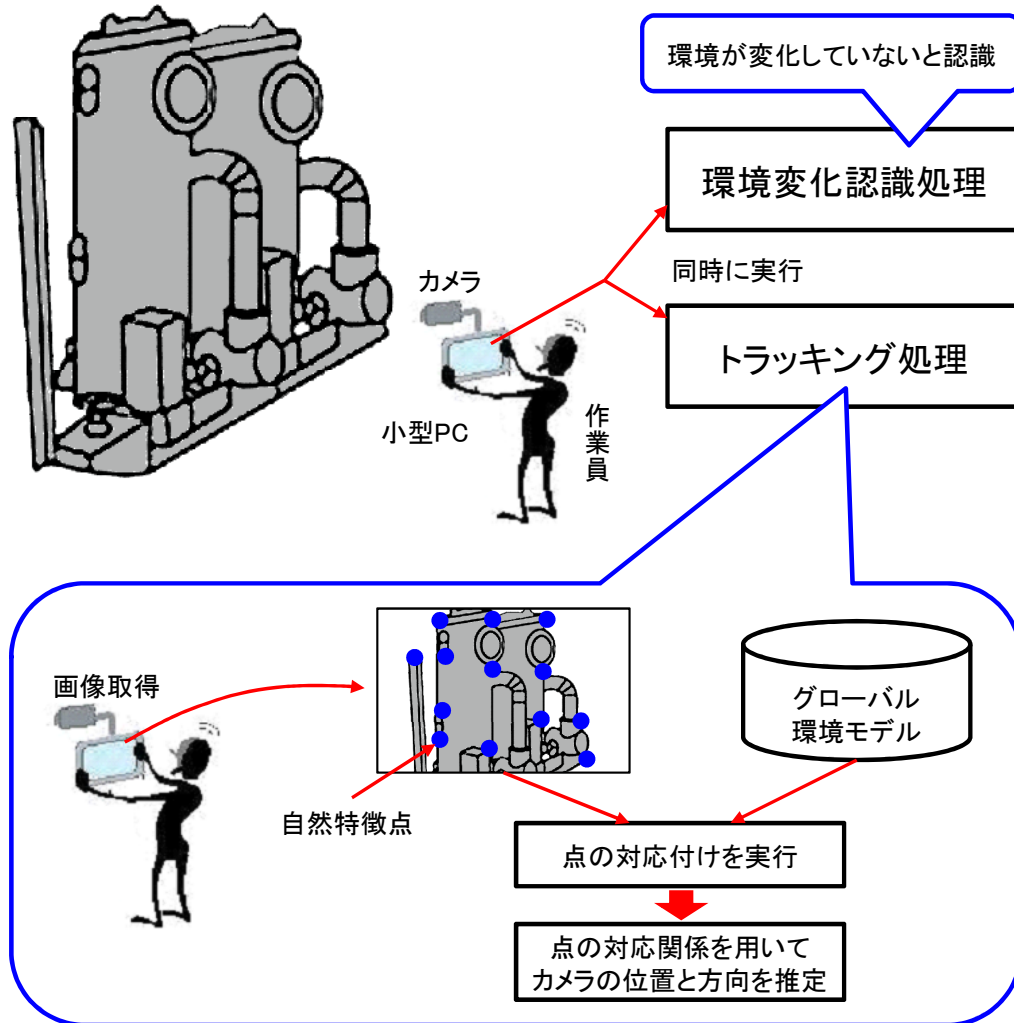


図 3.5: 環境変化がない場合の処理

と、現在のカメラ画像から得られる各自然特徴点の外観を比較し、互いに最も似ていと判断される自然特徴点同士を対応付けする。具体的には、2つの自然特徴点の外観を比較する際に、この2点の周囲の同じ位置の画素の輝度値の差の2乗を合計し、その結果を用いて2点の類似度を表す（値が小さいほど、類似度が高い）。このように計算したグローバル環境モデル内の自然特徴点と画像から認識された自然特徴点の類似度を利用し、最も似ている自然特徴点同士を探して対応付けする。得られた対応関係を用いて PnP 問題を解くことでカメラの位置と方向を推定する。環境が変化すると認識された場合には、図 3.6 に示すように、変化した領域とその周辺における自然特徴点を計測し、それらの三次元位置等の情報を生成する（以下、変化した領域とその周辺における自然特徴点の情報を格納したデータをローカル環境モデルと呼ぶ）。そして、環境が変化すると認識されている間、グローバル環境モデルの代わりにローカル環境

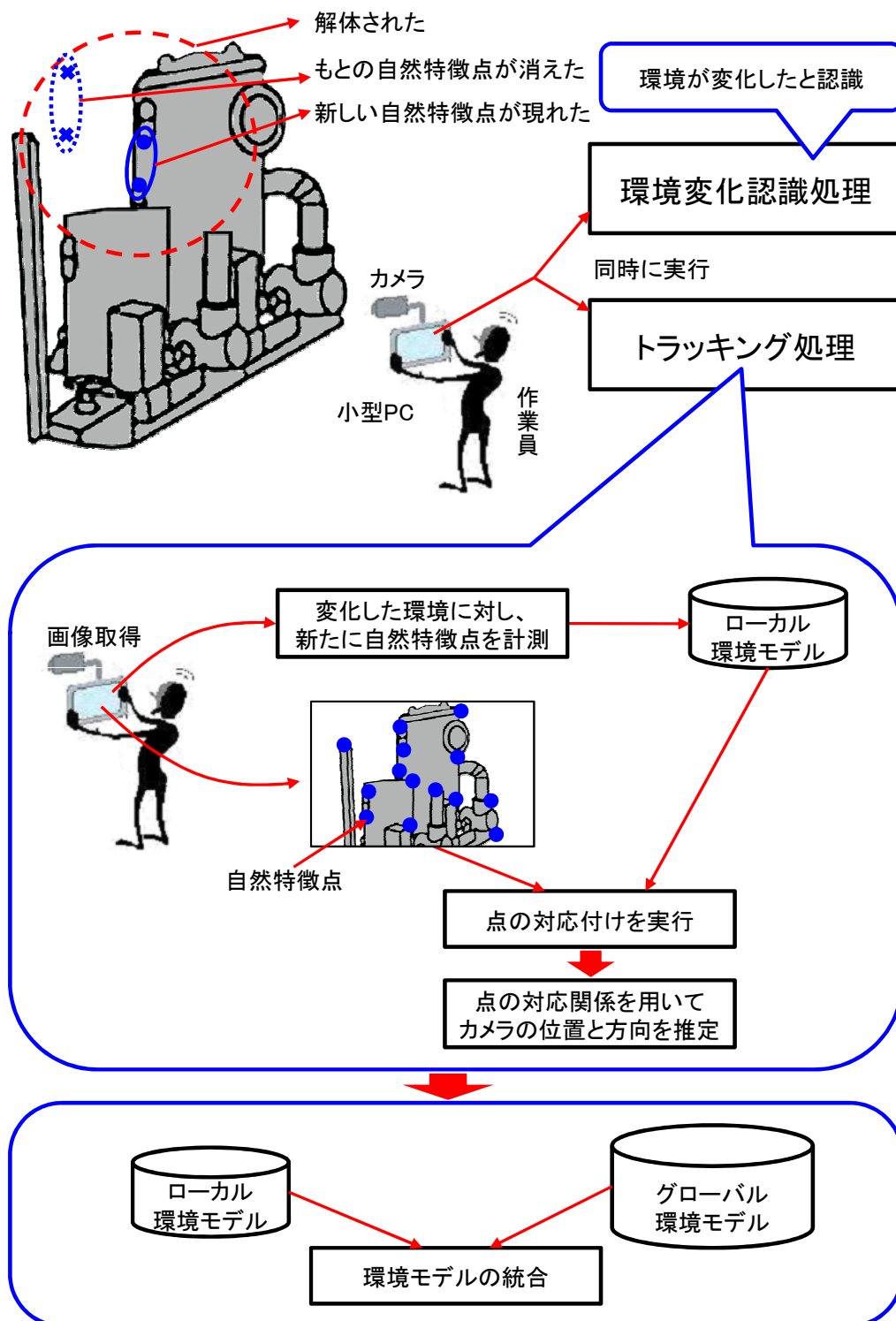


図 3.6: 環境変化がある場合の処理

モデルを用いてトラッキングを実行する。また、生成したローカル環境モデルを用いてグローバル環境モデルを更新する。

本研究で提案する手法は、図 3.7 に示すクライアント・サーバ方式の構成で使用することを想定する。事前に取得したグローバル環境モデルはサーバに保存される。拡張現実感を用いた作業支援時には、カメラのトラッキング、環境変化の認識およびローカル環境モデルの生成をクライアントで行い、ローカル環境モデルとグローバル環境モデルの統合をサーバで実行する。これにより、環境変化の認識とローカル環境モデルの生成を複数のデバイスで同時に行うことが可能になり、環境の変化が複数の箇所で起こった場合に、それらの環境の変化に応じて新たに自然特徴点を計測することを同時に実行可能になる。また、あるクライアントのデバイスで生成したローカル環境モデルを用いてグローバル環境モデルを更新した後、他のクライアントのデバイスでも更新されたグローバル環境モデルを利用できる。なお、本研究では、上記のクライアント・サーバ方式の環境の実現は将来課題とし、1 台のパソコンを利用して、カメラのトラッキング、環境変化の認識、ローカル環境モデルの生成およびグローバル環境モデルの更新を実現するシステムを実現する。

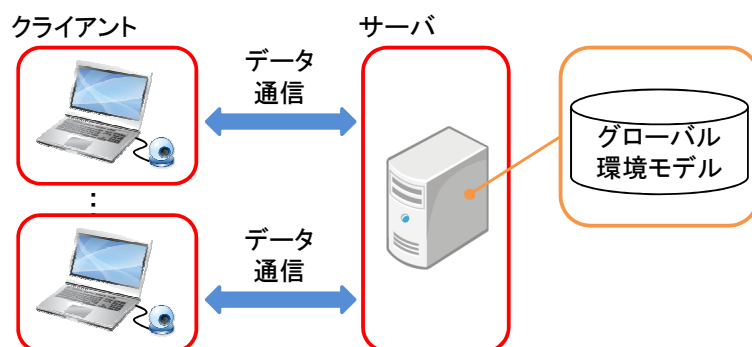


図 3.7: システムの構成

3.2 グローバル環境モデルの生成

本節では、トラッキングの実行および環境変化の認識に必要なグローバル環境モデルの生成について詳述する。

3.2.1 グローバル環境モデルの構成要素

計測した自然特徴点から生成したグローバル環境モデルは2種類のデータを含む。1つはトラッキングに用いられるデータ（以下「トラッキング用データ」）であり、もう1つは3.3節で提案する環境変化認識手法に用いられるデータ（以下「変化認識用データ」）である。以下ではこの2種類のデータについて説明する。

トラッキング用データは(1) 自然特徴点データと(2) キーフレームデータで構成される。トラッキング用データ内の1つの自然特徴点データには下記の情報が含まれる。

(A) 三次元位置

自然特徴点の三次元位置である。自然特徴点の三次元位置と画像上の像の二次元座標の対応からカメラの位置と方向を推定する際に必要となる。

(B) パッチ

図 3.8 に示すように、自然特徴点の画像上の二次元座標を中心とした、 16×16 px の画像テンプレートである。トラッキング用データ内の自然特徴点とトラッキングを実行する際にカメラで捉えた画像から認識された自然特徴点の対応付けを行う際に用いられる。

(C) 水平ベクトル

図 3.9 に示すように、パッチの中心 c から右に 1 px の点 r を、自然特徴点 P の三次元位置を通してパッチ平面に平行な平面へ投影した点 R と自然特徴点 P を結ぶベクトルである。トラッキング用データ内の自然特徴点とカメラで捉えた画像から認識された自然特徴点の対応付けの精度を高めるため、現在のカメラの位置と方向に応じて、トラッキング用データ内の自然特徴点のパッチをアフィン変換で調整する際に用いられる。

(D) 垂直ベクトル

図 3.9 に示すように、パッチの中心 c から下に 1 px の点 d を、自然特徴点 P の三次元位置を通してパッチ平面に平行な平面へ投影した点 D と自然特徴点 P を結ぶベクトルである。水平ベクトルと同じように、トラッキング用データ内の自然特徴点のパッチをアフィン変換で調整する際に用いられる。

また、トラッキング用データ内の1つのキーフレームデータには下記の情報が含まれる。

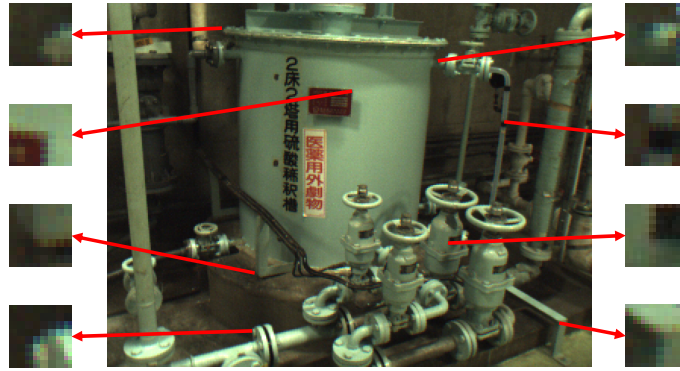


図 3.8: パッチの例

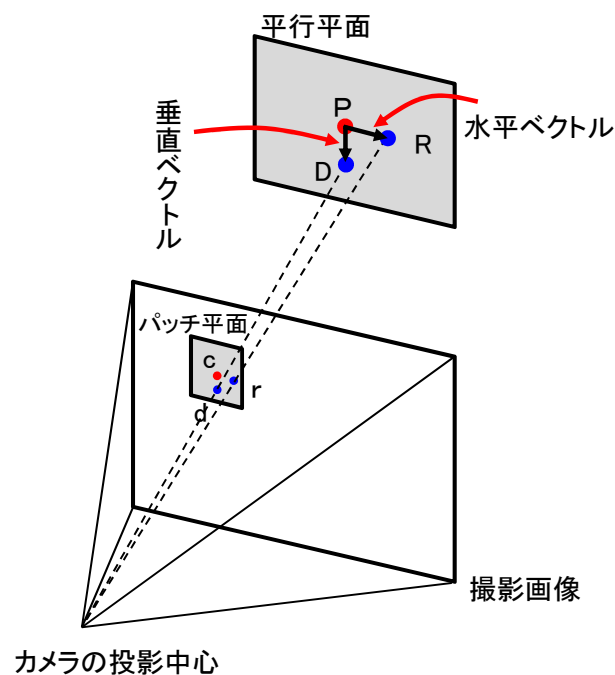


図 3.9: 水平・垂直ベクトル

(A) 縮小画像

自然特徴点が認識された画像を縮小することで得られる画像である。トラッキングの初期化を実行する際に、またトラッキングが失敗した際に、現在のカメラ画像の縮小画像と照合し、カメラの位置と方向を大まかに推定するために用いられる。

(B) キーフレーム取得時のカメラの位置と方向

縮小画像の元画像を撮影した際のカメラの位置と方向である。トラッキングの初期化を実行する際に、またトラッキングが失敗した際に、現在のカメラ画像の縮小画像と照合し、カメラの位置と方向を大まかに推定するために用いられる。

変化認識用データは計測された自然特徴点をもとに生成した自然特徴点データによって構成される。変化認識用データ内の1つの自然特徴点データには下記の情報が含まれる。

(A) 三次元位置

自然特徴点の三次元位置である。環境変化を認識する際に、自然特徴点を現在のカメラ画像上へ投影し、画像中の二次元座標を計算するために用いられる。

(B) カメラの位置

自然特徴点が認識された画像を撮影した際のカメラの位置である。環境変化を認識する際に、自然特徴点をカメラで捉えた画像に投影するかどうかを判断するために用いられる。

3.2.2 自然特徴点の計測

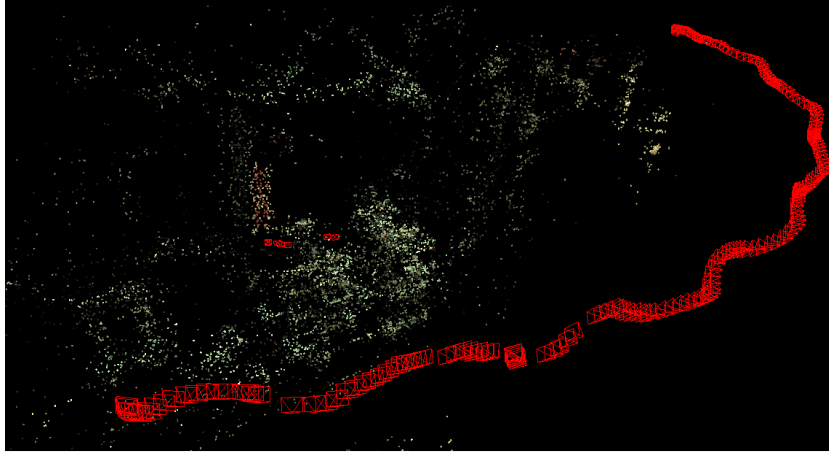
グローバル環境モデルを事前に生成するには、作業環境の画像から自然特徴点を認識した後、各自然特徴点の三次元位置および自然特徴点が認識された画像を撮影した際のカメラの位置と方向を求める必要がある。本研究では、以上のデータを取得するため、まず計測対象の環境内で一定速度で歩きながら環境を撮影する。そして、Snavelyが開発したBundler^[26]と呼ばれるStructure-From-Motionに基づく三次元復元システムを利用し、SIFT特徴点^[23]に基づく環境の三次元復元を行う。結果として、各画像を撮影した際のカメラの位置と方向、画像から認識された自然特徴点の各画像上での二次元座標および環境内での三次元位置（以下、この三次元位置を求める座標系を世界座標系と呼ぶ）が得られる。三次元復元結果の1つの例を図3.10に示す。図の上部に示す画像は作業環境の画像である。図の下部に計測した作業環境内の自然特徴点を示す。また、自然特徴点が認識された画像を撮影したときのカメラの位置と方向を赤い四角錐で表示する。

Bundlerを用いて環境の三次元復元を行う場合、図3.11に示すようにある画像から認識された自然特徴点が、その画像を撮影したときのカメラの方向と逆方向に存在すると、誤って求められる場合がある。本研究では、図3.12に示すように、三次元復元に用いた各画像に対し、画像から認識された自然特徴点の三次元位置を世界座標系から各画像を取得した際のカメラ座標系に変換し、変換後の三次元位置の z 軸の値により、推定の誤りを検出する。 z 軸の値が負になる場合に、推定が間違っており、その画像に関連する結果は全て信頼できないと考え、その画像から認識された全ての自然特

三次元復元に用いられた画像

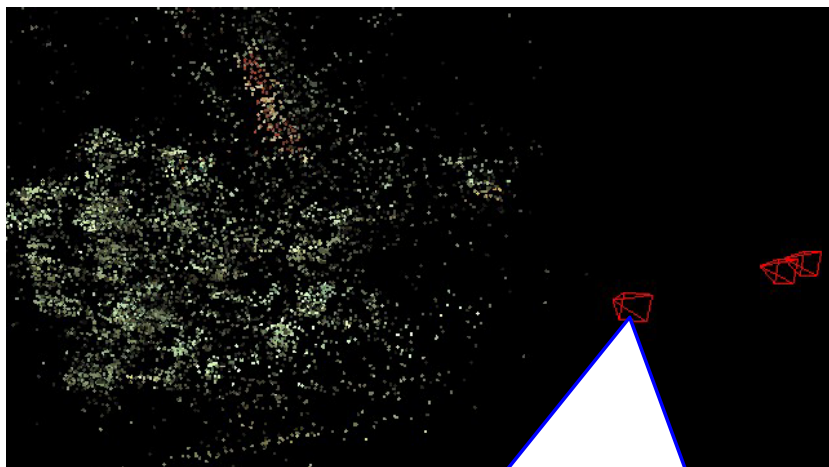


三次元復元の結果



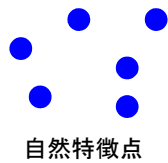
各画像を撮影した時のカメラの位置と方向

図 3.10: 三次元復元の結果

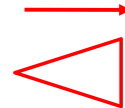


捉えた画像から認識された
自然特徴点の三次元位置が
撮影方向と逆の方向

撮影するときの
カメラの方向



自然特徴点



カメラ

図 3.11: 三次元復元のエラー

徴点の二次元座標、三次元位置および画像に対応するカメラの位置と方向情報を削除する。このような処理を行った後、残ったデータをもとにグローバル環境モデルを生成する。

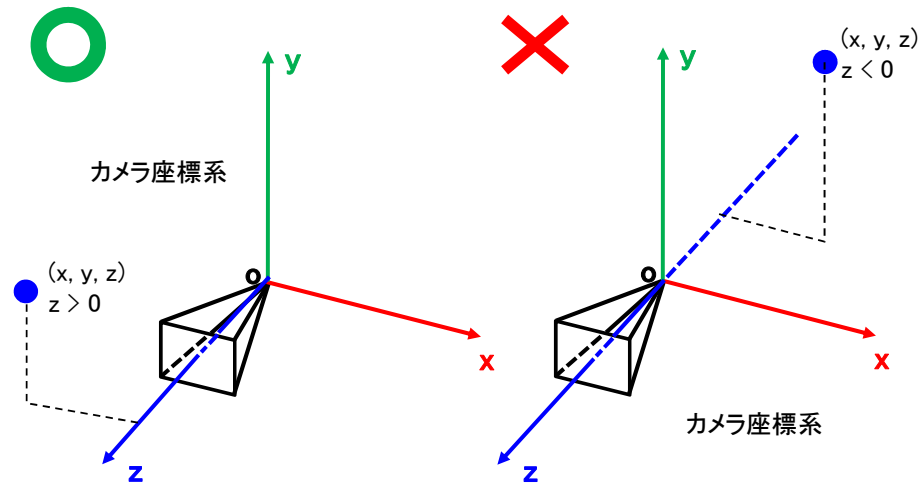


図 3.12: 三次元復元のエラーの検出

3.3 環境変化の認識

本節では、3.2 節で述べた方法で生成したグローバル環境モデルをもとに、環境変化を認識する手法について詳述する。

3.3.1 環境変化の認識手法の概要

機器や構造物の解体により環境が変化してもトラッキングを継続できるようにするためには、まず自動的に環境の変化を認識する手法を実現しなければならない。環境が変化したことを認識する方法としては、図 3.13 に示すように、環境が変化する前の画像を取得しておき、カメラからリアルタイムで取得した画像と比較することで、変化を認識する手法^{[27][28]}が考えられる。しかし、このような手法を用いる場合、比較に用いる画像同士がほぼ同じ位置・方向で撮影されたものである必要があるため、カメラが撮影する可能性がある全ての画像を事前に取得しておく必要があり、作業範囲が広い場合には現実的ではない。一方、トラッキングにより得られたカメラの位置と方向を用いて、事前に計測した自然特徴点をカメラで捉えた画像に再投影し、求められた再投影座標と撮影画像から認識された自然特徴点の二次元座標を比較することで環

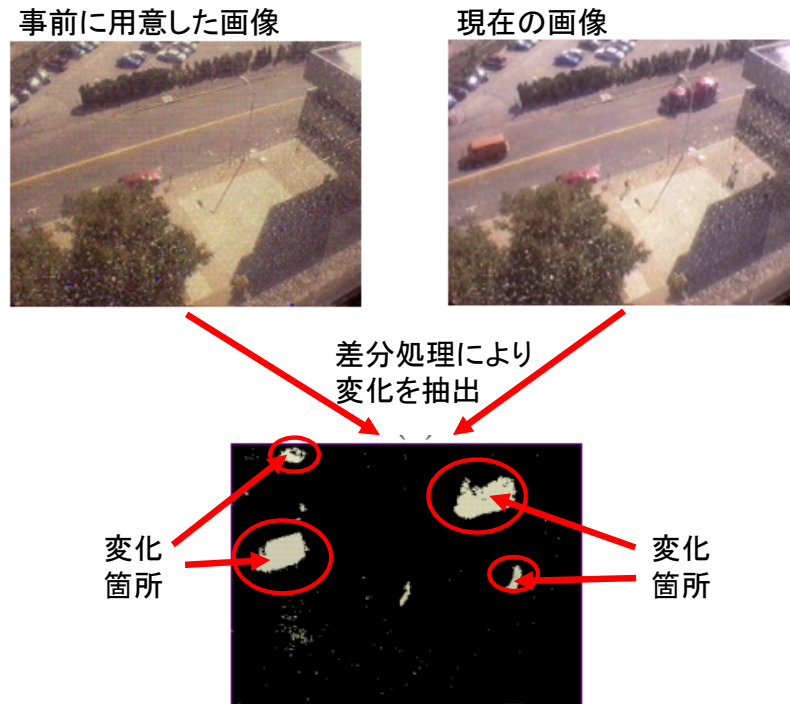


図 3.13: 画像の差分処理による変化の認識 [27]

環境変化を認識する手法も考えられる。この場合、自然特徴点の再投影誤差を個々に評価して変化を認識する方法も考えられるが、不安定なトラッキングにより再投影誤差が大きくなる際に、環境が変化していないにもかかわらず、環境が変化したと誤認識する可能性が高い。一方、機器や構造物の解体により原子力発電プラント内で環境が変化した場合には、自然特徴点の分布がある領域でまとまって変化することが多いと予想され、このことを利用して環境の変化を認識した方が、安定した処理が可能であることが期待できる。そこで本研究では、環境が変化した際に自然特徴点の分布がまとまって変化することを利用して環境変化を認識する方法を提案する。具体的には、図 3.14 に示すように、以下の処理を行うことにより、環境の変化を認識する。

- (1) トラッキングの際に取得した画像から認識された自然特徴点を利用して現在の自然特徴点の分布状況を表す自然特徴点分布画像を生成する。ここで生成した自然特徴点分布画像上の黒い点はカメラ画像から認識された自然特徴点である。
- (2) トラッキングにより得られたカメラの位置と方向を用いて変化認識用データをカメラ画像へ再投影することで変化がない場合の自然特徴点の分布状況を表す自然特徴点分布画像を生成する。ここで生成した自然特徴点分布画像上の黒い点は再投影した自然特徴点である。

