エネルギー科学研究科

エネルギー社会・環境科学専攻修士論文

題目：　仮想空間内シミュレーションによる
自然特徴点トラッキング手法の
精度予測

指導教員：下田　宏 准教授

氏名：小野　義人

提出年月日：平成24年2月9日(木)

論文要旨

題目： 仮想空間内シミュレーションによる自然特徴点トラッキング手法の精度予測

エネルギー情報学分野, 小野　義人

要旨：

2011年3月11日に発生した東日本大震災により、日本は東北地方と関東地方の太平洋沿岸部を中心に壊滅的な被害を受けた。特に福島第一原子力発電所は、津波による被害によって、解体を余儀なくされる事態に陥っており、安全に効率よく解体作業を進めていく手法を確立することが重要な課題となっている。

従来より、老朽化によって運転を停止した原子力発電プラントの解体作業を支援する研究がなされている。その中でも、拡張現実感 (Augmented Reality: AR) によって解体工程をシミュレーションすることで直感的に作業工程を理解し、仮置きや運搬作業の綿密な計画と安全対策を立てることを支援する手法が提案されており、AR を利用して原子力発電プラントの解体作業を支援する研究が注目されている。

一方で、AR 環境を実現するためには、ユーザの位置と方向をリアルタイムに計測するトラッキングと呼ばれる手法が必要である。原子力発電プラント内では、ユーザの位置と方向を計測するためのトラッキング手法として、GPS や磁気センサが使用不可能であることから、カメラを用いる手法が使われている。本研究では、カメラトラッキングの中でも、自然特徴点を用いたトラッキング手法に着目する。自然特徴点とは環境にあらかじめ存在している画像処理によって他の領域と識別可能な領域のことで、この自然特徴点を用いたトラッキング手法が実際に原子力プラント内の環境において利用可能であるのかどうかを人間が判断することは難しい。

そこで本研究では、レーザレンジファインダを用いた三次元形状計測技術を利用して、解析の対象となる環境を任意に設定することができ、かつ、その環境において、自然特徴点を用いたトラッキング手法の精度を事前に予測する手法を提案し、実装と評価を行った。この精度予測結果を用いて、対象環境においてトラッキング手法が利用可能であるかどうかの指標とすることができる。

提案手法では、環境の三次元モデルを用いた仮想空間内で、自然特徴点を用いたトラッキングをシミュレーションすることによってトラッキングの精度を予測する。これを実現するため、既存の環境を三次元モデル化するシステムを改良し、環境の三次元モデルの精度をトラッキングのシミュレーションに利用できるまで向上させた。

本研究で提案するトラッキングのシミュレーションにおいては、シミュレーションの処理時間を現実的な使用に適した処理時間に短縮することを目標とし、予測の信頼性を落とさず効率的に予測する箇所を限定するアルゴリズムを提案し、実装した。その後、提案手法の評価を行った。

この評価により、提案するアルゴリズムは処理時間の短縮に有効であることが分かった。また、提案アルゴリズムによって、適切に予測領域を省略することができた。今後は提案手法を実装したシステム全体としての処理速度の向上、そして現実環境を反映する精度のさらなる向上が今後の課題として残った。

目次

第 1 章 序論 1

第 2 章 研究の背景と目的 3

2.1 原子力発電プラントにおける解体作業の現状 3

2.2 原子力発電プラントにおける解体作業支援システムの現状 3

2.3 自然特徴点を用いたトラッキング手法と問題点 7

2.4 トラッキング手法の精度予測方法の関連研究 9

2.5 研究の目的と意義 12

第 3 章 シミュレーションによるトラッキング精度予測手法の提案 13

3.1 提案するトラッキング精度予測手法の概要 13

3.2 提案するトラッキング精度予測手法の課題点 16

3.3 環境の三次元モデルの構築 20

3.3.1 環境の三次元モデルリングシステムの改良点 20

3.3.2 ICP アルゴリズム 22

3.3.3 計測機器のキャリブレーション 23

3.3.4 環境の三次元モデルの穴埋め 28

3.4 シミュレーションによるトラッキング精度予測 30

3.4.1 シミュレーションによるトラッキング精度予測の概要 30

3.4.2 効率の良いトラッキング精度予測 31

第 4 章 提案するトラッキング精度予測手法の実装と評価 37

4.1 PTAN の実装 37

4.1.1 環境のモデルリングシステムのハードウェア構成と仕様 37

4.1.2 PTAN を実装した PC の仕様 40

4.2 PTAN により評価する対象のトラッキング手法 41

4.2.1 キーフレームと自然特徴点のデータベースを用いたトラッキング 41

4.2.2 キーフレームと自然特徴点のデータベース構築 42

4.3 PTAN の速度と省略する領域の妥当性評価実験 45
4.3.1 PTAN を実行する実験環境と評価実験 45
4.3.2 実験結果と考察 50
4.4 PTAN の予測結果の信頼性評価 56
4.4.1 実験環境と信頼性評価実験 56
4.4.2 評価の結果と考察 59
4.4.3 今後の課題 61

第 5 章 結論 62

謝 辞 63

参 考 文 献 64

図目次

2.1 拡張現実感の例 4
2.2 TPCOSS の概略図 [4] 4
2.3 マーカ利用のカメラ位置・方向トラッキング 5
2.4 作業員の位置・方向の測定 6
2.5 TPCOSS の画面の例 [4] 6
2.6 自然特徴点利用のカメラ位置・方向トラッキング 7
2.7 自然特徴点利用のトラッキング (大部分が単色の壁) 8
2.8 擬似自然特徴点 8
2.9 TrakMark のワークフロー [6] 10
2.10 TrakMark シナリオパッケージの例 [6] 11

3.1 トラッキング手法の精度予測の一般的な手法の概略図 13
3.2 トラッキング手法の精度予測の一般的な手法の流れ 14
3.3 提案するトラッキング精度予測手法の概要 (三次元モデル構築) 14
3.4 提案するトラッキング精度予測手法の概要 (トラッキングシミュレーション) 15
3.5 提案するトラッキング精度予測手法の全体の流れ 15
3.6 TPCOSS のモデリングサブシステムの概略図 [4] 16
3.7 従来手法 (TPCOSS のモデリングサブシステム) で構築した三次元モデルの例 17
3.8 現実環境を正確に反映していないモデルの例 17
3.9 カメラの移動箇所の例 18
3.10 場所の違いによるカメラ画像の違い 19
3.11 トラッキングの精度を考慮した領域の代表 19
3.12 レーザレンジファインダによる環境のモデリングシステム概略図 20
3.13 レーザレンジファインダの動き 21
3.14 ICP アルゴリズムの処理のイメージ 22
3.15 計測システムの各機器の配置 23

3.16 レーザレンジファインダの動きと計測範囲 (上下) 24
3.17 レーザレンジファインダの計測の動きと計測範囲 (左右) 24
3.18 レーザレンジファインダの計測の動きと計測範囲 (重なり部分) 25
3.19 複数の形状データの位置合わせ 26
3.20 カメラで撮影される画像と撮影対象の対応関係 26
3.21 撮影画像と撮影対象の対応関係計算の繰り返し 27
3.22 補間点の決定 29
3.23 補間点の座標の決定 29
3.24 補間点の色の決定 30
3.25 二点間の比較領域 31
3.26 評価点を 9 点追加 32
3.27 評価点を 9 点追加したときに追加される代表領域 32
3.28 評価点を 5 点追加 33
3.29 評価点を 5 点追加したときに追加される代表領域 33
3.30 代表点の比較と領域の追加が繰り返される様子 35
3.31 追加が完了したときの評価点の一例 36

4.1 環境のモデリングシステムのハードウェア構成 38
4.2 環境のモデリングシステムの全体図 38
4.3 データベースを用いたトラッキング手法の概略図 (キーフレーム) 41
4.4 データベースを用いたトラッキング手法の概略図 (自然特徴点) 42
4.5 キーフレームの作成の概要図 43
4.6 仮想空間内でのデータベース構築 44
4.7 実カメラ画像と改良モデル画像の自然特徴点 46
4.8 実験室環境の三次元モデルの世界座標系 47
4.9 実験室環境データベース構築のための仮想カメラ移動範囲 48
4.10 トラッキングのための仮想カメラ移動領域 49
4.11 全点予測のカメラ移動箇所 (最小ステップ幅 1mm) 51
4.12 全点予測のカメラ移動箇所 (最小ステップ幅 2mm) 52
4.13 PTAN のカメラ移動箇所 (最小ステップ幅 1mm,9 点追加,Nf=0.7,Err=0.5) 52
4.14 PTAN のカメラ移動箇所 (最小ステップ幅 1mm,5 点追加,Nf=0.7,Err=0.5) 53
4.15 全点予測と 9 点アルゴリズムのトラッキング誤差の可視化 1 54
4.16 全点予測と 9 点アルゴリズムのトラッキング誤差の可視化 2 55

4.17 計算機室環境の現実画像と三次元モデル 56
4.18 MAMS の概略図 57
4.19 カメラ測定用マーカの貼付け 58
4.20 カメラ撮影とカメラ位置・方向計測の様子 58
4.21 現実環境内トラッキングと仮想空間内トラッキングの相関 59
4.22 現実環境内と仮想空間内のトラッキング誤差の相関と考察 1 60
4.23 現実環境内と仮想空間内のトラッキング誤差の相関と考察 2 60

表 目 次

2.1 代表的な自然特徴点を求めるアルゴリズム 9

4.1 レーザレンジファインダの仕様 39
4.2 環境のモデリングシステムのカメラの仕様 39
4.3 電動雲台の仕様 39
4.4 モデリングシステムの制御用 PC の仕様 40
4.5 PTAN を実装する PC の仕様 40
4.6 カメラ画像と作成したキーフレームの解像度 43
4.7 レーザレンジファインダを動かした角度と速度 (実験室) 45
4.8 環境の三次元モデルの詳細 48
4.9 仮想カメラの移動ステップと移動範囲 48
4.10 トラッキング時の仮想カメラ移動領域とステップ幅 50
4.11 各トラッキング実行時の処理時間 51
4.12 レーザレンジファインダを動かした角度と速度 (計算機室) 56

第 1 章 序論

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震により、日本は東北地方と関東地方の太平洋沿岸部を中心に壊滅的な被害を受けた。特に沿岸部の原子力発電所は、津波による被害によって、解体を余儀なくされる事態に陥っており、安全に効率よく解体作業を進めていく手法を確立することが重要な課題となっている。

従来より、老朽化によって運転を停止した原子力発電プラントの解体作業を支援する研究がなされている。原子力発電プラントは放射性物質を取り扱うことから、安全性を確保するため、事前に綿密な計画と安全対策を立てた上で解体作業を実施する必要がある。原子力プラントに多く存在する大型機器の解体作業では、機器の周りに安全なスペースを確保し、そのスペースに横倒しして仮置きする工程が存在する。もし横倒しするスペースが十分にない場合は、最寄りの十分なスペースが確保できる場所まで解体対象機器を運び出すことで対応する。しかしながら仮置きや運搬のような、周囲の環境と解体対象機器との接触が起こらないように十分注意を払う必要がある作業について、原子力発電プラント内の環境にパイプやタンクなどが多数存在するため、どのような綿密な計画と安全対策を立てるのが適切であるのか判断することが難しい。そこで、日本原子力研究開発機構原子炉廃止措置研究開発センターふげんでは拡張現実感 (Augmented Reality: AR) によって解体工程をシミュレーションすることで直感的に作業工程を理解し、仮置きや運搬作業の綿密な計画と安全対策を立てることを支援する手法の研究をすすめている。

AR 環境を実現するためには、ユーザの位置と方向を常に把握しておく必要がある。原子力発電プラント内では、ユーザの位置と方向を計測するためのトラッキング手法として、カメラを用いる手法が使われている。本研究では、カメラトラッキングの中でも、自然特徴点を用いたトラッキング手法に着目する。この自然特徴点を用いたトラッキング手法が実際に原子力プラント内の環境において利用可能であるのかどうかについては、人間が判断することは難しい。

そこで本研究では、解析の対象とする環境を任意に設定することができ、かつその環境において、自然特徴点を用いたトラッキング手法の精度を事前に予測する手法を実現する。この実現により、対象環境においてトラッキング手法が利用可能であるかどうかの指標とすることができる。

本論文は第 1 章の序論を含め第 5 章までの 5 部で構成される。第 2 章では解体作業とそれを支援するシステムの現状と問題点について述べる。次に、これを背景として何を解決する必要があるのかという本研究の目的と意義を述べる。第 3 章では提案手法について述べる。第 4 章では提案手法の評価実験を行い、考察および今後の課題を述べる。第 5 章では本研究の結論を述べる。

本研究では、解析対象のトラッキング手法や環境に関わらず効率よくトラッキングの精度が予測できる手法を提案することを目標とする。

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と問題点を述べる。次に、その解決策としての拡張現実感による原子力発電プラントにおける解体作業の支援システムの現状について述べる。さらにそのシステムの問題点と関連研究について述べ、最後に本研究の目的と意義について述べる。

2.1 原子力発電プラントにおける解体作業の現状

原子力発電プラント内での解体作業においては、一般的な化学プラントや発電プラントの解体のような火薬を用いた発破解体や重機を用いた取り壊し解体とは異なり、作業員の被ばく量の低減や原子力発電プラント外への放射性粉塵等の放出低減などに考慮しながら解体対象機器を放射線環境下で撤去し、そのとき発生する放射性廃棄物の処理を適切に行う必要がある。このため、解体手順や工法を熟考した綿密な作業計画を事前に立て、十分な安全対策が必要であるが、そのためには解体対象機器の位置や作業手順が正確に把握される必要がある。この把握のためには豊富な作業経験が必要で、かつ難しいという問題がある。

2.2 原子力発電プラントにおける解体作業支援システムの現状

解体対象機器の正確な位置や作業の手順を把握するために、視覚的に直感的な理解を促すことが可能な拡張現実感 [1](Augmented Reality: AR) を用いた支援が有効であると考えられ、システムの開発や研究が行われてきた [2][3][4][5]。

AR とは、現実環境の映像に対して、三次元のコンピュータグラフィックス (Computer Graphics: CG) 等の情報を視覚的に重畳提示する技術である。AR を用いて現実環境の映像に仮想的な文字や図形を重畳表示させることにより、ユーザに直感的な理解を促すことができる。例えば図 2.1 に示すようなスイッチをある順番で操作するような場面があるとすると、現実環境を見ただけではどの順番でスイッチを操作すれば良いか分かりづらい。

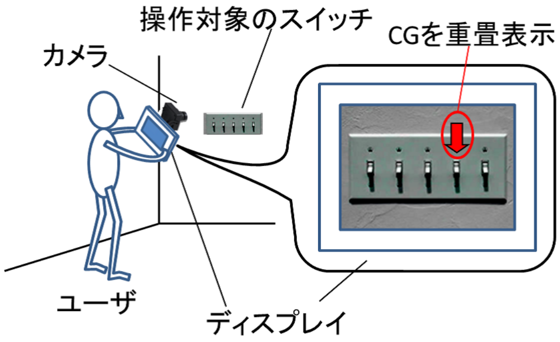


図 2.1: 拡張現実感の例

そこで AR を用いて、この現実環境の映像に対してリアルタイムに CG の矢印を順番に重畳表示することにより、言語などによる説明を用いなくても直感的な理解を促すことができる。AR では現実環境のカメラ映像上に CG を重畳表示させて情報提示をするため、提示する CG 以外は現実環境の映像でありユーザに高い没入感を与えることができる。ここで、カメラの画像に CG などのオブジェクトを重畳表示するためには、そのオブジェクトのカメラ画像上の表示位置と向きを決定する必要がある。オブジェクトのカメラ画像上の表示位置と向きを決めるためには、ユーザの位置と方向を常にトラッキングし、オブジェクトを画面上に適切な位置と方向で投影する必要がある。

先行研究において作業支援を実現した TPCOSS[4] の概略図を図 2.2 に示す。この研究によって、AR を用いた作業支援が有効であるという知見が得られている。

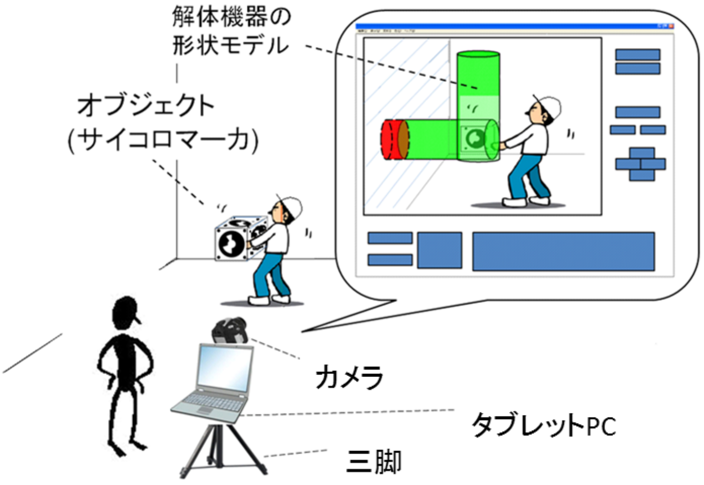


図 2.2: TPCOSS の概略図 [4]

プラント内でトラッキングを実行するためにはGPSや磁気センサが使用不可能であるなど、使用可能なセンサ類に制限があるので、本研究ではカメラを利用したトラッキングを利用する。カメラを利用したトラッキングでは、位置・方向が既知で外見的に特徴的な箇所を画像処理で認識し、幾何計算によりカメラの位置と方向を計測する。TPCOSSにおいては、カメラのトラッキングにはマーカを利用する手法を用いている。マーカを利用する手法は図2.3に示すように、特殊なパターンを描いたマーカを画像処理で認識している。

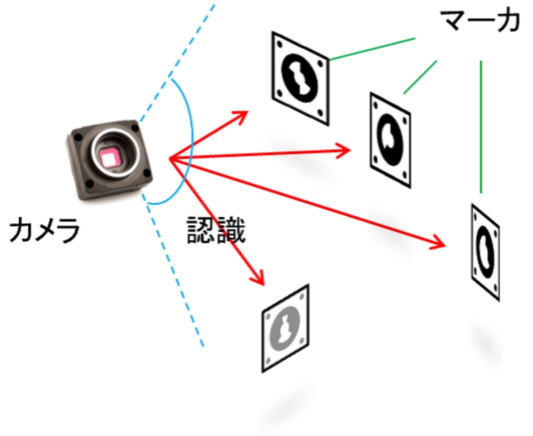


図 2.3: マーカ利用のカメラ位置・方向トラッキング

TPCOSSの接触判定システムを使用している様子を図2.4に示す。作業環境の周囲の壁面に設置されたマーカは、位置・方向をあらかじめ計測されている。このマーカを画像処理で認識し、幾何計算によってカメラの位置と方向をトラッキングする。また、作業員が持つサイコロ型マーカを画像処理で認識し、カメラの位置・方向との相対位置・方向を求める。これらのトラッキング結果に応じて、あらかじめ作成しておいた解体対象機器の形状モデルを作業員が持つサイコロ型マーカ上に描画させてカメラ映像に重畳表示させる。カメラから周囲の環境に設置したマーカへの相対位置・方向が分かっており、さらにカメラからサイコロ型マーカ上に重畳表示された解体対象機器の形状モデルへの相対位置・方向が分かっているので、周囲の環境と形状モデルの位置・方向関係を計算することができる。したがって、周囲の環境と形状モデルが接触しているかどうか計算可能である。

サイコロマーカと描画される形状モデルの動きは連動しているため、比較的困難であるとされる三次元的な形状モデルの操作を直感的に理解し、容易に行うことが可能である。さらに、実際に作業を行う現場で現状を反映した解体機器の仮置き・運搬の

シミュレーションを実行することが可能である。シミュレーション実行時は、図 2.5 に示すようなインタフェース画面の接触判定システムにより、形状モデルと周囲作業環境との間に接触があれば、その接触箇所が赤色に着色される。このため、接触箇所を直感的に理解できる。

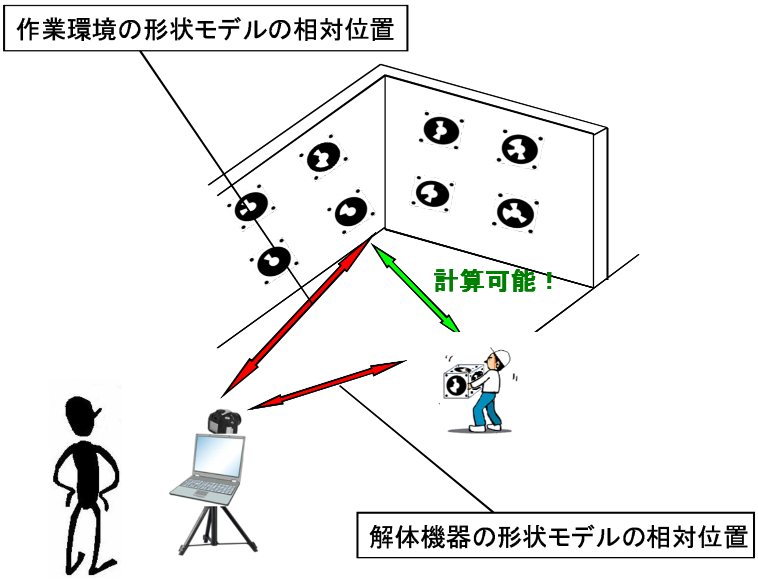


図 2.4: 作業員の位置・方向の測定

図 2.5: TPCOSS の画面の例 [4]

このシステムの問題点としては、トラッキングのために多数のマーカを環境に設置し、その位置と方向を事前に計測しなければならず、その手間が大きいという点が挙げられる。この問題点の解決策として図 2.6 に示すような、環境中にあらかじめ存在する、画像認識によって周りと区別できる特徴的な箇所 (以下自然特徴点) を用いたトラッキング手法の利用が挙げられる。この手法について次節で述べる。

