

# 動的環境における広域カメラトラッキングのための 自然特徴点データベースの更新手法

A method for updating feature landmark database for wide-area camera tracking  
in changing environments

顧穎成<sup>1)</sup>, 石井裕剛<sup>1)</sup>, 下田宏<sup>1)</sup>

Yingcheng GU, Hirotake ISHII and Hiroshi SHIMODA

1) 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

(〒606-8501 京都市左京区吉田本町

{koinsei, hirotake, shimoda}@ei.energy.kyoto-u.ac.jp)

概要: プラントの保守・解体作業現場の様な広域かつ変化する環境で自然特徴点を用いたカメラトラッキングを実現するためには, 自然特徴点データベースを事前に作成するだけでなく, 環境の変化に応じてデータベースを更新する必要がある. 本研究では, カメラトラッキングと同時に, 自然特徴点の分布の変化を分析することで環境変化を認識し, 変化した部分とその周辺の自然特徴点データをリアルタイムで計測し, 既存のデータを更新する手法を提案する.

キーワード: 自然特徴点分布, 環境変化, サーバ・クライアント, 重み付き Bundle Adjustment

## 1. はじめに

プラントの保守・解体作業等を拡張現実感 (Augmented Reality, AR) を用いて支援することにより, 作業の効率, 安全性および利便性を高めることができると期待されている<sup>1)</sup>. AR を用いた支援を実現するためには, 作業員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. 特に, 環境整備の労力や運用の手間を考慮すると, 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) を用いたトラッキングを利用することが望ましい.

自然特徴点を用いたトラッキングを実現する手法としては, Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) と呼ばれるトラッキング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データをもとに, トラッキング可能な範囲を拡張する手法がある<sup>2)</sup>. この手法では, 自然特徴点データは自動的に更新されるため, 物体の移動により環境が変化しても, トラッキングを継続できる. しかし, この手法で計測した自然特徴点の三次元座標は, 計測開始地点から離れるにつれて大きな誤差が含まれるようになるため, 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くなる. そのため, SLAM は通常は狭い範囲でのみ利用可能である. 一方, 広範囲でのトラッキングを実現したい場合, 事前にレーザレンジファインダあるいは Structure From Motion (SFM) と呼ばれる手法で計測・取得した自然特徴点データを用いれ

ば, 高精度のトラッキングを実現できる<sup>3) 4)</sup>. しかし, この方法では, 図 1 に示すような環境変化があった場合に自然特徴点データの更新に時間がかかるという問題がある.

そこで, 本研究ではプラントの保守・解体作業現場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長時間利用可能にするため, トラッキングと同時に環境変化を認識し, 変化した部分の自然特徴点データをリアルタイムで計測し, 既存のデータを更新する手法を提案する.

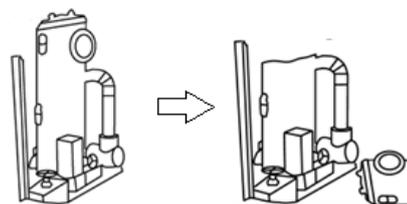


図 1: 環境の変化

## 2. 提案手法

### 2.1 システム構成

本研究では, 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に実現するために, 図 2 に示す仕組みのシステムを構成する. 本システムでは, 事前に図 3 に示すように, SFM の手法を用いて環境全体の自然

特徴点データ（グローバルデータ）を作成してサーバに保存する．システム運用時には、カメラのトラッキング、環境変化の認識および新たなデータの計測をクライアント側で行い、データの更新をサーバ側で実行する．これにより、環境変化の認識とデータの計測を複数のデバイスで行うため、環境変化がある場合、データを効率的に更新でき、また、クライアント側で更新されたグローバルデータを共有できる．