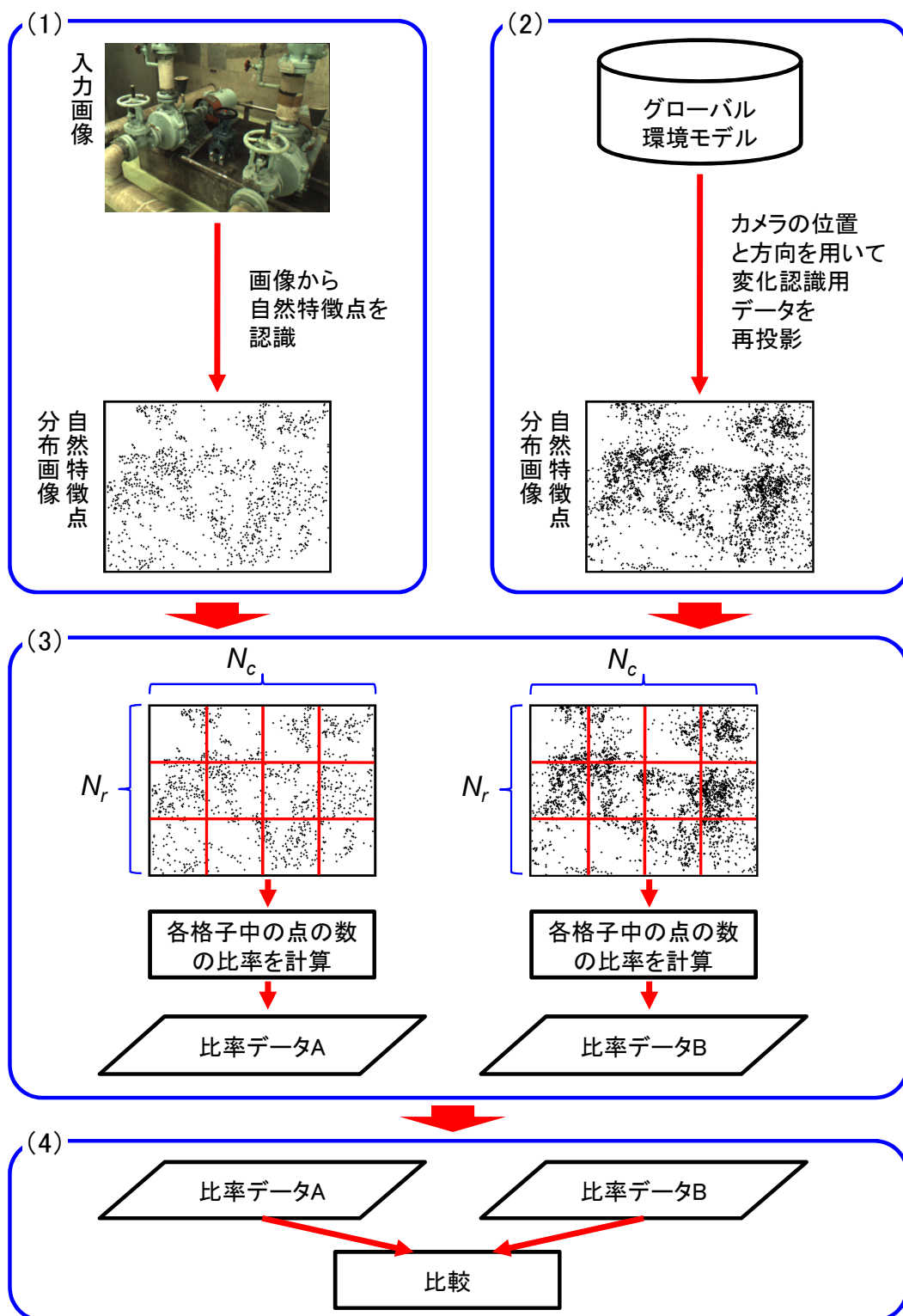


図 3.14: 環境変化の認識処理

- (3) ステップ (1) と (2) で生成した自然特徴点分布画像を $N_r \times N_c$ 個の格子に分割する。各格子内の自然特徴点の数と画像全域中の自然特徴点の数の比率を求める。環境が変化していない場合には、二枚の自然特徴点分布画像で、同じ位置の格子での自然特徴点の数の比率の差は小さくなる。一方、環境が変化した場合には、その差が大きくなる。このような方法では、図 3.15 に示すように、変化認識用データを再投影する際に、不安定なトラッキングで推定したカメラの位置と方向を利用することが原因で、投影点が正しい投影位置から離れても、計算した自然特徴点の数の比率が正確に投影した際に計算した比率と大きく異なることを避けられる。
- (4) 計算した自然特徴点の数の比率を比較し、その差異により環境の変化の有無を判断する。

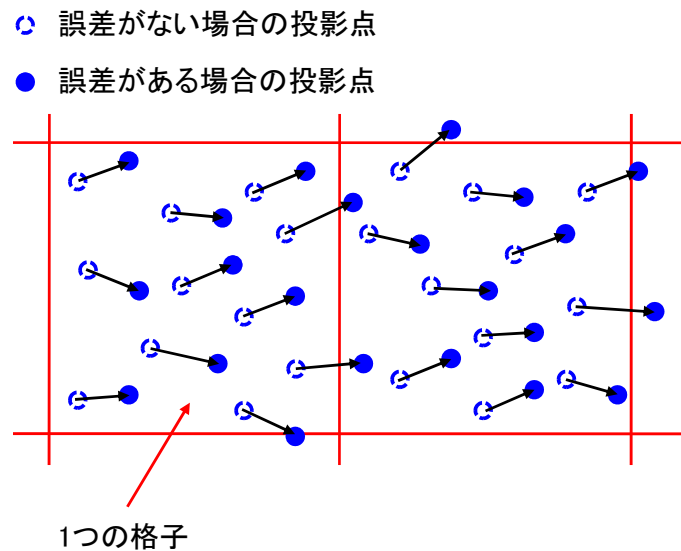


図 3.15: 誤差を含んだ再投影

3.3.2 自然特徴点分布画像の生成

本研究では、環境の変化を認識するために、まず、現在の環境の自然特徴点の分布状況、および比較の基準となる、環境に変化がない場合の自然特徴点の分布状況を求める必要がある。以下では、自然特徴点の分布状況を表す自然特徴点分布画像の生成方法について説明する。

トラッキングと同時に現在の自然特徴点の分布状況を得るために、まずカメラで撮影した画像から自然特徴点を認識する。本研究では、グローバル環境モデルの中の変

化認識用データは SIFT 特徴点であるため、同様に撮影画像から SIFT 特徴点を抽出する。そして、カメラで捉えた画像と同じサイズでなく、適切に縮小された自然特徴点分布画像の方が自然特徴点分布の特徴を適切に表せると同時に、メモリの消費も減らすことができるため、式 (3.1) のように撮影画像から認識された自然特徴点の二次元座標を変換する。

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (0 < k < 1) \quad (3.1)$$

ここで、 (u, v) は変換前の二次元座標であり、 (u', v') は変換後の二次元座標である。 k は縮小係数である。また、式 (3.2) で自然特徴点分布画像のサイズを計算する。

$$\begin{bmatrix} w' \\ h' \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} w \\ h \end{bmatrix} \quad (0 < k < 1) \quad (3.2)$$

ここで、 w と h はカメラで捉えた画像の横幅と縦幅であり、 w' と h' は自然特徴点分布画像の横幅と縦幅である。 k は縮小係数である。以上の処理を行った後、取得した二次元座標と画像のサイズを利用して現在の自然特徴点の分布状況を表す自然特徴点分布画像を生成する。

環境に変化がない場合の自然特徴点分布画像を作成するには、まずトラッキングにより得られたカメラの位置と方向を用いて、グローバル環境モデルの中の変化認識用データをカメラ画像に再投影する。そして、再投影により得られた点の二次元座標を同様に式 (3.1) で変換し、式 (3.2) で求められた画像のサイズを用いて、変化のない場合の自然特徴点分布画像を生成する。上記では、例えば $k=0.5$ とした場合、自然特徴点分布画像の解像度は、元画像の半分になる。この場合、元画像で縦横 2px の範囲に隣り合って再投影される自然特徴点は物理的には同一の自然特徴点であると扱われることになる。後述するようにグローバル環境モデルを生成する際には、Structure-From-Motion の誤差によって物理的には同一である点が異なる点として認識されることがあるが、このように自然特徴点分布画像を縮小することにより、これらを再度同一の点として統合することになる。これにより、環境の変化をより安定して認識できるようになる。

環境に変化がない場合の自然特徴点分布画像を作成する際には、変化認識用データの内、一部の自然特徴点がカメラ画像にも写っているが、現在のカメラの位置・方向がそれらの自然特徴点を計測した時のカメラの位置・方向と異なるため、図 3.16 に示すように、計測した時の画像上の外観と比べ、現在のカメラ画像上のそれらの自然特徴点の外観が大きく変化する場合がある。そのため、それらの自然特徴点が現在のカメラ画像から安定して認識できなくなる。これにより、グローバル環境モデルに含ま

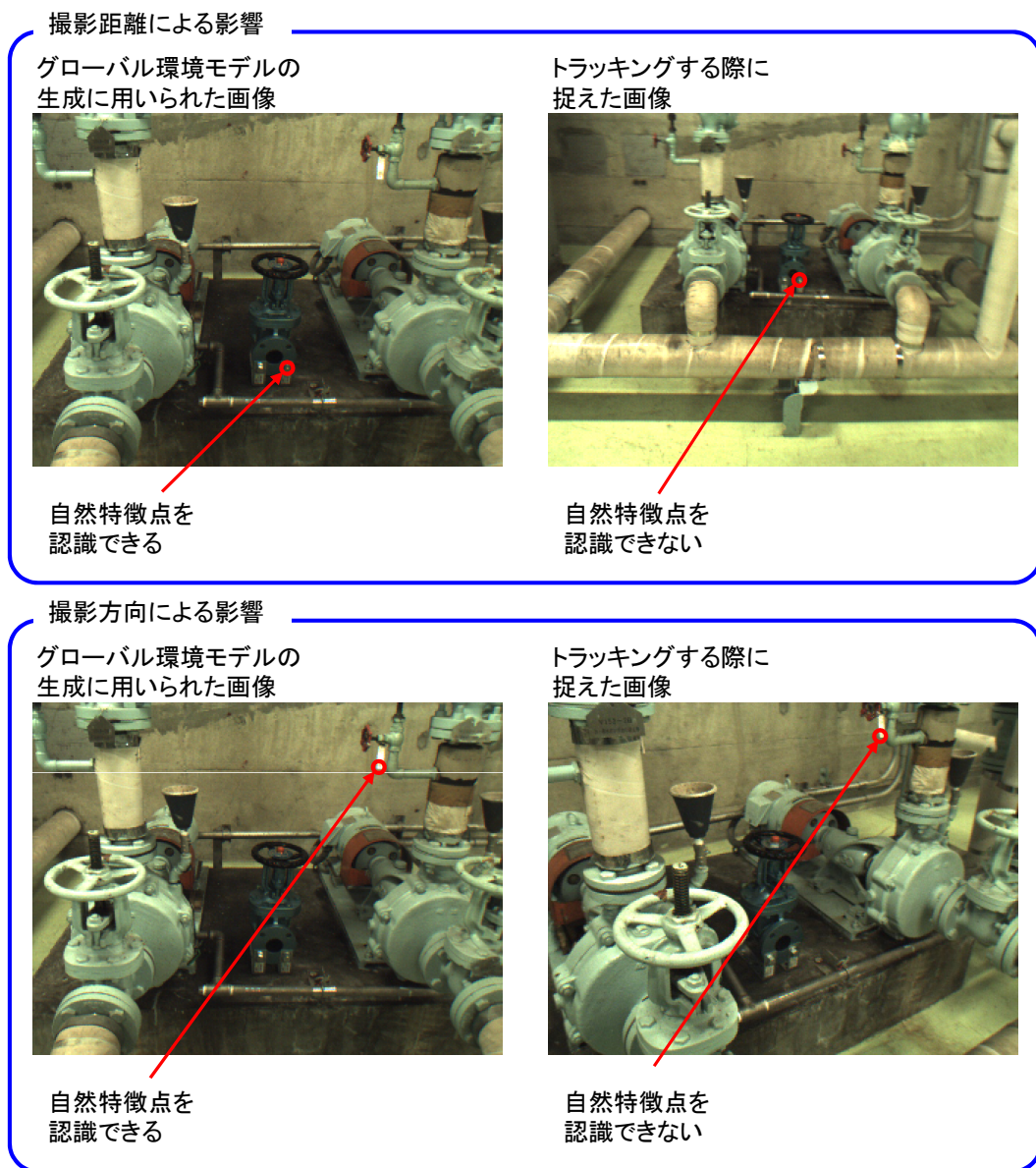


図 3.16: 自然特徴点の認識問題

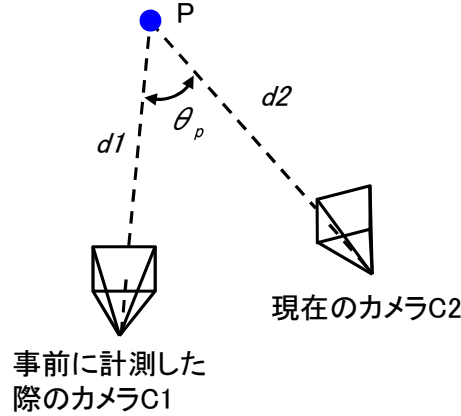


図 3.17: 再投影条件の計算

れる全ての変化認識用データと現在のカメラ画像から認識された自然特徴点をそのまま用いて両者の分布を比較した場合、比較が安定して行えない可能性がある。そこで、本研究では、現在のカメラの位置と方向に近い位置と方向で撮影した画像を用いて取得された変化認識用データのみをグローバル環境モデルから抜き出して画像に再投影する。具体的には、図 3.17 に示すように再投影する前に、変化認識用データ内の各自然特徴点 P とその点を事前に計測した時のカメラ $C1$ との間の距離を $d1$ 、自然特徴点 P と現在のカメラ $C2$ の間の距離を $d2$ 、 P と $C1$ を結ぶベクトルと P と $C2$ を結ぶベクトルがなす角を θ_p とした場合に、 θ_p が予め設定した閾値 T_θ 以下かつ $d2/d1$ が設定した閾値 $T_{d2/d1}$ 以下になる場合のみ自然特徴点 P を投影する。

3.3.3 自然特徴点分布画像を用いた環境変化の認識

本研究では、事前に Structure-From-Motion を利用し、環境中の自然特徴点を計測する。Structure-From-Motion を利用して自然特徴点の三次元位置を計測する場合は、図 3.18 に示すように、物理的には同じ個所を認識しているにもかかわらず、推定した自然特徴点の三次元位置に誤差が含まれていることが原因で、結果として物理的に同じ個所が、複数の異なる自然特徴点として認識され、複数の点が出力される状況がある。Structure-From-Motion はアルゴリズム自体の性質からある程度までこれらの点を統合するが、完全ではない。そのため、図 3.19 に示すように、変化認識用データを再投影することで生成した自然特徴点分布画像中の点の数と現在のカメラ画像から認識された自然特徴点で生成した自然特徴点分布画像中の点の数が大きく異なる場合がある。このような自然特徴点分布画像をそのまま利用して点の分布の差異を計算するこ

グローバル環境モデルの生成に用いられた画像

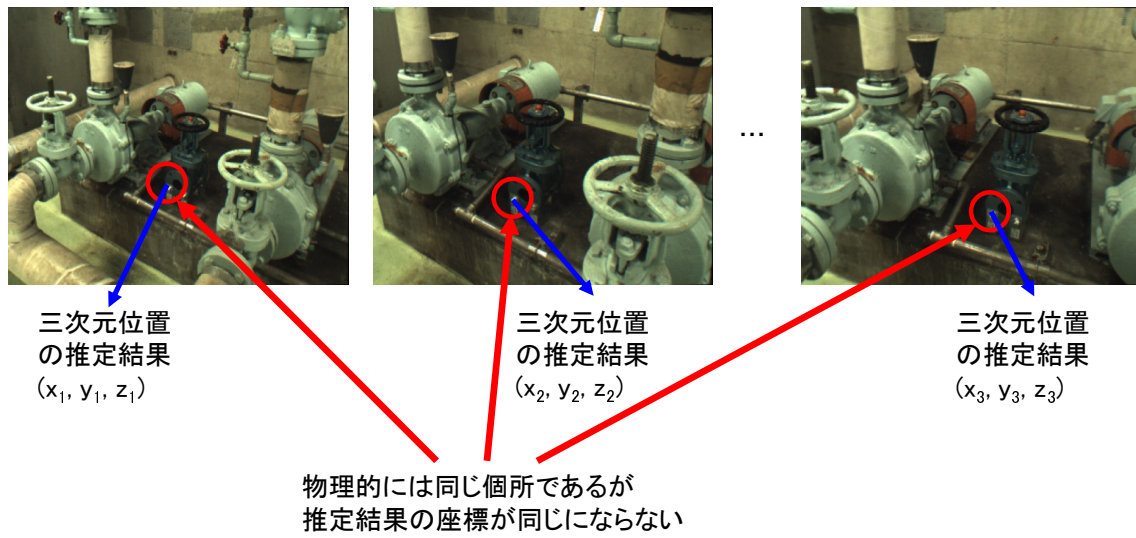


図 3.18: Structure-From-Motion による誤差

トラッキングの時のカメラ画像

画像からの認識結果

再投影の結果

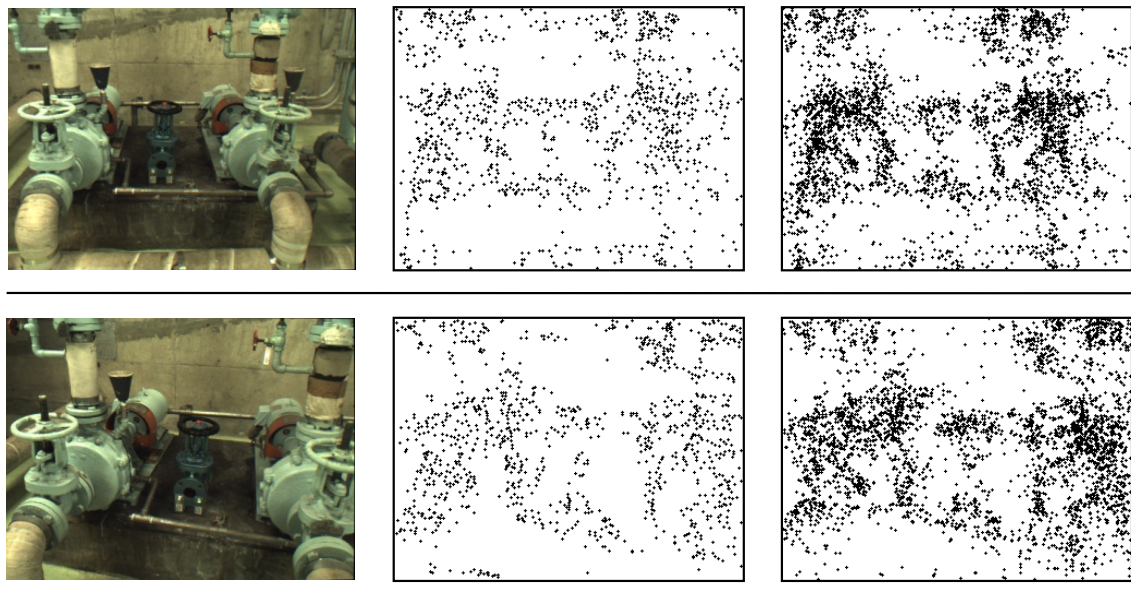


図 3.19: 自然特徴点の数の差

とは難しい。以上の理由から、本研究では、自然特徴点の分布状況を比較する際に、まず、自然特徴点分布画像を $N_r \times N_c$ 個の格子に分割し、各格子内の自然特徴点数と画像全域中の自然特徴点の数の比率を求める。そして、式 (3.3) により、自然特徴点分布の差異を計算する。

$$D = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_c} |R_{ij} - R'_{ij}| \quad (3.3)$$

ここでは、 R_{ij} は変化認識用データの再投影で生成した分布画像中の i 行 j 列目の格子中にある自然特徴点の個数の全自然特徴点の個数に対する比率であり、 R'_{ij} はカメラ画像から認識された自然特徴点で生成した分布画像中の i 行 j 列目の格子中にある自然特徴点の個数の全自然特徴点の個数に対する比率である。 D は自然特徴点分布の差異を表す指標である。最後に、式 (3.4) により、環境の変化の有無を判断する。

$$C = \prod_{k=1}^n H(D_k, T_{diff}) \quad (3.4)$$

なお、図 3.20 に示すようなカメラの微振動などによる画像のブレで起こる自然特徴点の分布の変化が環境の変化と認識されないように、複数回の自然特徴点分布の差異の計算結果が全て予め設定した閾値以上になる場合のみ、環境が変化したと認識する。

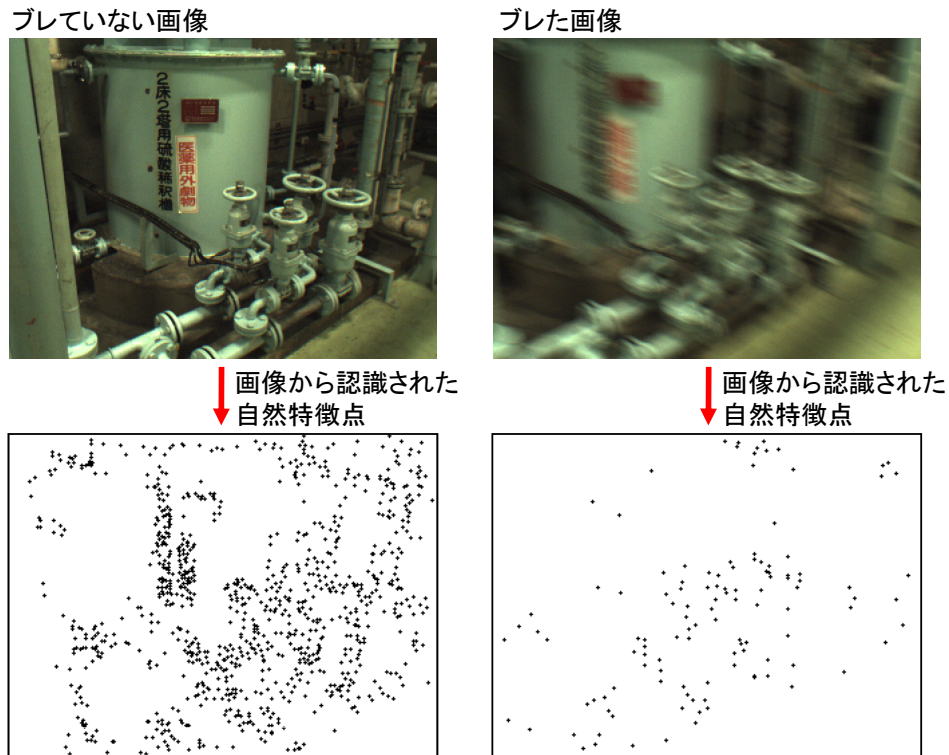


図 3.20: 画像のブレによる自然特徴点分布の変化

式 (3.4) の中、 D_k は k 回目の自然特徴点分布の差異であり、 T_{diff} は予め設定した閾値である。関数 $H(x, y)$ は式 (3.5) の通りである。

$$H(x, y) = \begin{cases} 1 & x \geq y \\ 0 & x < y \end{cases} \quad (3.5)$$

結果 C が 1 になる場合、環境が変化すると認識され、0 になる場合に、環境が変化していないと判断する。

3.4 ローカル環境モデルの生成

環境が変化したことが認識された場合、カメラのトラッキングを継続しながらも、可能な限り迅速にグローバル環境モデルを更新することが望ましい。そこで、本研究では Klein らが提案した手法^[25]をもとに、トラッキングと自然特徴点の計測を同時に行い、計測結果から生成したローカル環境モデルを用いてトラッキングを継続する。また、生成したローカル環境モデルをもとに 3.5 節で述べる方法でグローバル環境モデルを更新する。ここで生成するローカル環境モデルは計測した自然特徴点の三次元位置、自然特徴点が初めて認識された画像、その画像を撮影した時のカメラの位置と方向および撮影画像上での自然特徴点の二次元座標の 4 つの要素で構成される。図 3.21 にローカル環境モデルの例を示す。図の左に自然特徴点（青色の点）と自然特徴点が

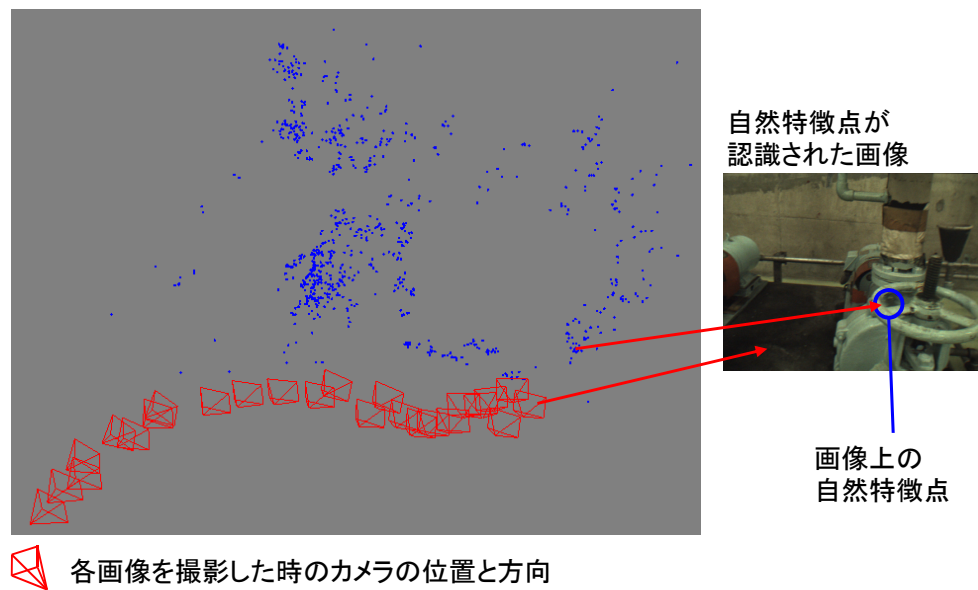


図 3.21: ローカル環境モデルの例

認識された画像を撮影した際のカメラの位置と方向（赤色の四角錐）を示す。図の右に自然特徴点が認識された画像および画像上の自然特徴点を示す。

本研究では、ローカル環境モデルを生成する際には、図 3.22 に示すように変化した部分のみの自然特徴点を計測するだけでなく、その周辺の変化していない部分の自然特徴点も同時に計測する。この場合、ローカル環境モデルの内、変化していない部分における自然特徴点は、グローバル環境モデルにも重複して存在することになる。以降、この重複している自然特徴点を重複点と呼ぶ。3.5 節で述べるグローバル環境モデルの更新手法では、ローカル環境モデルを用いてグローバル環境モデルを更新する際に、この重複点を用いる。