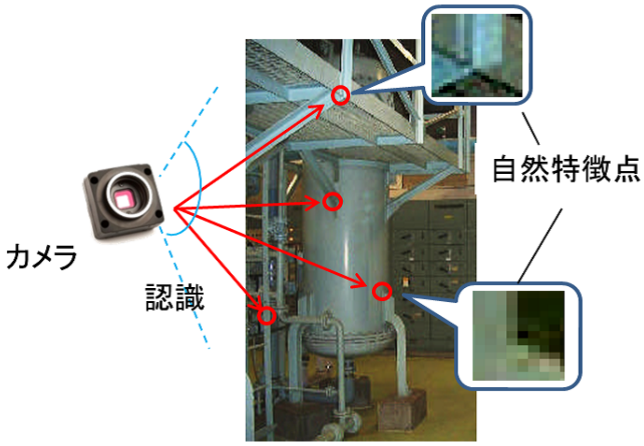


図 2.6: 自然特徴点利用のカメラ位置・方向トラッキング

2.3 自然特徴点を用いたトラッキング手法と問題点

自然特徴点を利用したトラッキング手法の精度予測が難しい理由として、認識されている自然特徴点の数や種類、配置に依存してトラッキングの精度が変わることが挙げられる。

原子力発電プラントのようなトラッキングに対して高い信頼性が求められる場所で自然特徴点を利用する場合は、トラッキングの精度を事前に予測し、その精度によって利用可能であるかどうか判断する必要がある。マーカはカメラに写る限りはトラッキングが可能であるので、マーカを用いるトラッキングが利用可能であるかどうか判断することは容易である。しかし自然特徴点はその数や種類、配置が環境によって変化するので、対象とする環境において自然特徴点を用いて精度よく安定したトラッキングが実行可能かどうかの判断が難しい。例えば、図 2.7 に示すように、大部分が単色の壁をカメラでトラッキングしようとする場合、自然特徴点となる箇所が非常に少ないため、トラッキングが成功しない可能性が高いが、どの程度の可能性かは正確に分からない。

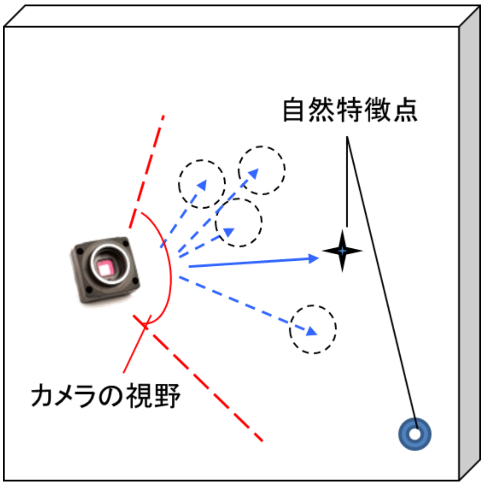


図 2.7: 自然特徴点利用のトラッキング (大部分が単色の壁)

また、図 2.8 に示すように、ある方向からみたときは自然特徴点として認識されていたが、別の方向からみたときには消失してしまう点 (擬似自然特徴点) が存在する場合、その擬似自然特徴点を用いたトラッキングは失敗する。しかし、原子力発電プラントのようにパイプやタンクが多数存在する複雑な環境では、このような同じ自然特徴点を用いてトラッキングを安定して行えない箇所が環境に存在していても、その箇所がどこに存在するのかを人間が正確に全て把握することは非常に困難である。

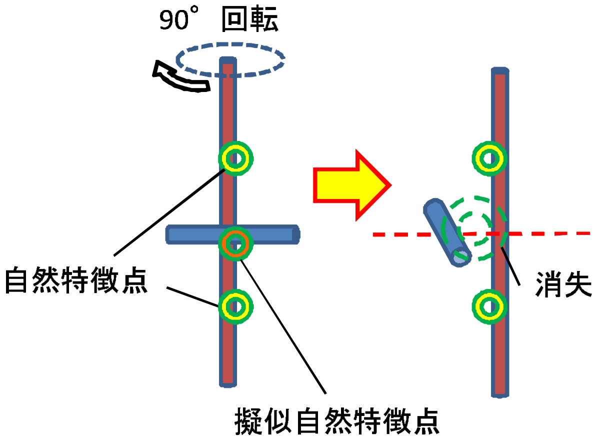


図 2.8: 擬似自然特徴点

自然特徴点を求める画像処理の代表的なアルゴリズムとしては、SURF[8] や SIFT[9]、FAST[10][11] などが挙げられる。それぞれのアルゴリズムの特徴を比較して表 2.1 に示す。

表 2.1: 代表的な自然特徴点を求めるアルゴリズム

	処理時間	マッチング精度
SIFT	長	高
SURF	中	中
FAST	短	低

自然特徴点を利用したトラッキングでは、事前にあるいはリアルタイムに登録した自然特徴点と画面上で認識される自然特徴点をマッチングさせ、幾何計算によってカメラの位置・方向を推定するが表 2.1 で示したように、SIFT はトラッキングのときの自然特徴点のマッチング精度は高いが処理が遅く、オンラインでのトラッキングに用いることができない。FAST は処理が速いがトラッキングのときの自然特徴点のマッチング精度が低い。そこで本研究では、処理時間と自然特徴点のマッチングの安定性のバランスがとれている SURF[8] を用いたトラッキング手法を解析の対象とする。

2.4 トラッキング手法の精度予測方法の関連研究

カメラからの画像を用いた位置合わせ手法やトラッキング手法を評価する指標としては TrakMark[6] と呼ばれる指標が提案されている。TrakMark を指標として用いる場合に推奨されるワークフローを図 2.9 に示す。

TrakMark では大きく分けて 3 つの利用形態 (シナリオ) を想定した映像シーケンスとそのカメラの位置や姿勢の真値が 9 セット準備されている。この映像シーケンスを生成するシナリオパッケージのサンプルを図 2.10 に示す。

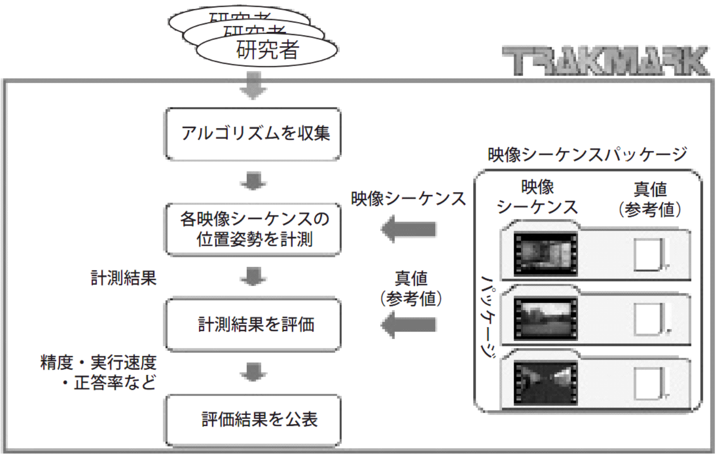
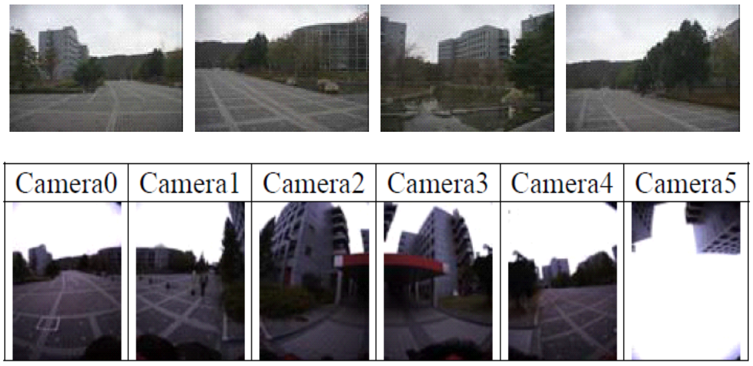


図 2.9: TrakMark のワークフロー [6]

これらの映像シーケンスは TrakMark のホームページで無料で公開されており、各種トラッキングアルゴリズムを評価する際の共通の映像シーケンスとして用いることができる。共通の映像シーケンスを利用することでアルゴリズム間の性能の比較をするための基準とすることができる。例えば、図 2.10(a) に示す時代劇セットパッケージの映像シーケンスを用いて、各種トラッキングを実行する。そのときのカメラの位置・方向の真値とトラッキング結果を比較し、その誤差の大小によって各種トラッキングアルゴリズム間の評価をすることができる。

しかし、自然特徴点を用いたトラッキングの精度は、環境が変わると大きく変化するため、TrakMark の映像シーケンスパッケージを用いて評価した場合に高精度のトラッキングができるという結果が得られたとしても、実際のプラント内でトラッキングを行った場合に同様に高精度のトラッキングができるとは限らない。

(a) 時代劇セットパッケージ (下列は映像シーケンスの一部)



(b) キャンパスパッケージ (下列は全方位カメラ毎の映像シーケンスの一部)

(c) 学会会場パッケージ (左図は映像シーケンスの一部，右図は3Dモデルデータ)

図 2.10: TrakMark シナリオパッケージの例 [6]

2.5 研究の目的と意義

本研究では、拡張現実感環境を実現するシステムに必要となるトラッキング技術の中でも、システムを使用するときにユーザにとっての手間が少ない、自然特徴点を用いたトラッキング手法に着目する。これを原子力プラント内の保守作業支援に利用するためには、対象とする環境においてトラッキングが十分な精度で安定に実行できることを事前に確認する必要がある。しかし、自然特徴点は存在する数や種類、配置が環境によって変化するため、任意の環境における自然特徴点を用いたトラッキング手法の精度を事前に予測することは容易ではなく、また、その手法はこれまでなかった。

そこで本研究では、任意の環境における自然特徴点を用いたトラッキング手法の精度を事前に予測する手法の実現を目的とする。例えば、ロボットアームを環境の全体に設置し、アームにカメラを取り付けて自然特徴点を用いたトラッキングを実行し、カメラの位置・方向とトラッキング結果を比較する手法が考えられるが、このような手法を実現するためには非常に多くの手間と費用がかかる。本研究では、このような多くの手間や費用がかからず、かつトラッキングの精度を任意の環境で容易に予測するため、現実環境を再現した三次元モデルを構築し、このモデルを用いた仮想空間内において自然特徴点を用いたトラッキングをシミュレーションすることにより、トラッキングの精度を予測するシステムを開発する。

本研究の目的が実現されたとき、本手法は原子力発電プラントのみならず任意の環境において自然特徴点を用いたトラッキング手法の精度指標として利用できるため、対象環境の拡張という点においても有意義である。

第 3 章 シミュレーションによるトラッキング精度予測手法の提案

本章では、提案手法の概要を述べる。次に、提案手法に必要となる環境の三次元モデル構築手法について述べ、最後にシミュレーションにより効率よく精度予測をする手法について述べる。

3.1 提案するトラッキング精度予測手法の概要

トラッキングの精度を予測する手法として、一般的には図 3.1 に示すように、トラッキング実行時のカメラの実際の位置・方向と、トラッキングにより推定される位置・方向を比較し、例えばその誤差が大きいとき、トラッキングの精度が悪いというように誤差を指標として精度を予測する手法が考えられる。この処理の流れを図 3.2 に示す。この比較を対象とする領域全体で繰返し行い、予測は終了となる。

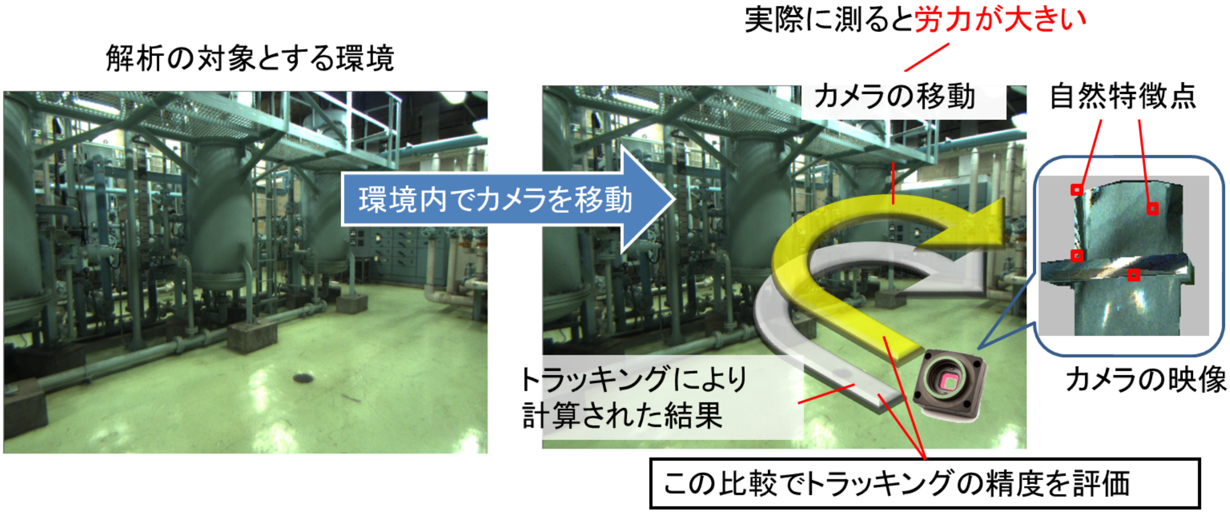


図 3.1: トラッキング手法の精度予測の一般的な手法の概略図

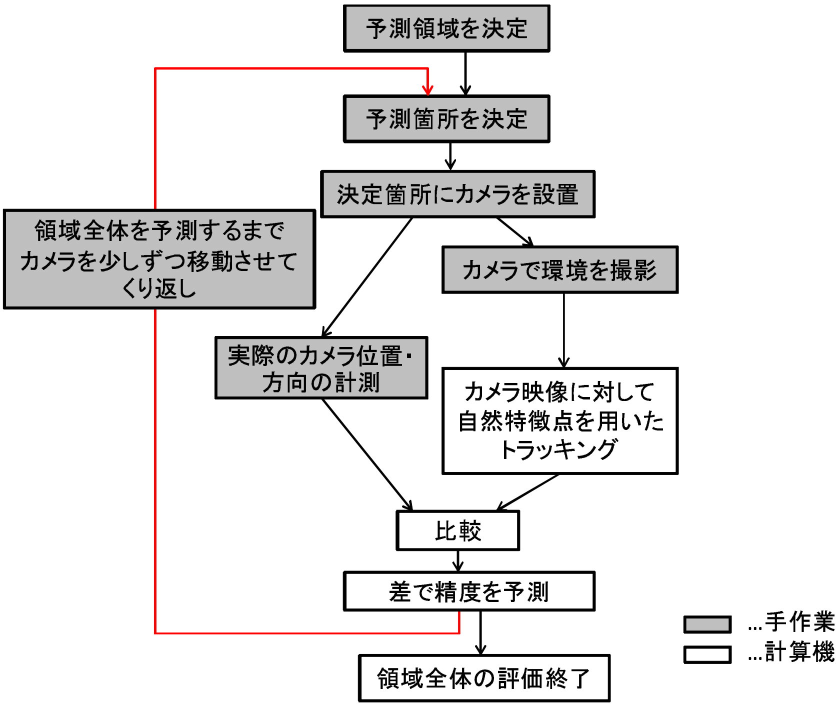


図 3.2: トラッキング手法の精度予測の一般的な手法の流れ

しかしながらこの手法では、カメラが移動する可能性のある全ての箇所へカメラを移動させ、さらにその位置・方向を正確に計測する必要があり、その計測は多くの労力が必要となるという問題がある。

そこで本研究では、この問題を解決するため、まず図3.3に示すように対象とする環境の三次元モデルを構築する。その三次元モデルを用いた仮想空間内で仮想的なカメラを想定する。これによってカメラの移動と計測の手間がかかるという問題点を解決できる。

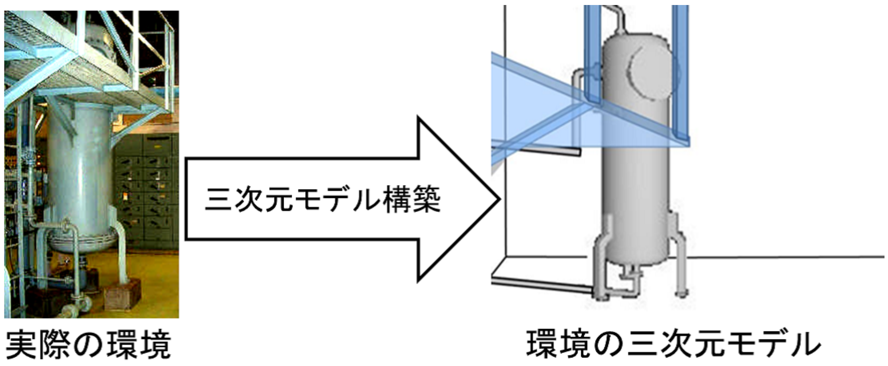


図 3.3: 提案するトラッキング精度予測手法の概要 (三次元モデル構築)

さらに、図 3.4 に示すように、この仮想カメラが任意の位置・方向から撮影する画像をCGによって生成し、このCGを用いてトラッキングを実行する。このトラッキング結果と仮想カメラの位置・方向を比較し、その誤差を精度の指標とする。全体の処理の流れを図 3.5 に示す。対象とする領域全体の予測が終わるまでこの比較を繰返し行う。

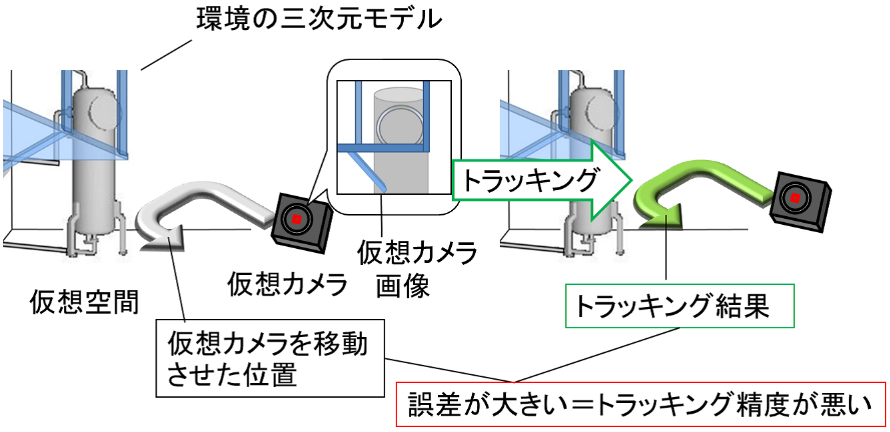


図 3.4: 提案するトラッキング精度予測手法の概要 (トラッキングシミュレーション)

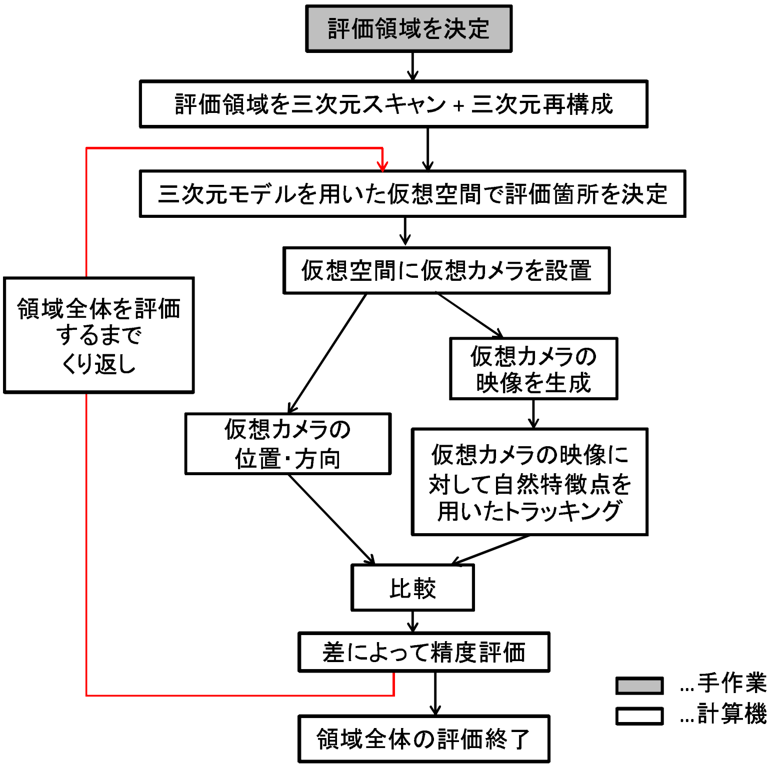


図 3.5: 提案するトラッキング精度予測手法の全体の流れ

本稿では、実際の環境で用いるカメラを「実カメラ」、仮想空間内で実カメラをシミュレーションしている仮想的なカメラを「仮想カメラ」として表記する。

3.2 提案するトラッキング精度予測手法の課題点

本研究では、環境の三次元モデルを構築する手法として、現状を反映した三次元モデルを構築可能であるという点から、図 3.6 に示す青山の開発した TPCOSS のモデリングサブシステムを用いる。このシステムでは、レーザレンジファインダを用いて計測した距離データ点群を三次元空間にレンダリングすることで環境の三次元モデルとして表現し、多くの点をレンダリングすることで現実環境を反映した三次元モデルを構築することができる。環境を広くスキャンするために、電動雲台を用いてレーザレンジファインダを上下左右に動かすことができるようになっており、距離データ点群の取得と同時に点群の色を取得するためにカメラで写真撮影を行う。

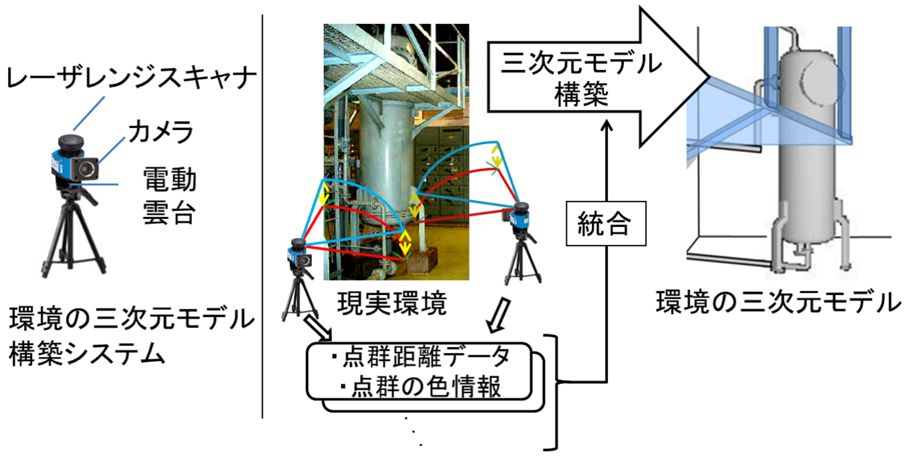


図 3.6: TPCOSS のモデリングサブシステムの概略図 [4]