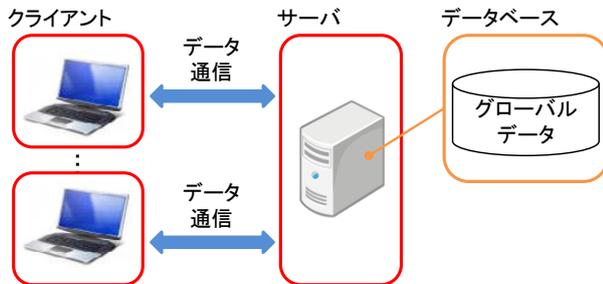


図 2: システムの構成

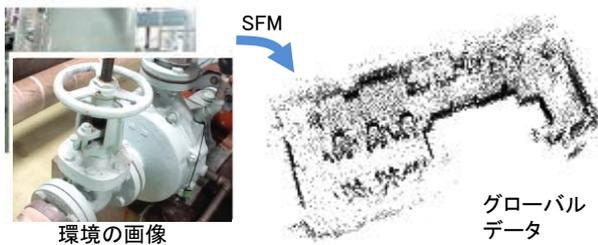


図 3: SFM を用いたグローバルデータの作成

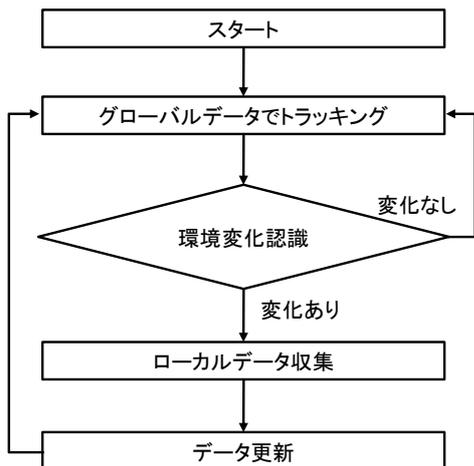


図 4: 提案手法の処理の流れ

## 2.2 提案手法の処理手順

本手法の処理手順を図 4 に示す．事前に SFM で取得したグローバルデータを用いてトラッキングを実行すると同時に、物体の移動などで起こる環境変化を自動的に認

識する．環境が変化したと認識した場合には、変化した領域とその周辺の自然特徴点データ（ローカルデータ）を計測し、その結果を元にグローバルデータを更新する．本節では、この処理手順に従い、環境変化の認識手法、ローカルデータの計測手法およびデータの更新手法について述べる．

### 2.2.1 環境変化の認識

環境が変化したことを認識する必要がある場合、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が考えられる．しかし、このような手法では、カメラが撮影する可能性がある全ての画像を事前を取得しておく必要があるが、認識に必要な全ての画像を用意することは非常に困難である．一方、システムが保持している自然特徴点の座標情報とカメラの現在の位置・方向から自然特徴点の再投影座標を求め、現在のカメラ画像から認識される自然特徴点の座標と比較することで環境の変化を認識する方法も考えられる．この場合、自然特徴点の再投影誤差を個々に評価する方法も考えられるが、プラント内で環境が変化した場合、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、そ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と期待される．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．

具体的には、トラッキングと同時にカメラから取得した画像から SIFT 特徴点を抽出し、自然特徴点の分布を表す画像を生成する．また、リアルタイムで推定したカメラの位置・方向を用いてデータベースに格納されたグローバルデータを画像に再投影し、自然特徴点の分布を表すもう 1 枚の画像を生成する．そして、図 5 に示すようにガウシアフィルタを用いて画像の平滑処理を行う．その後、処理した 2 枚の画像を差分する．環境が変化した場合、差分画像中にその変化が現れるため、差分画像のヒストグラムを求め、平均輝度を計算し、その結果を用いて環境の変化を認識する．

上述の手法では、自然特徴点を再投影する際のカメラの位置・方向がグローバルデータを作成した時のカメラの位置・方向と異なるため、一部の自然特徴点が現在のカメラ画像から安定して抽出されない場合がある．データベースに含まれる全ての自然特徴点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の変化を比較した場合、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、環境の変化を安定して比較可能にするために、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を用いて抽出された自然特徴点データのみをデータベースから抜き出して比較に用いる．具体的には、自然特徴点データベースに含まれる点をカメラ画像上に投影する前に、図 6 に示すように各自然特徴点  $p$  とその点を事前に計測した時のカメラ  $c_1$  と

の間の距離を  $d1$ 、自然特徴点  $p$  と現時点のカメラ  $c2$  の間の距離を  $d2$  および  $p$  と  $c1$  を結ぶベクトルと  $p$  と  $c2$  を結ぶベクトルの成す角を  $\theta$  とした場合に、 $\theta$  および  $d1/d2$  の値が予め設定した閾値以下になる場合のみ投影を行う。

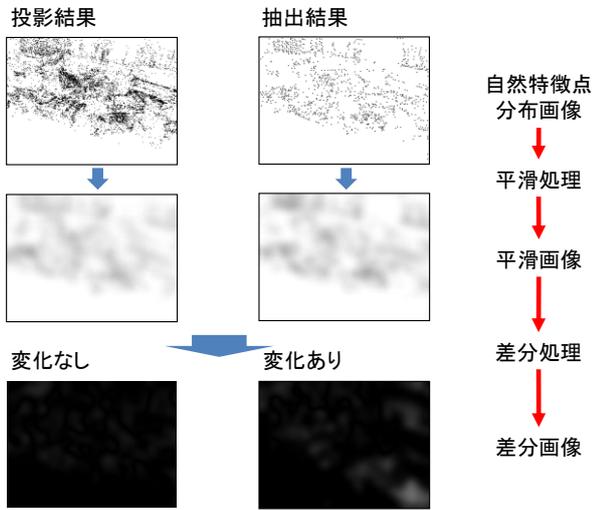


図 5: 自然特徴点分布の分析

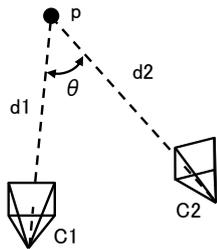


図 6: 再投影条件の計算

### 2.2.2 ローカルデータの計測

環境の変化が認識された場合、カメラのトラッキングを継続しながらも、可能な限り迅速に自然特徴点データベース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<sup>2)</sup>をもとに、トラッキングとローカルデータの計測を同時に行う。そして、ローカルデータを計測する際には、変化した部分の自然特徴点データを計測するだけでなく、その周辺に変化していない部分の自然特徴点データも同時に計測する。ここで、ローカルデータの内、変化していない部分に対するデータは、自然特徴点データベースにも重複して存在することになるが、以降、この重複している自然特徴点を重複点と呼ぶ。後で、この重複点を用いてデータを統合する。