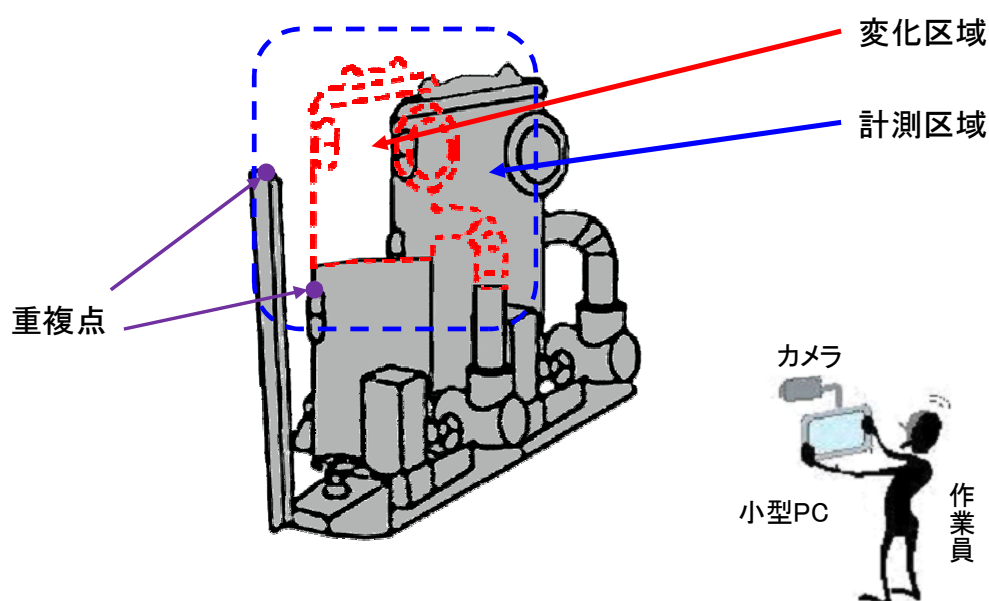


図 3.22: 重複点

3.5 グローバル環境モデルの更新

本節では、トラッキングと同時に生成したローカル環境モデルを用いてグローバル環境モデルを更新する手法について説明する。

3.5.1 更新手法の概要

本研究では、環境が変化すると認識された場合、カメラのトラッキングを継続するだけでなく、新たに自然特徴点計測して、可能な限り既存のグローバル環境モデルを迅

速に更新する。グローバル環境モデルを更新するには、事前処理と同様に、Structure-From-Motion を用いて変化した環境における自然特徴点を計測し、得られたデータをもとにグローバル環境モデルを更新する手法が考えられる。ただし、このような手法を利用する場合、環境の三次元復元に必要な環境画像の中に作業員などの、環境モデルを生成する処理を行う際の外乱となるものが写らないようにする必要があり、また、環境画像を取得している領域で新たな変化が起こらないように、解体作業を一時中断しなければならない。さらに、変化した環境の画像を取得する際、作業員が自ら変化した範囲を判断しなければならないため、適切な画像を取得できない可能性もある。また、Structure-From-Motion の処理は、処理対象となる画像の数が多くなるにつれて、処理に要する時間が多くなるため、変化していない環境を撮影した映像が数多く含まれてしまうなど、取得された画像の数が無駄に多くなった場合に三次元復元の時間が長くなるという問題がある。一方、変化した環境の一部しか撮影されないなど、取得された画像の数が足りない場合には、必要な処理が実行できなくなる可能性もある。上述の理由から、本研究では、環境が変化したと認識された後、トラッキングと同時に生成したローカル環境モデルを用いて既存のグローバル環境モデルを更新する。具体的には、図 3.23 に示すように、

- (1) 環境が変化したと認識してからの時間（本研究では、この値をローカル環境モデルの計測時間として利用する）を計算し、その値が予め設定した閾値以上の場合に、処理(2)～(4)を実行する。これにより、他の作業員がカメラの前を通過する場合など、カメラの映像が変化しているにも関わらず、実際には環境が変化していない場合に、グローバル環境モデルを更新してしまうことを避けることができる。
- (2) ローカル環境モデルとグローバル環境モデルを照合し、2つのモデルの間の重複点を検索する。
- (3) トラッキングと同時に生成したローカル環境モデルは精度が低い可能性があり、そのまま利用してグローバル環境モデルを更新すると、更新された回数が増えるにつれて、グローバル環境モデル全体の精度が低下する。そのため、ローカル環境モデルとグローバル環境モデルを統合する前に、重複点を用いてローカル環境モデル内の自然特徴点の三次元位置と自然特徴点が認識された画像を取得した時のカメラの位置と方向を修正し、精度を向上させる。
- (4) 重複点を用いてローカル環境モデルとグローバル環境モデルを統合する。

の処理を通じ、グローバル環境モデルを更新する。以上に述べた方法では、既にトラッキングに使用することに成功したローカル環境モデルをもとにグローバル環境モデルを更新することになるため、計測時間が長い、データが不十分である等の問題がある程度解決できる。

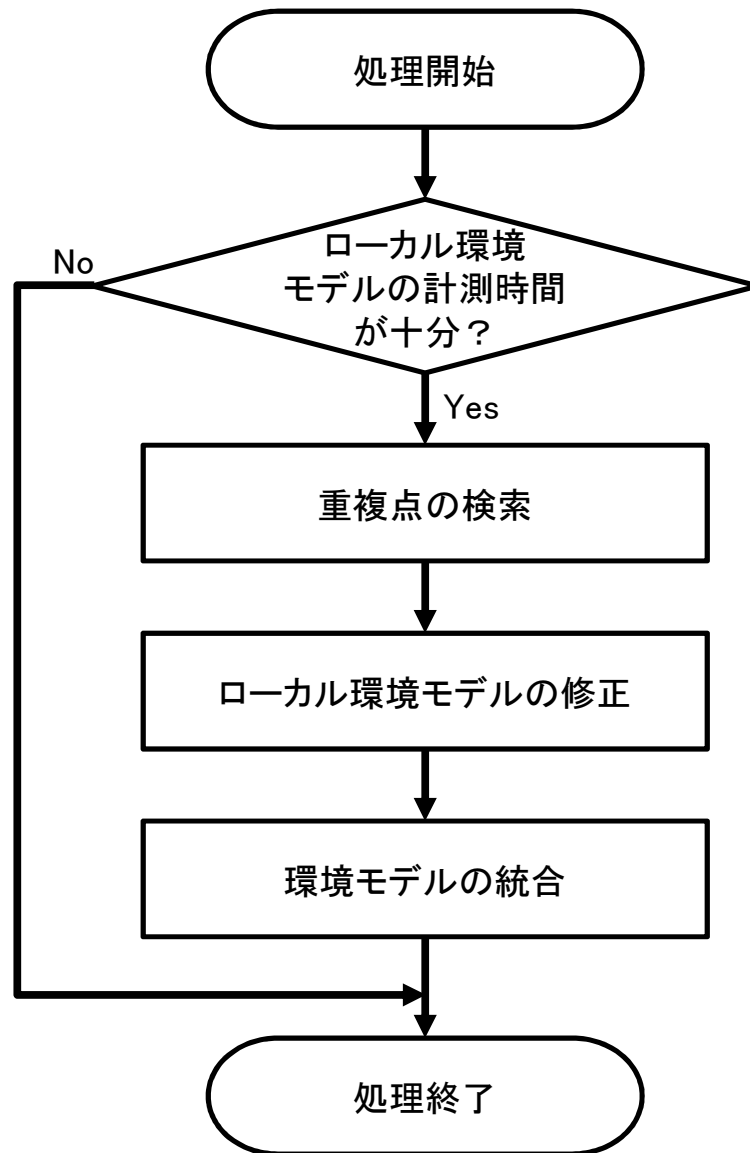


図 3.23: グローバル環境モデルの更新処理

3.5.2 重複点の検索

本研究では、グローバル環境モデルを正しく更新するため、3.5.1 項で説明したように、まずローカル環境モデルとグローバル環境モデルの中の重複点を検索する必要が

ある。以下では、重複点の検索方法について説明する。

重複点を検索する際に、まずローカル環境モデルから1点を取り出し、その点をPとする。そして、点Pとグローバル環境モデル内のトラッキング用データの中の各自然特徴点の間の三次元距離 d を計算する。同時に、点Pが計測されたときのカメラの方向ベクトルとトラッキング用データ内の各自然特徴点が計測されたときのカメラの方向ベクトルのなす角 φ を計算する。 d が予め設定した閾値 T_d 以下かつ φ が閾値 T_φ 以下となる点をグローバル環境モデルから抜き出し、その中から点Pとの三次元距離が最も近い点を求める。ローカル環境モデルの中の全ての自然特徴点に対して上述の処理を行った後、対応付けたローカル環境モデル内の自然特徴点とグローバル環境モデル内の自然特徴点のペアは重複点であると仮定する。その後、図3.24に示すように、各重複点の周りの他の重複点の分布状況を分析し、重複点を中心とする半径 T の球内の他の重複点の数を数え、その数が N 以下の重複点は外れ値として除く。最後に残る点を最終的な重複点とする。

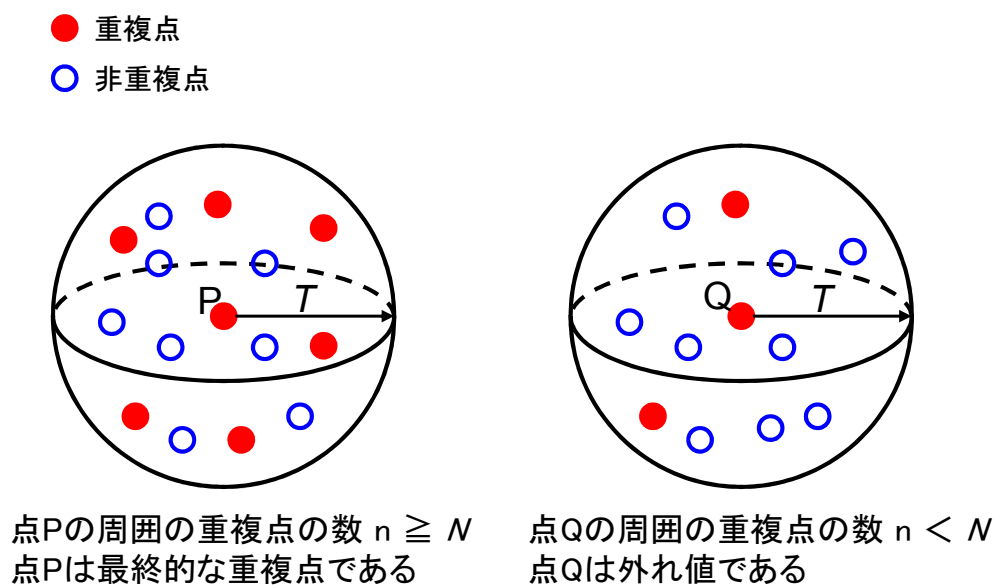


図 3.24: 重複点の中の外れ値

3.5.3 ローカル環境モデルの誤差低減

本研究では、ローカル環境モデルとグローバル環境モデルの間の重複点を利用してローカル環境モデルを修正する。ただし、ローカル環境モデル中の自然特徴点は特徴点ごとに精度が異なるため、ローカル環境モデルを効率的に修正できるように、各自

然特徴点の予想される精度に応じて0から1の間の信頼度（予想される精度が高いほど信頼度が高く値が大きい。本研究では、 r_1 、 r_2 、1の三段階の信頼度を設定する、 $0 < r_1 < r_2 < 1$ ）を設定し、その信頼度に応じて自然特徴点の三次元位置および自然特徴点が認識された画像を取得したときのカメラの位置と方向を修正する。具体的には、まず3.5.2項で述べた方法での検索結果を用いて、ローカル環境モデル内の重複点の三次元位置を、その対応付けられたグローバル環境モデル内の自然特徴点の三次元位置に変換する。次に、ローカル環境モデルの中で、重複点には1の信頼度を設定し、残る点に r_1 の信頼度に付ける。そして、図3.25に示すように信頼度が1未満の各点に対して、その点が写っている画像を探し、その画像に他のより高い信頼度を持つ自然特徴点が写っているかどうかを調べる。より高い信頼度を持つ点が写っている場合、その点とより高い信頼度を持つ点および画像を取得したときのカメラの位置と方向を1つの組とする（この組を以下、修正グループと呼ぶ）。その後、修正グループ内の信頼度が1の点の三次元位置、および写っている全ての点の信頼度が1である画像が存在すれば、そのカメラの位置と方向を固定し、Bundle Adjustment [29] を用いて式(3.6)、(3.7)で計算した誤差 E_{sum} を最小化することで、修正グループ内の点の三次元位置およびカメラの位置と方向を修正する。

$$\Delta E_{ij} = \begin{cases} \sqrt{(u_{ij} - u'_{ij})^2 + (v_{ij} - v'_{ij})^2} & (\text{点が認識された場合}) \\ 0 & (\text{点が認識されていない場合}) \end{cases} \quad (3.6)$$

$$E_{sum} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\alpha_i \Delta E_{ij}|^2 \quad (3.7)$$

ここで、 (u_{ij}, v_{ij}) は自然特徴点 i の三次元位置および画像 j を捉えたときのカメラの位置と方向を用いて点 i を画像 j へ再投影した二次元座標であり、 (u'_{ij}, v'_{ij}) は画像 j 上での自然特徴点 i の検出座標である。 ΔE_{ij} は自然特徴点 i の画像 j への再投影誤差であり、 α_i は自然特徴点 i の信頼度である。1回の修正が終わった後、修正された自然特徴点の信頼度を r_1 から r_2 にまた r_2 から1に変更する。全ての点の信頼度が1になるまで上記の処理を繰り返す。

3.5.4 ローカル環境モデルとグローバル環境モデルの統合

3.5.3項で述べた方法で修正して精度を向上させたローカル環境モデルと既存のグローバル環境モデルを統合する際、(1) ローカル環境モデルの周辺領域を除去する処理と(2) 更新領域を確定してグローバル環境モデルを更新する処理を実行する必要がある。以下では、各処理について具体的に説明する。

信頼度: $0 < r_1 < r_2 < 1$

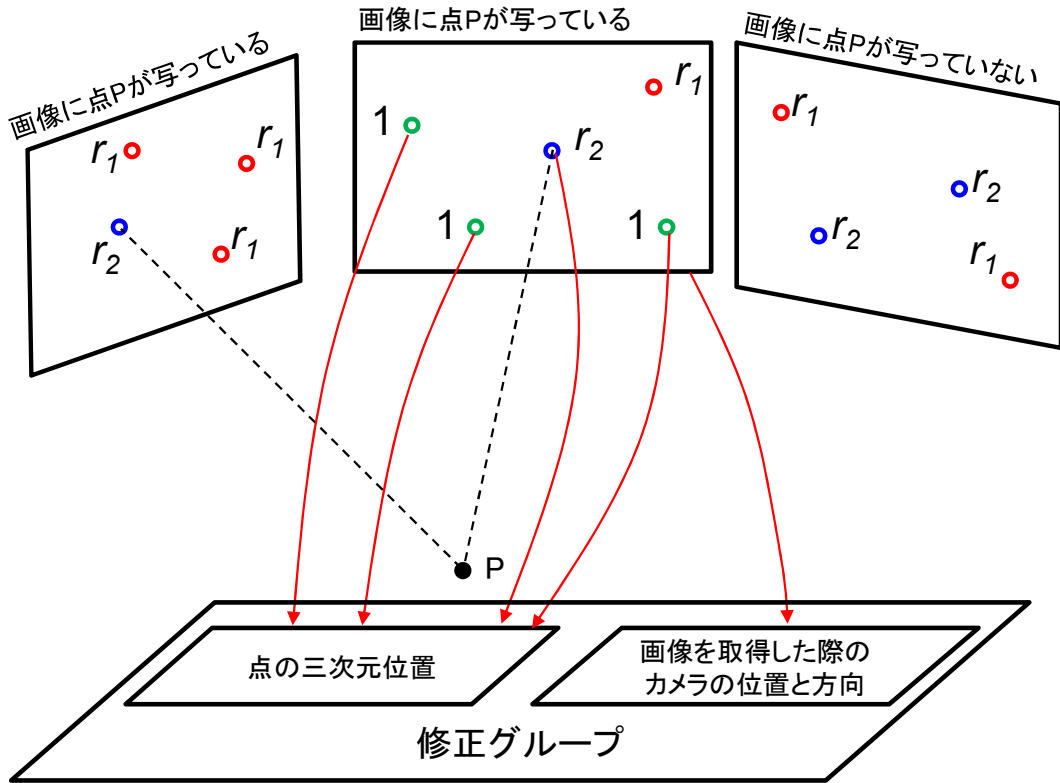


図 3.25: 修正グループ

図 3.26 に示すように、ローカル環境モデルの外側の領域（周辺領域）には通常、計測された自然特徴点が非常に少ないため、これらの領域の中の自然特徴点も用いてグローバル環境モデルを更新する場合、グローバル環境モデル内の同じ領域にある自然特徴点を大量に間違えて削除する可能性が高い。そこで、ローカル環境モデルを用いてグローバル環境モデルを更新する前に、ローカル環境モデルの周辺領域を除去する必要がある。そこで本研究では、図 3.27 に示すように、まずローカル環境モデル内の全ての自然特徴点に対し、x 座標の最大・最小値、y 座標の最大・最小値および z 座標の最大・最小値を求め、得られた結果により自然特徴点を包囲する直方体区域を生成する。そして、直方体区域を辺の長さが a_{side} の立方体に分割する。その後、図 3.28 に示すようにローカル環境モデル座標系の x 軸正の方向に沿って、x 座標が最も小さな立方体から順に、1 つの立方体の中に含まれる自然特徴点の数が予め設定した閾値 T_{num} 以上になる立方体を検索し、一番最初に見つかった立方体の最小 x 座標（立方体の 8 頂点の x 座標の内、最も小さい値）を x_{min} とする。同様に、x 軸負の方向に沿って、x 座標が最も大きな立方体から順に、1 つの立方体の中に含まれる自然特徴点の数が閾値

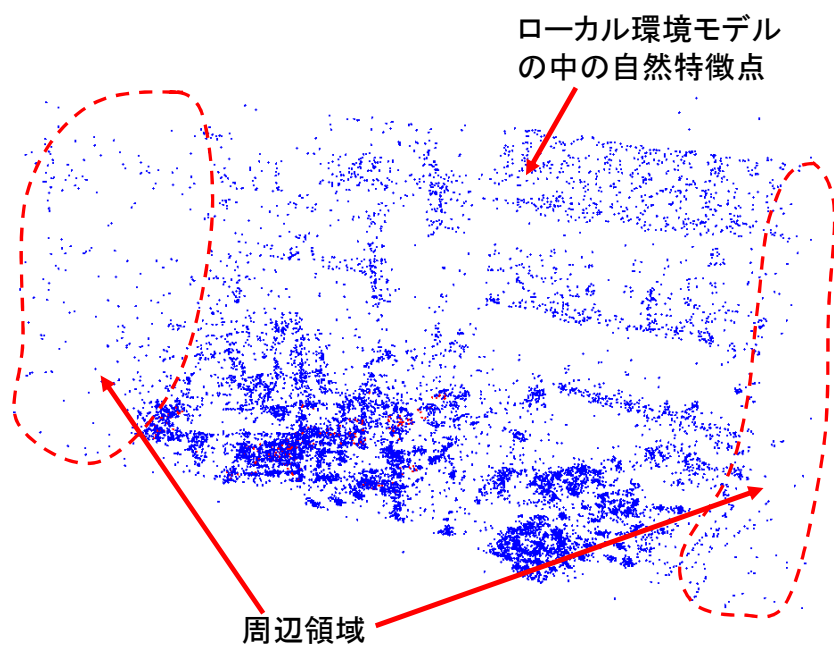


図 3.26: 周辺領域

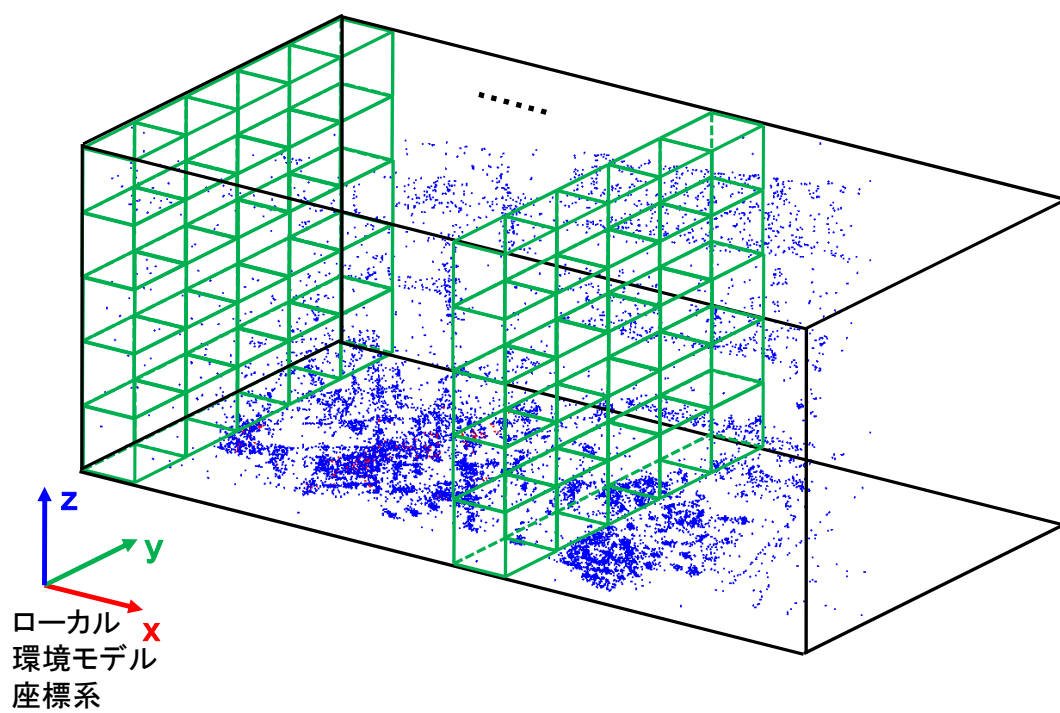


図 3.27: 区域の分割

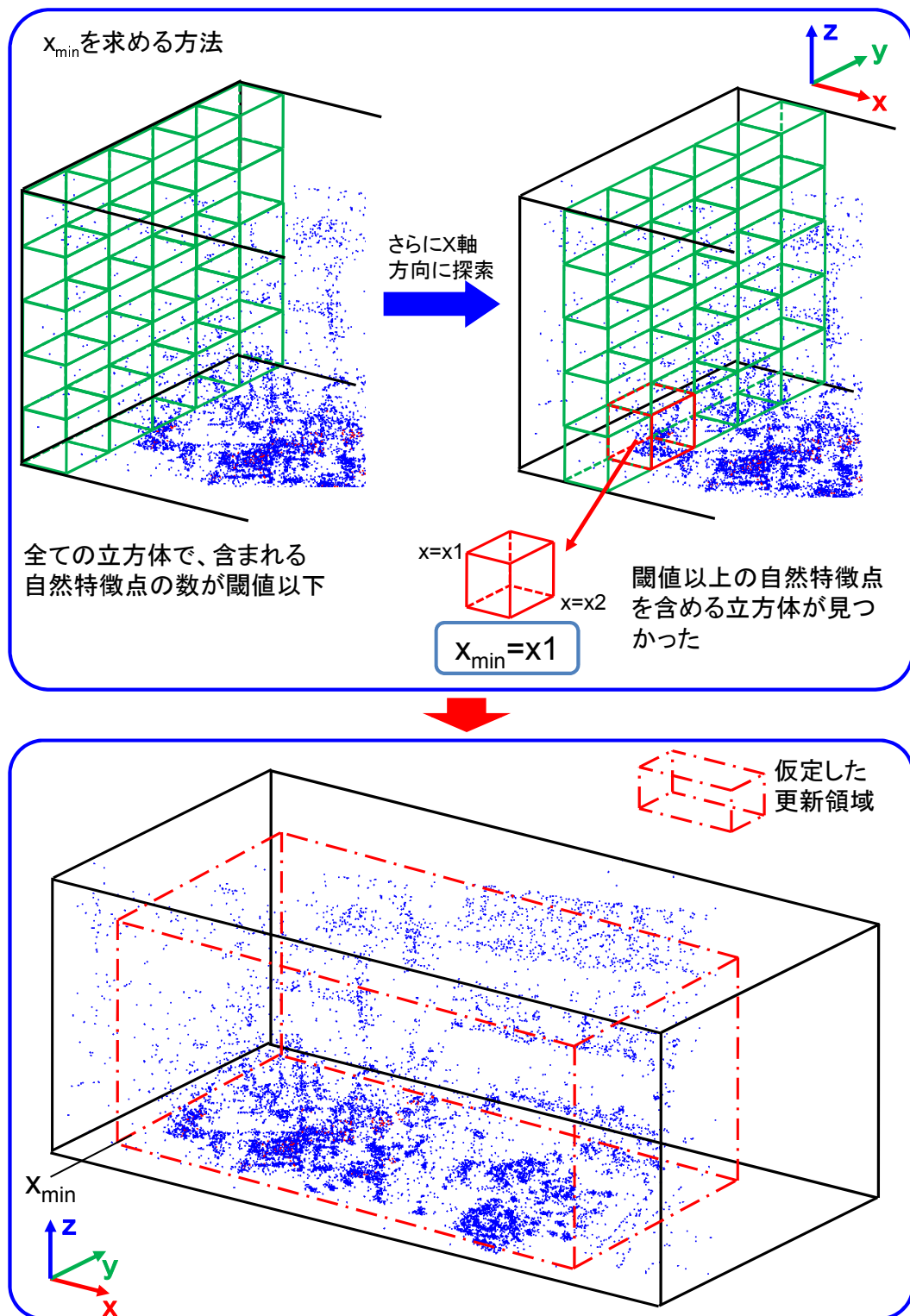


図 3.28: 更新領域の仮定

T_{num} 以上になる立方体を検索し、一番最初に見つかった立方体の各頂点の最大 x 座標を x_{max} とする。同様に y_{min} 、 y_{max} 、 z_{min} 、 z_{max} を求めた後、それらで構成される直方体領域を更新領域と仮定し、それ以外の部分を周辺領域として除く。