このシステムを用いて環境の三次元モデルを構築後、環境のある箇所で撮影した実カメラ画像と、その箇所の位置・方向を仮想空間内で反映させて CG で生成した仮想カメラ画像の例を図 3.7 に示す。この仮想カメラ画像は、電動雲台の最小移動角度以下の計測ができないために生じる計測点の隙間によって、画像中の多くの箇所で穴のあいた画像になってしまう。これらの画像を用いて、例えば本研究で解析の対象として用いる SURF によって自然特徴点を抽出してみると、図 3.8 に示すように、実カメラ画像には存在しない穴やその周辺を自然特徴点として取得してしまう。

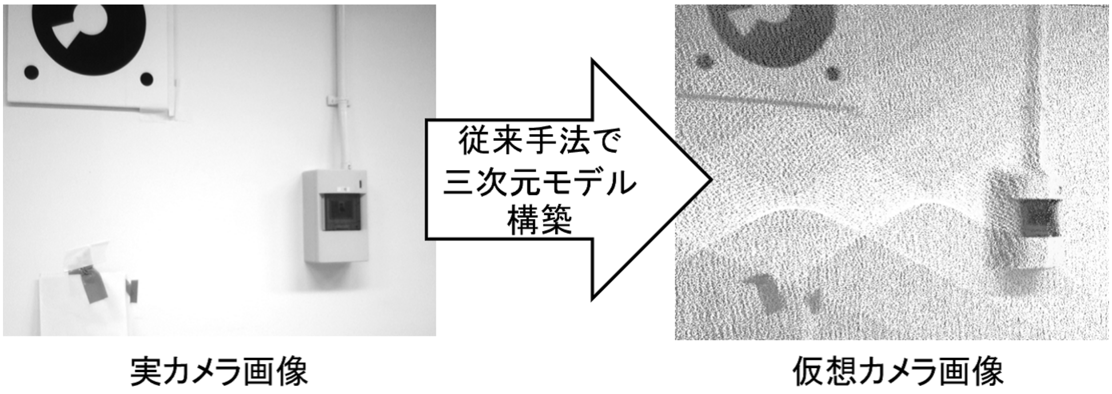


図 3.7: 従来手法 (TPCOSS のモデリングサブシステム) で構築した三次元モデルの例

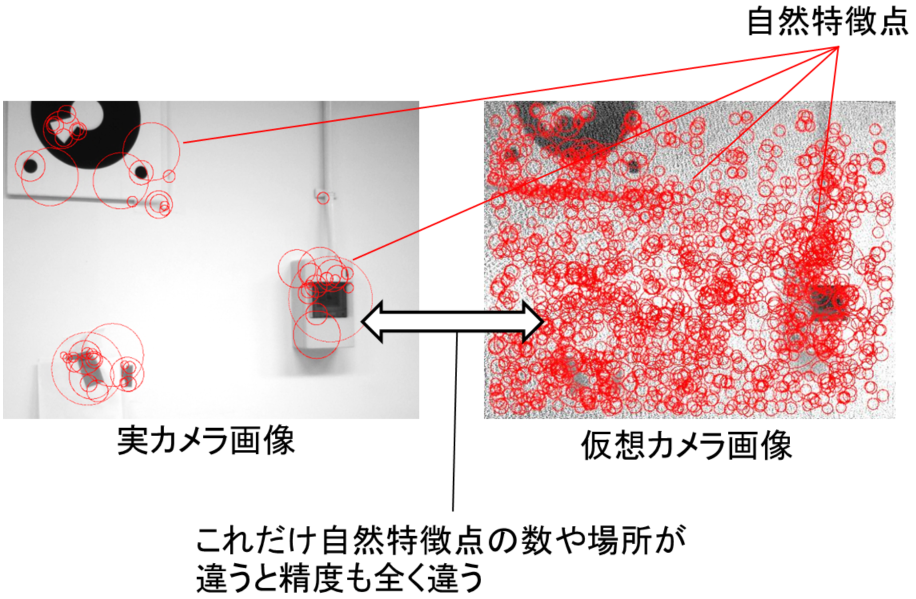


図 3.8: 現実環境を正確に反映していないモデルの例

そこで本研究では、TPCOSS のモデリングサブシステムで得られる三次元モデルを改良する。改良した三次元モデルを用いた仮想空間内でトラッキングの精度を予測したときに予測結果の信頼性が高くなるように改良する。この改良手法については第 3.3 節で述べる。

一方、シミュレーションにおいて、対象領域のカメラが移動する可能性のある箇所は位置と方向の組み合わせによって無限通り存在するため、全ての箇所を予測することはできないという問題がある。そこで、この問題を解決するため、カメラが移動す

る箇所を離散化する方法が考えられるが、離散化してもその全てを予測するのは膨大な時間がかかる。例えば、図 3.9 に示すように、10m × 2m × 10m の大きさの空間を対象として、1cm の格子点上を全点予測する場合を想定した場合、予測点数は約 2 億点となり、毎秒 10 点予測したとしても、約 230 日の処理時間が必要である。そこで本研究では、この問題を解決するため、予測結果の信頼性を保ちつつ予測点数を削減し、シミュレーションを効率良く行う手法を提案する。

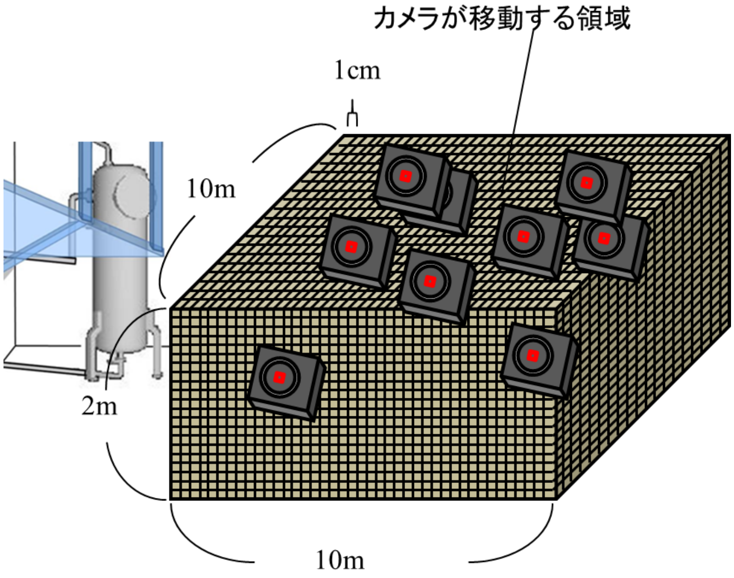


図 3.9: カメラの移動箇所の例

ここで、図 3.10 に示すように、少しだけカメラを移動させてトラッキングを実行したとき、その実行箇所が、カメラ画像に写っている自然特徴点の種類や配置にほとんど違いがないような近い箇所であった場合は、それら二箇所のトラッキング精度にほとんど差がないと考えられる。一方、大きく移動させた場合はカメラ画像が大きく違うため、トラッキングの精度がどの程度違うのか不明である。つまり、ある計測点の周りには、トラッキングの精度にほとんど違いがない領域が存在する。したがって、図 3.11 に示すように、ある領域内のトラッキング精度は、その領域の代表点におけるトラッキング精度と同じであると考えられる。そこで本研究では、精度予測の不足箇所がないように予測対象領域を適切に分割し、各領域の代表点をカメラの移動箇所として設定することで効率よく精度を予測する手法を提案する。以下、本手法を PTAN(Prediction of Tracking Accuracy with Natural feature) と呼ぶ。この手法については第 3.4 節で詳しく述べる。

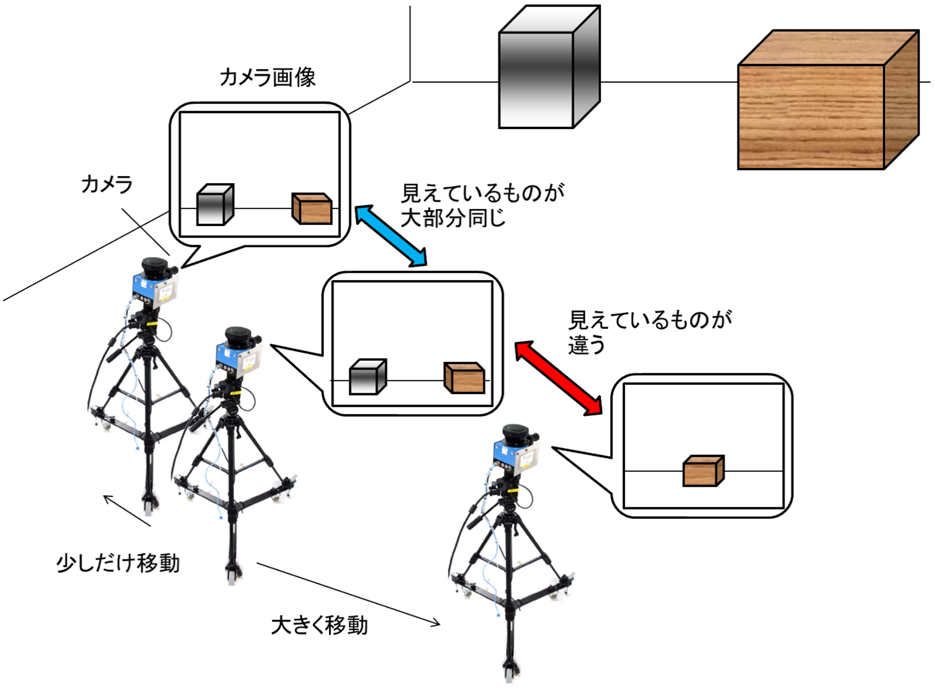


図 3.10: 場所の違いによるカメラ画像の違い

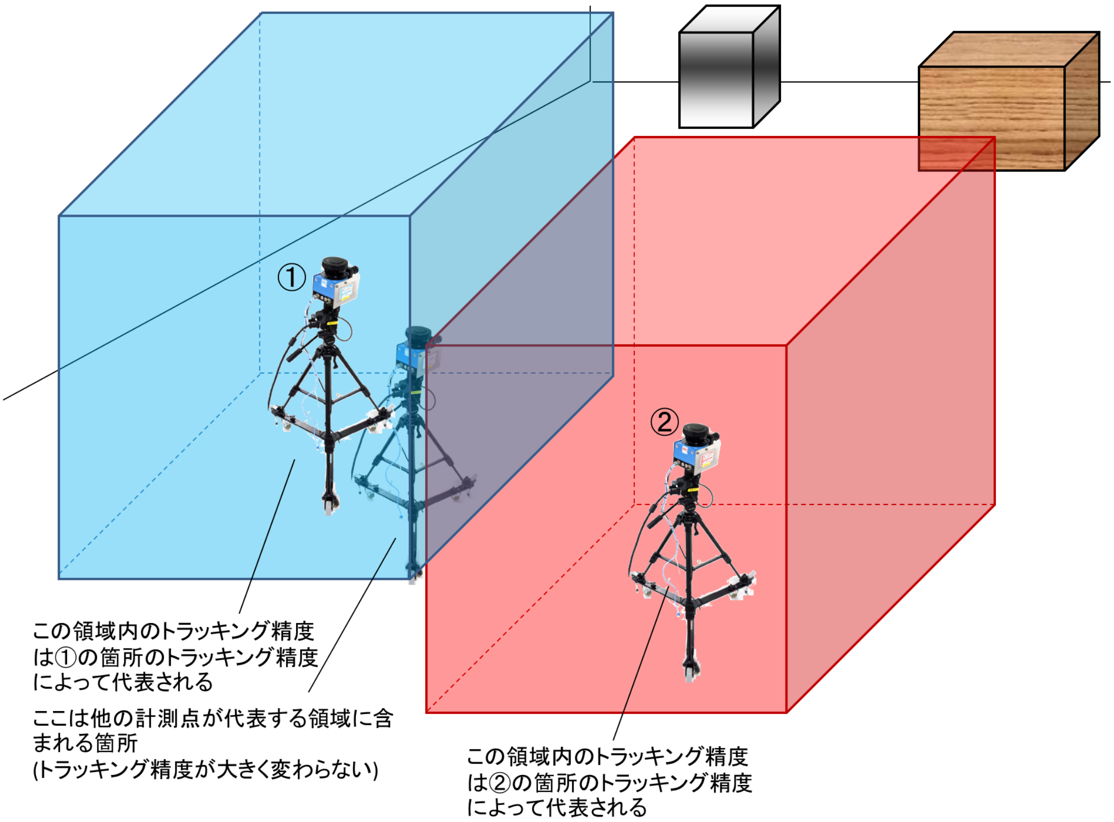


図 3.11: トラッキングの精度を考慮した領域の代表

3.3 環境の三次元モデルの構築

3.3.1 環境の三次元モデルリングシステムの改良点

原子力発電プラントにおいては、部屋の三次元 CAD(Computer Aided Design: CAD) データが存在する場合があるが、そのほとんどの場合、実際の環境を正確に反映した詳細なデータではない。さらに、解体作業中は対象環境の様子が変化するため、その変化を反映した三次元モデルを毎回手作業で作成するのは非常に手間がかかる。

そこで本研究では、第 3.1 節で述べたように環境のモデリングのために、当研究室で開発した TPCOSS のモデリングサブシステムを用いるが、構築される三次元モデルが現実環境を正確に反映するように改良して用いる。

本研究で用いるレーザレンジファインダは、図 3.12 に示すように、ある方向にレーザを照射し、レーザが反射する点までの距離を取得する。レーザを水平方向の一定範囲の角度で走査させ、環境のある線上をレーザの照射される間隔によって離散的に広くスキャンすることができる。

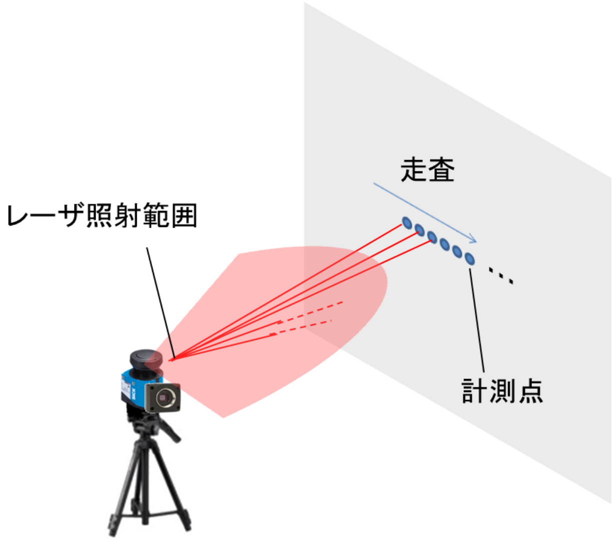


図 3.12: レーザレンジファインダによる環境のモデリングシステム概略図

図 3.13 に示すように、レーザを照射する上下方向 ϕ とレーザレンジファインダの正面が向いている水平方向 ω を電動雲台によって動かすことで、環境を様々な角度からスキャンする。

このとき距離計測と同時にカメラを用いて周囲の環境を撮影する。このとき取得した画像により 256 階調の色情報を取得する。本研究で用いるトラッキング手法では、色

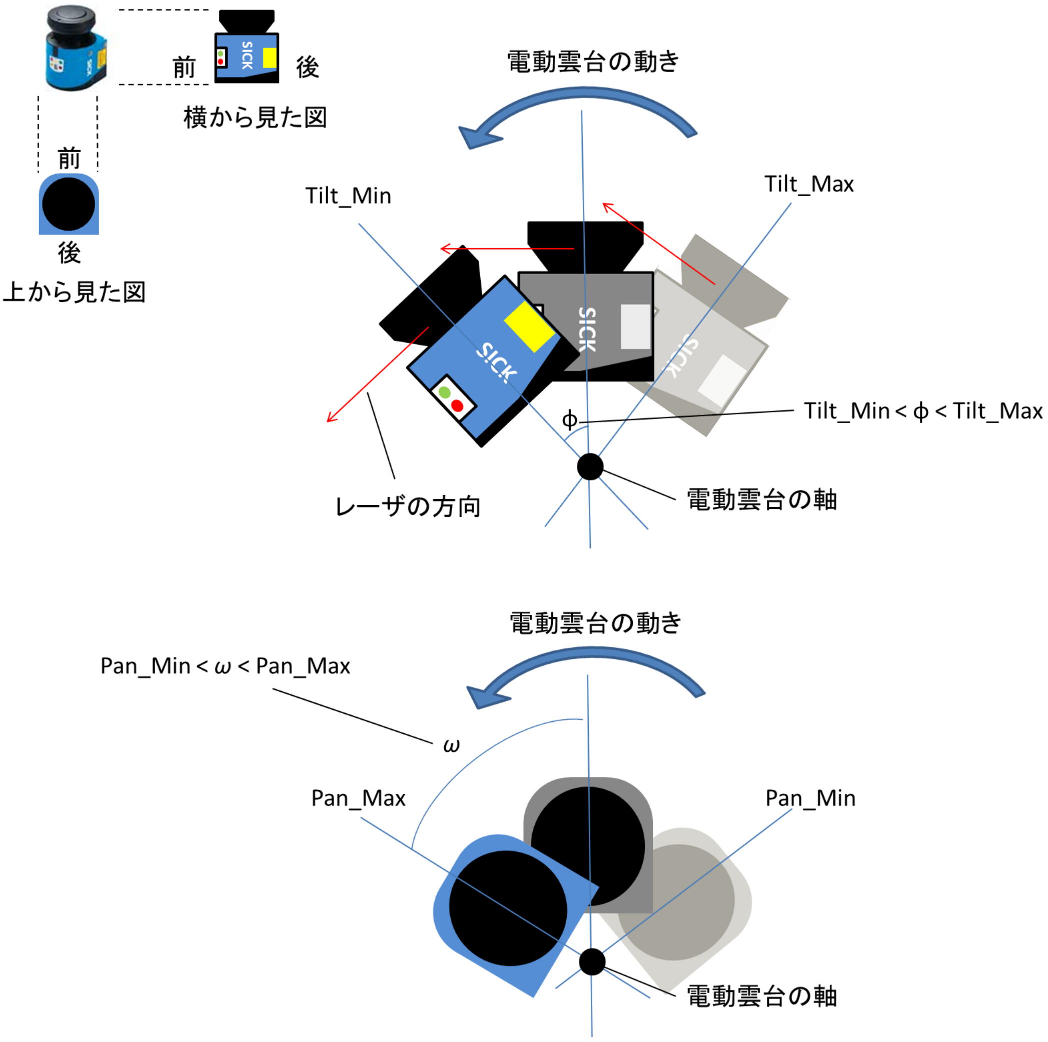


図 3.13: レーザレンジファインダの動き

情報が必要であるため、取得した点群形状モデルに対してカメラ画像を用いて色情報を付加する。

また、一方向からのスキャンだけでは、手前にある物体の背後にある物体が隠れてしまうような状態 (オクルージョン) が発生する可能性が高いため、環境を正確に反映することができない場合が多い。そこで本研究では、オクルージョンが発生するような環境の場合は、この計測システムを環境中の様々な箇所に移動させ、計測を繰り返して取得したデータを ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム [7] を用いて統合し、オクルージョンのない三次元形状データを取得する。ICP アルゴリズムについては第 3.3.2 項で述べる。

さらに、構築される環境の三次元モデルは、電動雲台の座標系、レーザレンジファインダの座標系、カメラ座標系のそれぞれを世界座標系に変換して構築される。このと

き、各座標系の世界座標系への変換がずれていると、現実を正確に反映しないモデルが構築されてしまう。そこで、各座標系の世界座標系への変換を正確に行うため、計測機器のキャリブレーションをする必要がある。本研究では、このキャリブレーションの手法を提案する。この手法については第 3.3.3 項で詳しく述べる。

また、ICP アルゴリズムによる複数の形状データの位置合わせと計測機器のキャリブレーションだけでは、仮想カメラの位置を決めて画像をレンダリングしたときに第 3.1 節で述べたように穴の開いた画像になってしまう。本研究では、この穴の開いた箇所を埋める手法を提案する。この手法については第 3.3.4 項で詳しく述べる。

3.3.2 ICP アルゴリズム

複数箇所から三次元形状データを計測したとき、それぞれの座標系は異なる。これらの座標系間の位置関係を推定する処理は、一般的に位置合わせと呼ばれている。ICP アルゴリズムは、位置合わせの一種であり、部分的な三次元形状データと、目標となるモデル形状データとの位置合わせを対応関係が正確に分かっていない状況で実行する手法である。ICP アルゴリズムにより位置合わせを行うためには、位置合わせを実行する形状モデルの初期位置によっては正しくない局所解に陥る可能性があるため、まず大まかな位置合わせが既知である必要がある。本研究では、図 3.14 に示すように、大まかな位置合わせを手動で実行した後、その状態を初期値として、細かい位置合わせを実行する。大まかな位置合わせでは、局所形状間の対応付けが行われ、細かい位置合わせでは、対応点間の距離誤差関数の最小化問題に帰着される。このくり返しにより位置合わせの最適解を求めることができる。