上述の処理を行った後、更新領域と仮定された領域内の各立方体に対し、立方体が含まれる自然特徴点の総数と重複点の数を求める。そして、下記のようにグローバル環境モデルにおける自然特徴点を更新する。

- (A) 図 3.29(a) に示すように、立方体内の重複点の数が設定した閾値 T_{rep} 以上である場合、重複点が数多く存在しており、今のままでもトラッキングを継続するのに支障がないため、自然特徴点の更新を行わない。
- (B) 図 3.29(b) に示すように、立方体内の重複点の数が閾値 T_{rep} 以下、かつ自然特徴点の総数が閾値 T_{total} 以上である場合、重複点が十分存在しておらず、環境中の自然特徴点の配置が大きく変わったと考えられる。そのため、グローバル環境モデル内の自然特徴点を更新しない場合、その領域の自然特徴点を用いたトラッキングが失敗する可能性が高い。そのため、グローバル環境モデル内の同じ領域内にある自然特徴点を削除すると同時に、ローカル環境モデルの中の自然特徴点をグローバル環境モデルに追加する。
- (C) 図 3.29(c) に示すように、立方体内の重複点の数が閾値 T_{rep} 以下、かつ自然特徴点の総数が閾値 T_{total} 以下である場合、重複点が十分存在しておらず、自然特徴点の配置が大きく変わったと考えられる。そのため、グローバル環境モデル内の自然特徴点を更新しない場合、その領域の自然特徴点を用いたトラッキングが失敗する可能性が高い。そのため、グローバル環境モデル内の同じ領域内である自然特徴点を削除する。ただし、立方体内の自然特徴点の数が少なく、間違った計測で生成した特徴点である可能性があると考え、グローバル環境モデルにローカル環境モデル内の自然特徴点は追加しない。

その後、グローバル環境モデル内の各キーフレームに対し、キーフレームから認識された自然特徴点の中の削除された自然特徴点の数を求める。閾値 T_{del} 以上の点が削除された場合に、キーフレームが写っている環境が大きく変わったと予想され、そのキーフレームは使えないと考えられる。そのため、そのキーフレームを削除する。最後に、ローカル環境モデルの中の環境画像および画像を撮影した時のカメラの位置と方向をもとに、新たなキーフレームデータを生成し、グローバル環境モデルに追加する。

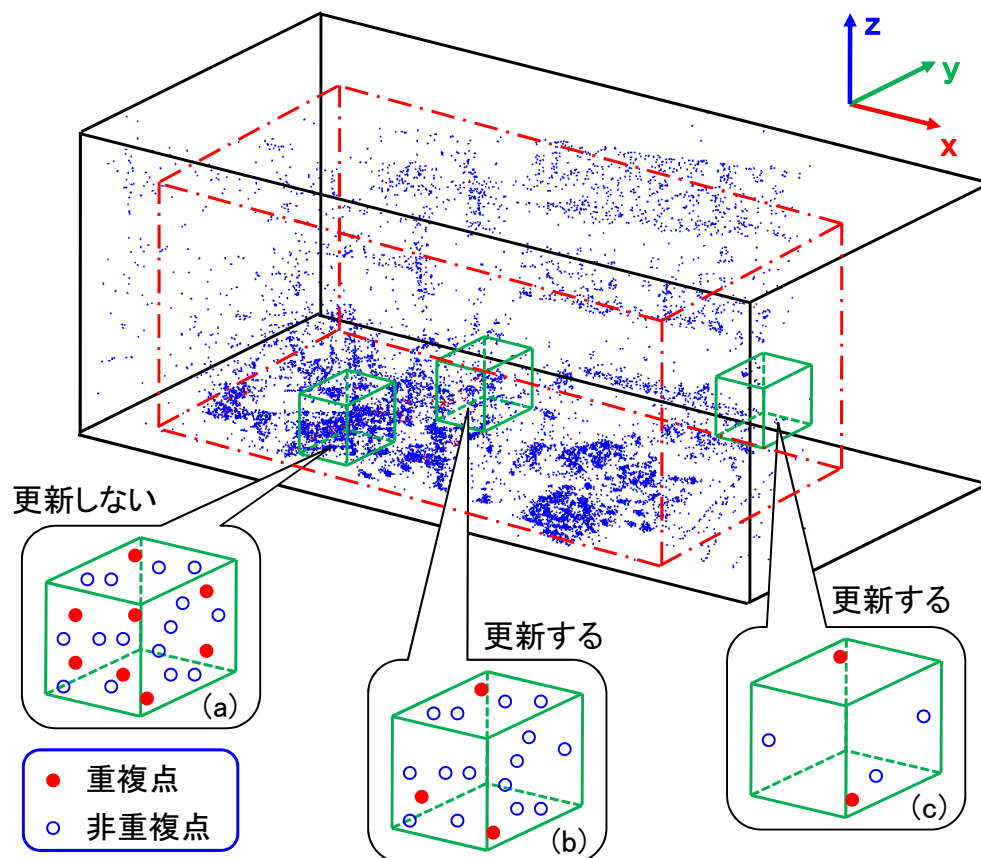


図 3.29: 自然特徴点の更新

第 4 章 解体作業現場における提案手法の有効性の評価実験

提案手法の有効性を評価するため、原子炉廃止措置研究開発センター内の純水装置室で評価実験を実施した。以下では、まず評価実験の目的と方法について述べ、次に得られた結果と考察を述べる。

4.1 実験の目的

本実験では、実際の解体作業現場に提案手法を適用した場合に環境変化を正しく認識できるかどうかを、提案手法をもとに実装した実験用システムを用いて確認すること、および提案手法を用いて、変化のない環境と変化のある環境で安定なトラッキングを実現できることを確認することを目的とする。

4.2 実験の方法

以下では、実験の手順、実験の機材と用いた実験用システム、実験環境、実験環境の画像の取得および変化認識処理と環境モデル更新処理に必要なパラメータの設定について説明する。

4.2.1 実験の手順

本実験の手順を図 4.1 に示す。事前に、変化する前の環境の画像をカメラで取得し、3.2 節で述べた方法でグローバル環境モデルを生成する。

環境変化を正しく認識できるかどうかを確認するには、まず変化していない環境で提案手法を用いて変化の認識を実行する。変化を認識するために式 (3.3) で計算した自然特徴点分布の差異を結果 D1 として保存する。その後、実験環境中の機器を移動させることで解体作業で起こる環境変化を模擬する。機器を移動させた後の環境で環境変化の認識を実行し、計算した自然特徴点分布の差異を結果 D2 として保存する。最後に、結果 D1 と結果 D2 を比較することで環境変化の認識効果を評価する。

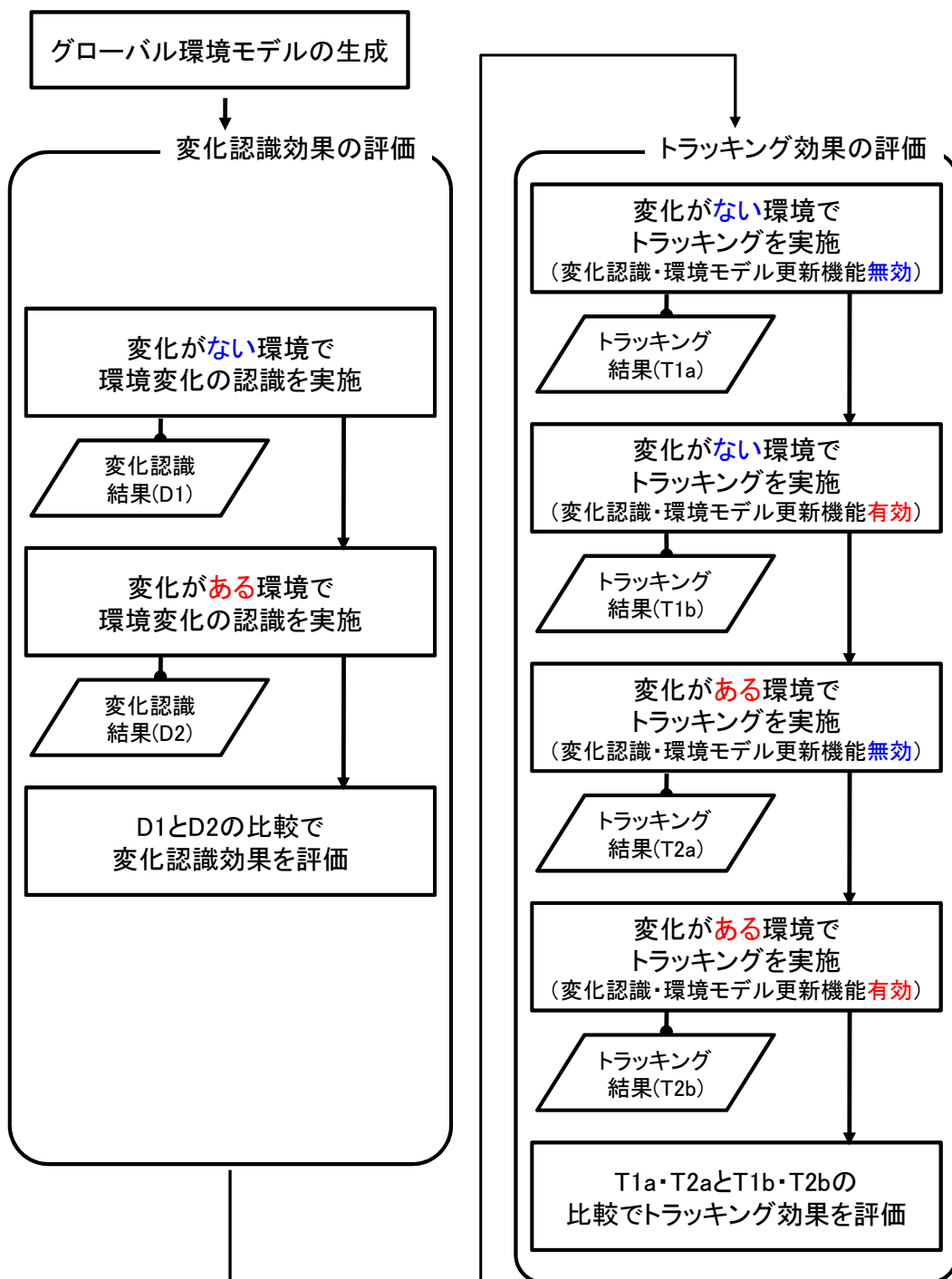


図 4.1: 手法の有効性の評価実験の手順

一方、提案手法によるトラッキングが正しく動作することを確認するため表 4.1 に示す 4 種類の条件でトラッキングを実施する。まず変化認識・環境モデル更新機能を無効にし、変化していない環境でトラッキングを実行し、トラッキングの結果を結果 T1a として保存する。その後、変化認識・環境モデル更新機能を有効にし、変化していない環境でトラッキングを実行する。トラッキングの結果を結果 T1b として保存する。その後、変化した環境で、同様に変化認識・環境モデル更新機能を無効・有効に設定してそれぞれにトラッキングを実行し、トラッキングの結果を結果 T2a および結果 T2b として保存する。最後に、結果 T1a・T2a と結果 T1b・T2b を比較することで提案手法によるトラッキングを評価する。

表 4.1: トラッキングの評価実験の条件

環境変化の有無	変化認識・環境モデル更新機能	トラッキングの結果
なし	無効	結果 T1a
なし	有効	結果 T1b
あり	無効	結果 T2a
あり	有効	結果 T2b

4.2.2 実験の機材と実験用システム

本実験で、現場環境の画像の取得に用いたカメラ（図 4.2）の仕様を表 4.2 に示す。Matlab の Camera Calibration Toolbox^[30] で測定したカメラの歪補正パラメータを表 4.3 に示す。また、グローバル環境モデルの生成およびトラッキングの実行に用いたパソコンの仕様を表 4.4 に、現場で解体作業により起こる環境変化を模擬するため、図 4.3 に示すようなバルブを用いた。バルブの仕様を表 4.5 に示す。実験中に、カメラを載せたレールを図 4.4 に示す。レールの仕様を表 4.6 に示す。



図 4.2: 実験用カメラ

表 4.2: 実験用カメラの仕様

メーカー・型名	Point Grey Firefly MV FMVU-03MTC
解像度	640 × 480px
レンズ	3.5mm レンズを装着

表 4.3: 実験用カメラの歪補正パラメータ

パラメータ	fc_x	fc_y	cc_x	cc_y
測定の値	614.911999	614.556264	326.773273	222.852709
パラメータ	k1	k2	k3	k4
測定の値	0.009855	0.056186	0.000826	0.000779

表 4.4: 実験用パソコンの仕様

メーカー・型名	Sony VPCEA3S1C
CPU	2.67Hz(Intel Core i5 560M)
メモリ	4GB
OS	Windows7 Ultimate(32bit)

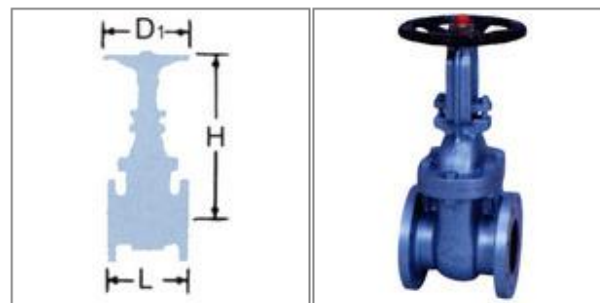


図 4.3: 実験用バルブ

表 4.5: 実験用バルブの仕様

メーカー・型名	東洋バルブ 鋳鉄ゲートバルブ 5K
寸法 L	160mm
寸法 H	328mm
寸法 D1	160mm
呼び径 (A)	50



図 4.4: 実験用レール

表 4.6: 実験用レールの仕様

メーカー・型名	koolertron AS-KLMH12
長さ	120cm

提案手法を評価するために使用したシステムのハードウェア構成を図 4.5 に示す。事前に生成したグローバル環境モデルを MySQL5.5 でパソコンに保存し、カメラのトラッキング、環境変化の認識、ローカル環境モデルの生成およびグローバル環境モデルの更新も同じパソコンで実行した。実験用システムのソフトウェアは Microsoft Visual Studio 2010 を用いて開発し、開発言語は C/C++ を用いた。ソフトウェアを開発した際に用いた外部ライブラリを表 4.7 に示す。

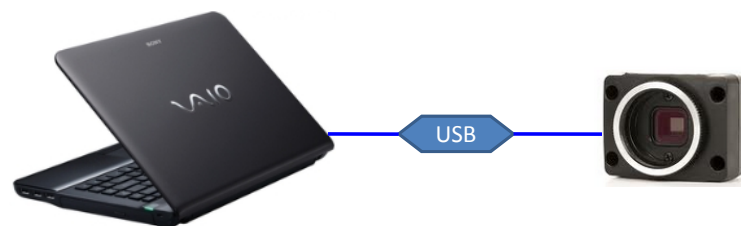


図 4.5: 実験用システムのハードウェアの構成

4.2.3 実験の環境

本実験は、ふげんの保全区域の一角である純水装置室の一角で実施した。実験を実施した環境の概略図を図 4.6 に示す。図の中の点線で囲まれた部分は自然特徴点の計測とカメラのトラッキングを実際に行った区域である。実験環境の実際の様子を図 4.7 に示す。

表 4.7: 外部ライブラリ

機能	利用したライブラリ
画像の歪補正・自然特徴点の認識	OpenCV 2.3.1
行列の計算	Tom's Object-oriented numerics library(TooN)
データの修正	Sparse Bundle Adjustment(sba) 1.5
DB の接続	Connector/C
カメラの制御	FlyCapture(Point Grey 社から提供)

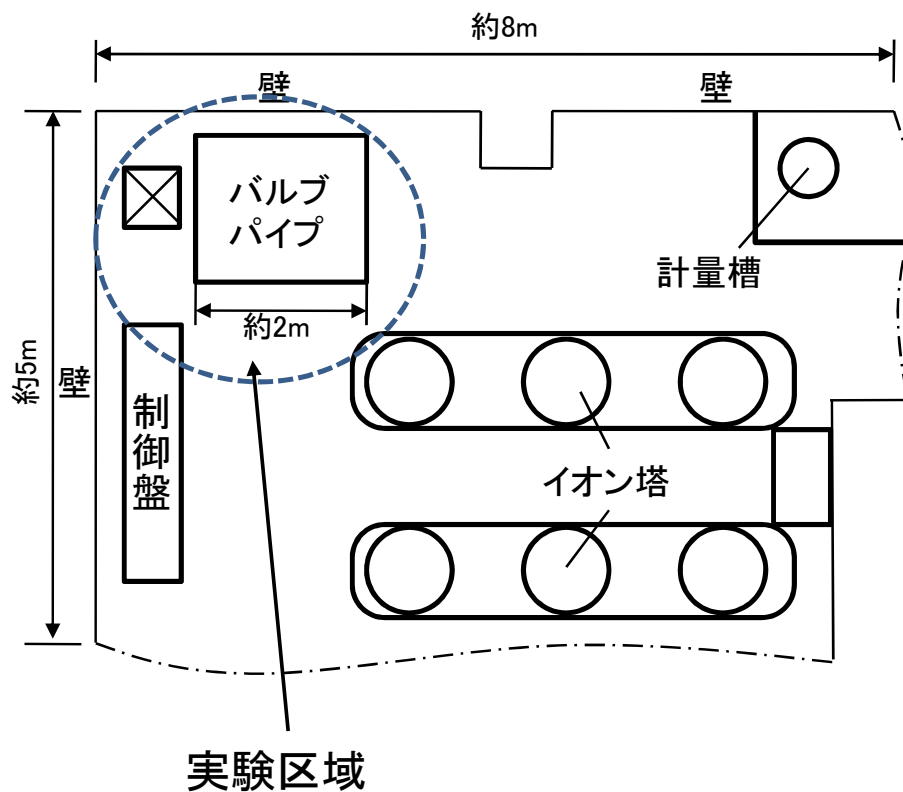


図 4.6: 純水装置室の一部の概略図

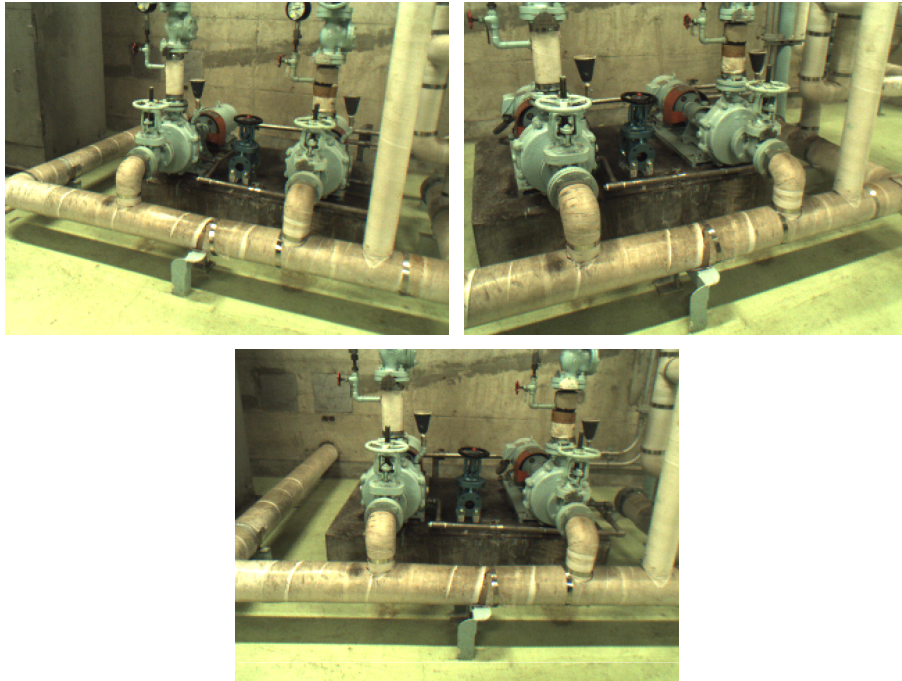


図 4.7: 実験環境の様子

4.2.4 実験環境の画像の取得

本実験では、カメラで撮影（30fps）した実験環境の画像を一旦、パソコンのハードディスクに保存した後（以下、ハードディスクに保存した画像を画像シーケンスと呼ぶ）、それを読みだして評価に必要な処理を実行した。実験環境の画像を取得する手順を以下に示す。

- (1) 図 4.7 に示すように実験用バルブを実験環境に置く。実験環境で様々な視点から環境を撮影する。撮影した画像を三次元復元に用いられる画像シーケンスとしてパソコンに保存する。
- (2) 手動でカメラを移動させると同時に、カメラを実験用バルブに向けて撮影する。取得した画像を、変化のない環境の画像シーケンスとしてパソコンに保存する。カメラの移動経路を図 4.8 に示す。
- (3) 図 4.9 に示すように、実験環境から実験用バルブを移動させることにより解体作業により起こる環境変化を模擬する。
- (4) カメラをレールに載せ、レールに沿って移動させる。途中、レールから離れて空中を移動させる。最後にカメラをレールに載せ、最初の箇所に戻す。手動でカメ

ラを移動させると同時に、カメラを変化した部分に向けて撮影する。取得した画像を、変化のある環境の画像シーケンスとしてパソコンに保存する。カメラの移動経路を図 4.10 に示す。

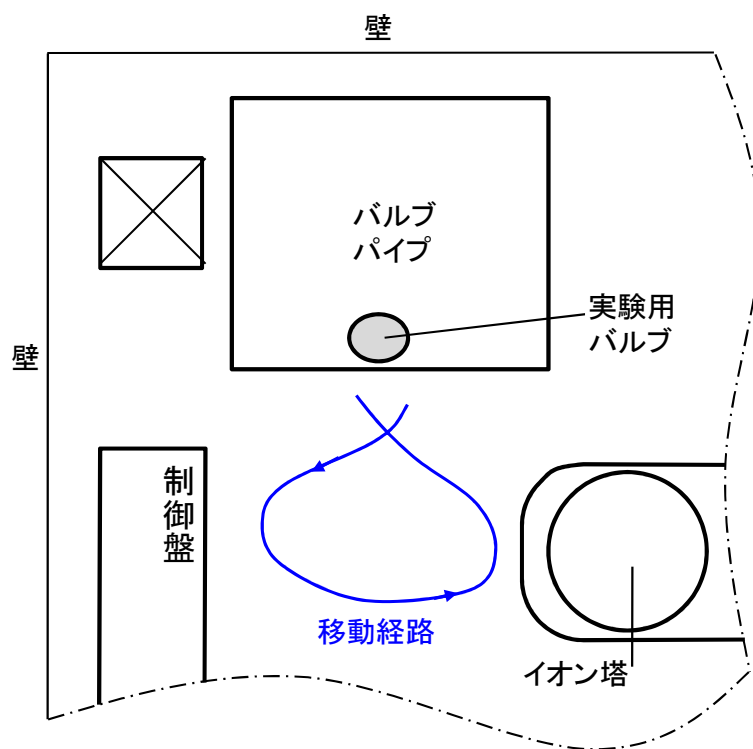


図 4.8: カメラの移動経路（変化がない環境）

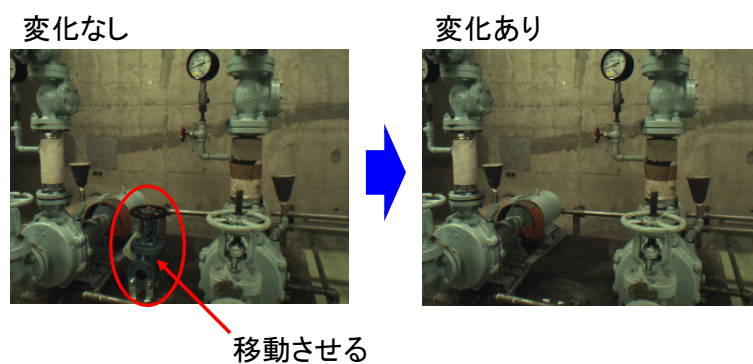


図 4.9: 解体作業で起こる環境変化の模擬

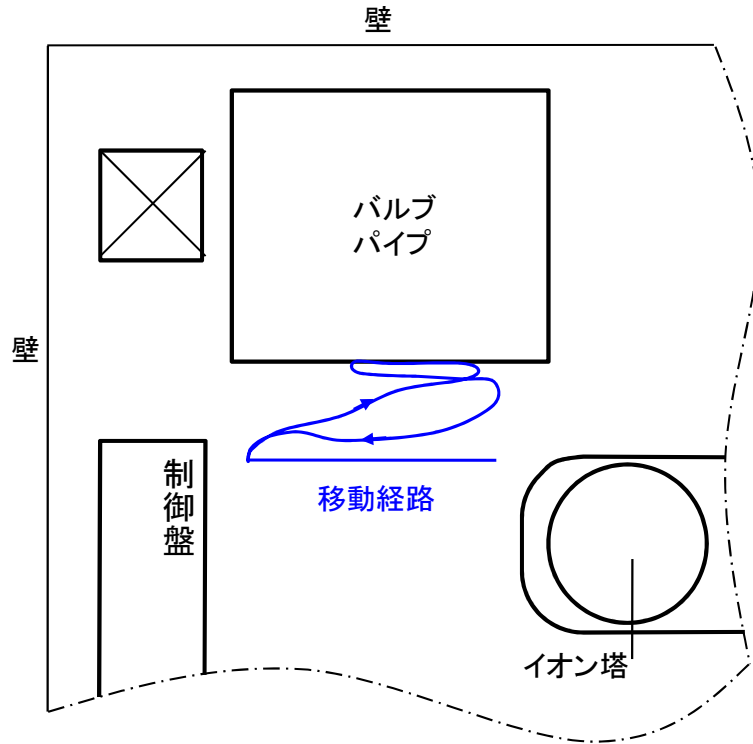


図 4.10: カメラの移動経路（変化がある環境）

4.2.5 変化認識・環境モデル更新処理に必要なパラメータの設定

本実験では、変化認識・環境モデル更新処理に必要なパラメータを設定する際、予備実験等で試行錯誤により調整された値を利用した。以下では、各パラメータの設定値を述べる。

3.3.2 項で述べた自然特徴点分布画像の生成に必要なパラメータの値を表 4.8 に示す。式 (3.1) と式 (3.2) の中の縮小係数 k を 0.5 に設定した。即ち、 $320 \times 240\text{px}$ の自然特徴点分布画像を使用した。そして、変化認識用データを画像へ再投影する際に、現在のカメラの位置・方向に近い位置・方向で撮影した画像から認識された自然特徴点のみ画像へ再投影するため、閾値 T_θ を 20° 、閾値 $T_{d2/d1}$ を 1.1 に設定した。

表 4.8: 自然特徴点分布画像の生成に必要なパラメータの設定値

パラメータ	k	T_θ	$T_{d2/d1}$
設定値	0.5	20°	1.1

3.3.3 項で述べた自然特徴点分布画像を用いた変化認識手法に必要なパラメータの値は表 4.9 に示すように設定した。本実験では、自然特徴点分布画像を 12×16 個の格子

に分割した。式 (3.3) で計算した自然特徴点分布の差異を用いて環境の変化の有無を判別する際に、比較基準としての閾値 T_{diff} を 55 に設定した。また、式 (3.4) 中の比較回数 n を 3 回に設定した。即ち、計算した自然特徴点分布の差異が 3 回連続で T_{diff} 以上になる場合のみ、環境が変化したと認識する。

表 4.9: 環境変化の認識に必要なパラメータの設定値

パラメータ	N_r	N_c	T_{diff}	n
設定値	12	16	55	3

3.5.2 項で述べた重複点の検索に必要なパラメータの値を表 4.10 に示すように設定した。ここで、ローカル環境モデル内の自然特徴点 P とグローバル環境モデル内の自然特徴点 Q の間の距離が 1cm 以下、かつこの 2 点を計測した際のカメラの方向ベクトルのなす角が 90° 以下になる場合、この自然特徴点ペアは重複点であると仮定する。また、重複点を中心とする半径 10cm の球内の他の重複点の数が 5 以上になる場合、その重複点を最終的な重複点とする。

表 4.10: 重複点の検索に必要なパラメータの設定値

パラメータ	T_d	T_φ	T	N
設定値	1cm	90°	10cm	5

3.5.3 項で述べたローカル環境モデルの修正方法に必要な信頼度を表 4.11 に示すように設定した。

表 4.11: 信頼度の設定値

パラメータ	r_1	r_2
設定値	0.1	0.9

3.5.4 項で述べた環境モデルの統合に必要なパラメータの値を表 4.12 に示す。ここで、立方体の辺の長さを 20cm に設定した。自然特徴点を更新する際に、立方体内の重複点の数が 5 以上になる場合、自然特徴点のデータは更新しない。立方体内の重複点の数が 5 以下、かつ自然特徴点の総数が 10 以上になる場合、グローバル環境モデル内の同じ領域内にある自然特徴点を削除すると同時に、立方体の中の自然特徴点をグローバル環境モデルに追加する。立方体内の重複点の数が 5 以下、かつ自然特徴点の総数が

10 以下になる場合、グローバル環境モデル内の同じ領域内にある自然特徴点を削除する。また、キーフレームから認識された自然特徴点が 15 点以上削除された場合、そのキーフレームを削除する。

表 4.12: 環境モデルの統合に必要なパラメータの設定値

パラメータ	a_{side}	T_{num}	T_{rep}	T_{total}	T_{del}
設定値	20cm	10	5	10	15

以上に述べたパラメータの値は、本手法を適用する環境の特性によっては異なった値が適する可能性がある。適用する環境の特性に応じて最適なパラメータを求める方法を開発する必要があるが、本研究では今後の課題とする。

4.3 実験結果と考察

4.2.4 項で述べた作業により取得したそれぞれの画像シーケンスの枚数を表 4.13 に示す。本実験では、画像シーケンスを用いて三次元復元を行う際に、類似画像を数多く使用することで処理時間が長くなることを避けるため、三次元復元に用いられる画像シーケンスの中から 10 枚ごとに 1 枚の画像を抜き出し、全 236 枚の画像を利用して環境の三次元復元を実行した。三次元復元の結果をもとにグローバル環境モデルを生成した後、取得した変化のない環境の画像シーケンスと変化のある環境の画像シーケンスを用いて、環境の変化認識した。また、トラッキングの効果を評価するため、同様に変化のない環境および変化のある環境の画像シーケンスを入力とし、変化認識・環境モデル更新機能が無効・有効に設定してそれぞれでトラッキングを実行した。以上の処理では、OpenCV を用いて画像の歪補正を実行した。以下では、変化認識の結果およびトラッキングの結果を示し、その結果を考察する。

表 4.13: 手法の有効性の評価実験に用いた画像シーケンス

利用場合	環境変化の有無	枚数
三次元復元	なし	2352
変化認識・トラッキング	なし	602
	あり	1656

4.3.1 変化認識の結果と考察

変化のない環境の画像シーケンスを実験用システムに入力し、式 (3.3) で計算した自然特徴点分布の差異を図 4.11 に示す。図の横軸は入力画像の番号であり、縦軸は分布の差異の値である。入力した画像シーケンスの一部を図 4.12 に示す。また、変化のある環境の画像シーケンスを入力として式 (3.3) で計算した自然特徴点分布の差異を図 4.13 に示す。入力画像の一部を図 4.14 に示す。

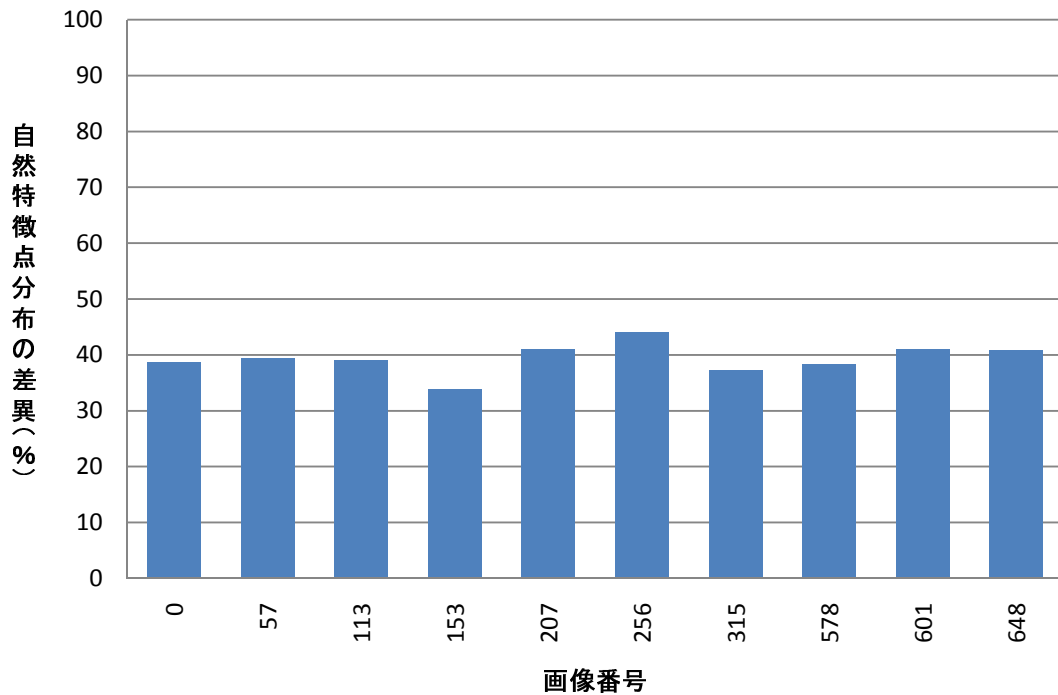


図 4.11: 環境変化がない場合の自然特徴点分布の差異

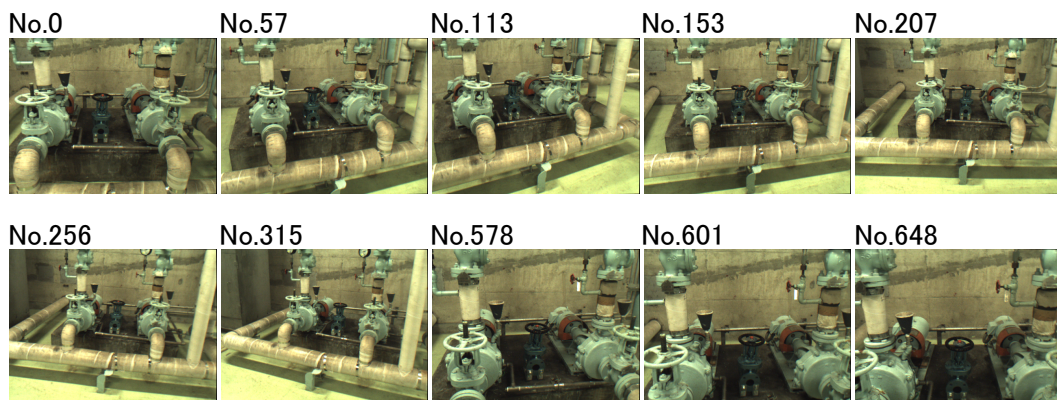


図 4.12: 環境変化がない場合の画像

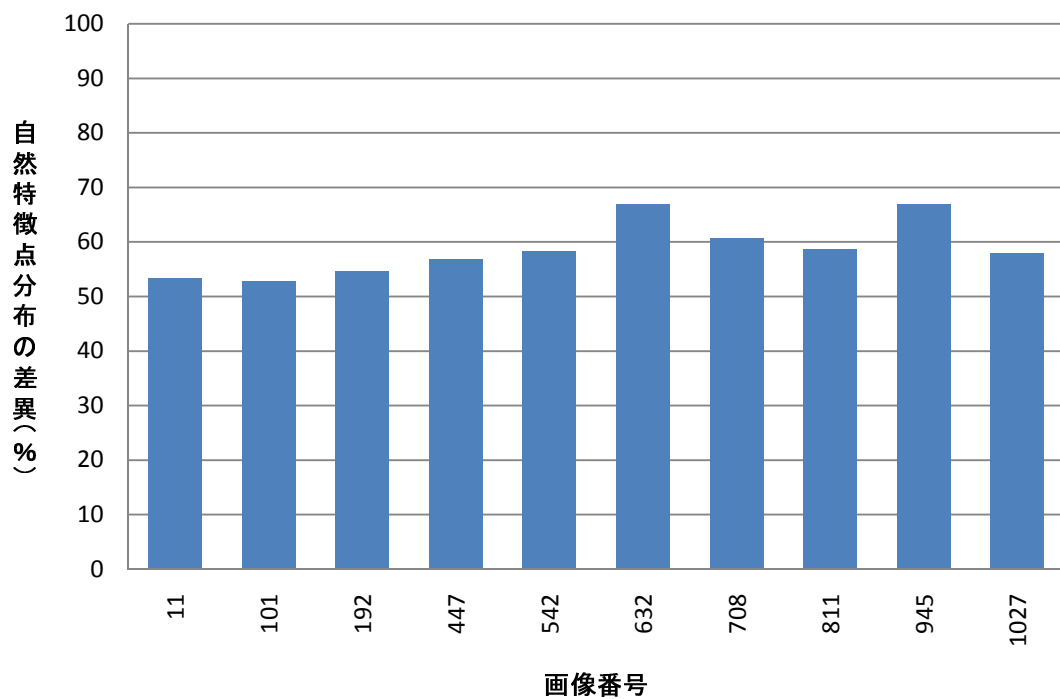


図 4.13: 環境変化がある場合の自然特徴点分布の差異

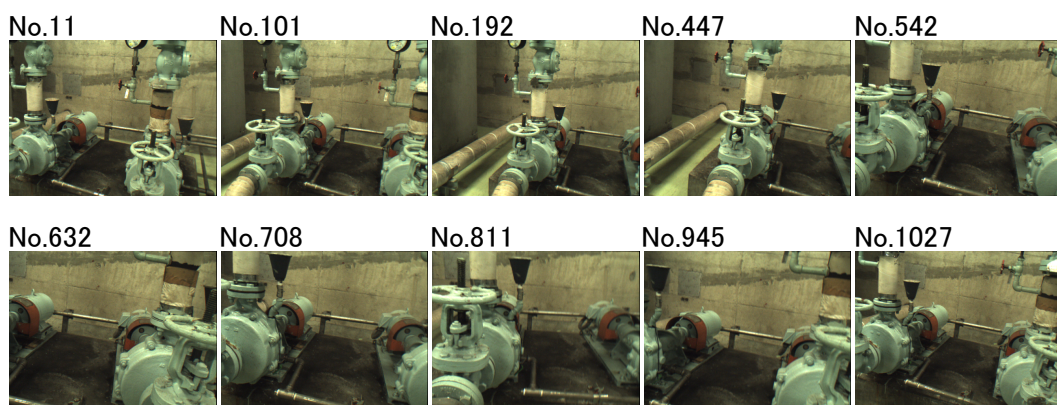


図 4.14: 環境変化がある場合の画像

図 4.11 に示すように、環境が変化していない場合、計算した自然特徴点分布の差異はおおよそ 35～45 の間の数値である。環境が変化した場合、計算した自然特徴点分布の差異は全て 50 以上となった。カメラが環境の変化した箇所に近づくほど、その撮影画像を用いて計算した自然特徴点分布の差異が大きくなった。以上の結果により、式 (3.4) 中の閾値 T_{diff} を適切に設定すれば、変化がある場合と変化がない場合の判別が可能であると言える。ただし、閾値 T_{diff} を小さ過ぎる値に設定した場合、変化していない環境を変化した環境と誤認識し、必要のないグローバル環境モデルの更新を頻繁に実行する可能性がある。逆に、閾値 T_{diff} を大き過ぎる値に設定した場合、カメラ画像の大部分に環境の変化した箇所が写っていても、環境が変化していないと認識し、環境モデルの更新処理を実行しない可能性がある。そのため、トラッキングを継続できない可能性が高い。本実験の場合には、変化していない環境で必要のない環境モデルの更新を避けると同時に、変化した環境でカメラのトラッキングを安定して実行するため、閾値 T_{diff} を 45～55 の間の数値に設定することが適切だと考えられる。

本実験を実施した際に、図 4.15 に示すような画像を用いて自然特徴点分布の差異を計算する場合、画像が暗いため、画像から自然特徴点を認識することが困難になった。特に、画像中のバルブが写っている領域から自然特徴点を殆ど認識できなかった。そのため、計算した自然特徴点分布の差異が大きくなり、この画像および前後フレームの画像が入力された際に、環境が変化していないにもかかわらず、環境が変化したと誤認識することがあった。この問題を解決するには、環境を撮影する際にカメラのシャッタースピードやゲインなどのパラメータを適切に設定する方法、および画像から自然特徴点を認識する際に画像処理で画像のコントラストや明るさを修正する方法が考えられる。図 4.16 に画像処理でコントラストを修正した画像から認識された自然特徴点を示す。図 4.17 に示すように、修正した画像を用いて計算した自然特徴点分布の差異がおおよそ 43 になり、図 4.11 に示した自然特徴点分布の差異の値に近くなったと言える。画像処理で照明の影響を低減できると考えられる。

4.3.2 トラッキングの結果と考察

ふげんで取得した変化のない環境の画像シーケンスを対象に変化認識・環境モデル更新機能を無効にした場合のトラッキングの結果を図 4.18 に示す。図の中にトラッキングにより得られたカメラの移動経路を表示している。ここで、トラッキング用データ内の自然特徴点と画像から認識した自然特徴点の対応付けを行った際に、トラッキング用データ内で、実際に対応点が見つかった自然特徴点の数と対応点が存在する可

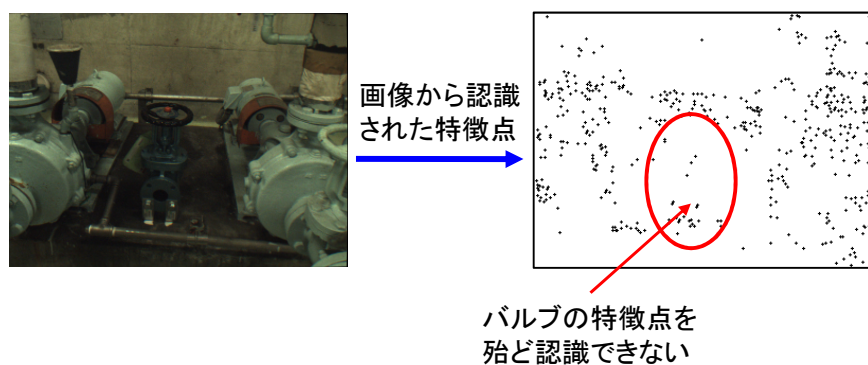


図 4.15: 照明の影響による環境変化認識の問題

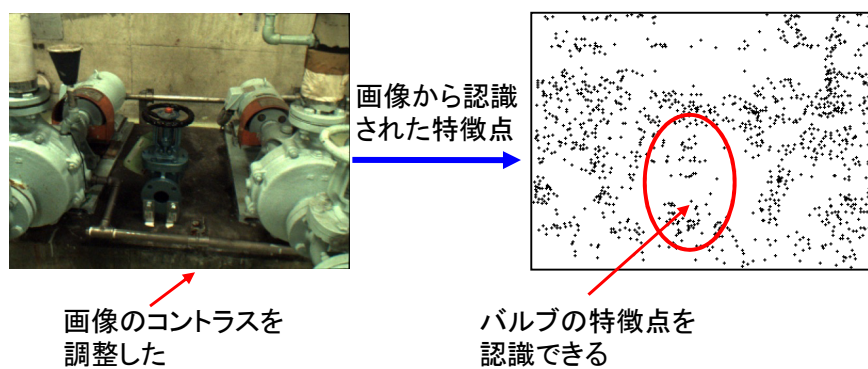


図 4.16: 照明の影響による問題の解決案

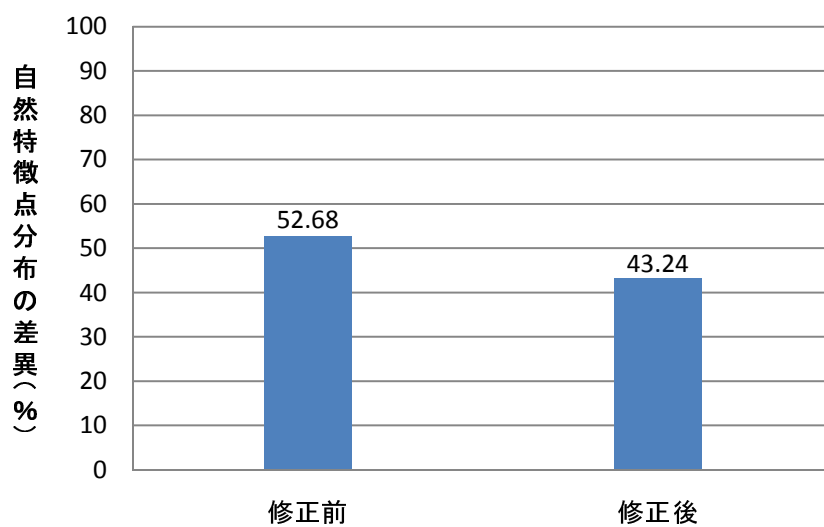


図 4.17: 修正した画像で計算した自然特徴点分布の差異

能性のある自然特徴点の数の比率を利用して、トラッキングの安定性を評価する^[25]。この比率が0.13以下である場合、トラッキングが不安定になると考え、推定したカメラの移動経路を黄色の線で表す（この0.13という比率は、PTAMでトラッキング結果が安定であるか不安定であるかを判別する際に用いている数値である）。トラッキングが安定して実行できた部分を青い線で表す。同じ画像シーケンスを対象に変化認識・環境モデル更新機能を有効にした場合のトラッキングの結果を図4.19に示す。変化のある環境を撮影して得た画像シーケンスを対象に変化認識・環境モデル更新機能を無効にした場合のトラッキングの結果を図4.20に示す。同じ画像シーケンスを対象に変化認識・環境モデル更新機能を有効にした場合のトラッキングの結果を図4.21に示す。

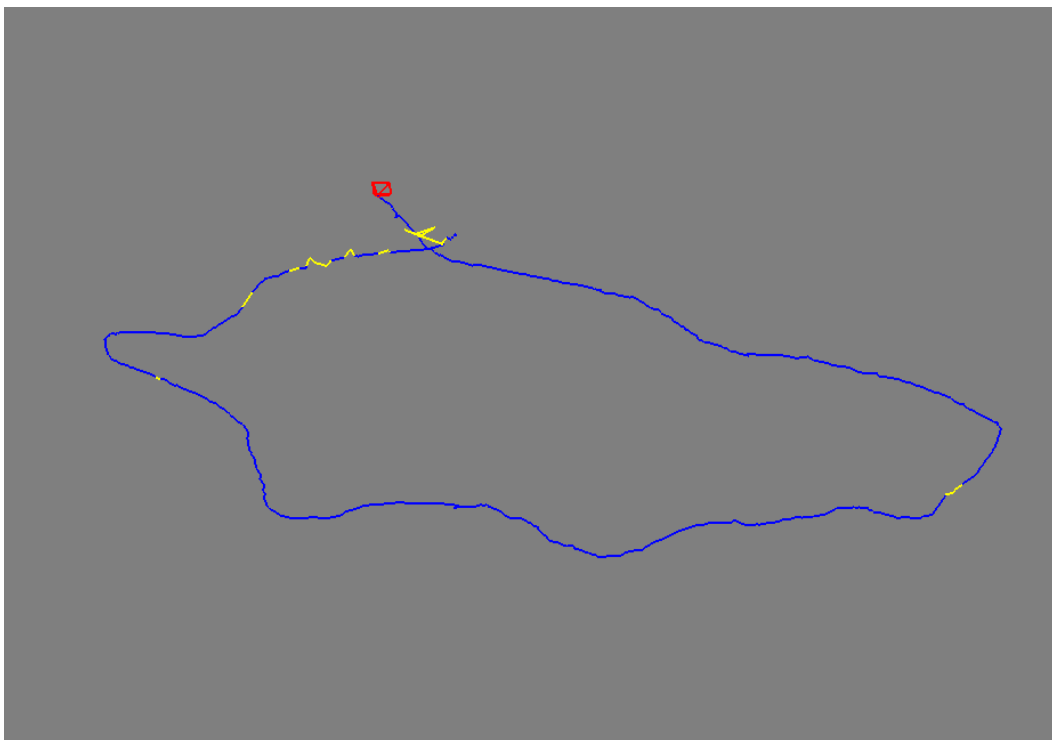


図 4.18: 環境変化がない場合のトラッキング結果 (認識・更新機能無効)

環境が変化していない場合、変化認識・環境モデル更新機能を無効に設定してトラッキングを実行した際、図4.18に示したように、ほぼ全ての箇所安定してトラッキングが実行できたと考えられる。変化認識・環境モデル更新機能を有効に設定した際、トラッキングを実行していた間に環境が変化すると認識しなかったため、グローバル環境モデルは更新されることなくトラッキングが実行された。変化認識・環境モデル更新機能を無効に設定した際と同様に、トラッキングが継続できなかった箇所はほぼないと考えられる。環境が変化した場合、変化認識・環境モデル更新機能を無効に設定

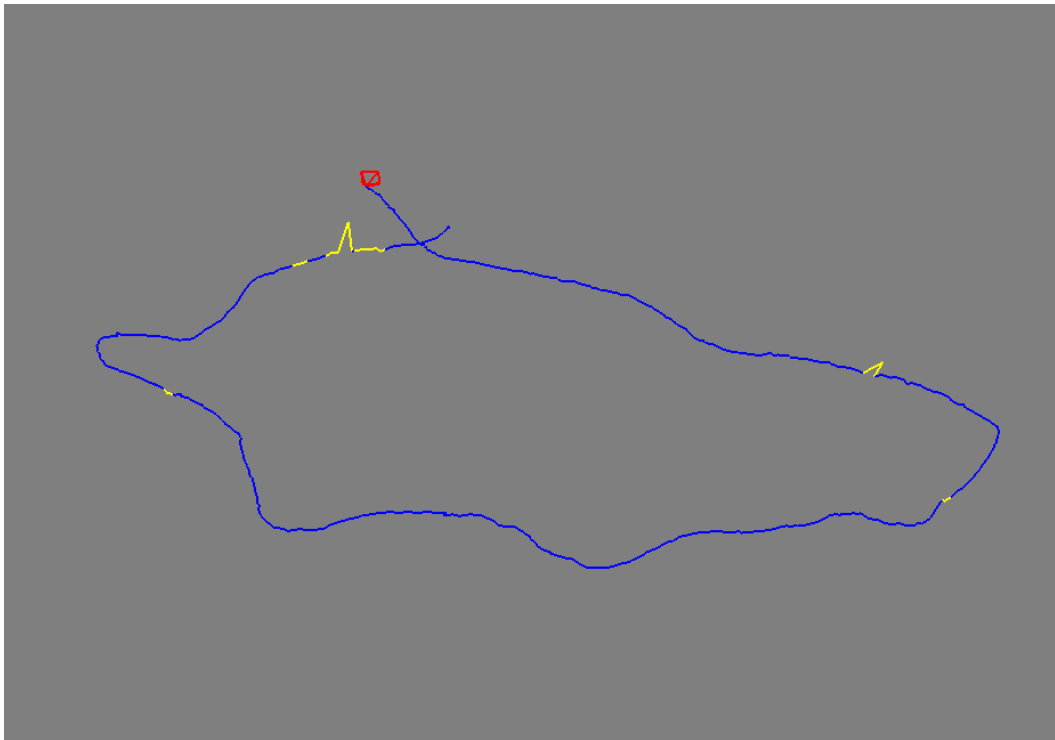


図 4.19: 環境変化がない場合のトラッキング結果 (認識・更新機能有効)