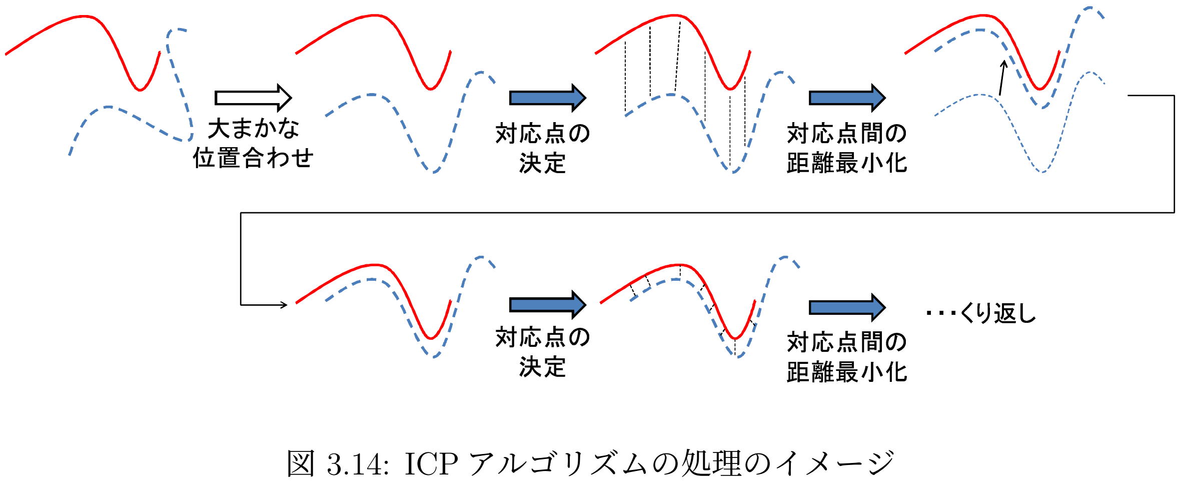


図 3.14: ICP アルゴリズムの処理のイメージ

3.3.3　計測機器のキャリブレーション

カメラとレーザレンジファインダは、電動雲台の座標系の原点から図 3.15 に示すように設置される。レーザレンジファインダで得られる距離データはレーザ照射源を原点にする座標系から得られる値であり、カメラ画像はカメラの焦点を原点とする座標系から得られる画像である。座標系を変換して合わせるためには各機器の歪みや位置・方向のずれを正確に知る必要がある。本研究では電動雲台の座標系を基準として、全ての計測機器の座標系を合わせるため、電動雲台の座標系の原点を基準点としたときのレーザレンジファインダのオフセットとカメラのオフセットを正確に求め、世界座標系と各座標系を正確に合わせる。

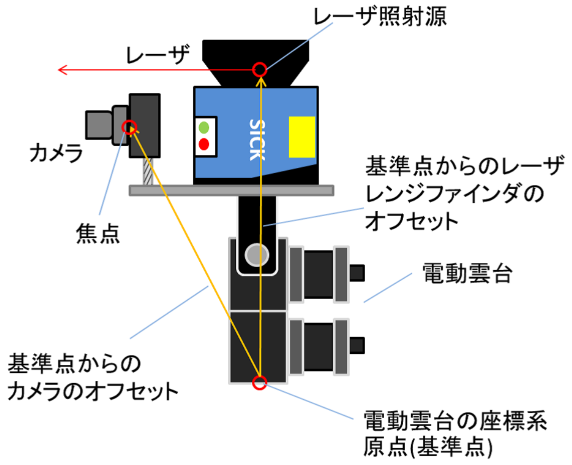


図 3.15: 計測システムの各機器の配置

本研究では以下に示す計測機器のキャリブレーションを行い、より精度よく現実環境の反映ができるように三次元モデルを改良する手法を提案する。なお、カメラレンズの歪みパラメータの取得には既存の手法である Camera Calibration Toolbox for Matlab[12] を用いて行う。

レーザレンジファインダの位置・方向のずれ

電動雲台によって、レーザレンジファインダは図 3.16 に示すように、垂直方向を上下に動き、計測範囲は垂直方向に広がる。さらに電動雲台によって、レーザレンジファインダは図 3.17 に示すように、水平方向を左右に動き、計測範囲は水平方向に広がる。

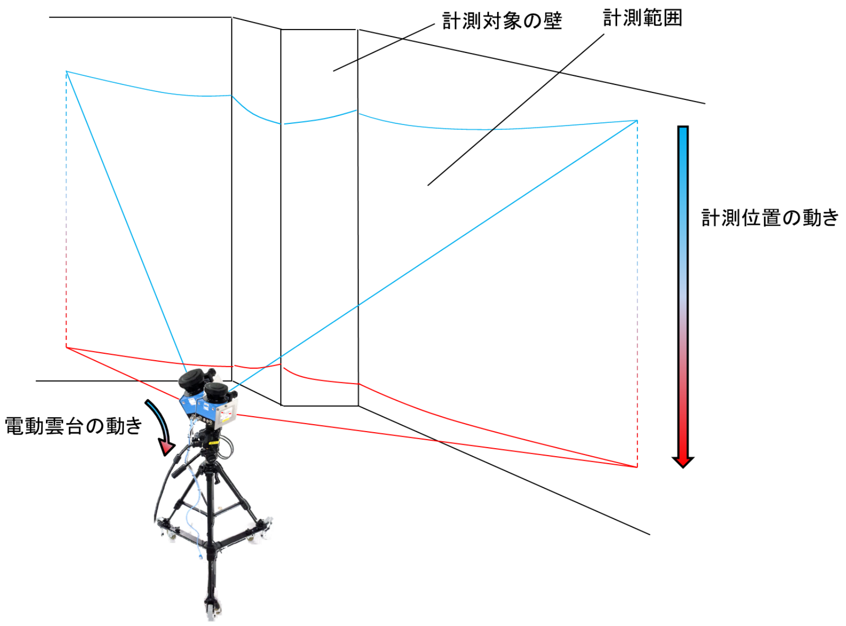


図 3.16: レーザレンジファインダの動きと計測範囲 (上下)

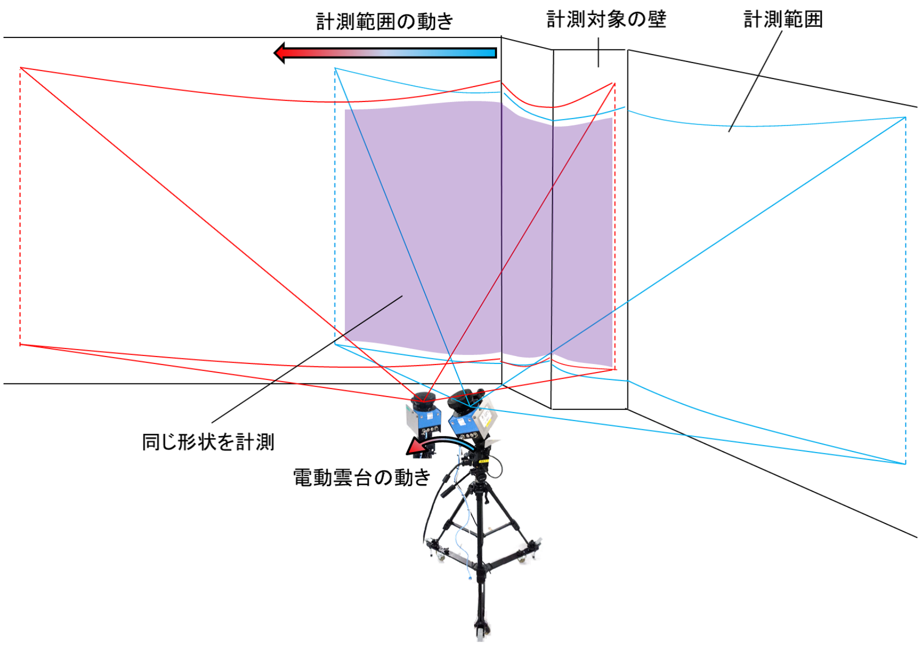


図 3.17: レーザレンジファインダの計測の動きと計測範囲 (左右)

以上のように電動雲台によって、レーザレンジファインダの計測方位を上下左右に動かして計測すると、図 3.18 に示すように、同じ形状を繰り返し計測している領域が多数存在する。

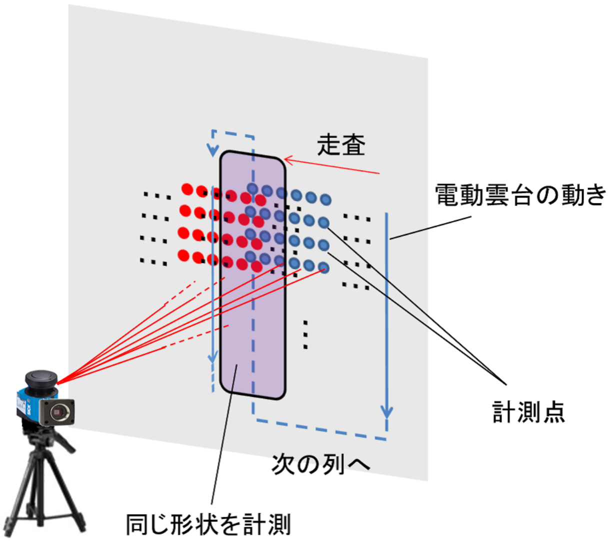


図 3.18: レーザレンジファインダの計測の動きと計測範囲 (重なり部分)

本研究では、この共通計測領域を用いて形状データの位置合わせを行い、レーザレンジファインダの位置・方向パラメータを探索する。具体的な方法を以下に述べる。

求めるパラメータはレーザレンジファインダの回転角度と回転速度、世界座標系への座標変換である。レーザレンジファインダのオフセットは、手計測によって得られた値を初期値として用いる。ここで、図 3.19 に示すように、共通領域に存在する全点の近傍 r mm 以内に存在する、他のタイミングで取得した計測点の個数を調べる。この合計数 S は、計測形状が最も合致する位置・方向に移動させたときに最も多くなるはずである。

そこで本研究では、各パラメータを初期値から少しずつずらす。このとき、元のパラメータのときより計測近傍点の合計数 S が増加していれば再度パラメータをずらして S の値を比較する。これを繰り返してどのパラメータを変化させてもずらす前のパラメータでの S が最も大きい場合、ずらすパラメータの大きさを前回ずらした大きさの半分にしてずらして比較をする。これを繰り返す。ずらす回数とずらす大きさを半分にする回数にそれぞれしきい値を設定しておき、どちらかがしきい値になったときに終了とする。以上のようにして、レーザレンジファインダの位置・方向パラメータを最適化することでレーザレンジファインダの位置と方向のキャリブレーションを実現する。

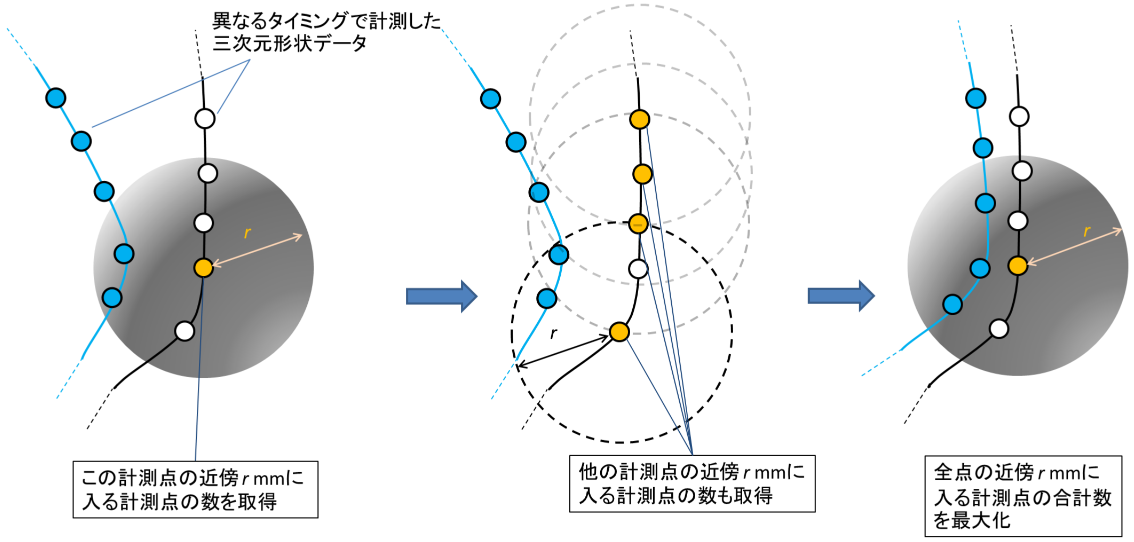


図 3.19: 複数の形状データの位置合わせ

カメラの位置・方向のずれ

ここで求めるパラメータはカメラの世界座標系からみた焦点位置と方向である。計測された形状モデル内の全ての点はカメラから見た三次元位置・方向が計算できるので、図 3.20 に示すように、ある点がカメラで撮影される画像内のどのピクセルに投影されるか計算することができる。

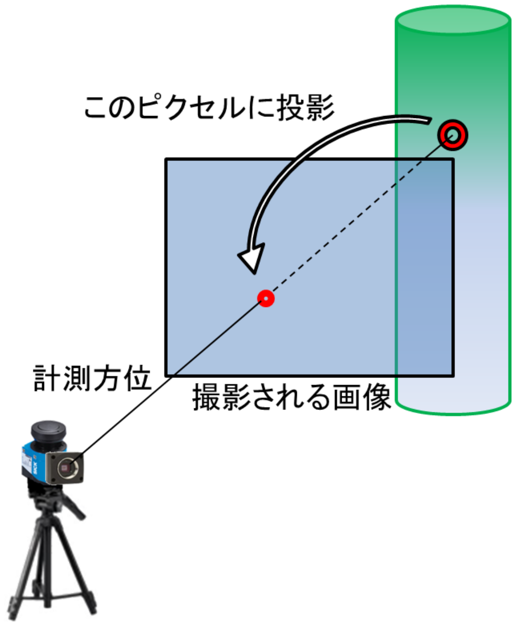


図 3.20: カメラで撮影される画像と撮影対象の対応関係

さらに、図 3.21 に示すように、その点が投影されうる全ての画像について、この計算を行う。本来はこれらの全てのピクセルは同じ点を投影しているので同じ色のはずである。

そこで本研究では、レーザレンジファインダのキャリブレーションのときと同様に各パラメータを少しずつずらして、各パラメータにおける各点の色差の絶対値を合計した値 C を比較する。これを繰り返してどのパラメータを変化させてもずらす前のパラメータでの C が最も小さい場合、ずらすパラメータの大きさを前回ずらした大きさの半分にしてずらして比較をする。これを繰り返す。ずらす回数とずらす大きさを半分にする回数にそれぞれしきい値を設定しておき、どちらかがしきい値になったときに終了とする。以上のようにして、カメラの位置・方向パラメータを最適化することで、カメラの位置と方向のキャリブレーションを実現する。

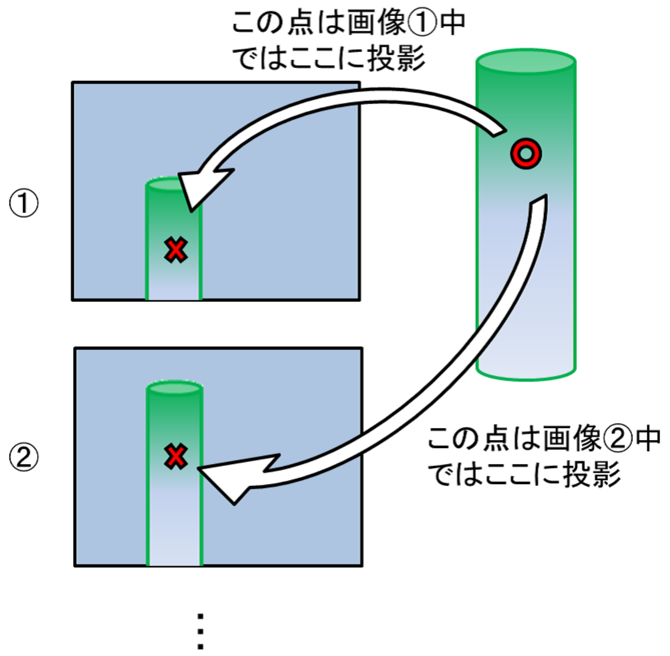


図 3.21: 撮影画像と撮影対象の対応関係計算の繰り返し

3.3.4　環境の三次元モデルの穴埋め

3.3.1 項で述べたように生成された仮想カメラ画像に穴が多く存在すると、現実環境に即した自然特徴点を用いたトラッキングの精度を予測することができないため、仮想カメラ画像の穴を埋める必要がある。

以下に画像の穴を埋めるアルゴリズムについて順に説明する。

全ての計測点を投影

全ての計測点が、生成される仮想写真のどのピクセルに投影されるのか計算する。

補間の対象ピクセル 0 の設定

画像上で計測点が投影されていないピクセルを、図 3.22 に示すように補間の対象ピクセル 0 に設定する。

投影済みのピクセルを用いたピクセル 0 の線形補間

ピクセル 0 の上下左右方向で一番近い投影済みのピクセルの投影元の点を取得する。補間対象点がこれらの点の直線上にあるとして、図 3.23 に示すように、直線上のピクセル数の比を用いて三次元空間において線形補間を行う。

補間点の採用

上下方向、左右方向でそれぞれ異なる点が計算されうるが、補間点を決めるための上下の 2 点と左右の 2 点の直線距離が短い方の補間点を採用する。ただし、この計算された異なる補間点 2 点間の距離がしきい値以上である場合は、補間の信頼性が低いと判断して穴を埋めない。

実写真から補間点の色を取得

補間点の座標が決定した後、図 3.24 に示すように、その点が実写真のどこに写っているのか計算し、実写真から補間点の色を取得し、画像の穴を埋める。

～　を繰り返し、穴埋めの処理の前後の点の数が等しくなるまで続ける。間違って埋めてしまう穴が発生する可能性や、穴が全て埋まらない可能性が残るが、この三次元モデルを用いて自然特徴点を検出した結果については、第 4.3.1 項で評価する。

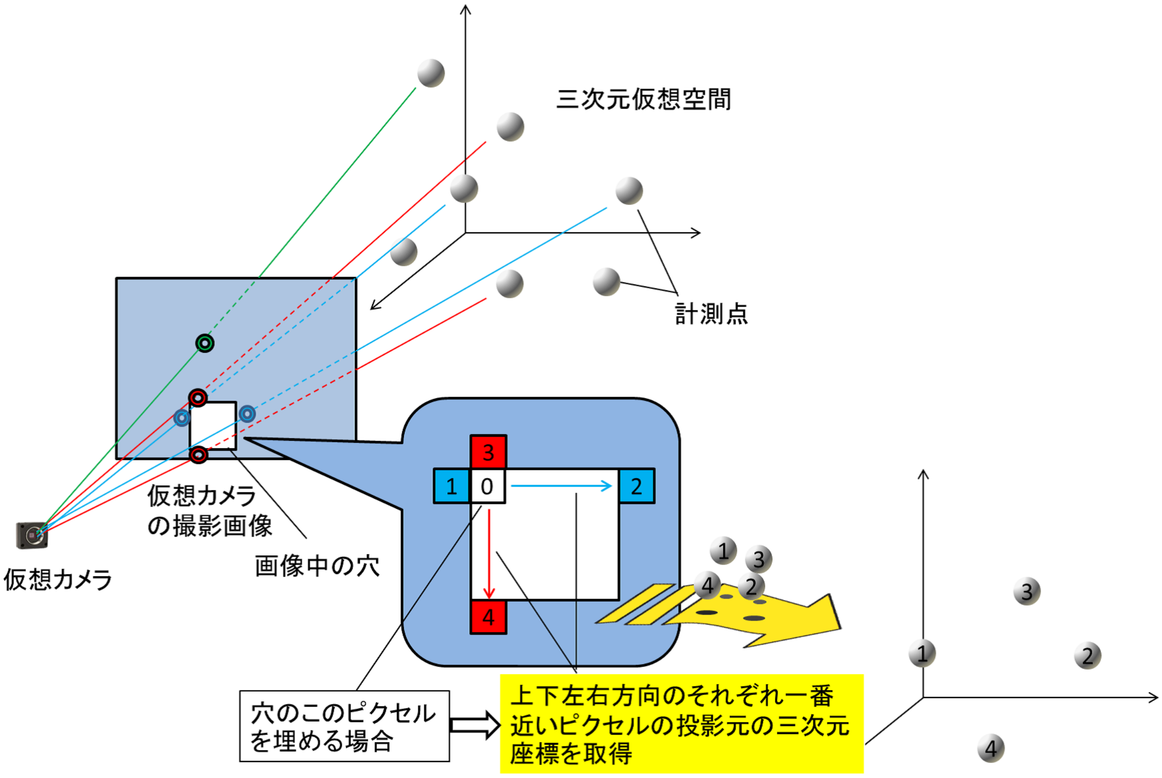


図 3.22: 補間点の決定

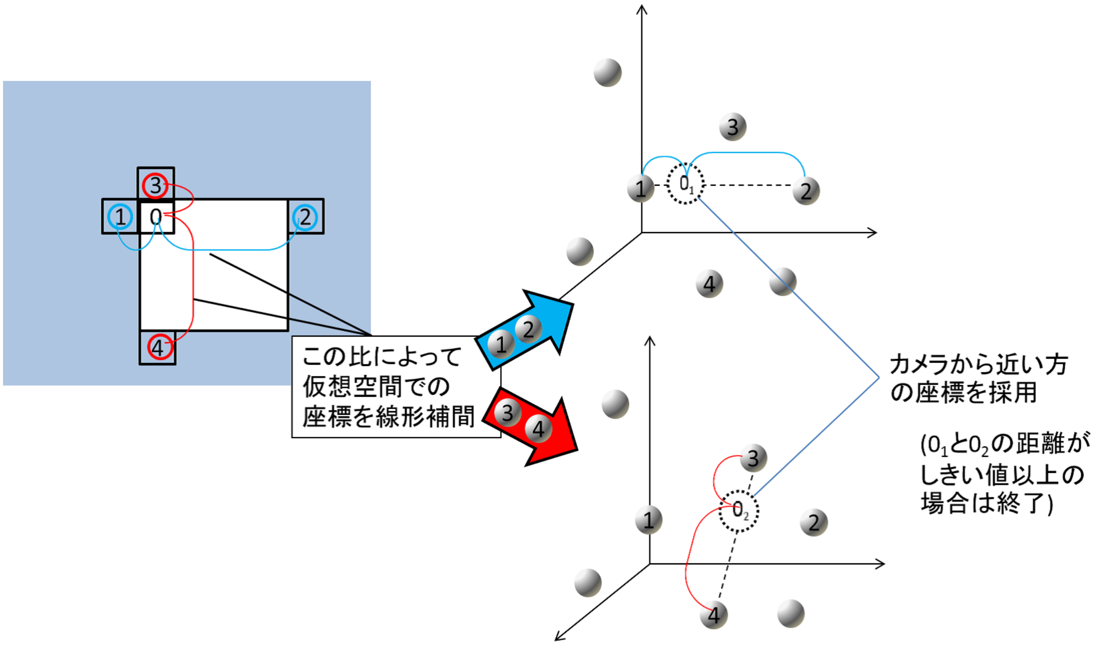


図 3.23: 補間点の座標の決定

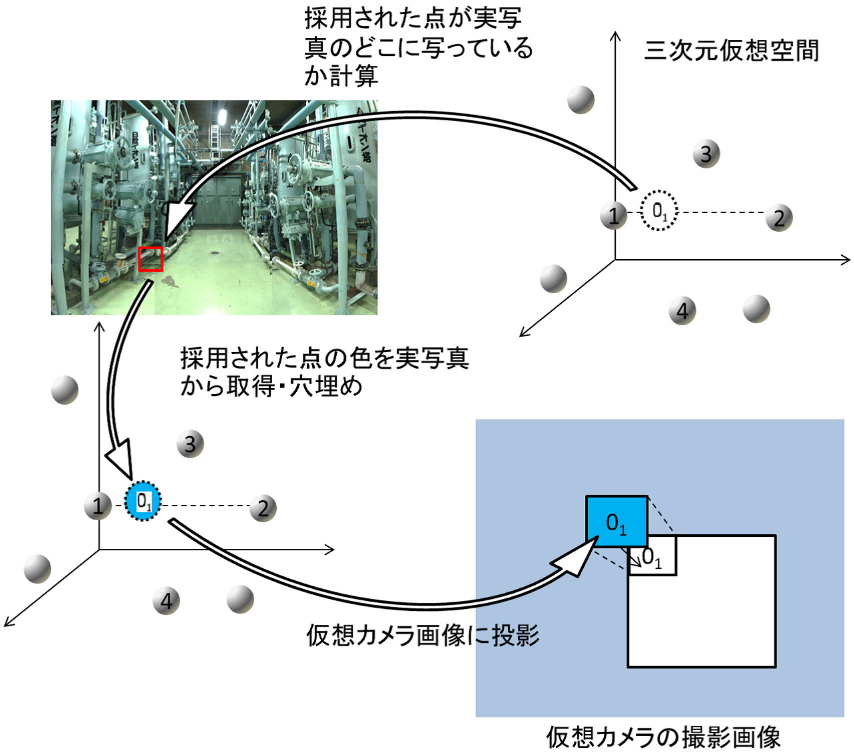


図 3.24: 補間点の色の決定

3.4 シミュレーションによるトラッキング精度予測

3.1 節で述べたように、本研究では、シミュレーションによってトラッキングの精度を効率よく予測するために、対象領域を分割し、各領域の代表点でのみトラッキングシミュレーションを実行する。この対象領域の代表点の決め方と分割方法を本節で述べる。