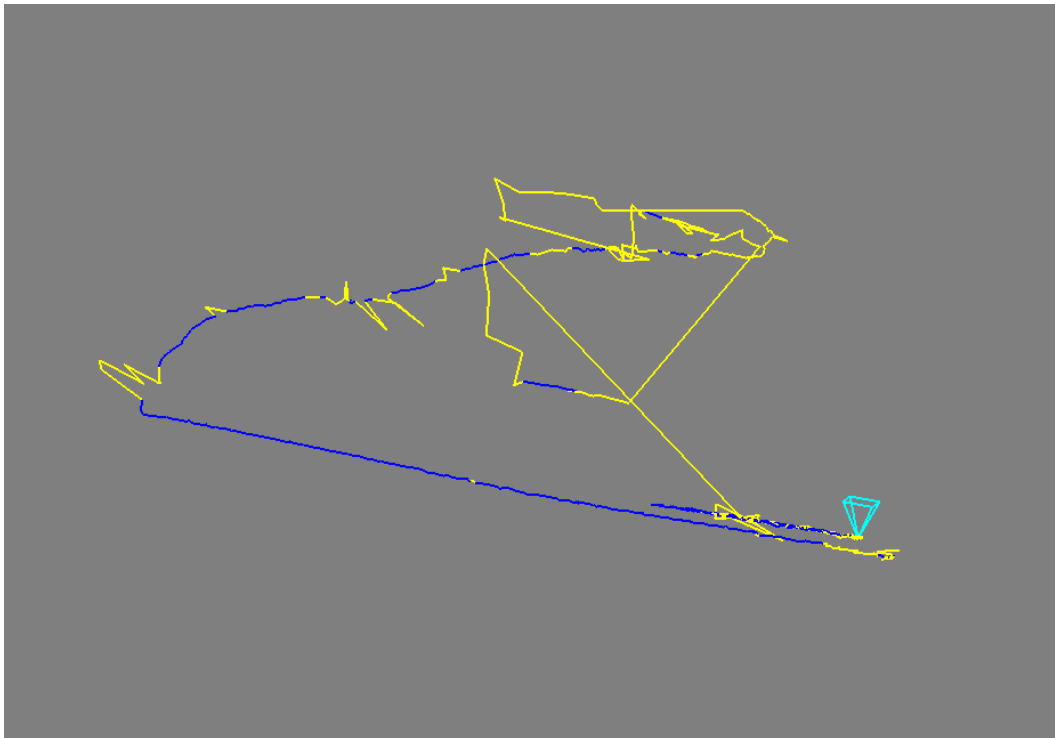
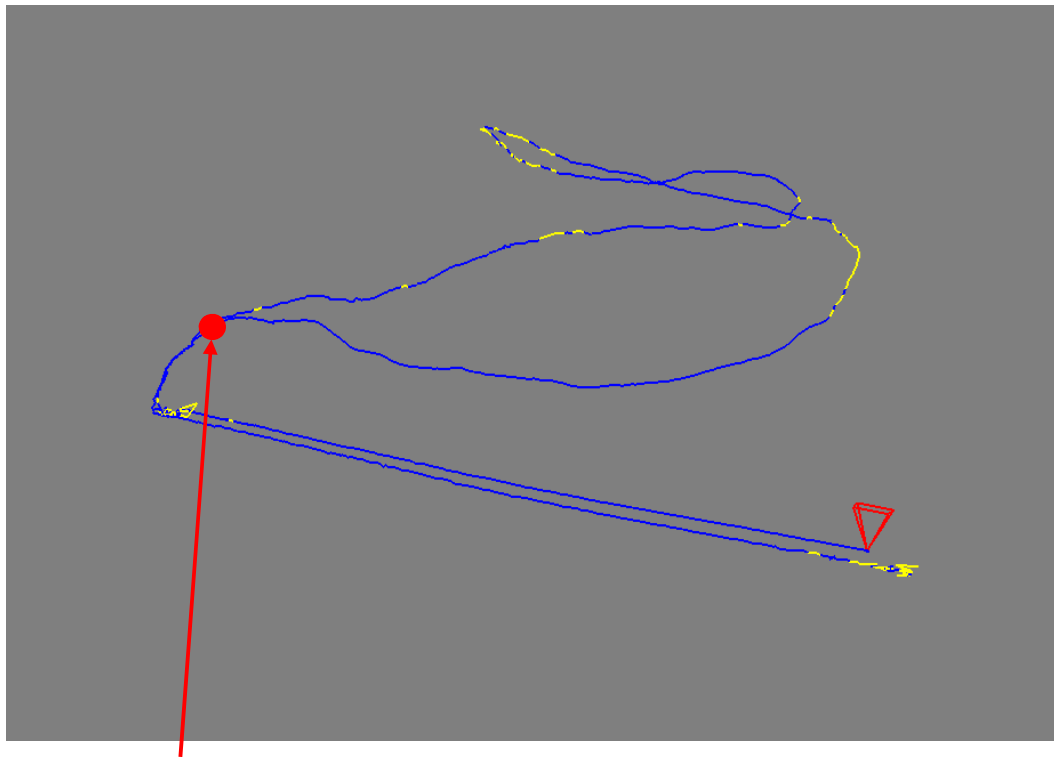


図 4.20: 環境変化がある場合のトラッキング結果 (認識・更新機能無効)



更新開始

図 4.21: 環境変化がある場合のトラッキング結果 (認識・更新機能有効)

してトラッキングを実行した際、図 4.18 に示したように、カメラを環境が変化した場所に近づけると、トラッキングが不安定になっている。一方、同じ画像シーケンスを対象として、変化認識・環境モデル更新機能を有効に設定してトラッキングを実行した場合、環境の変化に応じて新たに自然特徴点が計測され、グローバル環境モデルが更新されたため、図 4.21 に示したように、ほぼ全ての箇所でトラッキングを安定して実行できた。

以上に述べたように、変化する環境において、変化認識・環境モデル更新機能を利用してより安定してトラッキングが実行できることを示すことができた。

4.3.3 まとめ

本実験では、原子炉廃止措置研究開発センター内の純水装置室において提案手法を用いることにより環境変化の認識手法および環境モデルの更新手法を評価した。その結果、提案手法を用いることにより、解体作業で起こる環境変化を認識できることを確認した。しかし、グローバル環境モデルを作成するために環境を撮影した際の照明

条件と、環境の変化を認識するために環境を撮影した際の照明条件の違いにより環境変化の認識が不安定になる場合があることも確認された。そのため、画像のコントラストや明るさを適切に修正することで環境変化の認識の安定性をさらに向上させる必要がある。一方、トラッキングの実験結果により、環境が変化したと認識された場合、オンラインで生成したローカル環境モデルを用いてグローバル環境モデルを正しく更新でき、トラッキングを継続できることが確認できた。解体中の原子力発電プラントのような動的に変化する広い環境で、トラッキングを安定して継続するため、提案手法は有効な方法だと考えられる。

第 5 章 解体作業現場における提案手法とマーカによるトラッキング手法の比較実験

本章では、提案手法とマーカを用いたトラッキング手法の比較実験について述べる。

5.1 実験の目的

これまでの、ふげんにおける拡張現実感を用いた解体作業支援システムの評価実験の結果^[20-22]により、マーカを用いたトラッキング手法を利用した解体作業支援システムは十分な安定性があることが分かっているが、同時にマーカを用いたトラッキング手法は、その準備に手間がかかると同時に作業の邪魔になる場合があり、マーカを用いないトラッキング手法を用いた解体作業支援システムを開発することが望ましいことが分かっている。そこで、本実験では、解体作業現場において提案手法とマーカによるトラッキング手法を比較し、実用化するにあたり重要な要素である安定性を定量的に評価することで、解体作業現場で提案手法が実用可能かどうかを確かめる。

5.2 実験の方法

本節では、実験の手順、実験に用いた機材と実験用システム、実験環境、実験環境の画像の取得および変化認識処理と環境モデル更新処理に必要なパラメータの設定について述べる。

5.2.1 実験の手順

本実験では、図 5.1 に示す手順に従い、マーカを用いたトラッキング手法と提案手法を比較する。提案手法でのトラッキング結果を取得するにあたり、まず変化させる前の実験環境の画像を取得し、3.2 節で述べた手法を用いて、グローバル環境モデルを生成する。その後、グローバル環境モデルを用いて提案手法によるトラッキングを行い、推定したカメラの位置と方向を結果 C1a として保存する。その後、環境中の機器を移動させることにより環境を変化させる。その後、提案手法によるトラッキングを実行

し、推定したカメラの位置と方向を結果 C1b として保存する。提案手法によるトラッキングを実行した後、同じ実験環境に青山らが開発した拡張現実感を用いた仮置・運搬作業シミュレーションシステムでも用いられている遠近両用マーカ^[19]を貼り付け、移動させた機器をもとに戻し、変化がない環境としてマーカを用いたトラッキングを実施する。トラッキングの結果を結果 C2a として保存する。そして、提案手法の場合と同様に環境にある機器を移動させ、変化がある環境としてマーカを用いたトラッキングを行い、その結果を結果 C2b として保存する。また、マーカを用いたトラッキング手法の業界標準である ARToolKitPlus^[31]によるトラッキングも変化していない環境と変化した環境で実行し、トラッキングの結果を結果 C3a と結果 C3b として保存する。取得したトラッキング結果をもとに、提案手法とマーカを用いたトラッキング手法の安定性を比較することで、提案手法の実用性を評価する。

5.2.2 実験の機材と実験用システム

本実験を実施するにあたり、パソコン、カメラ、環境変化を模擬する為のバルブは、第4章の評価実験で用いたものと同じものを使用した。トラッキングの安定性を評価するにあたり、トラッキングを実行しながらカメラを移動させ、その時のトラッキングの結果とカメラの真の位置・方向を比較することが望ましいが、その為にはカメラの位置・方向を正確かつ高速に計測できるロボットアームを用いるなど、特殊な機材が必要である。しかし、評価を実施したプラント内には、そのような特殊な機材を持ち込むことができない為、今回は、直線であることが分かっているレール上でカメラを移動させ、その時のトラッキング結果が直線からどの程度離れているかを評価することにより、トラッキングの安定性を評価する。遠近両用マーカと ARToolKitPlus マーカとしては、それぞれ、図 5.2、図 5.3 に示す直径 200mm の遠近両用マーカ 2 枚と幅 200mm の ARtoolKitPlus の方形マーカ 2 枚を用いた。それぞれのマーカは紙と発泡パネルで作成した。本実験で使用する ARToolKitPlus のトラッキング処理プログラムのバージョンは 2.1.1 である。

5.2.3 実験の環境

本実験は第4章で述べた評価実験と同じ環境で実施した。マーカを用いたトラッキングを実行する際に、マーカを図 5.4 および図 5.5 に示すように設置した。2 枚のマーカの間の距離は 80cm である。

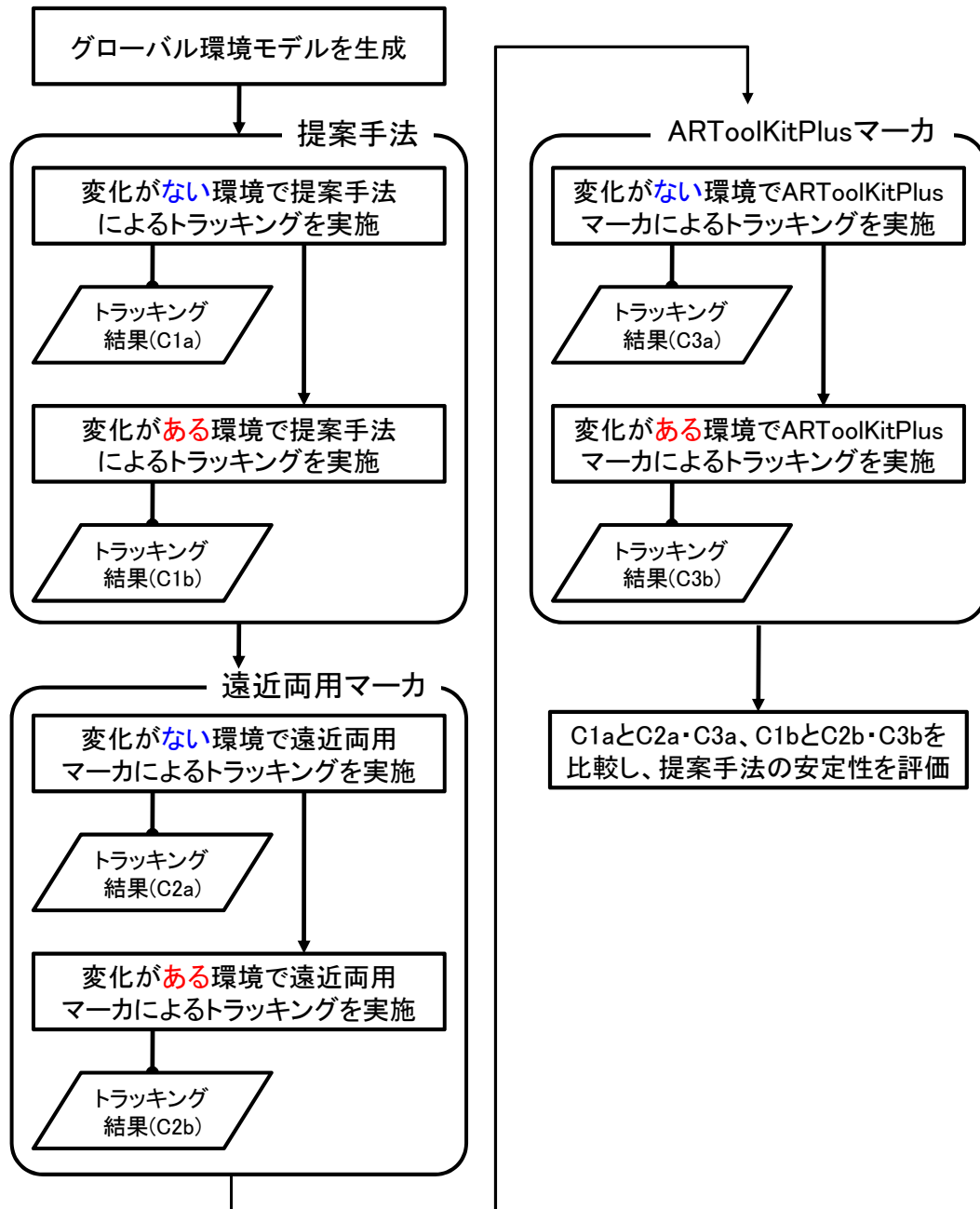


図 5.1: 比較実験の手順

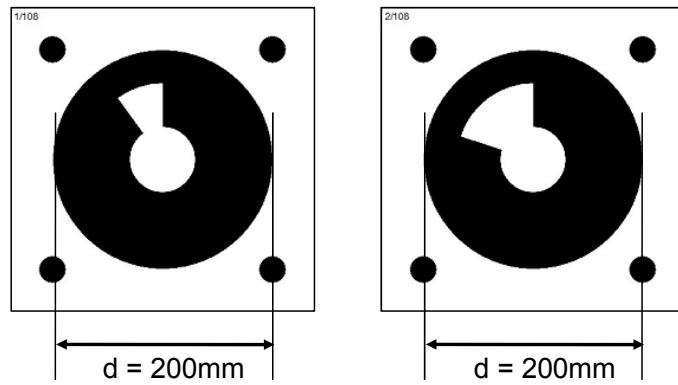


図 5.2: 実験用遠近両用マーカ

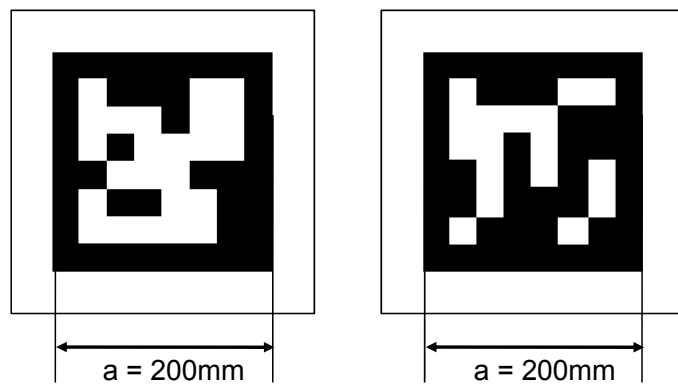


図 5.3: 実験用 ARToolKitPlus マーカ



図 5.4: 実験用遠近両用マーカの設置



図 5.5: 実験用 ARToolKitPlus マーカの設置

5.2.4 実験環境の画像の取得

本実験では、第4章で述べた実験と同様にカメラで撮影（30fps）した実験環境の画像を一旦、パソコンのハードディスクに保存し（以下、ハードディスクに保存した画像を画像シーケンスと呼ぶ）、後にそれらを読みだして評価に必要な処理を実行した。実験環境の画像を取得する手順を以下に示す。

- (1) 実験用バルブを実験環境に置き、環境の三次元復元に用いる実験環境の画像をカメラで取得する。
- (2) 図5.6に示すように実験環境の中にレールを置き、図5.6に示す赤い点にカメラを設置する。
- (3) カメラが図5.6トラッキング結果を評価する際に、どの範囲の画像がレール上で撮影された画像であるかを判別可能にするために、カメラでの撮影を開始した後、まず撮影開始地点でカメラを約5秒間静止させる。その後、レールに従ってカメラを右から左に移動させる。カメラがレールの左端に達した際に、同様にカメラをそこで約5秒間静止させる。その後、レールからカメラを外す。
- (4) 図5.7に示すように空中の経路に沿ってカメラを移動させ、その後、レールの左端に戻す。
- (5) レールの左端でカメラを約5秒間静止させた後、カメラを撮影開始地点に移動させる。カメラが撮影開始地点に達した後、約5秒間静止させ、撮影を終了する。
- (6) 環境の変化を模擬するために、バルブをカメラに写らない箇所に移動させ、(3)～(5)の作業を実行する。
- (7) 遠近両用マーカを環境に設置した後、バルブをもとの場所に戻し、(3)～(6)の作業を実行する。
- (8) ARToolKitPlus マーカを環境に設置した後、バルブをもとに戻し、(3)～(6)の作業を実行する。

本実験では、トラッキングの安定性を調べるため、カメラをレールに沿って移動させた。また、データ更新によりトラッキングの安定性に影響を与えるかどうかを調べるため、途中、カメラをレールから外し、バルブに近づけた。上述の作業を実行した際

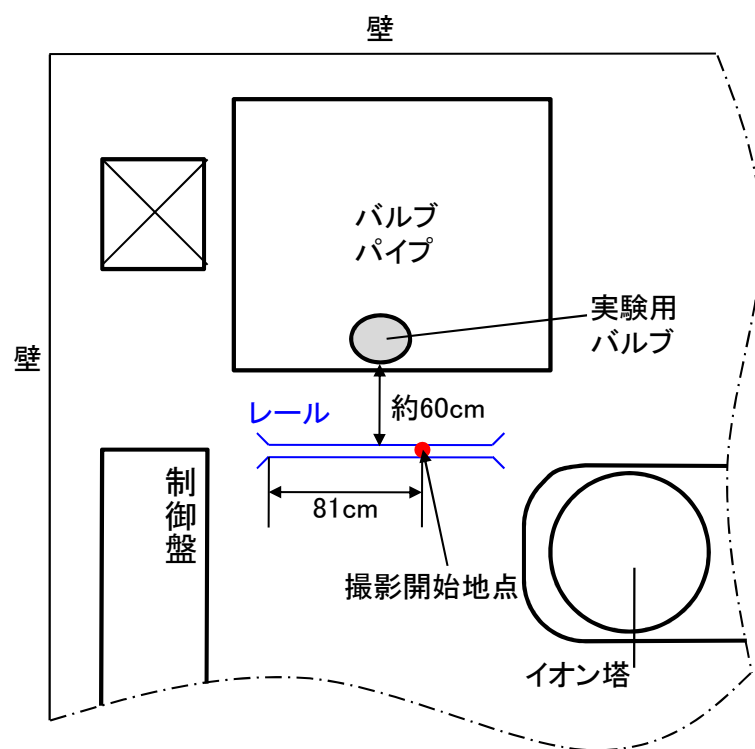


図 5.6: レールの設置

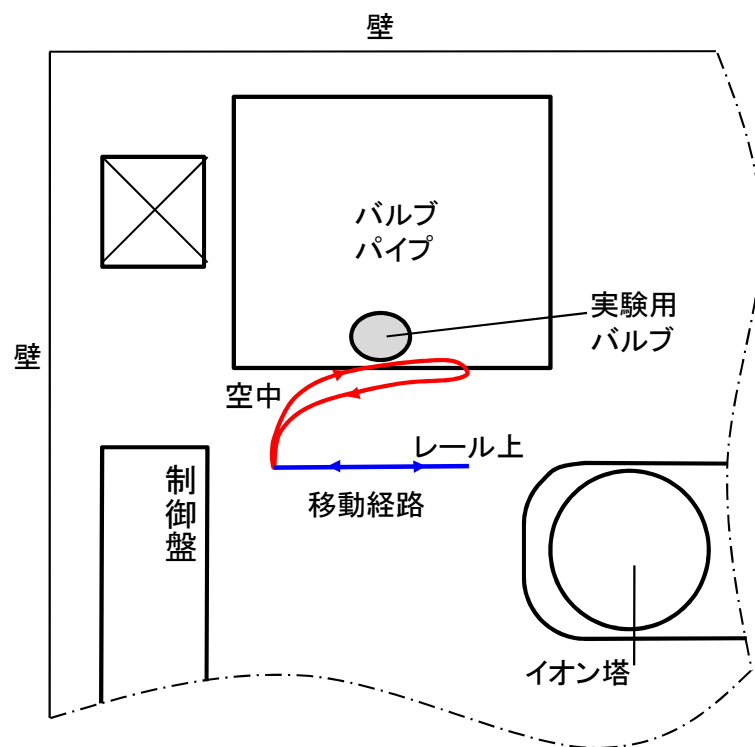


図 5.7: カメラの移動経路

に、カメラを手にとって移動させる部分では、遠近両用マーカ、ARToolKitPlus マーカ、提案手法のそれぞれの場合で、可能な限り同じになるように移動させたが、全く同じではない点に注意が必要である。

5.2.5 変化認識・環境モデル更新処理に必要なパラメータの設定

本実験では、変化認識処理および環境モデル更新処理に必要なパラメータを第4章で述べた実験と同様に設定した。

5.3 実験結果と考察

5.2.4 項で述べた作業により取得したそれぞれの画像シーケンスの枚数を表5.1に示す。ここで、第4章で述べた実験と同様に、環境の三次元復元を行う際に、三次元復元に用いられる画像シーケンスの中から10枚ごとに1枚の画像を抜き出し、全133枚の画像を利用して環境の三次元復元を実行した。三次元復元の結果をもとにグローバル環境モデルを生成した後、各手法によるトラッキングを実行した。以上の処理では、OpenCVを用いて画像の歪補正を実行した。

表 5.1: 比較実験に用いた画像シーケンス

利用場合	環境変化の有無	枚数
三次元復元	なし	1322
提案手法によるトラッキング	なし	2293
	あり	2268
遠近両用マーカによるトラッキング	なし	2401
	あり	2380
ARToolKitPlus マーカによるトラッキング	なし	2273
	あり	2413

図5.8および図5.9に環境に変化がない場合と変化がある場合に提案手法を用いてトラッキングを実行した結果を示す。図5.10および図5.11に環境に変化がない場合と変化がある場合に遠近両用マーカを用いてトラッキングを実行した結果を示す。また、図5.12および図5.13に環境に変化がない場合と変化がある場合にARToolKitPlus マーカを用いてトラッキングを実行した結果を示す。また、各手法によるトラッキングの安

定性を比較するために、カメラがレール上を移動している間に推定したカメラの三次元位置を TLS (Total Least Squares) 法で直線にフィッティングし、各三次元位置と得られた直線の距離を各画像毎に計算した。その結果を図 5.14～5.19 に示す。図の中の、横軸は入力した画像の番号であり、縦軸は推定したカメラの位置と直線の間の距離である。

図 5.8 および図 5.9 に示すように、提案手法を用いた場合、変化していない環境と変化した環境の両方でトラッキングを安定して継続できたと考えられる。遠近両用マーカおよび ARToolKitPlus マーカに基づく手法を利用した場合も、画像からマーカを認識できた場合は、トラッキングを継続できた。ただし、カメラとマーカの間の距離が約 30cm 程度に近づいた際には、マーカの一部がカメラの視野の外に出てしまったため、マーカが正しく認識できず、トラッキングができなかった画像も存在した。一方、図 5.8 および図 5.9 に示すように、提案手法によるトラッキングで推定したカメラの三次元位置とフィッティングした直線の間の距離は、遠近両用マーカ、ARToolKitPlus マーカを用いたトラッキングよりも短く、より安定したトラッキングが実行できたと言える。この様にマーカを用いたトラッキング手法の安定性が低かった原因としては、実験環境に設置したマーカの枚数が 2 枚と少なかったこと、トラッキングを実行する際にマーカをほぼ正面から撮影したことなどが考えられる。

以上に述べたように、提案手法はマーカを用いた手法と比べ、より安定したトラッキングが実現可能であり、解体作業現場のような環境での使用により適していると言える。ただし、本実験では解体作業現場の 1 箇所のみで実施しており、網羅性が十分であるとは言い難く、提案手法を十分評価したとは言えない。今後、多数の機器が同時に移動される場所や、今回の実験環境より広い場所などで比較実験を実施する必要がある。