3.4.1 シミュレーションによるトラッキング精度予測の概要

本研究では、対象領域を立方体単位で分割し、立方体の中心を代表点と考える。このとき、トラッキングの精度を予測するためには、まず予測の対象となる領域を図 3.9 で示したように、細かい立方体領域に分割し、各々の空間に対して予測をする手法が考えられる。しかし、第 3.2 節で述べたように、対象空間を細かく分割してカメラが移動し得る全ての箇所を予測の対象とすると、計算量が膨大となる問題がある。

そこで本研究では、まず対象領域において予測点を大まかな格子点上に設定してト

ラッキングの精度を予測し、精細な評価が必要と判断できる箇所のみより精細な予測点を設定する。これを段階的に繰り返すことにより必要最少限の評価点だけで効率よくトラッキングの精度を予測する手法を提案する。詳細は第 3.4.2 項で述べる。

3.4.2　効率の良いトラッキング精度予測

本研究では、図 3.25 に示すように隣接する二点を比較し、その二点の精度の差が大きいとき、二点間の八面体領域中にはトラッキングの精度が大きく違う箇所が存在すると考える。

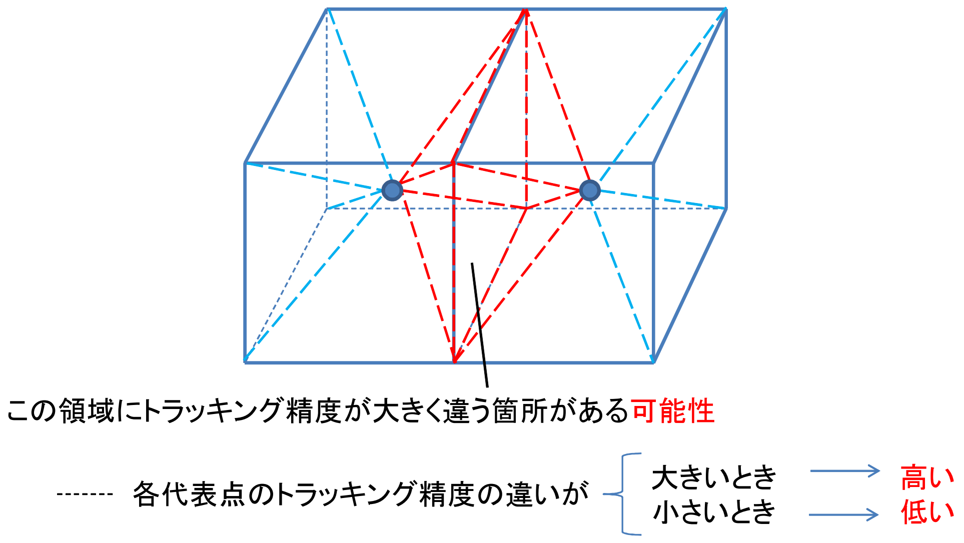


図 3.25: 二点間の比較領域

このとき、二点の比較によって、この領域内の予測が不十分であると判断できる場合、図 3.26 に示すようにして予測点を追加する。不十分であると考えられる精度差はあらかじめ設定したしきい値を用いる。

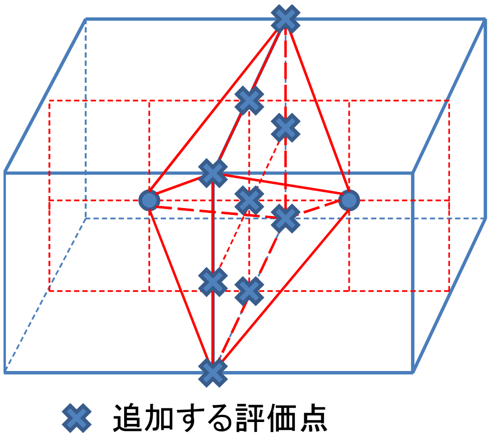


図 3.26: 評価点を 9 点追加

これによって、図 3.27 に示すように、予測点が代表する領域が小さくなり、より詳細な空間の代表点として予測をするができる。

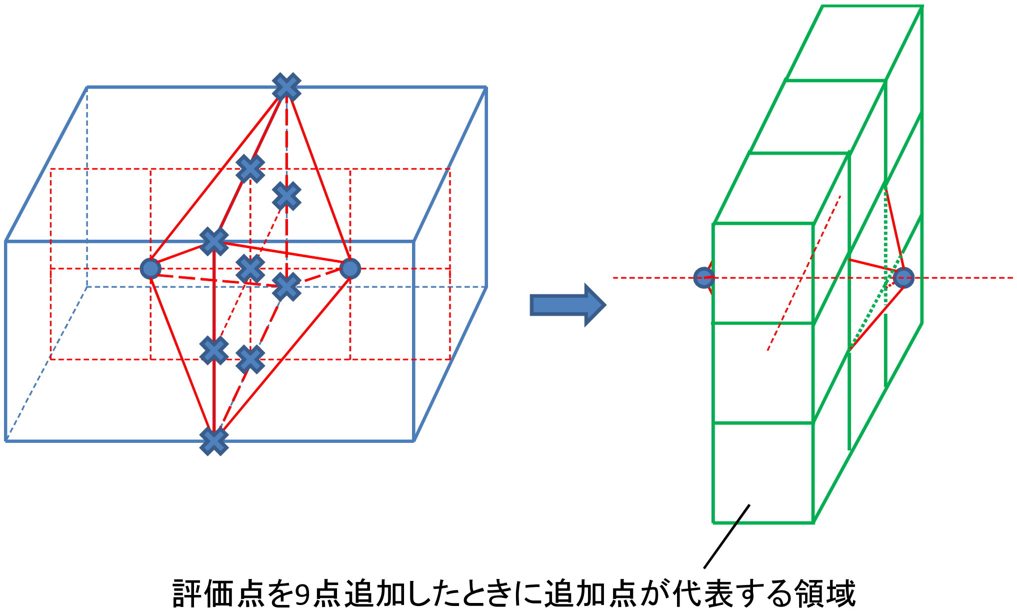


図 3.27: 評価点を 9 点追加したときに追加される代表領域

予測が不十分な立方体領域の一辺の長さを半分にした、ひとまわり小さい立方体領域の代表点として新たに 9 点の予測点を追加し、さらに比較した元の代表点も新規追加の代表点との比較を行う。この比較を新しい予測点で繰り返して、どの比較をみても精度差がしきい値より小さければそれ以上は詳細に予測点を追加しない。比較の結

果、精度差がしきい値以上の場合は、その比較箇所の間の領域において、半分の大きさの格子点を同様に追加して再度比較をする。これを繰り返す。

いま、9 点を新規追加するアルゴリズム (以下「9 点追加アルゴリズム」とする) を提案したが、さらに図 3.28 に示すように、新たに 5 点を新規追加するアルゴリズム (以下「5 点追加アルゴリズム」) も提案する。

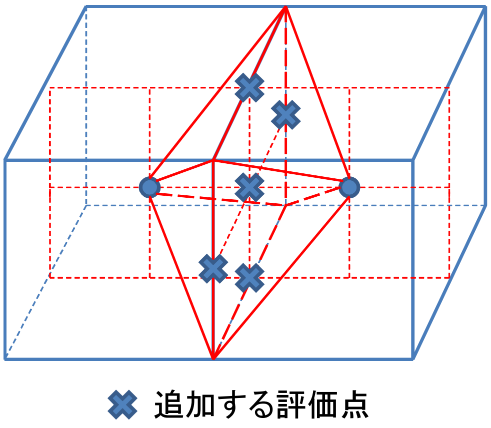


図 3.28: 評価点を 5 点追加

この 5 点追加アルゴリズムは 9 点追加アルゴリズムに比べて図 3.29 に示すように評価空間の網羅性は低くなるが、対象環境によっては十分な信頼性を持てる可能性がある上、全体の処理速度は向上できる。

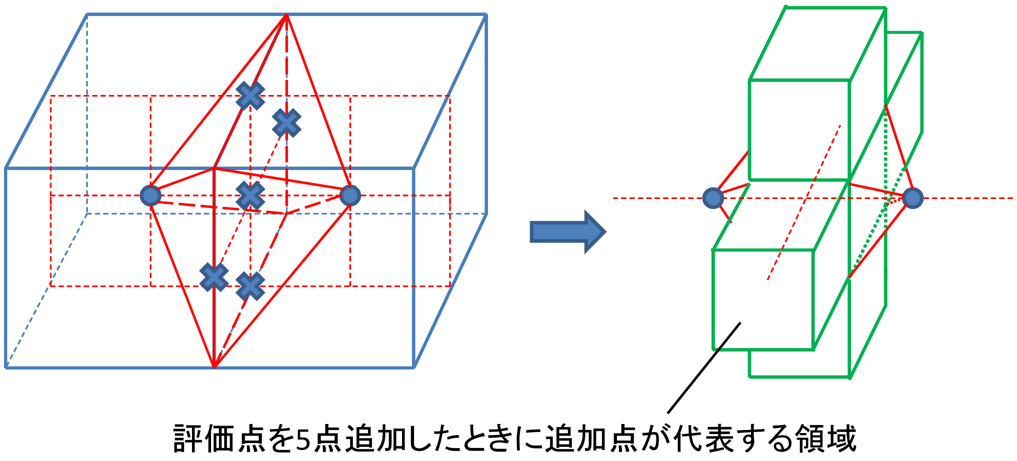


図 3.29: 評価点を 5 点追加したときに追加される代表領域

図 3.30 に示すようにして、それ以上は分割しないと決められたしきい値の大きさの一辺をもつ立方体領域になるまで比較と分割をくり返し行うことで、効率よく対象空

間全体を予測する。このくり返しを最小格子まで行ったときの予測点の一例を図 3.31 に示す。それぞれの評価点では、参考座標との誤差が計算される。本稿では、この最小格子を「最小ステップ幅」、最初に代表点とする大まかな格子の大きさを「初期ステップ幅」と呼ぶ。

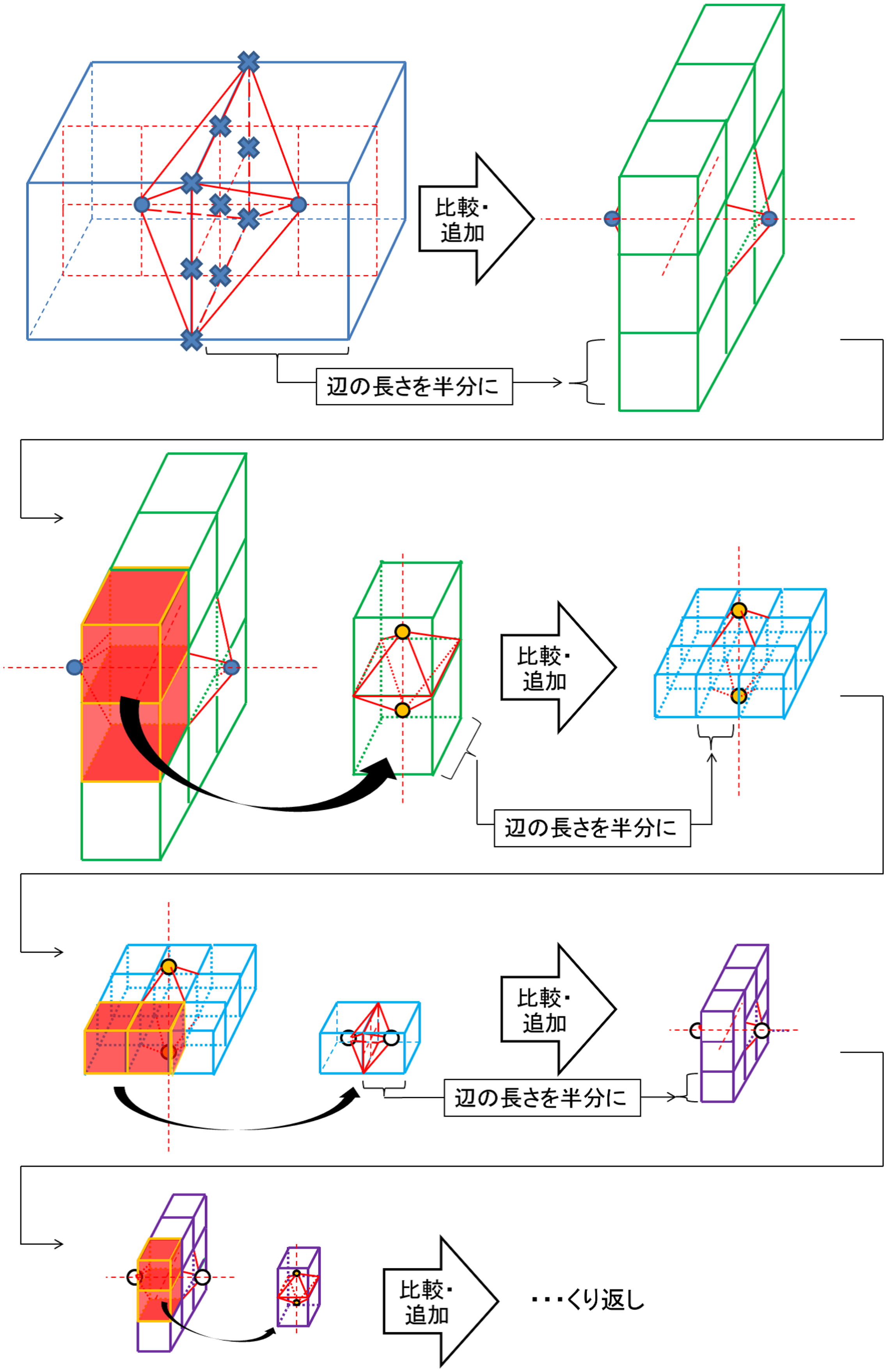


図 3.30: 代表点の比較と領域の追加が繰り返される様子

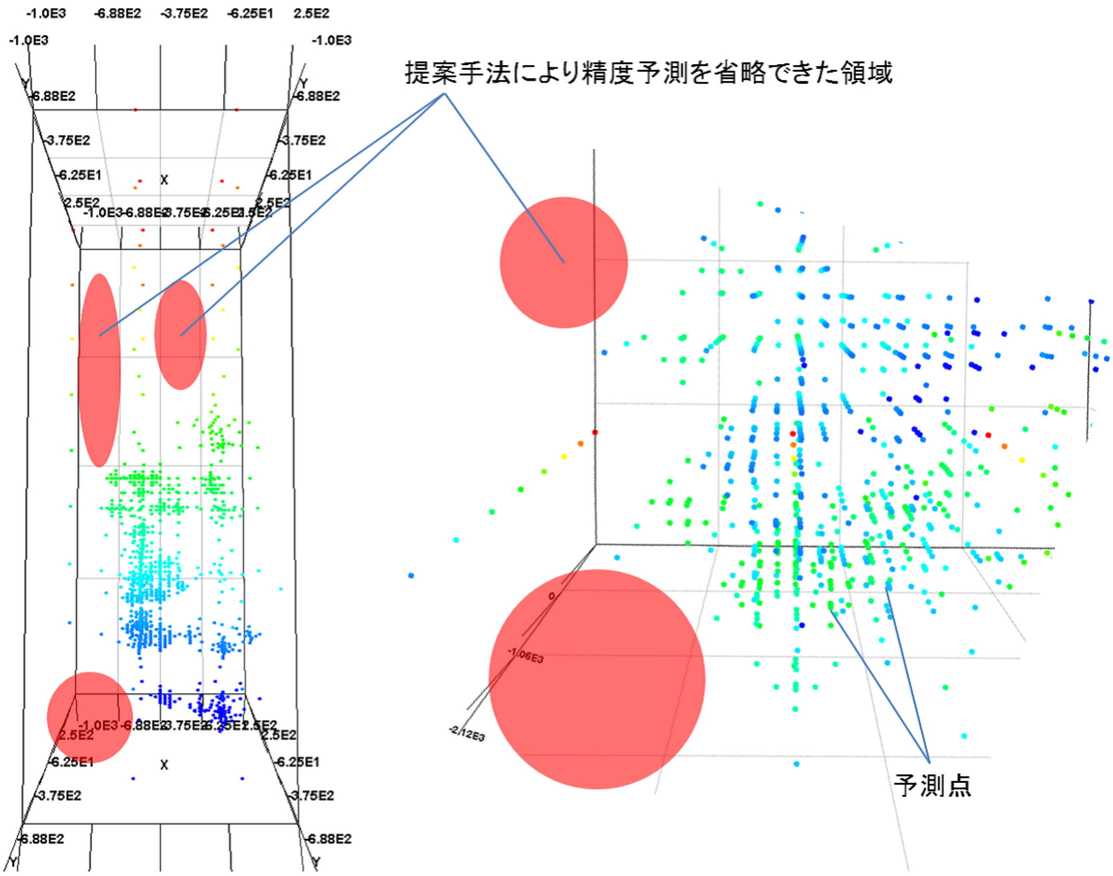


図 3.31: 追加が完了したときの評価点の一例

第 4 章 提案するトラッキング精度予測手法の実装と評価

本章では、PTAN を PC に実装し、実行して得られる結果が、現実環境におけるトラッキング精度に即した結果であるかどうか、PTAN の信頼性を評価することを目的とした実験と結果について述べる。

まず PTAN に使用する環境の三次元モデルを構築するためのモデリングシステムのハードウェア構成と仕様について述べ、PTAN を実装した PC のハードウェアについて述べる。次に、PTAN によって評価する対象となるトラッキング手法と実行環境について述べる。最後に、PTAN の評価方法について述べ、手法の評価と実装したシステムの評価の両方について述べる。

4.1 PTAN の実装

4.1.1 環境のモデリングシステムのハードウェア構成と仕様

シミュレーションに使用する環境のモデリングシステムのハードウェア構成と仕様について述べる。ハードウェア構成を図 4.1 に示し、全体図を図 4.2 に示す。さらにハードウェアの仕様を表 4.1、表 4.2、表 4.3、表 4.4 に示す。対象環境の三次元形状モデルは KIT WARE 社の提供する VTK (The Visualization Toolkit) ライブラリ [13] を用いて構築した。

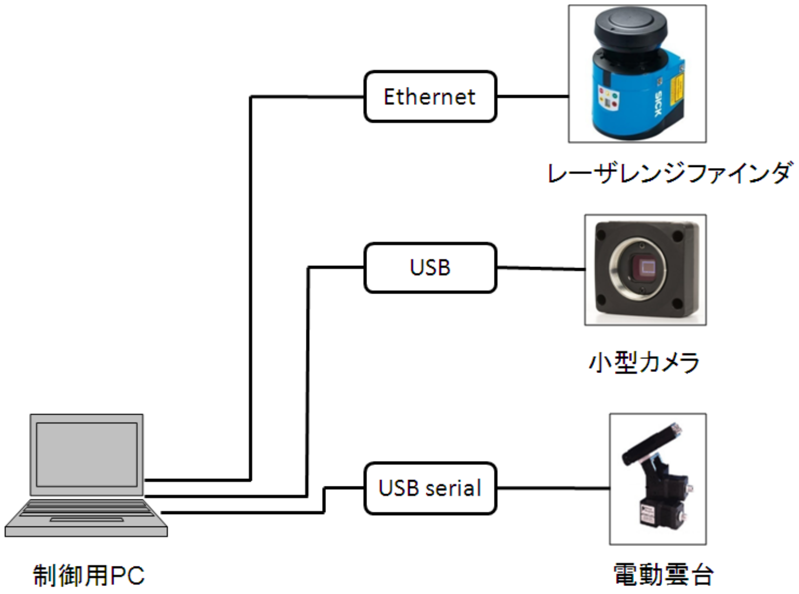


図 4.1: 環境のモデリングシステムのハードウェア構成

図 4.2: 環境のモデリングシステムの全体図

表 4.1: レーザレンジファインダの仕様

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

表 4.2: 環境のモデリングシステムのカメラの仕様

メーカー・型名	Chameleon CMLN-132S2C
画像素子	1/3 インチ EXview HAD CCD ICX445
解像度	1280 × 960　1.3 メガピクセル
インタフェース	USB2.0
最大フレームレート	18 fps
レンズの焦点距離	4.146 mm
スケール	カラー

表 4.3: 電動雲台の仕様

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

表 4.4: モデリングシステムの制御用 PC の仕様

メーカー・型名	lenovo ThinkPad X201s(5129-RA3)
CPU	インテル Core i7-640LM プロセッサー 2.13GHz (Turbo 時 2.933GHz)
メインメモリ	2.92GB
ビデオメモリ	最大 768MB
ディスプレイ	12.1 型 WXGA 液晶
OS	WindowsXP Professional SP3
寸法	幅 295 × 奥行 210 × 高さ 20.7〜28.7mm
重量	1.17kg

4.1.2 PTAN を実装した PC の仕様

PTAN を実装した PC のハードウェアの仕様を表 4.5 に示す。PTAN を用いたシステムは Microsoft Visual Studio 2008 を用いて作成し、開発言語は C++を用いた。

表 4.5: PTAN を実装する PC の仕様

マザーボード	ASRock Z68 Pro3-M
CPU	インテル Core i7-2600K プロセッサー
メインメモリ	16GB
グラフィックカード	GV-N580UD-15I
GPU	GeForce GTX 580
ビデオメモリ	1536MB/GDDR5
OS	Windows 7 Professional SP1 64 ビット

4.2　PTAN により評価する対象のトラッキング手法

本研究では、種々存在する自然特徴点を用いたトラッキング手法のうち、最も基本的な手法としてキーフレームと自然特徴点で構成されるデータベースを用いたトラッキング手法を評価対象とする。

4.2.1　キーフレームと自然特徴点のデータベースを用いたトラッキング

キーフレームと自然特徴点のデータベースを用いたトラッキング手法では、まずデータベースのキーフレームと自然特徴点情報を全て計算機のメモリに読み込む。次に、図 4.3 に示すように、読み込んだキーフレームからカメラ画像に最も合うキーフレームを検索する。ここで、検索するときのカメラ画像はキーフレームと同じ解像度まで落としている。検索されたキーフレームを取得したときのカメラの位置・方向を現在の推定したいカメラの仮の位置として設定する。

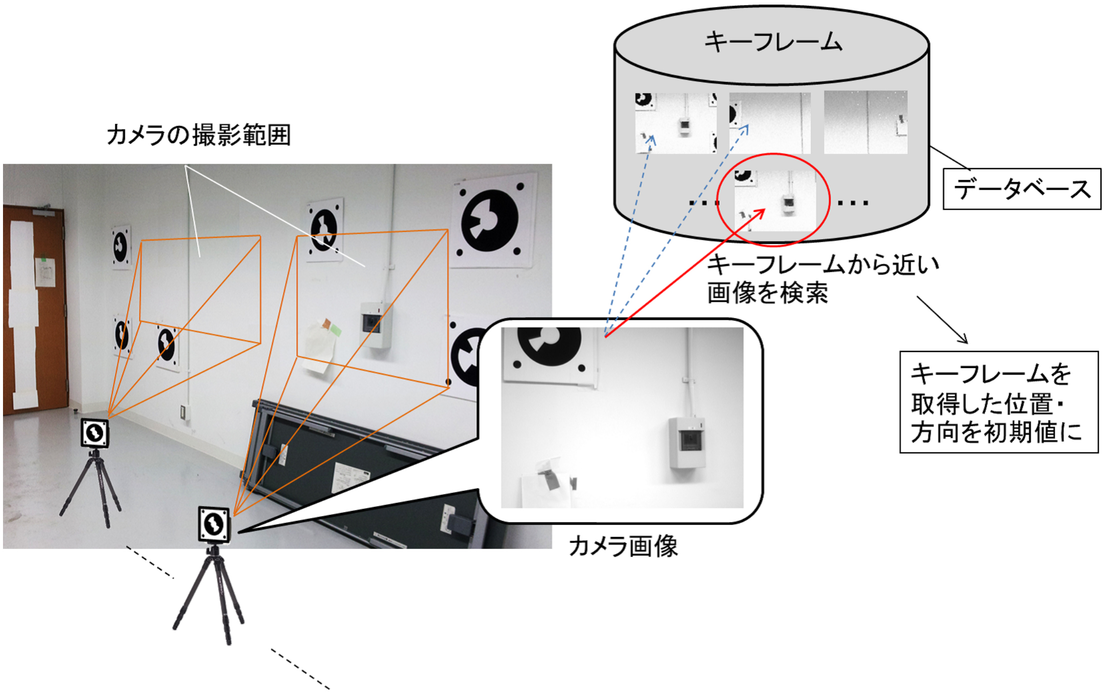


図 4.3: データベースを用いたトラッキング手法の概略図 (キーフレーム)

続いて、この仮の位置を用いてデータベースの各自然特徴点が現在のカメラ画像に写るかどうか調べる。写る自然特徴点があれば、図 4.4 で示すようにデータベースから似た特徴点を検索してペアを作る。このペアの距離誤差の合計 D が最も小さくなるように、カメラの位置・方向を少しずつずらして再投影を繰り返す。ずらす前の位置・方

向での D が最も小さい場合、ずらす位置・方向の大きさを前回ずらした大きさの半分にしてずらして比較をする。これを繰り返す。ずらす回数とずらす大きさを半分にする回数にそれぞれしきい値を設定しておき、どちらかがしきい値になったときに終了とする。高速化のため、ずらす最大数は設定しておき、その回数分のずれはあらかじめ計算しておく。以上のようにして、自然特徴点のデータベースを用いて仮の位置を補正することによって、キーフレームだけのトラッキングより正確に推定する。

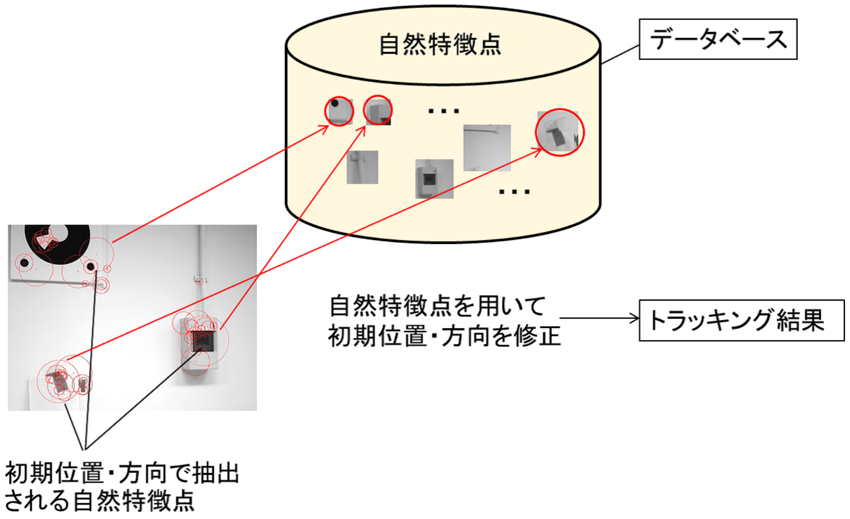


図 4.4: データベースを用いたトラッキング手法の概略図 (自然特徴点)

4.2.2 キーフレームと自然特徴点のデータベース構築

キーフレームの作成

キーフレームの作成は、図 4.5 に示すように、カメラ画像を元にして解像度を落とした画像を生成し、キーフレームとする。本研究では、元の画像の 8 ピクセルごとに 1 ピクセル取り出して生成したピクセル数を 64 分の 1 まで減らした画像をキーフレームとした。表 4.6 に元の画像とキーフレームの解像度を示す。キーフレームを取得したカメラの位置・方向情報をキーフレームと一緒にデータベースへ格納する。

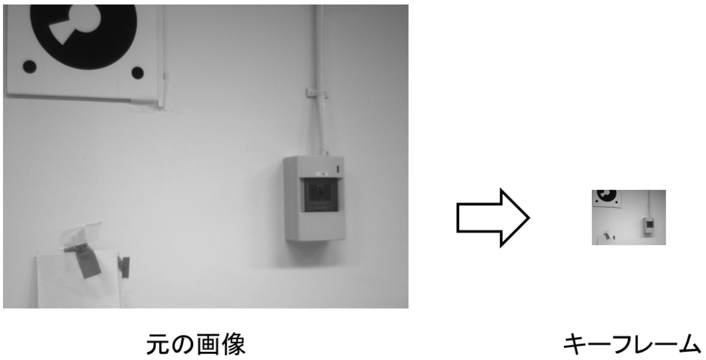


図 4.5: キーフレームの作成の概要図

表 4.6: カメラ画像と作成したキーフレームの解像度

	解像度
カメラ画像	320 × 240
キーフレーム	40 × 30

SURF による自然特徴点の抽出

本研究では、第 2.3 節で述べたように処理時間と自然特徴点のマッチングの安定性のバランスがとれている SURF[8] を用いる。この SURF を用いて検出される自然特徴点の位置と方向、1 つの自然特徴点に対して 128 次元の特徴ベクトルを自然特徴点情報としてデータベースに格納する。

キーフレームと自然特徴点のデータベースは、環境の三次元モデルを用いた仮想空間内で、図 4.6 に示すように仮想カメラを格子点上で移動させて、仮想カメラ画像を取得する。取得した仮想カメラ画像を用いてキーフレームと自然特徴点のデータベースを構築する。

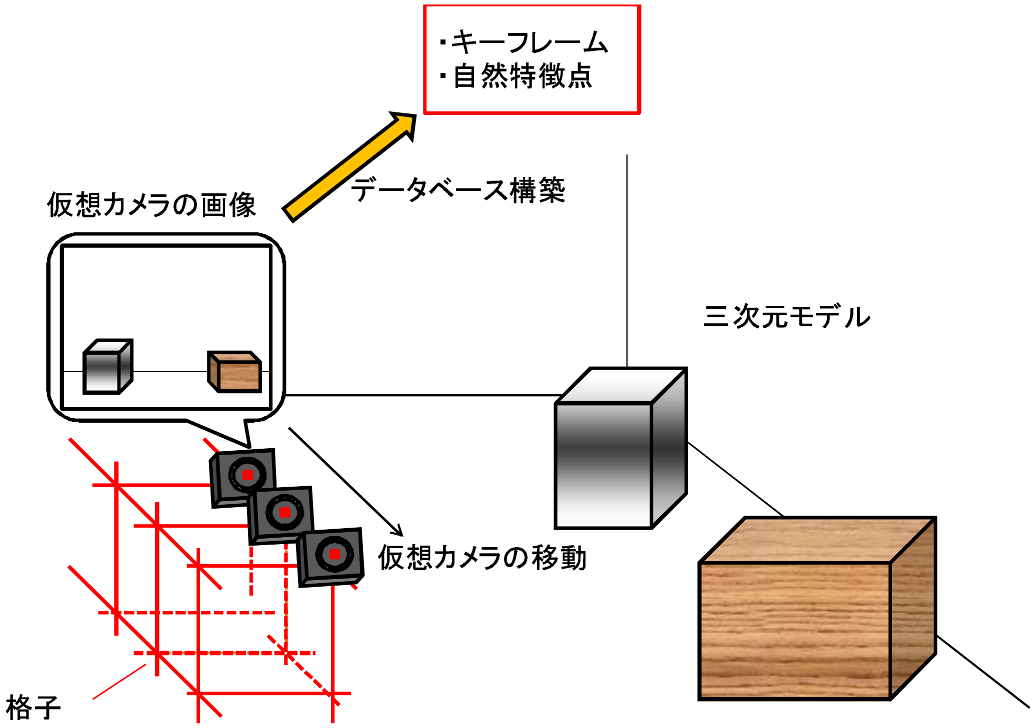


図 4.6: 仮想空間内でのデータベース構築

4.3 PTANの速度と省略する領域の妥当性評価実験

この実験では、PTAN の処理速度と PTAN によって省略される領域が妥当であるかどうかを評価することを目的とする。環境の三次元モデルを用いた仮想空間を格子状に分割し、その格子点上をトラッキングを実行する初期の予測点として設定する。PTAN によって予測点が妥当に省かれているかどうか、また PTAN の処理時間を評価するには、PTAN で得られる予測点よりも網羅性が高い予測点における精度予測結果を参考値として用意しておく必要がある。この網羅性の高い予測点における予測を以下では「全点予測」とする。ここでは、PTAN の最小ステップ幅の格子点全てでトラッキングを実行した結果を全点予測の結果として用いる。同じ対象領域において、全点予測と PTAN を実行したときの処理時間を比較することで処理速度を評価する。また、全点予測の格子点と PTAN によって採用される予測点でのトラッキング精度に対して色を付けて可視化し、PTAN によって省略される領域が妥当かどうかを評価する。

4.3.1 PTANを実行する実験環境と評価実験

実験環境として、京都大学工学部 1 号館 259 室 (以下、実験室) を使用した。実験室を精度予測の対象環境とし、第 3.3.3 項で述べた計測機器のキャリブレーションと第 3.3.4 項で述べた穴埋め処理を行った三次元モデルを構築した。図??に対象環境の画像と構築した三次元モデルを示す。この三次元モデルは第 3.3.1 項で示した図 3.13 のようにレーザレンジファインダを動かして取得したデータを用いて構築した。このときの動かした角度や速度を表 4.7 に示す。

ただし、環境中 1 箇所からだけのスキャンデータを用いたため、この実験で用いた三次元モデルは ICP アルゴリズムを用いずに構築した。実カメラ画像と、実カメラ画像に位置・方向を合わせて生成したこのモデルを用いた仮想空間内における仮想カメ

表 4.7: レーザレンジファインダを動かした角度と速度 (実験室)

Tilt_Min	-30 °
Tilt_Max	30 °
Pan_Min	-60 °
Pan_Max	60 °
Tilt 方向の速度	0.5 °/秒

ラ画像に対して、自然特徴点を検出したときの様子を比較したものを図 4.7 に示す。ここで示したように、実カメラ画像で検出される自然特徴点と仮想カメラ画像で検出される自然特徴点は数や位置の傾向が一致しており、現実環境を正確に反映できている。

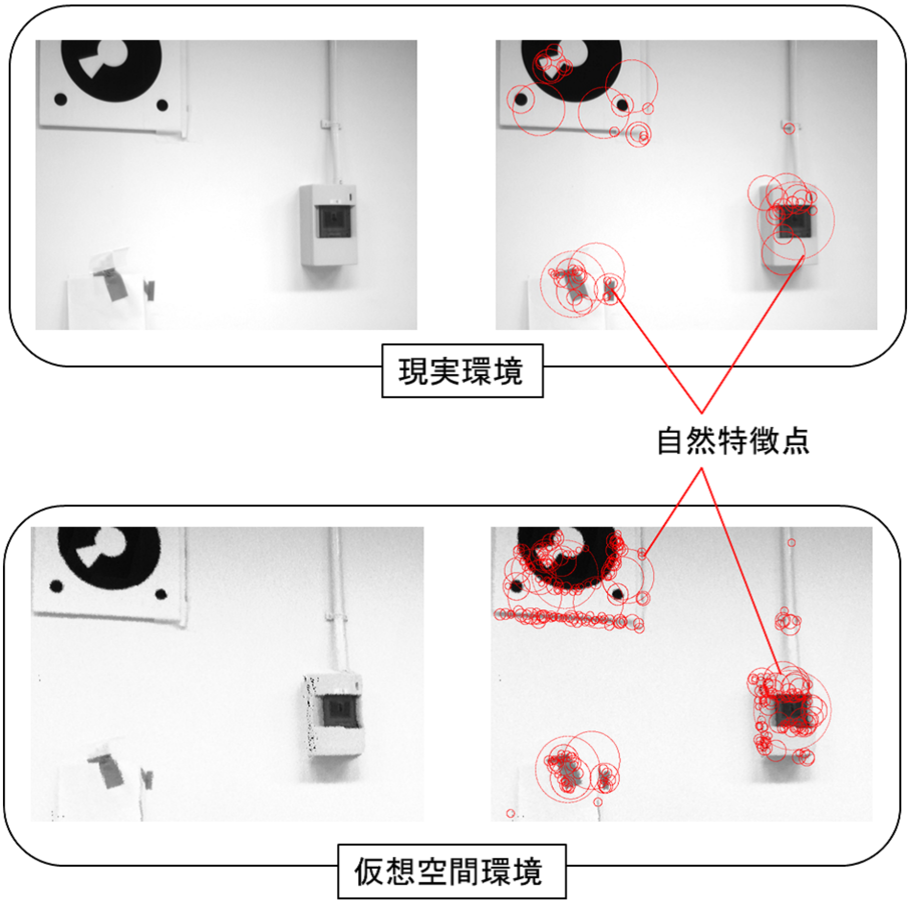


図 4.7: 実カメラ画像と改良モデル画像の自然特徴点

ここからは、PTAN の処理速度と PTAN によって省略される領域の妥当性の評価実験について述べる。

まず、第 4.2.2 項で述べた方法でトラッキングに利用するためのキーフレームと自然特徴点のデータベースを構築した。環境の三次元モデルを用いた仮想空間の世界座標系は図 4.8 に示すように、マーカを用いて壁が xy 平面となるように設定した。

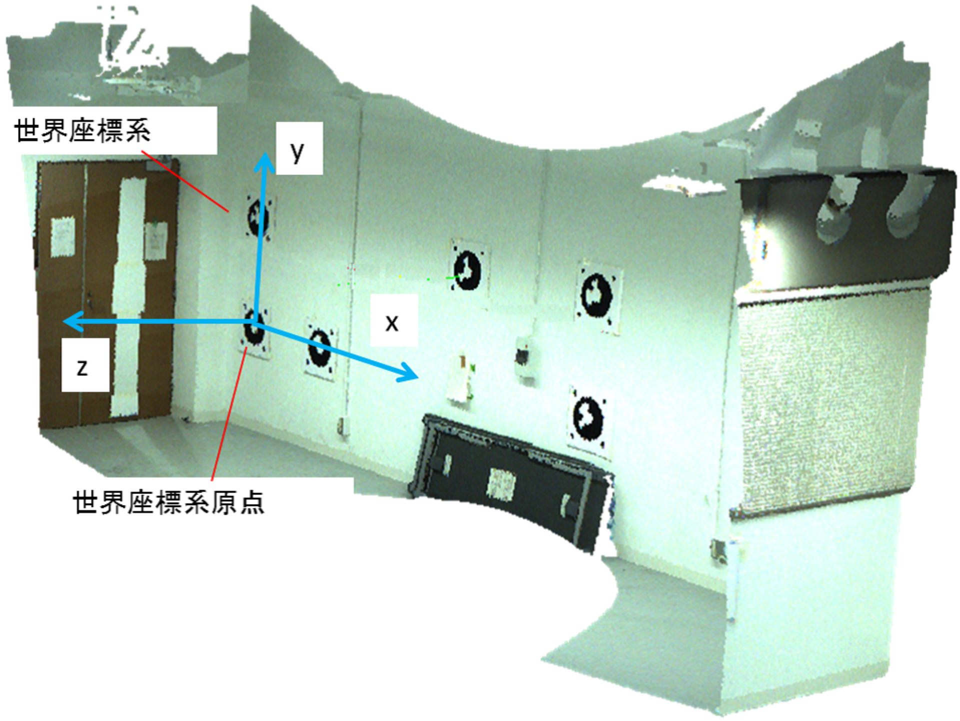


図 4.8: 実験室環境の三次元モデルの世界座標系

用いた環境の三次元モデルの詳細を表 4.8 に、データベース構築したときの仮想カメラの移動ステップと移動させた範囲を表 4.9 に示す。仮想カメラは、図 4.9 に示すような範囲内を移動ステップずつ、格子上の点を移動する。キーフレームと自然特徴点を取得するときの仮想カメラの撮影方向は全て z 軸負方向とした。これは、一方向だけの評価でも PTAN のアルゴリズムの一つの評価として有効である。ここで一方向だけの評価ができれば、他の方向を含めた評価をすることは可能である。

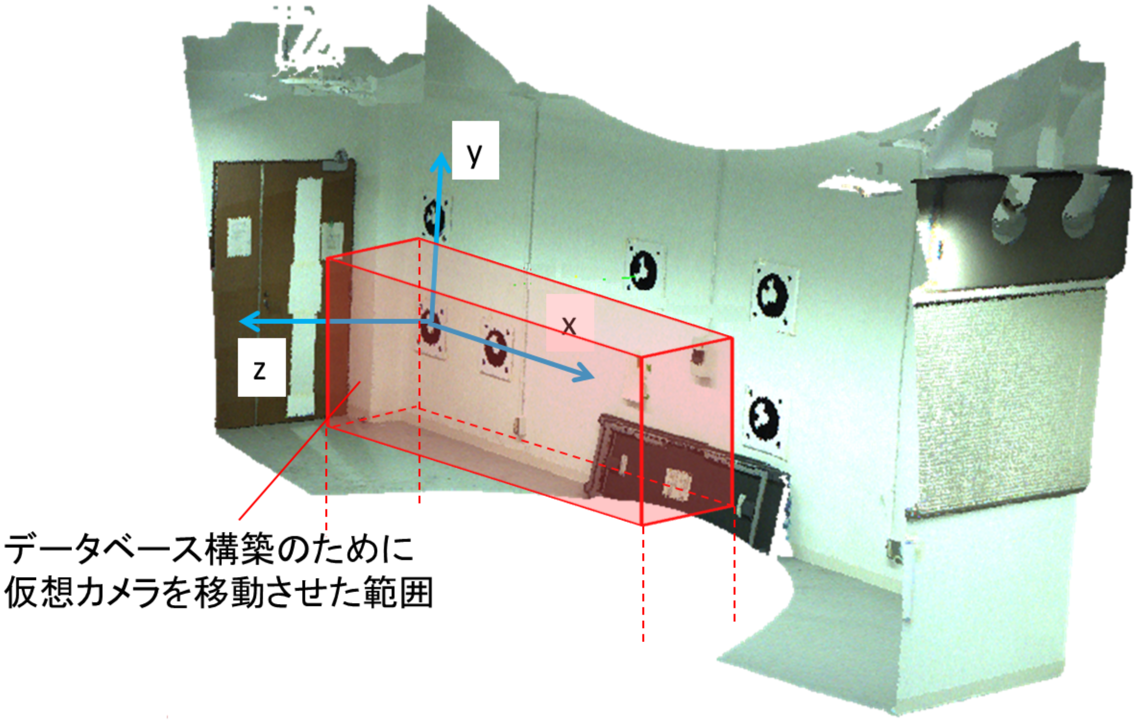


図 4.9: 実験室環境データベース構築のための仮想カメラ移動範囲

表 4.8: 環境の三次元モデルの詳細

モデルを構成する点の数 [点]		3940 万
モデルの範囲 [mm]	x 座標	-809 〜 6680
	y 座標	-886 〜 2620
	z 座標	-24 〜 1990