図 5.8: 環境変化がない場合の提案手法によるトラッキング結果

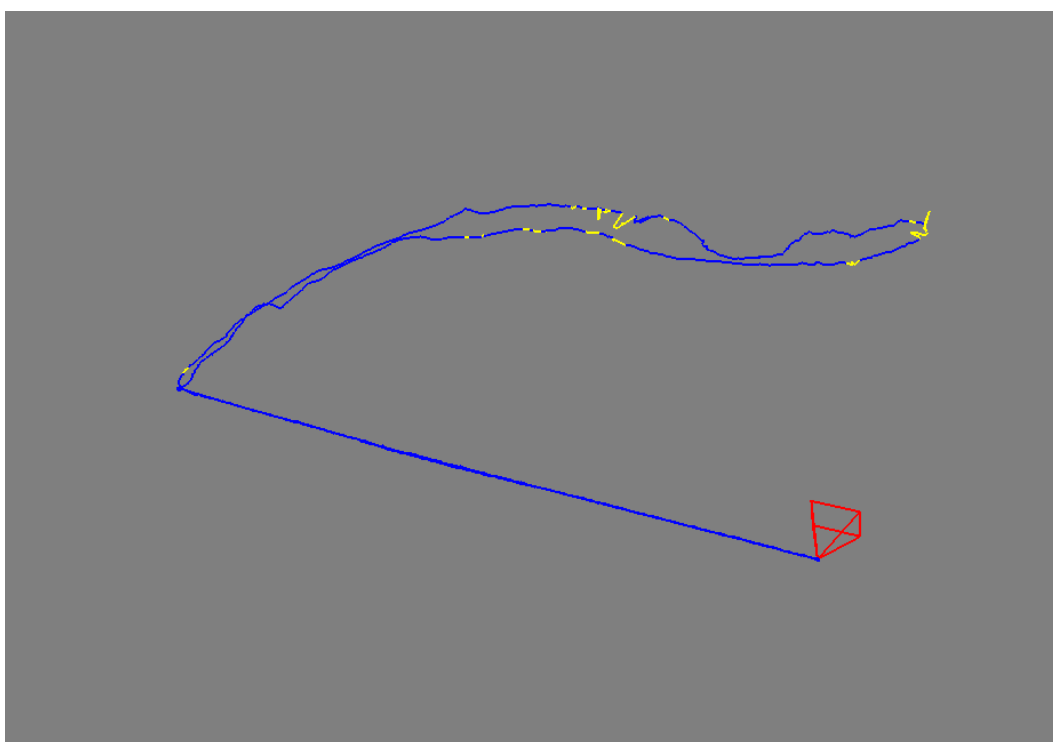


図 5.9: 環境変化がある場合の提案手法によるトラッキング結果

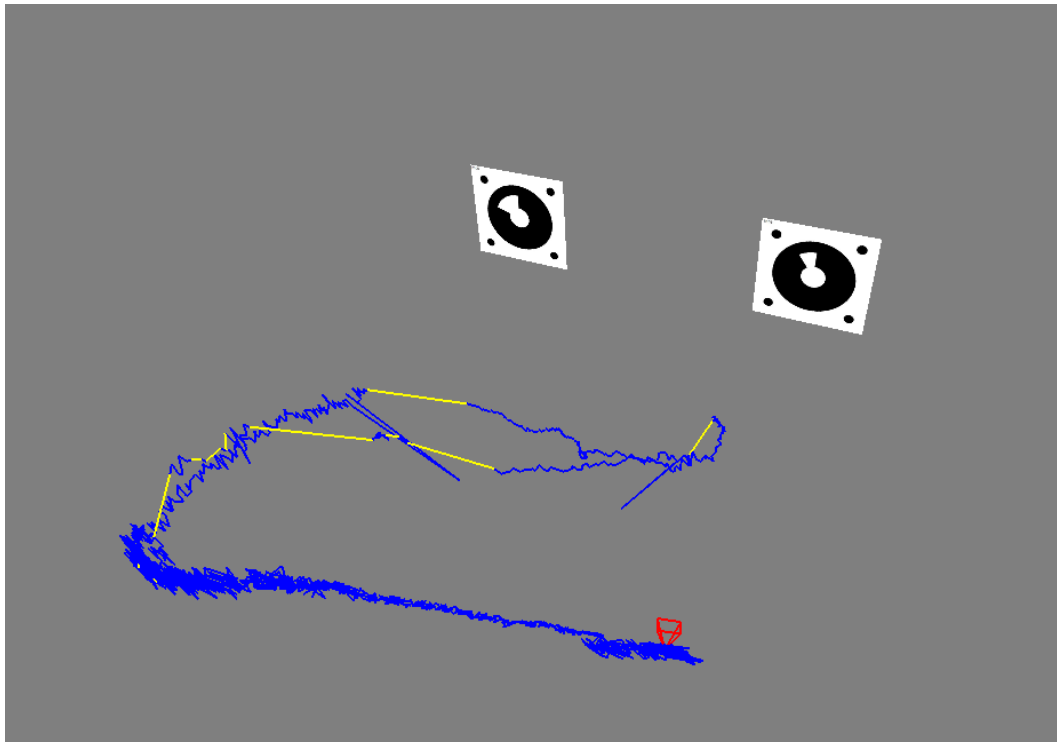


図 5.10: 環境変化がない場合の円形マーカによるトラッキング結果

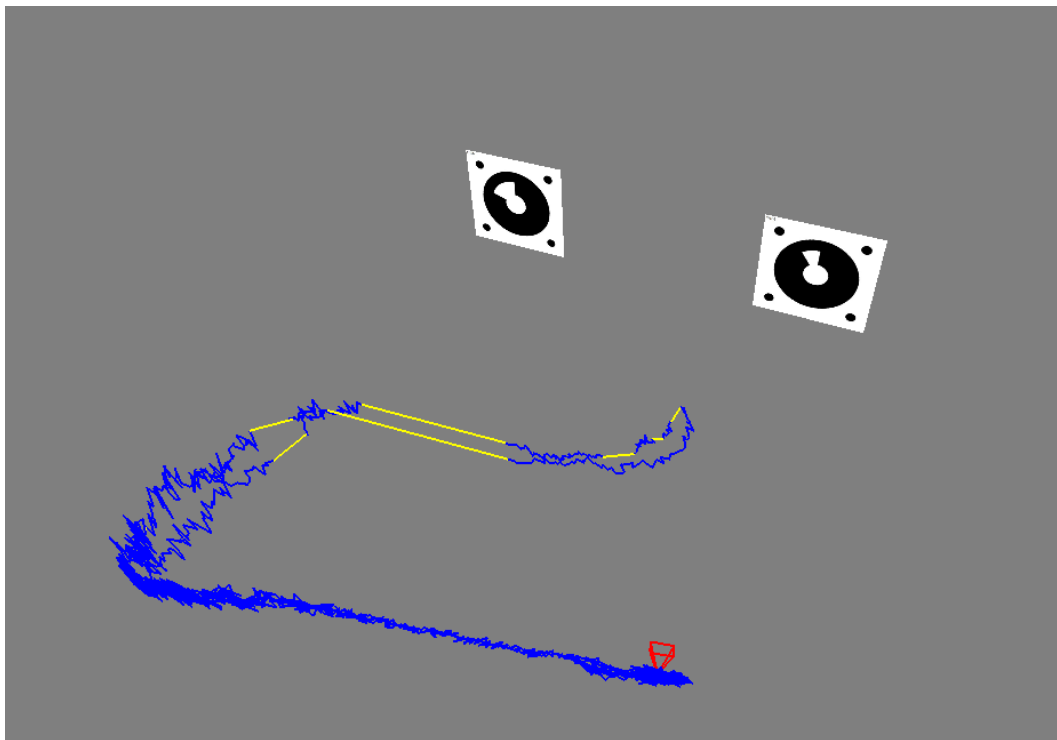


図 5.11: 環境変化がある場合の円形マーカによるトラッキング結果

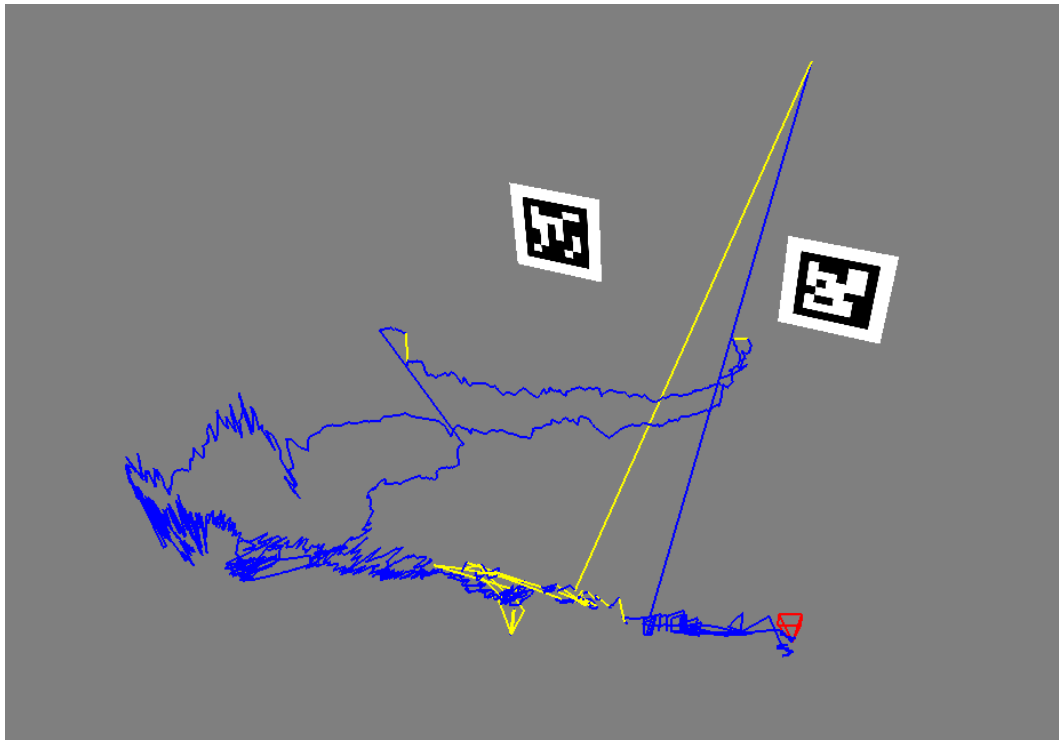


図 5.12: 環境変化がない場合の ARToolKitPlus マーカによるトラッキング結果

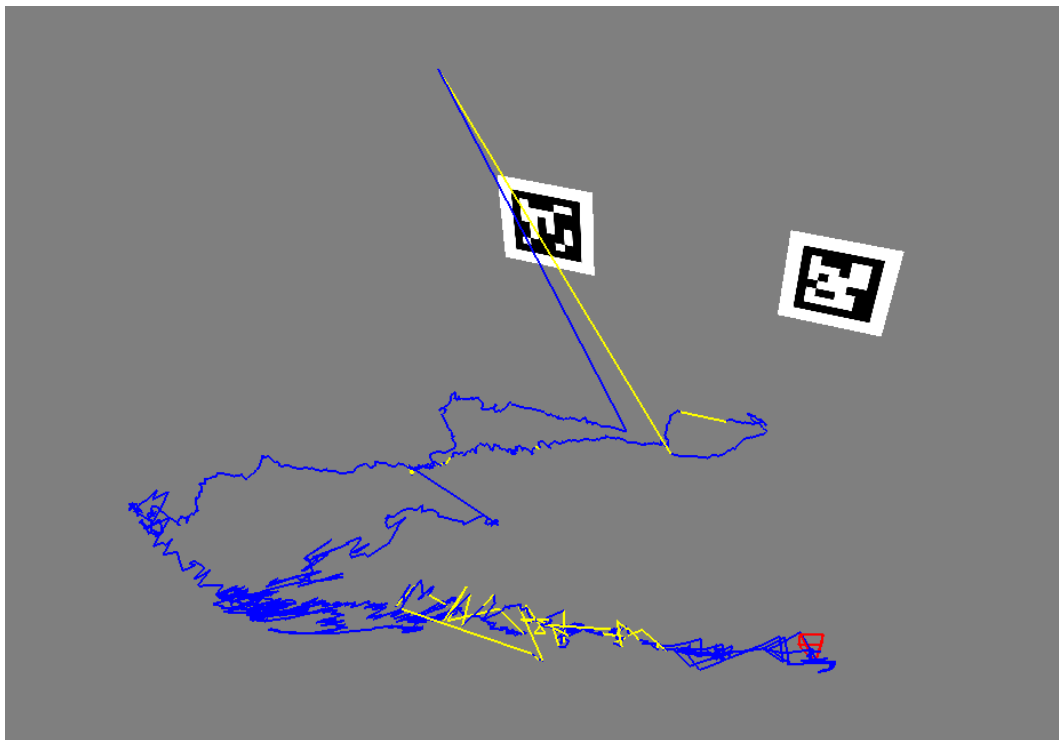


図 5.13: 環境変化がある場合の ARToolKitPlus マーカによるトラッキング結果

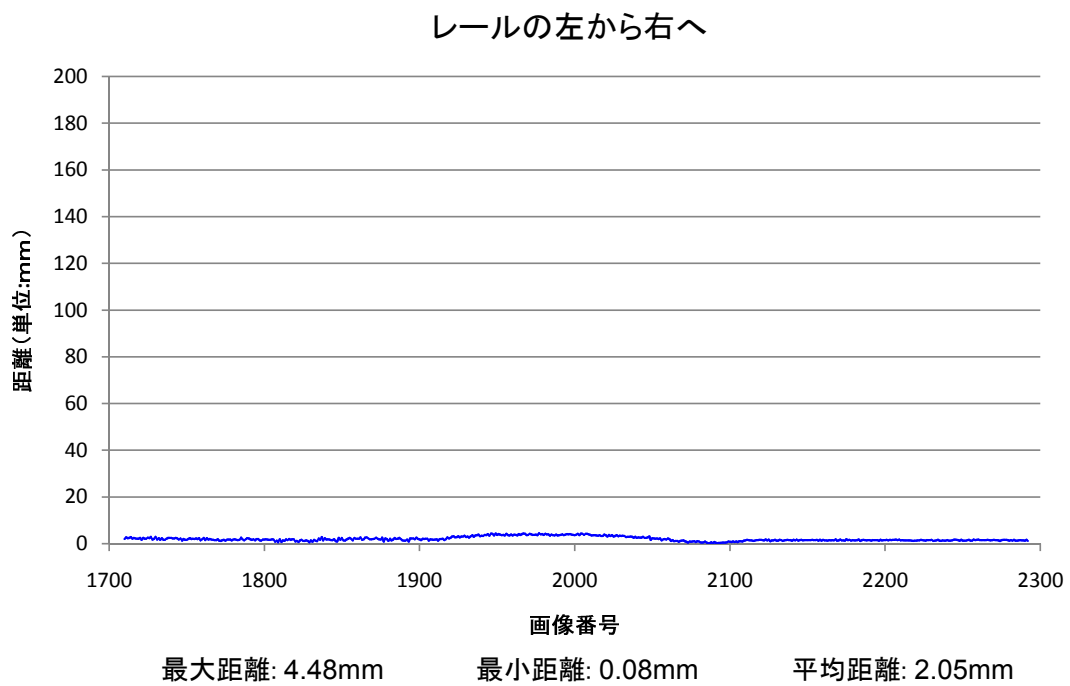
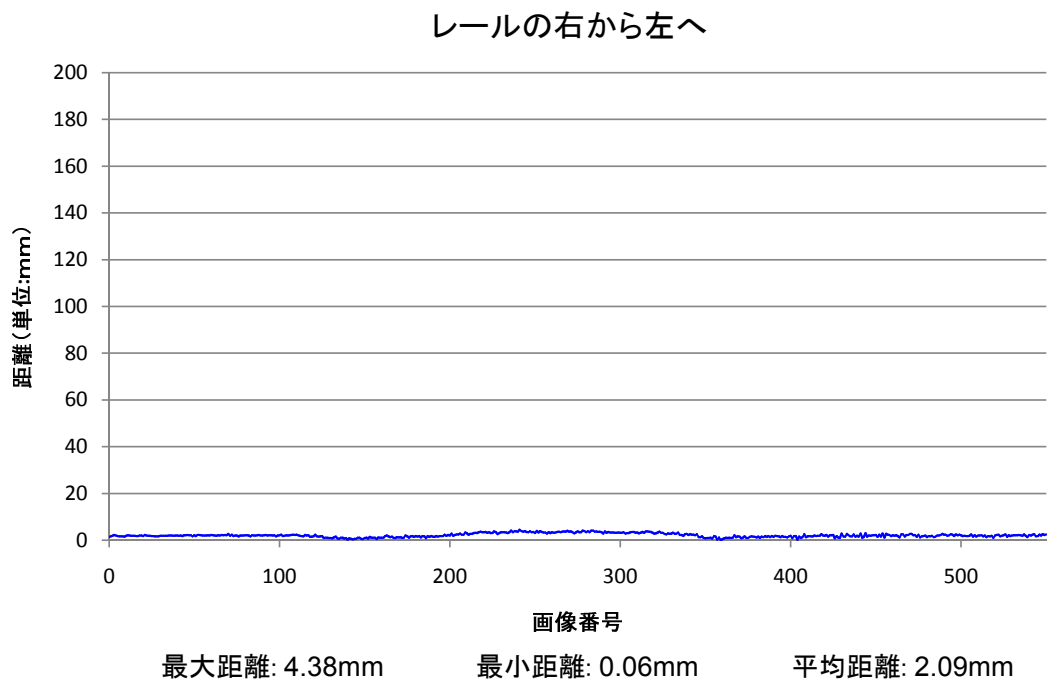


図 5.14: 環境変化がない場合の提案手法によるトラッキング誤差

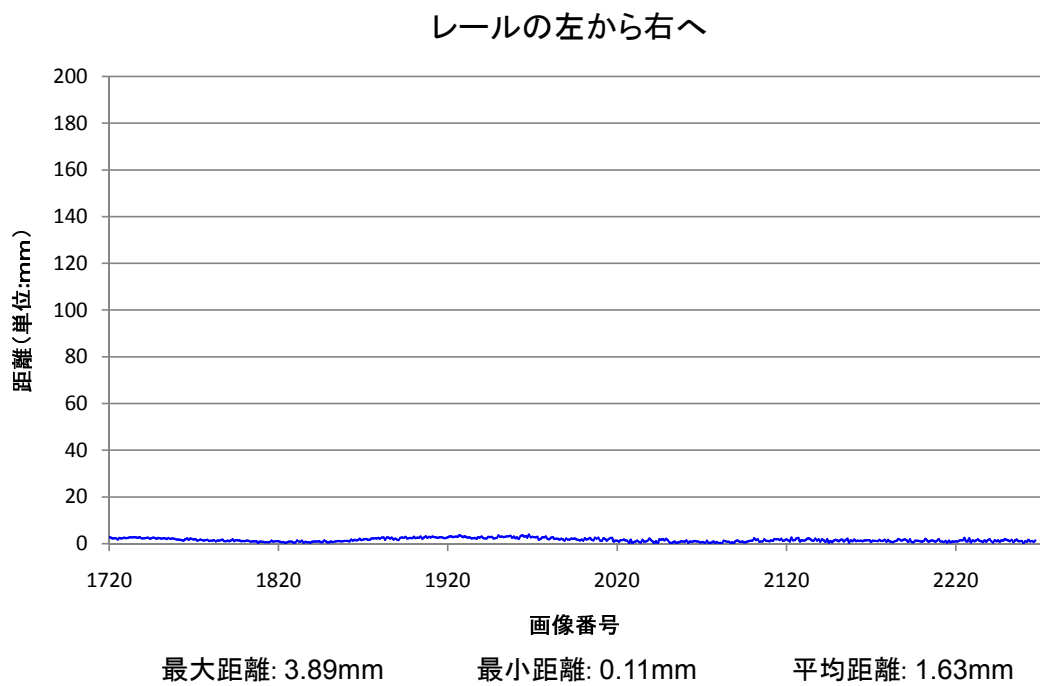
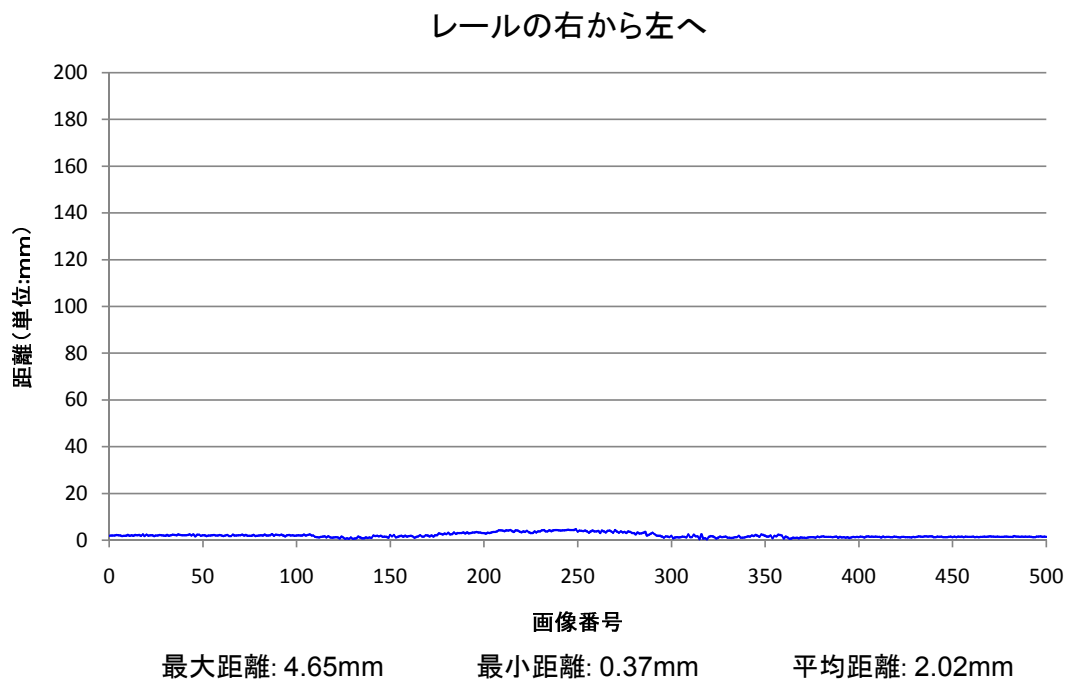


図 5.15: 環境変化がある場合の提案手法によるトラッキング誤差

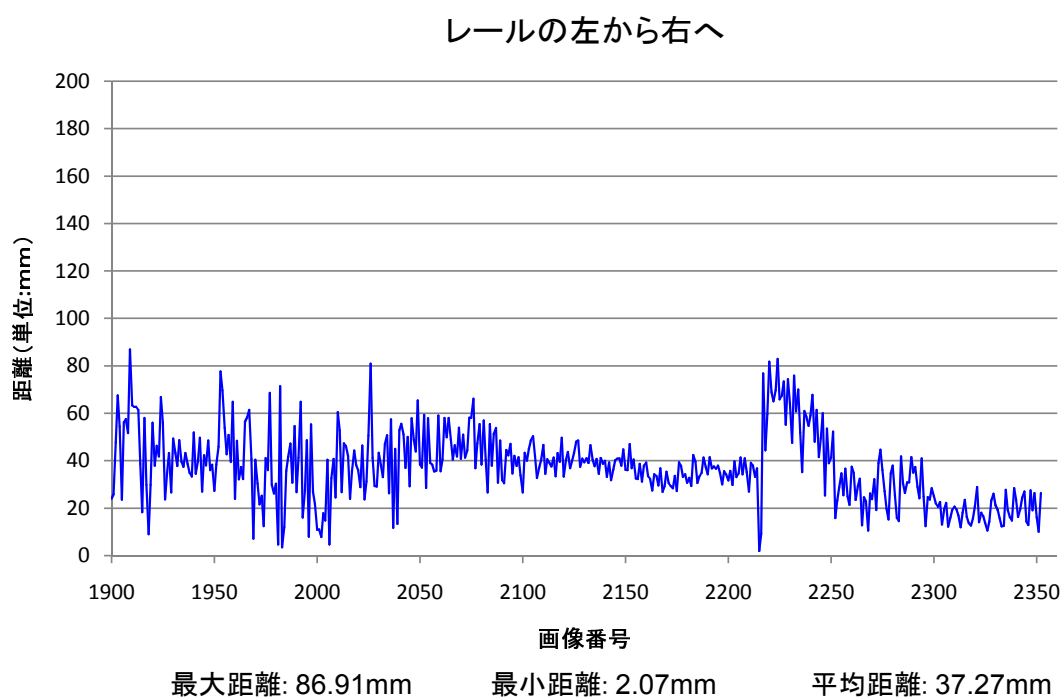
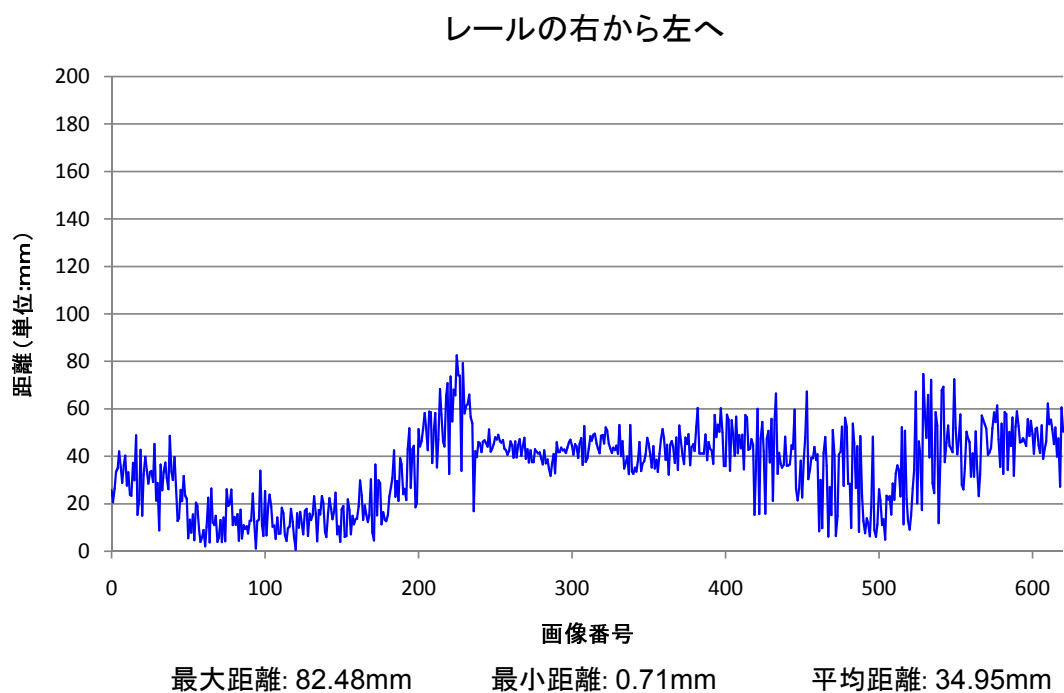