表 4.9: 仮想カメラの移動ステップと移動範囲

移動ステップ [mm]		50
モデルの範囲 [mm]	x 座標	2900 〜 5700
	y 座標	300 〜 1200
	z 座標	1350 〜 2200

以下では、予測点で得られる予測結果とカメラ位置の真値との差をトラッキング誤差とする。

予測の対象とする空間を格子状に分割し、第3.4節で述べたアルゴリズムに従って、トラッキングを実行する予測点が決定される。

ここで、隣合う予測点のペアについて考える。両点のトラッキング誤差の差の、ペアのうち小さい方のトラッキング誤差に対する割合を Err とする。さらに、ペアのそれぞれの点が用いた自然特徴点のうち、同じ自然特徴点を用いている割合を Nf とする。トラッキング手法によっては、同じ自然特徴点を利用していても、トラッキング結果が大きく変化してしまい、トラッキングが安定しないことが考えられる。このトラッキングの安定性の考慮を排除するため、Err を考慮せず Nf だけを用いて自然特徴点の一致度だけを比較する。これによって PTAN のアルゴリズムだけの評価をすることができる。Err を考慮することで、トラッキング手法の安定性を含めた評価をすることができる。実際に PTAN を用いて対象環境を評価する場合は Err の考慮も必要である。

全点予測と PTAN(9 点追加アルゴリズムおよび 5 点追加アルゴリズム) による予測とを比較する。図 4.10 に示すような領域内で提案アルゴリズムを用いてトラッキングのために仮想カメラを移動させた。この領域とステップ幅の詳細は表 4.10 に示す。

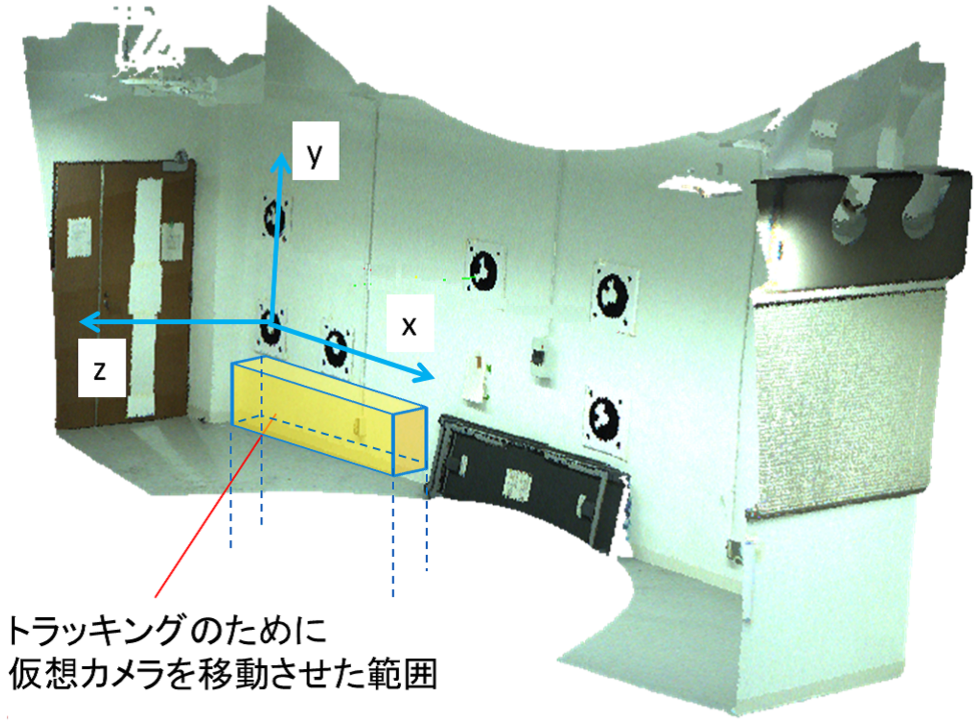


図 4.10: トラッキングのための仮想カメラ移動領域

表 4.10: トラッキング時の仮想カメラ移動領域とステップ幅

x 座標 [mm]	3000 〜 3256
y 座標 [mm]	400 〜 432
z 座標 [mm]	2000 〜 2016
初期ステップ幅 [mm]	8
最小ステップ幅 [mm]	1 または 2

4.3.2 実験結果と考察

トラッキングを実行した処理時間は、表 4.11 にしたようになり、最小ステップ幅の違いで結果を比較すると、細かく予測した方が処理時間は長いことが分かる。しかし全点予測の結果は約 7.3 倍処理時間が長くなったのに対して、PTAN では約 4.3 倍長くなるだけにとどまった。これは、PTAN によって予測点数を効果的に減らすことができているからだと考えられる。

これは、共通で使う自然特徴点の種類が一致している割合が Nf より高い場合以外は、領域を分割して詳細に予測するので、Nf が高いほど領域を分割して詳細にみていく回数が増えるはずである。ここで Err を考慮しない結果の比較をすると、Nf が高いほど処理時間が長いことが分かる。これによって、PTAN のアルゴリズムが正しく動いていると考えられる。また、全点予測に比べて約 14 倍高速化が実現できた。

また、Err を考慮する場合は考慮しない場合よりも処理時間が長いことが分かる。これは、この表の場合、共通で使う自然特徴点の種類が 70% 同じで、かつ Err が 0.5 よりも小さいとき以外は間の領域を細かくしていくので、共通で使う自然特徴点の一致率だけ考慮すれば良かった Err 考慮なしの場合に比べて、比較する予測点が増加していることが理由であると考えられる。

表 4.11: 各トラッキング実行時の処理時間

約7.3倍

		全点 [h]	9 点追加 [h]			5 点追加 [h]		
			Nf=0.7	Nf=0.8	Nf=0.9	Nf=0.7	Nf=0.8	Nf=0.9
最小ステップ幅 2mm	Err 考慮なし	3.29	0.515	1.10	2.40	0.370	0.730	1.72
	Err=0.5		1.18	-	-	0.760	-	-
最小ステップ幅 1mm	Err 考慮なし	24.1	1.68	4.79	15.0	0.855	2.16	7.16
	Err=0.5		5.12	-	-	2.18	-	-

約14倍 約4.3倍

ここで、カメラがそれぞれのアルゴリズムによって仮想空間内で移動した箇所を以下に示す。最小ステップ幅 1mm と 2mm の全点予測のカメラ移動箇所を図 4.11、図 4.12 に示す。Nf=0.7、Err=0.5 の場合の PTAN によるカメラの移動箇所を最小ステップ幅が 1mm と 2mm の場合に分けて図 4.13、図 4.14 に示す。

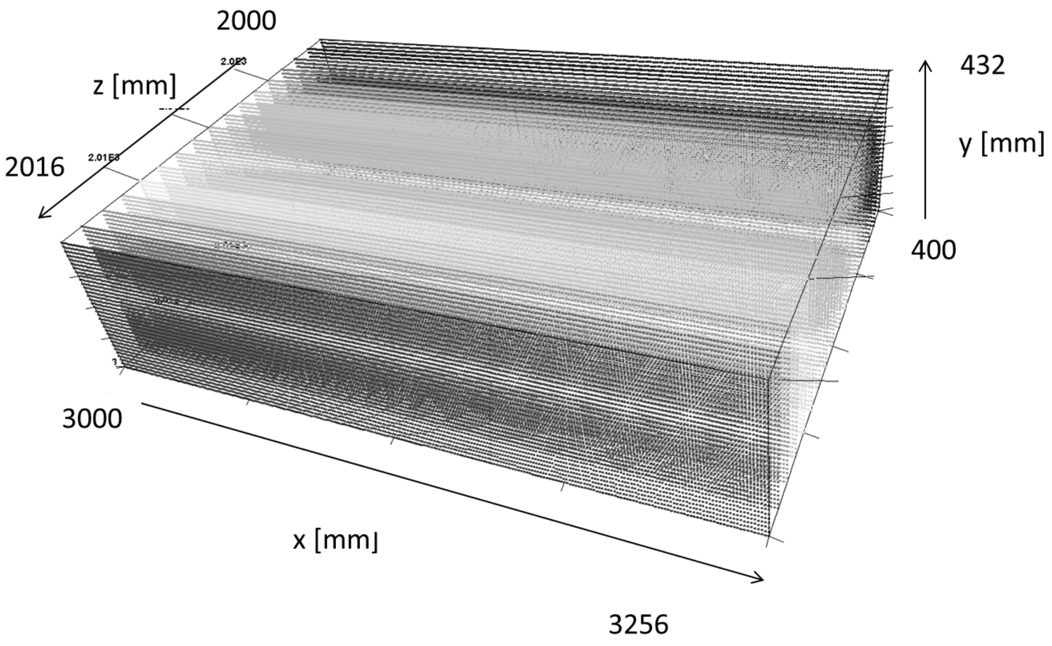


図 4.11: 全点予測のカメラ移動箇所 (最小ステップ幅 1mm)

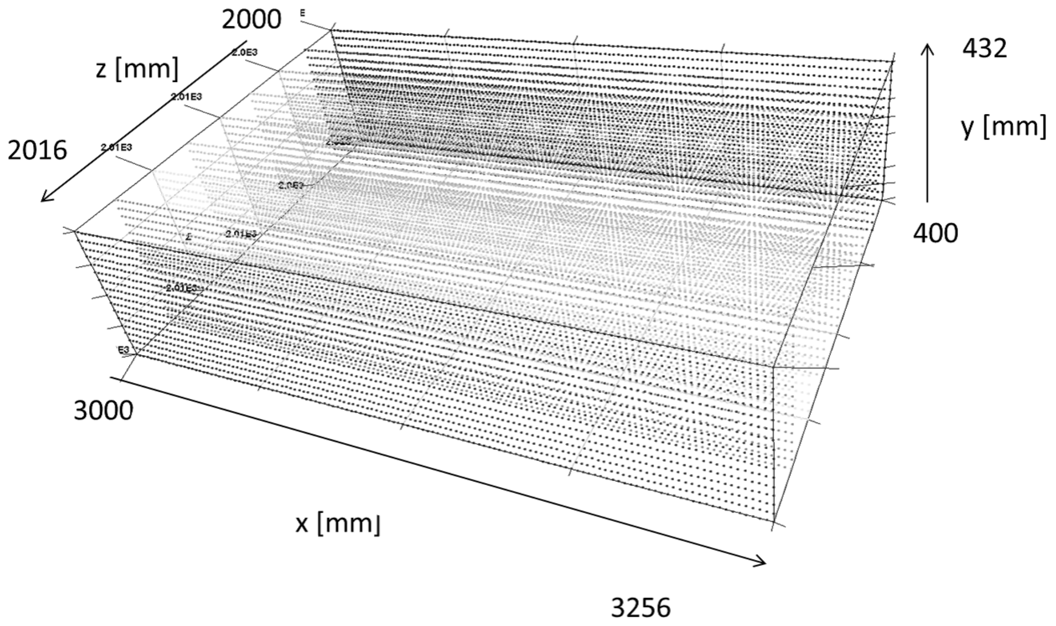


図 4.12: 全点予測のカメラ移動箇所 (最小ステップ幅 2mm)

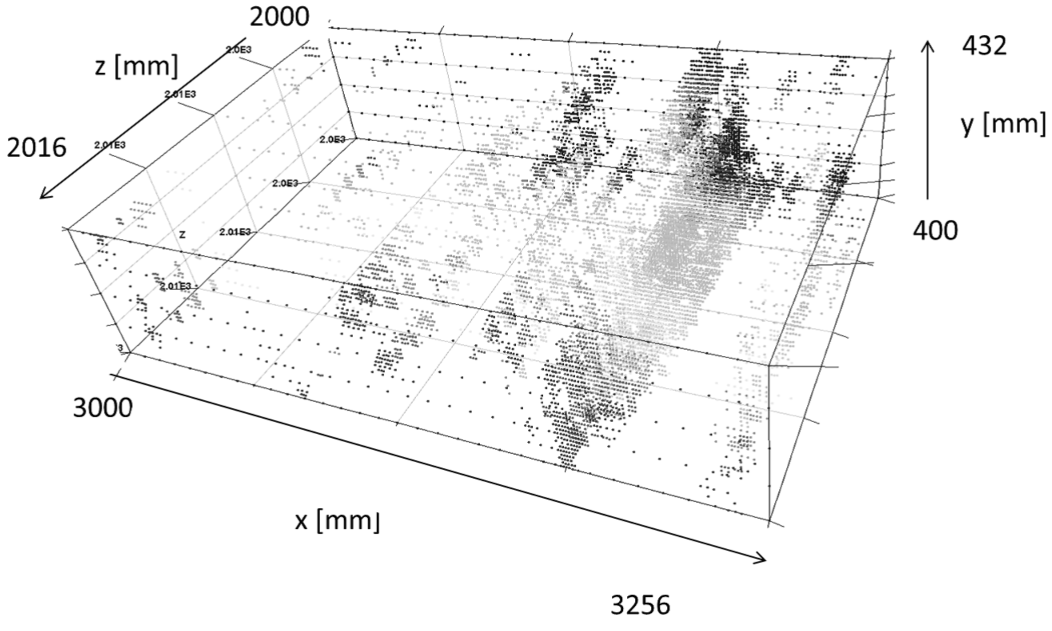


図 4.13: PTAN のカメラ移動箇所 (最小ステップ幅 1mm,9 点追加,Nf=0.7,Err=0.5)

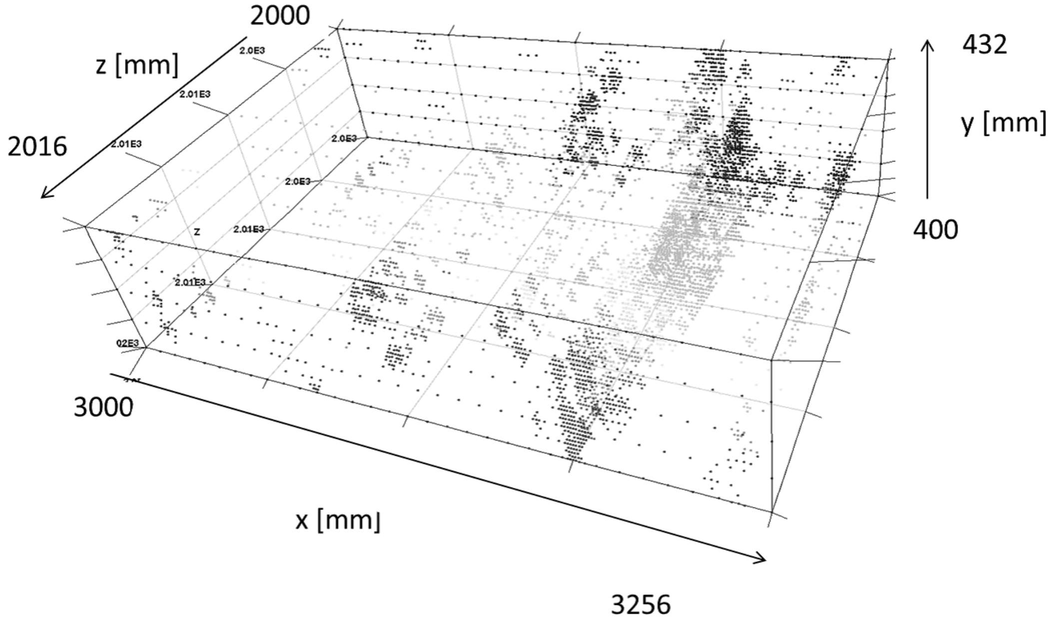


図 4.14: PTAN のカメラ移動箇所 (最小ステップ幅 1mm,5 点追加,Nf=0.7,Err=0.5)

この移動箇所での予測だけで予測点を妥当に省略することができたかどうか確認するために、ある z 座標における xy 平面上の予測点だけに着目し、トラッキング精度に応じて平面図で色付けをした結果を 9 点追加アルゴリズムについて図 4.15 に示す。これらの図の左側の平面図では、赤色になるほど誤差が大きく、青色になるほど誤差が小さいことを表す。この結果によると、似た精度の続く範囲はよく予測点を省いていることが分かる。また、図 4.16 に示したように、精度変化が大きい範囲を予測点にできていることが分かる。これらの結果により PTAN によって省略される予測点が妥当であることが確認できた。

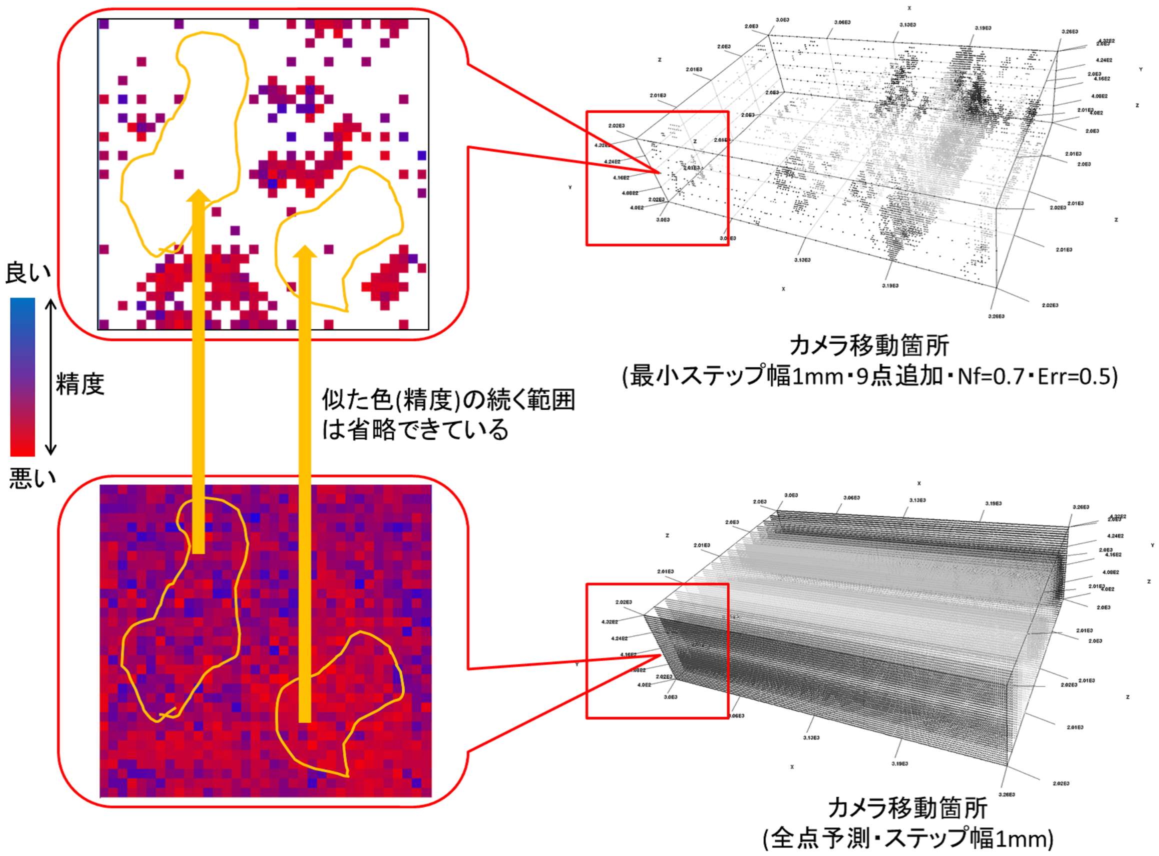


図 4.15: 全点予測と 9 点アルゴリズムのトラッキング誤差の可視化 1

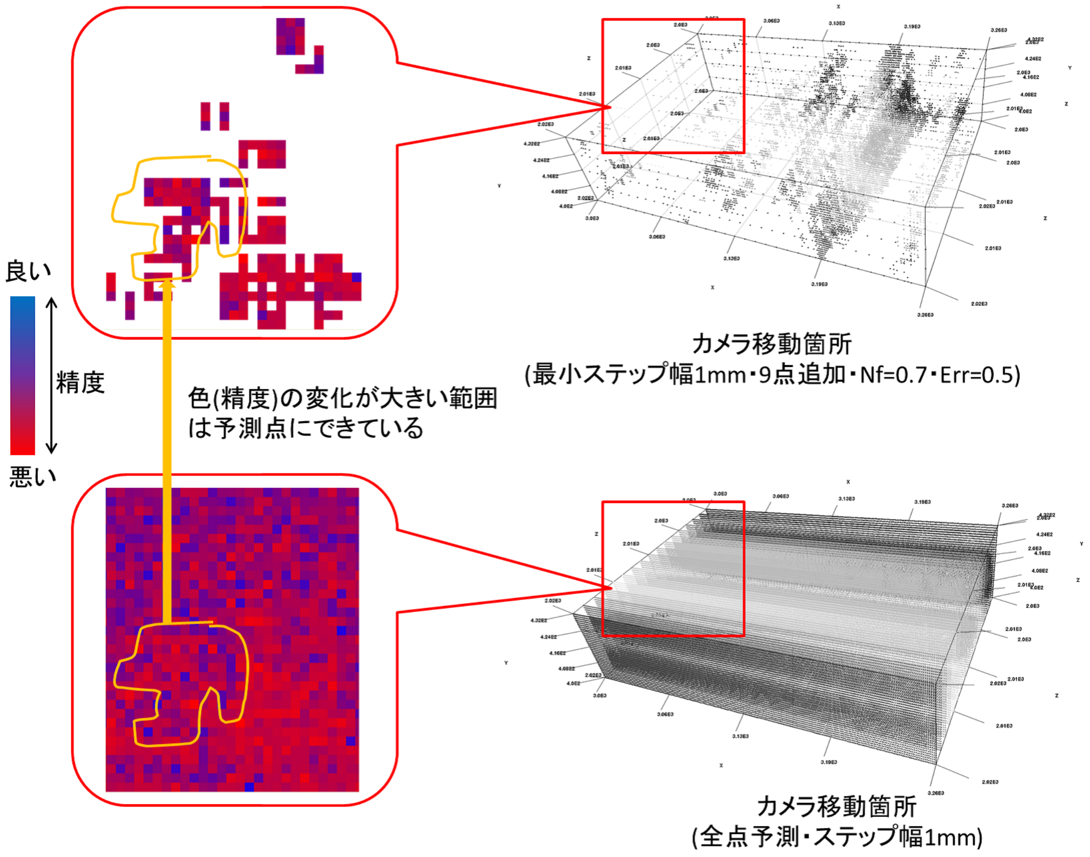


図 4.16: 全点予測と 9 点アルゴリズムのトラッキング誤差の可視化 2

4.4 PTAN の予測結果の信頼性評価

4.4.1 実験環境と信頼性評価実験

PTAN の予測結果の信頼性を評価するために、実際の環境において自然特徴点を用いたトラッキングを実行し、その結果得られるカメラの位置・方向と提案手法のシミュレーションにより得られるトラッキング結果を比較する。この評価実験は、京都大学工学部 1 号館 233 室 (以下、計算機室) で行った。計算機室を精度予測の対象環境とし、第 3.3.3 項で述べた計測機器のキャリブレーションと第 3.3.4 項で述べた穴埋め処理を行った三次元モデルを構築した。ただし、この三次元モデルは、環境中 2 箇所からスキャンした形状データを用いて ICP アルゴリズムによって各形状を位置合わせし、統合したものである。図 4.17 に対象環境の画像と構築した三次元モデルを示す。この三次元モデルは第 3.3.1 項で示した図 3.13 のようにレーザレンジファインダを動かして取得したデータを用いて構築した。このときの動かした角度や速度を表 4.12 に示す。

図 4.17: 計算機室環境の現実画像と三次元モデル

表 4.12: レーザレンジファインダを動かした角度と速度 (計算機室)

Tilt_Min	-30 °
Tilt_Max	30 °
Pan_Min	-30 °
Pan_Max	30 °
Tilt 方向の速度	0.5 °/秒

本研究では、カメラの位置・方向を計測するために、図 4.18 に示す椙らの開発したマーカの三次元位置自動計測システム (MAMS:Marker Auto-Measurement System)[14] を用いる。この計測システムを利用するため、図 4.19 に示すように実カメラの裏側にマーカを貼って対象環境内に実カメラを設置し、そのマーカの位置・方向を計測する。これによってカメラの位置・方向を知ることができる。

この計測システムを用いて図 4.20 に示すように環境内の 50 箇所にカメラを移動させ、各箇所で 48〜50 枚のカメラ画像を取得した。これらの画像全てでトラッキングした結果を平均して各箇所のトラッキング結果とした。

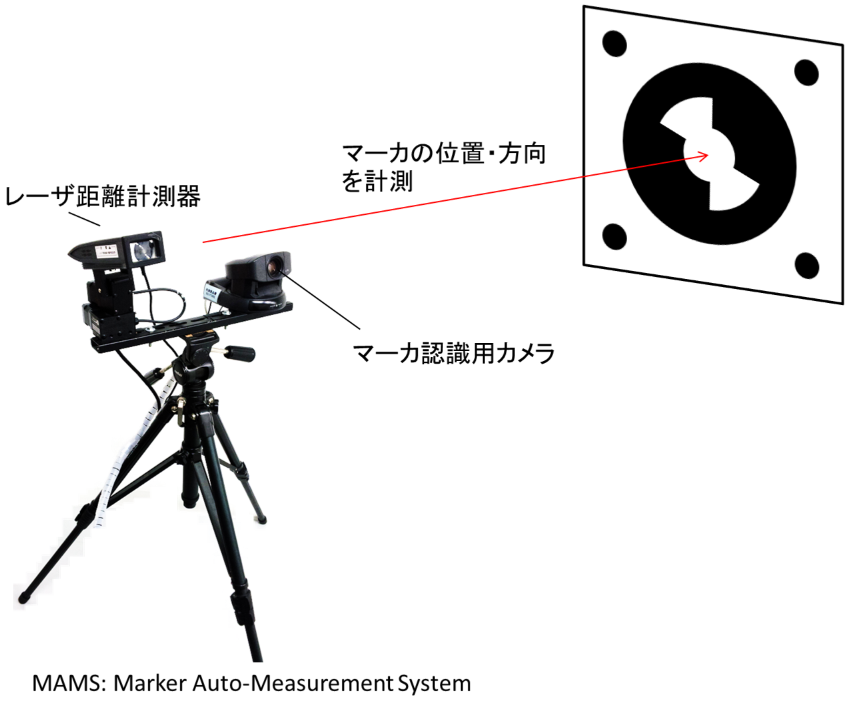


図 4.18: MAMS の概略図

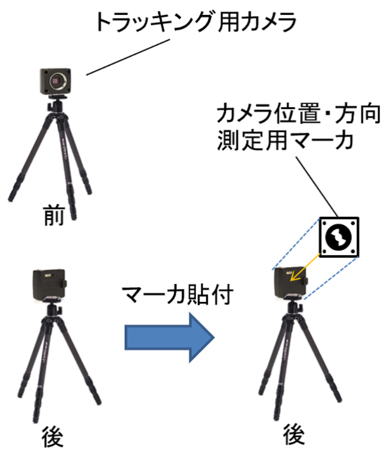


図 4.19: カメラ測定用マーカの貼付け

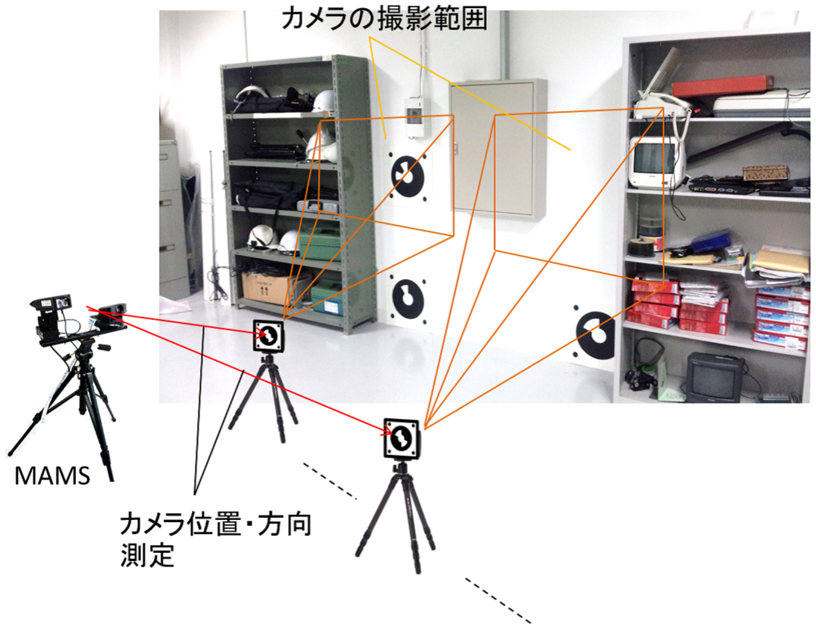


図 4.20: カメラ撮影とカメラ位置・方向計測の様子

MAMS で計測したカメラ位置・方向を真値として、実カメラ画像を用いてトラッキングを実行した結果との誤差を取得する。その後、対象環境の三次元モデルを用いた仮想空間内において、MAMS で計測した実カメラの位置・方向に合わせて仮想カメラ画像を CG で生成し、その CG を用いてトラッキングを実行する。このトラッキング誤差を取得し、実カメラのトラッキング誤差と比較する。

ここでも第 4.3 節で述べたデータベース構築を環境の三次元モデルを用いた仮想空間内で行い、データベースを用いて現実環境と仮想空間でトラッキングを実行した。

図 4.21 にそれぞれの環境でトラッキングを実行した結果を相関図で示す。この図中の現実環境と仮想空間の結果が合わない箇所と現実環境と仮想空間の結果が合う箇所について第 4.4.2 項で考察する。

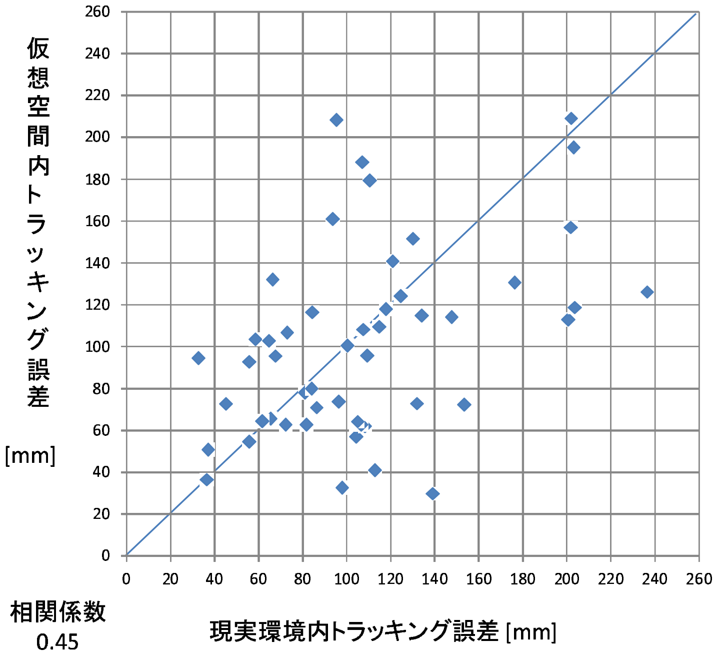


図 4.21: 現実環境内トラッキングと仮想空間内トラッキングの相関

4.4.2　評価の結果と考察

図 4.22 のように、現実環境内トラッキング誤差と仮想空間内トラッキング誤差が一致する箇所については、図の右側で示すように、トラッキングに使用した自然特徴点が同じものだったためにトラッキングの誤差が一致したと考えられる。

図 4.23 のように、現実環境内トラッキング誤差と仮想空間内トラッキング誤差が一致しない箇所については、図の右側で示すように、トラッキングに使用した自然特徴点の数が大きく異なるため、トラッキング誤差が大きく異なるものになったと考えられる。また、自然特徴点のデータベースを構築したとき、三次元モデルを用いた仮想空間内で構築したため、画像の検出される自然特徴点が増えると、合う特徴点は実カメラ画像よりも仮想カメラ画像の方が増えると考えられる。このため、図 4.23 に示したように、仮想空間内のトラッキングの方が誤差が小さくなったと考えられる。

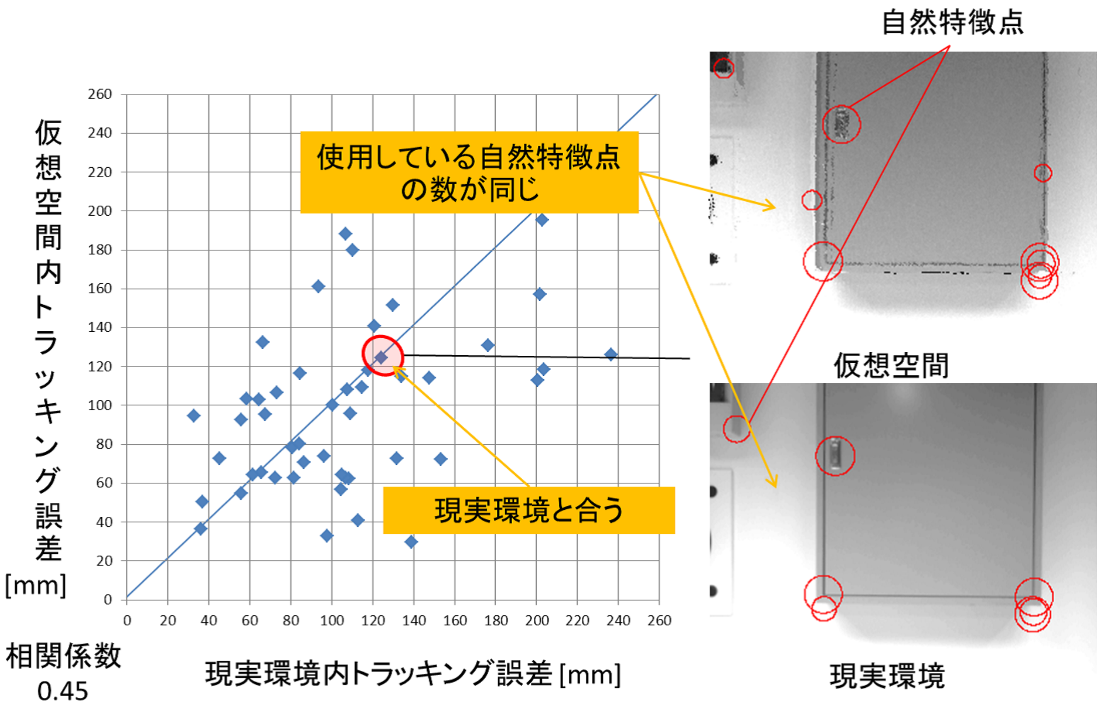


図 4.22: 現実環境内と仮想空間内のトラッキング誤差の相関と考察 1

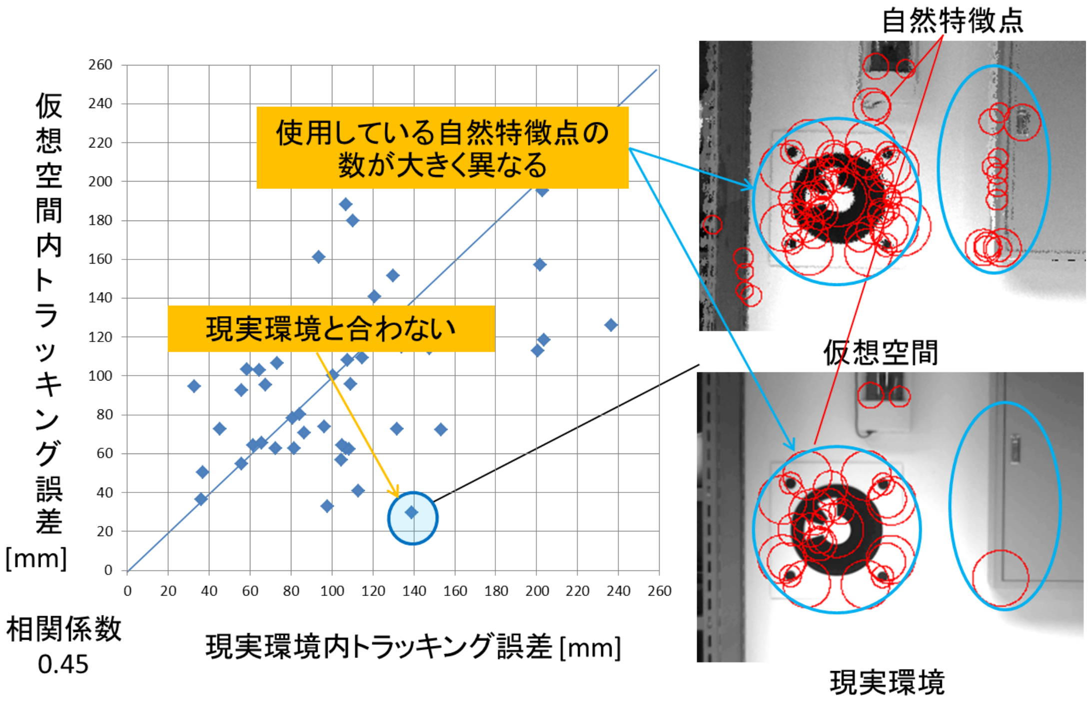


図 4.23: 現実環境内と仮想空間内のトラッキング誤差の相関と考察 2

4.4.3 今後の課題

今後の課題としては、トラッキング手法を他のものに変えてPTANを評価することや、より広い領域や多くの環境において評価することが挙げられる。また、本研究ではカメラの方向を1方向に限定して評価したので、様々な方向から予測しても有効な手法であることを確認することや、現実環境で検出される自然特徴点と仮想空間で検出される自然特徴点の位置や方向をさらに一致させるために三次元モデルを再改良することも課題として挙げられる。

第 5 章 結論

本研究では、原子力発電プラントの解体作業支援を AR を用いて行うときの効率の向上のために、AR 環境の実現に必要なトラッキングを自然特徴点を用いた手法によって行うことに着目した。このときに問題となるのは、環境によって変わってしまう自然特徴点を用いたトラッキングの精度を、人間は正確に予測することができないことである。これにより原子力発電プラントの解体作業に自然特徴点を用いたトラッキングを利用してもよいのかかどうか判断ができない。

この問題を解決するため、環境の三次元モデルを用いた仮想空間内でトラッキングシミュレーションを行うことによって自然特徴点を用いたトラッキング精度を予測する手法 PTAN を提案した。PTAN による予測結果を判断の指標とすることができる。

PTAN では、予測点に代表領域を割り当てることによって、隣合う予測点との間の領域に精度の予測が不十分だと考えられる箇所があるかどうかを、それぞれの予測点での予測精度の違いによって決めるというアルゴリズムを提案している。

実験室を対象環境として三次元モデルを構築し、全点を予測する場合と PTAN による予測を比べて処理速度が向上するかどうかと PTAN によって省略される領域が妥当であるかどうかを評価する実験を行った。解析対象としてデータベースを用いたトラッキング手法を用いた。このとき環境の三次元モデルを用いた仮想空間内の仮想カメラ画像からキーフレームと自然特徴点を生成し、データベースとした。実験の結果、全点を予測する場合に比べて PTAN による予測では処理速度を約 4.3 倍向上できたことが分かった。また、計算機室を対象環境として三次元モデルを構築し、現実環境でトラッキングを実行した結果と仮想空間でトラッキングを実行した結果を比べて、PTAN で用いたトラッキング手法の結果の信頼性を評価する実験を行った。実験の結果、トラッキングに利用した自然特徴点の数や種類の一致度が、各環境間のトラッキング結果の差に大きく影響していることが分かった。

今後の課題としては、本研究で行った評価はカメラの方向が 1 方向からのみの評価になっているなど、環境に対する評価の網羅性が不十分だと考えられるので、より広い空間で実行するなど、網羅性の向上が必要である。また、トラッキングの手法を他のものに変えて評価をするなど、様々なトラッキング手法にも有効な精度予測手法であることを確認する必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、研究の方針や進め方、叱咤や激励だけでなく、様々な面白い話をしてくださった下田宏准教授に心より感謝いたします。カップラーメン・お菓子の差し入れで私たち学生は寿命が縮まるくらい感謝しております。

また、特にプログラミングに関して多くの時間と寿命を割いてサポートをして下さった石井裕剛助教に心より感謝いたします。

どれだけ忙しいときでも楽しく話が弾む研究室メンバーは頼もしく、次元の壁を越えられるのではないかと思うほどでした。心より御礼申し上げます。就職活動で忙しいにもかかわらず丁寧に論文チェックをして下さった松田君、大石君、高松君本当にありがとうございました。最後に、研究生活を主に紅茶で支えて下さった普照さん、若林さん、ありがとうございました。

参考文献

[1] 神原 誠之: 基礎１：拡張現実感 (Augmented Reality:AR) 概論, 情報処理, Vol. 51, No. 4, pp. 367-372(2011).

[2] 石井 裕剛, 中井 俊憲, 卞 志強, 下田 宏, 泉 正憲, 森下 喜嗣: 拡張現実感を利用した原子力発電プラントの解体支援手法の提案と評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 289-300(2008).

[3] H. Ishii, S. Oshita, W. Yan, H. Shimoda, M. Izumi: Development and Evaluation of a Dismantling Planning Support System based on Augmented Reality Technology, International Journal of Nuclear Safety and Simulation, Vol. 2, No. 1, pp. 52-60(2011).

[4] 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, 京都大学エネルギー科学研究科修士論文 (2011).

[5] 桑原 潤一郎, 箕輪 弘嗣, 鈴木 和彦: 原子力プラント解体作業におけるＡＲ技術を用いた解体支援システムの提案と実装, 安全工学研究発表会講演予稿集, Vol. 41, pp. 221-222(2008).

[6] 田村 秀行，柴田 史久: WG 活動報告 AR/MR 位置合わせ&トラッキング手法の評価方法策定，日本バーチャルリアリティ学会第 14 回大会論文集，3C2-3(2009).

[7] P. Besl and N. McKay: A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256(1992).

[8] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, L. V. Gool: SURF: Speeded Up Robust Features, Computer Vision and Image Understanding, Vol. 110, No. 3, pp. 346-359(2008).

[9] D. G. Lowe: Distinctive image features from scale-invariant keypoints, International Journal of Computer Vision, Vol. 60, No. 2, pp. 91-110(2004).

[10] E. Rosten, T. Drummond: Fusing points and lines for high performance tracking, IEEE International Conference on Computer Vision, Vol. 2, pp. 1508-1511(2005).

[11] E. Rosten and T. Drummond: Machine learning for high-speed corner detection, European Conference on Computer Vision, Vol. 1, pp. 430-443(2006).

[12] J.Y. Bouguet: Camera Calibration Toolbox for Matlab, `http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/` (2012年2月9日現在).

[13] W. Schroeder, K. Martin, B. Lorensen: Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3D Graphics, Kitware(2006).

[14] W. Yan, S. Yang, H. Ishii, H. Shimoda and M. Izumi: Development and Experimental Evaluation of an Automatic Marker Registration System for Tracking of Augmented Reality, International Journal of Nuclear Safety and Simulation, Vol. 1, No. 1, pp. 52-62(2010).