図 5.16: 環境変化がない場合の円形マーカによるトラッキング誤差

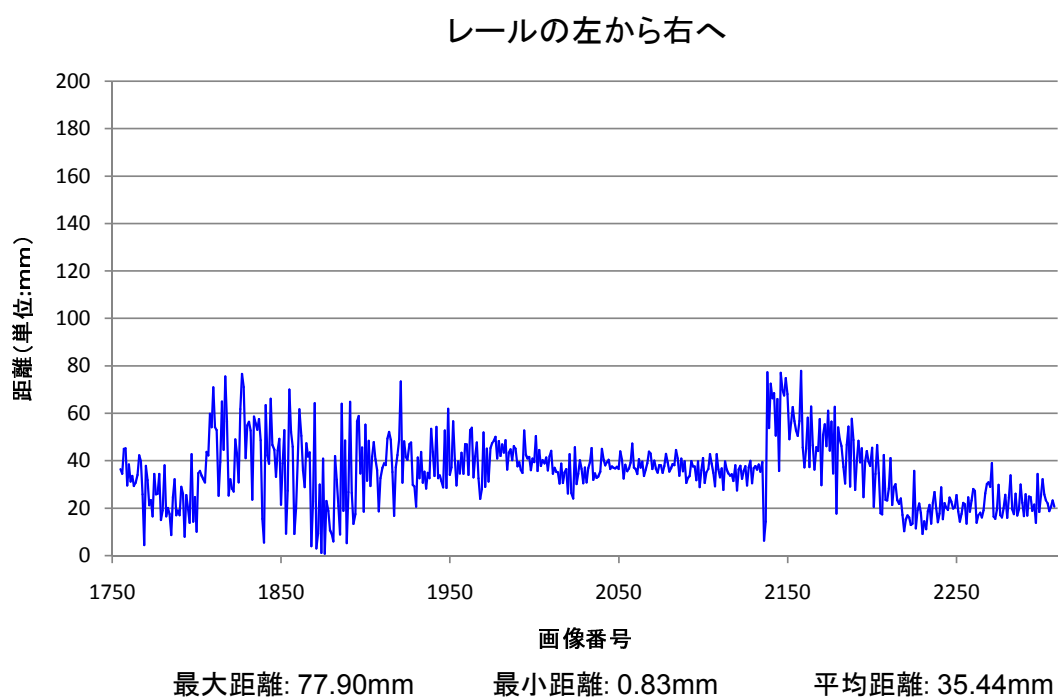
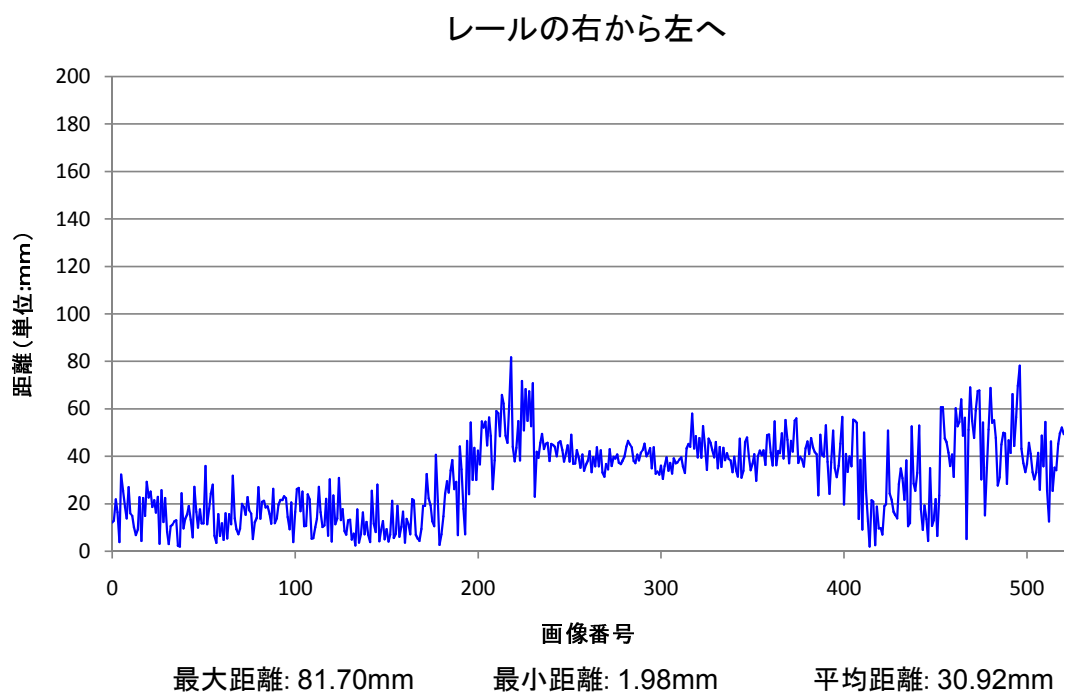


図 5.17: 環境変化がある場合の円形マーカによるトラッキング誤差

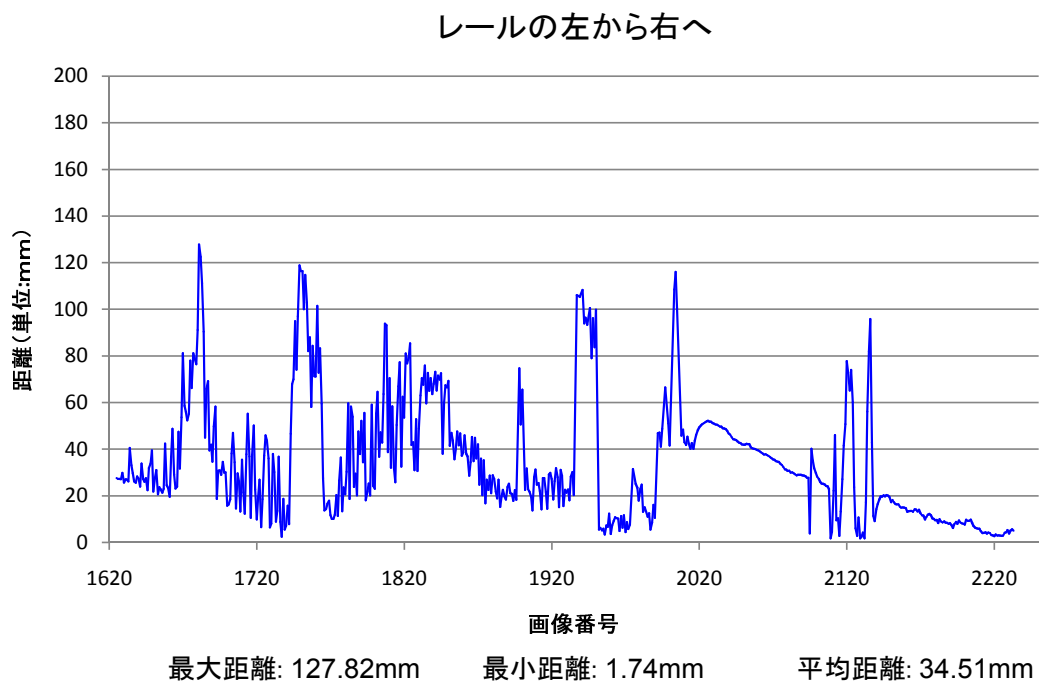
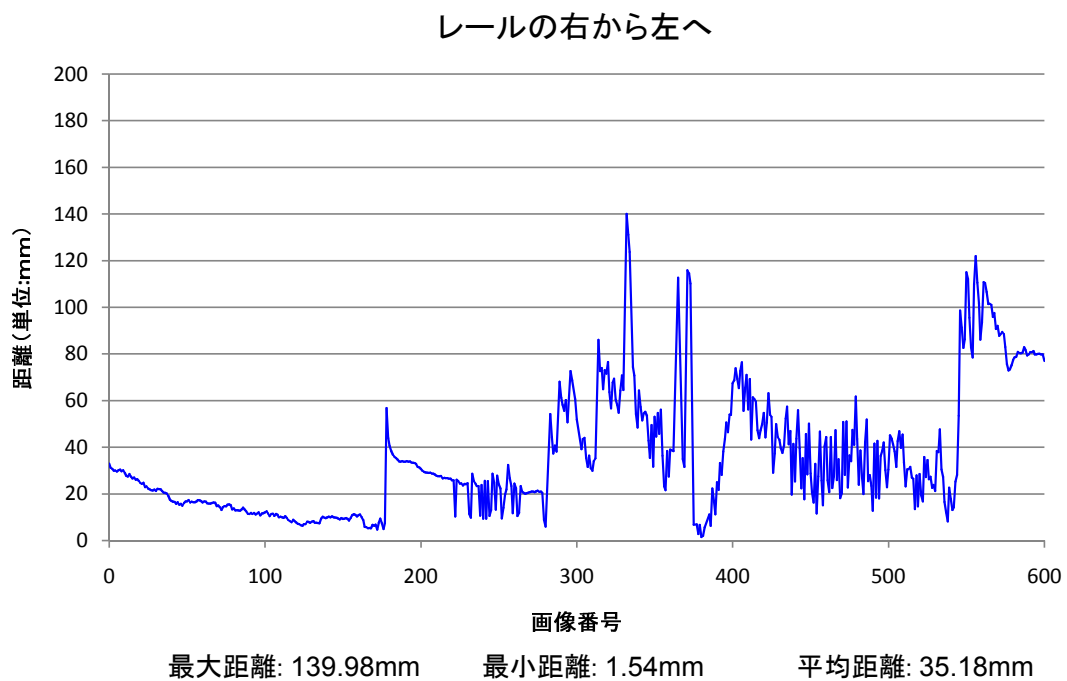


図 5.18: 環境変化がない場合の ARToolKitPlus マーカによるトラッキング誤差

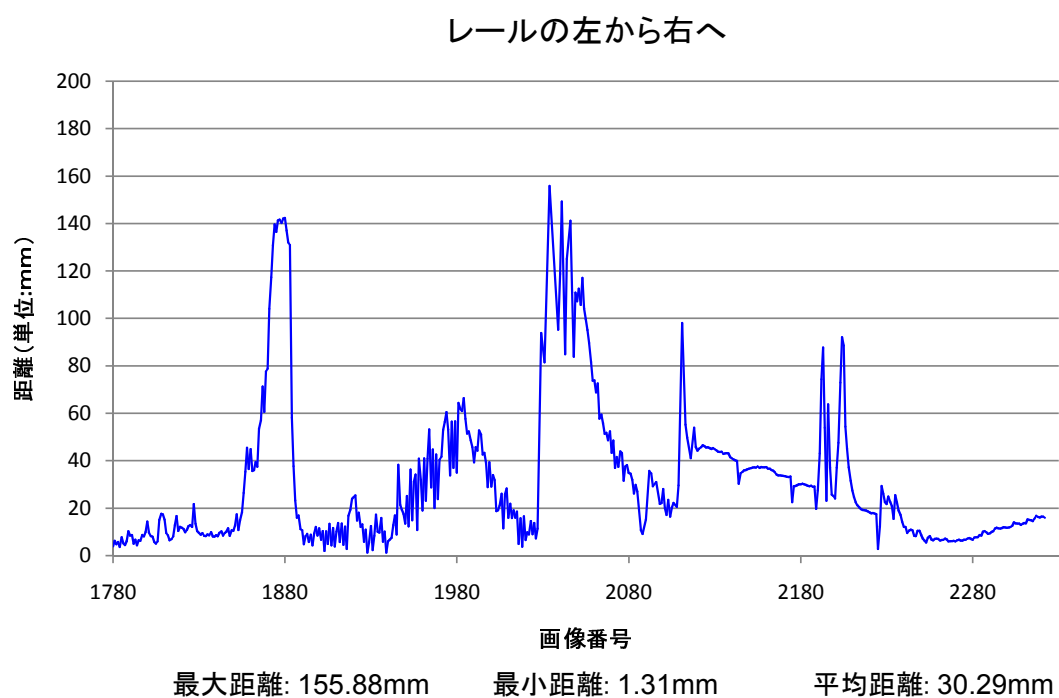
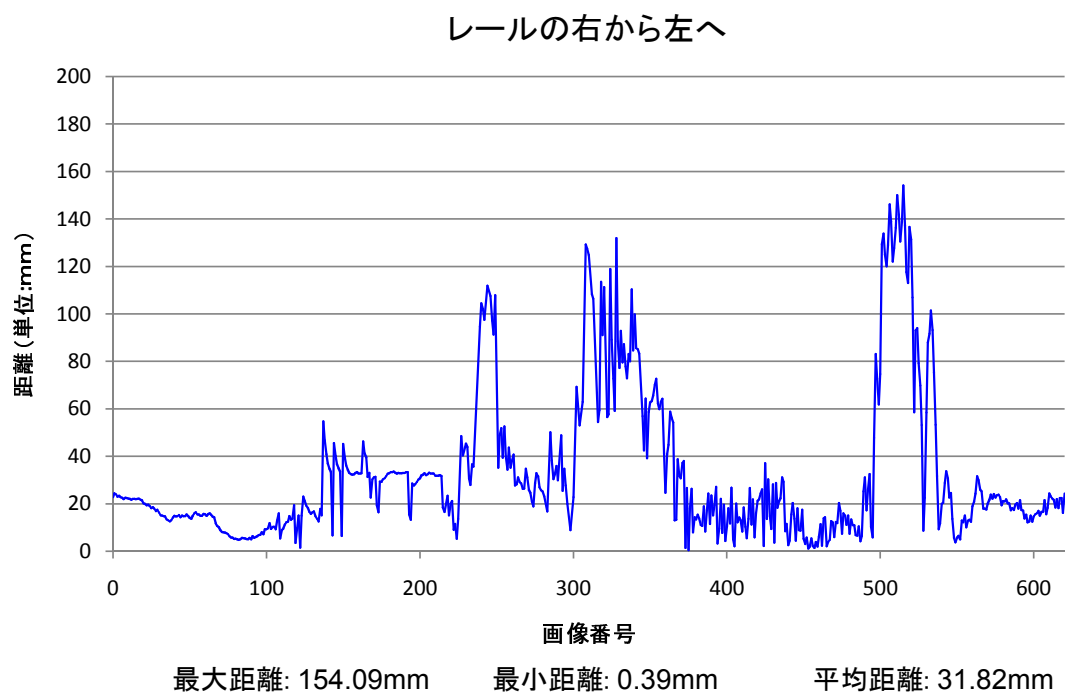


図 5.19: 環境変化がある場合の ARToolKitPlus マーカによるトラッキング誤差

第 6 章 結論

本研究では、原子力発電プラントの解体作業を拡張現実感を用いて支援する際に必要となるトラッキング技術のうち、運用の手間やコストの面で最も有望であると考えられる自然特徴点を用いたトラッキング手法に着目し、広域かつ変化する環境でも安定して長時間利用できる手法を実現することを目的とした。従来の広域環境を対象とした自然特徴点を用いたトラッキング手法では、機器の解体などにより環境が変化しても、トラッキングに必要な自然特徴点情報を迅速には更新できず、トラッキングを継続できないという問題があった。本研究では、トラッキングを実行すると同時に環境の変化を認識し、環境が変化すると認識された際には、新たに自然特徴点を計測し、計測結果をもとに既存の自然特徴点情報を自動的に更新する手法を実現した。また、原子炉廃止措置研究開発センター内において、模擬的に変化する環境でトラッキングを実行する実験を行い、提案手法を用いることにより、環境の変化を適切に認識できること、また、環境が変化した際には自然特徴点情報を適切に更新し、トラッキングを継続できることを確認した。

第 2 章では、研究の背景として、原子炉廃止措置研究開発センターにおける解体作業の現状を述べ、次に拡張現実感を用いた解体支援の現状と課題について述べた。また、解体中の原子力発電プラントで、拡張現実感の実現に不可欠なトラッキングを、自然特徴点を用いた場合でも安定して長時間利用可能にすることを本研究の目的とすることを述べた。

第 3 章では、解体中の原子力発電プラントのような動的に変化する広い環境でも、自然特徴点を用いたトラッキングを安定して継続可能とするために、トラッキングと同時に環境の変化を認識し、変化に応じてトラッキングに必要な自然特徴点情報を自動的に更新する手法を提案した。

第 4 章では、第 3 章で提案した手法をもとに実装した実験用システムを用いて、解体作業現場で行った提案手法の有効性の評価実験について述べた。その結果、提案手法を用いることにより、変化する環境でも安定してトラッキングを実行できることを示した。

第 5 章では、解体作業現場における提案手法とマーカを用いたトラッキング手法の比較実験について述べた。その結果、提案手法はマーカを用いたトラッキング手法よ

りも安定かつ高精度にトラッキングを実行できる場合があることを示した。

本研究で提案した手法をもとに拡張現実感を用いた解体支援システムを開発すれば、解体作業をより効果的に支援できるようになることが期待される。ただし、本研究の成果を実用化するためには、3.1 節で述べたクライアント・サーバ方式のシステムを実装することが望ましい。また、本研究では1 個の機器が移動される場合のみの条件で評価実験を行ったが、多数の機器が同時に移動される場合や、カメラの前を作業員が横切る場合など、他の条件でも提案手法を評価する必要がある。また、将来的には、解体作業現場で性能が異なる複数のデバイスを同時に利用することも考えられる。この場合、低性能のデバイスでも快適に作業できるようにするために、自然特徴点情報の更新処理などの負荷の高い計算を、低性能のデバイスから高性能のデバイスへ転送して実行する仕組みを実現するなど、スケーラビリティの高いシステムを実現することも必要である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究の方針や進め方について終始適切な助言を賜り、また丁寧にご指導してくださった下田宏教授に心より深くお礼を申し上げます。

ご多忙にもかかわらず、研究の基本から論文の執筆に至るまで様々な場面で丁寧にご指導していただき、実験の際にも御支援を頂いた石井裕剛助教に心より感謝いたします。

ふげんで実験を実施した際に、ご協力して頂いた日本原子力研究開発機構の香田有哉さん、泉正憲さんに深く感謝いたします。

就職活動で忙しいにもかかわらず、丁寧に論文をチェックして頂いた修士1回生の上東大祐君、半田大樹君に深く感謝いたします。

さらに、研究室生活を送るにあたり、日頃からお世話をして頂いた普照郁美さんに心より感謝いたします。

最後に、様々なご支援ご協力を頂いた全ての方に、お礼を申し上げます。「謝謝！」

参考文献

- [1] Takeshi Ishikura: Status and Development of Nuclear Power Plant Decommissioning Technologies, Proceedings of an International Conference on Safe Decommissioning for Nuclear Activities, pp.193-213 (2002).
- [2] Hiroshi Shimoda, Toshinori Nakai, Hirotake Ishii, Masanori Izumi, Zhiqiang Bian, Yoshinori Kanehira, Yoshitsugu Morishita: A Feasibility Study of Decommissioning Support Method by Augmented Reality, Proceedings of International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems for 21st Century(ISSNP2008), pp.244-249 (2007).
- [3] Francesca Iacobone, Antonio Lerro, Sergio Orlandi, Giuseppina Passiante: Knowledge management approaches and tools in the Nuclear Energy Industry: Evidences and Implications from Italian, Journal of Strategic Innovation and Sustainability, 7(3), pp.54-65 (2012).
- [4] 武富 貴史, 佐藤 智和, 横矢 直和: AR 観光システムのための全周レンジファインダを用いたランドマークデータベース構築に基づく幾何的位置合わせ, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010) 講演論文集, pp.1947-1953 (2010).
- [5] Guan Tao, Wang Cheng: Registration Based on Scene Recognition and Natural Features Tracking Techniques for Wide-Area Augmented Reality Systems, IEEE Transactions on Multimedia, 11(8), pp.1393-1406 (2009).
- [6] Clemens Arth, Daniel Wagner, Manfred Klopschitz, Arnold Irschara, Dieter Schmalstieg: Wide Area Localization on Mobile Phones, Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality(ISMAR2009), pp.73-83 (2009).
- [7] Jonathan Ventura, Tobias Hollerer: Wide-Area Scene Mapping for Mobile Visual Tracking, Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality(ISMAR2012), pp.3-12 (2012).

- [8] 原子力安全技術センター: 原子力安全技術センターホームページ,
<http://www.nustec.or.jp/anzenjissyo/> (2013 年 12 月 9 日現在).
- [9] 原子炉廃止措置研究開発センター: 原子炉廃止措置研究開発センターホームページ,
<http://www.jaea.go.jp/04/fugen/index.html> (2013 年 12 月 9 日現在).
- [10] 原子炉廃止措置研究開発センター: 未来を拓く原子力—原子力機構の研究開発成果,
http://jolisfukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/mirai/2006/9_3.html (2013 年 12 月 9 日現在).
- [11] D.W.F. van Krevelen, Ronald Poelman: A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations, *The International Journal of Virtual Reality*, 9(2), pp.1-20 (2010).
- [12] Rune Vabo, Leon Piotrowski, Grete Rindahl: 3D representation of radioisotopic dose rates within nuclear plants for improved radioprotection and plant safety, *International Journal of Nuclear Safety and Simulation*, 1(2), pp.127-133 (2010).
- [13] Jannick P. Rolland, Larry D. Davis, Yohan Baillot: A survey of tracking technology for virtual environments, In: *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*, 1st ed, Woodrow Barfield, Thomas Caudell(eds.), Mahwah, pp.67-112 (2001).
- [14] Hirotake Ishii: Augmented Reality: Fundamentals and Nuclear Related Applications, *International Journal of Nuclear Safety and Simulation*, 1(4), pp.316-327 (2010).
- [15] Amir H. Behzadan, Vineet R. Kamat: Automated Generation of Operations Level Construction Animations in Outdoor Augmented Reality, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23(4), pp.405-417 (2009).
- [16] Achille Peternier, Frederic Vexo, Daniel Thalmann: Wearable Mixed Reality System In Less Than 1 Pound, *Proceedings of the 12th Eurographics conference on Virtual Environments(EGVE2006)*, pp.35-44 (2006).

- [17] Joseph Newman, David Ingram, Andy Hopper: Augmented Reality in a Wide Area Sentient Environment, Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality(ISMAR2001), pp.77-86 (2001).
- [18] Hirokazu Kato, Mark Billinghurst: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, Proc. of 2nd Int. Workshop on Augmented Reality, pp.85-94 (1999).
- [19] Hirotake Ishii, Hidenori Fujino, Zhiqiang Bian, Tomoki Sekiyama, Toshinori Nakai, Hiroshi Shimoda: Development of Wide Area Tracking System for Augmented Reality, the 12th International Conference on Human-Computer Interaction, 14(Virtual Reality), pp.234-243 (2007).
- [20] 中井 俊憲: 拡張現実感技術を利用した原子力プラントの解体支援手法の提案と評価, エネルギー科学研究科修士論文, 京都大学 (2006).
- [21] 大下 慧: 拡張現実感技術を用いた原子力プラント解体作業計画支援システムの開発, 工学部学士論文, 京都大学 (2008).
- [22] 青山 周平: 拡張現実感を用いた仮置・運搬作業シミュレーションシステムの開発, エネルギー科学研究科修士論文, 京都大学 (2010).
- [23] David G. Lowe: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, International Journal of Computer Vision, 60(2), pp.91-110 (2004).
- [24] Edward Rosten, Tom Drummond: Machine learning for high-speed corner detection, Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV2006), pp.430-443 (2006).
- [25] Georg Klein, David Murray: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality(ISMAR2007), pp.225-234 (2007).
- [26] Noah Snavely, Steven M.Seitz, Richard Szeliski: Photo tourism: exploring photo collections in 3D, ACM Transactions on Graphics, 25(3), pp.835-846 (2006).

- [27] Chris Stauffer, W. Eric L. Crimson: Learning Patterns of Activity Using Real-Time Tracking, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(8), pp.747-757 (2000).
- [28] Vasilis Papadourakis, Antonis Argyros: Multiple objects tracking in the presence of long-term occlusions, Computer Vision and Image Understanding, 114(7), pp.835-846 (2010).
- [29] Bill Triggs, Philip F. McLauchlan, Rucgard I. Hartley, Andrew W. Fitzgibbon: Bundle Adjustment - A Modern Synthesis, Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms(ICCV1999), pp.298-372 (1999).
- [30] Jean-Yves Bouguet: Camera Calibration Toolbox for Matlab, http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ (2014 年 2 月 3 日現在).
- [31] Christian Doppler Laboratory: Handheld Augmented Reality, <http://handheldar.icg.tugraz.at/artoolkitplus.php> (2014 年 2 月 3 日現在).

付録 A 自然特徴点

A.1 SIFT 特徴点

図 A.1 に SIFT 特徴点の例を示す。図の中の赤い点は SIFT 特徴点である。画像から SIFT 特徴点を認識する際には、通常は 2 段階の処理を実行する。まずは、グレースケールの 2 次元画像（カラー画像を入力とする場合に、グレースケールの画像に変換する必要がある）を用いて、画像中の輝度が激しく変化しかつ周囲の部分との類似度が低い箇所をキーポイントとして検出する。その後、各キーポイント周辺の輝度情報を用いてそのキーポイント周辺の外観を表す特徴点ベクトルを生成する。この際、画像が縮小・拡大・回転しても同じ個所を撮影している場所にはほぼ同じ特徴量になるように、キーポイント周辺の輝度変化を元に特徴量計算の方向と基準スケールを求め、それらを元に特徴量を記述する。



図 A.1: SIFT 特徴点

このような工夫がなされているため、異なる位置・方向から撮影された複数の画像から、同じ個所を写している点同士の対応付けを安定して行うことができる。そのた

め、SIFT 特徴点は利用されることが多い。2つの SIFT 特徴点是对应点である場合には、この2点の特徴量の間のユークリッド距離は小さくなる。一方、対応点でない場合には、特徴量の間のユークリッド距離は大きくなる。ただし、SIFT 特徴点を認識する際には、多くの計算を行う必要があるため、リアルタイムで処理することは困難である。

A.2 FAST 特徴点

図 A.2 に FAST 特徴点の例を示す。図の中の青い点は FAST 特徴点である。画像から FAST 特徴点を認識する際には、グレースケールの 2 次元画像の中にある点 P を中心とする半径 r の円周上の各画素の輝度と点 P の輝度を比較し、差異が大きい画素が数多く存在する場合には、点 P を FAST 特徴点と認識する。



図 A.2: FAST 特徴点

FAST 特徴点は計算時間が非常に短いため、高速な特徴点抽出が必要な場合に、FAST 特徴点を利用されることが多い（本研究では、カメラでリアルタイムで撮影した画像から特徴点を認識する際に FAST 特徴点を認識する）。ただし、FAST 特徴点は SIFT のような特徴量を生成しないため、特徴点の対応付けを行う場合、点の外観の比較などの追加処理が必要となる。