### 2.2.3 グローバルデータの更新

2.2.2 で述べた手法により、自然特徴点の三次元座標、自然特徴点が写っている画像（キーフレーム）、キーフレームを撮影したときのカメラの位置と方向およびキーフレーム上での自然特徴点の二次元座標の 4 種類のデータ

を取得できる。しかし、リアルタイムで計測したローカルデータはグローバルデータより精度が低いため、ローカルデータをそのまま利用してデータベースを更新した場合、時間が経過するにつれてグローバルデータの精度が低下する。そこで、本研究では、ローカルデータの精度を向上させた後、データベースを更新する。

具体的には、1) 2.2.2 で述べた手法でローカルデータを計測した後、図 7 に示すようにローカルデータを作成する際に使用したキーフレームへローカルデータとグローバルデータの両方を投影する。そして、ローカルデータの各投影点に対して最も近い距離に投影されたグローバルデータを求める。

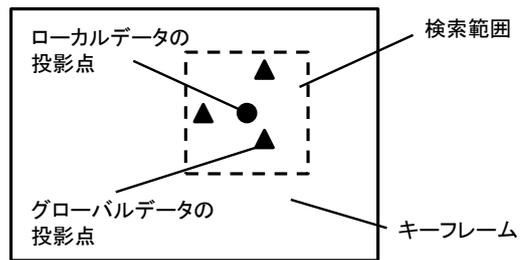


図 7: 二次元距離での重複点の検索

以上で対応づけたグローバルデータ内の自然特徴点とローカルデータ内の自然特徴点の間のキーフレーム上での距離と三次元空間内での距離を求め、共に予め設定した閾値以下である場合に、その対応付けられた自然特徴点のペアは重複点であると仮定する。その後、各重複点に対してその周りのほかの重複点の分布状況を分析し、図 8 に示すように、周囲の他の重複点の数が少ない重複点は外れ値として除く。以上の処理の後に残った点を最終的な重複点とする。

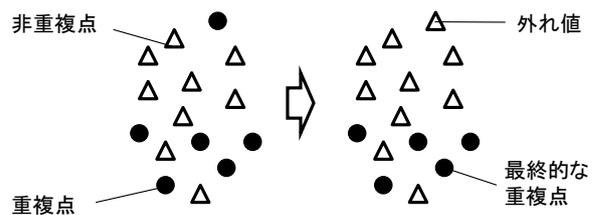


図 8: 重複点の中の外れ値の削除

2) ローカルデータの精度を向上させる際には、各計測データの予想される誤差の度合に応じて 0 から 1 の間の信頼度（誤差が小さいほど信頼度が高く値が大きい）を設定し、その信頼度に応じてローカルデータの三次元座標を修正する。具体的には、まず初めに重複点の計測データをデータベース中に保存されたその点のデータに変える、次に、重複点には 1 の信頼度を設定し、残る点に低い信頼度を付ける。そして、信頼度が 1 未満の各点毎に対して、その点が写っているキーフレームを探し、そのキーフレームにより高い信頼度を持つ自然特徴点が写っ

ているか否かを調べる．より高い信頼度を持つ点が写っている場合に，その点とより高い信頼度を持つ点をグループとしてまとめる（まとめたグループを以下，修正データ集合と呼ぶ）．その後，信頼度が1の点の三次元座標を固定し，式(1)のような再投影誤差の計算方法を用いた Bundle Adjustment を利用し，修正データ集合の中のデータを修正する．ここで， $\Delta X$  は一つの点の再投影誤差であり， $\alpha$  は点の信頼度である．

$$E = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot \Delta X_i \quad (1)$$

1回の修正が終わった後，修正された点の信頼度を0.1から0.9にまた0.9から1.0に変えるように上げる．全ての点の信頼度が1になるまで上記の処理を繰り返し，その結果を用いてデータベースを更新する．なお，上述の信頼度の値は本研究では最適となる値を実験的に定めた．

### 3. 実験と考察

本研究では2章で述べた手法の有効性を確認するために，事前に SFM で図9に示すような環境のグローバルデータを生成し，そのデータを用いて環境変化の認識とローカルデータの計測を行った．実験には Intel(R) Core(TM) i5 CPU (M 560, 2.67GHz)，4GB メモリを使用した．画像キャプチャには Firefly MV FMVU-03MTC（解像度 640×480）に 3.5mm レンズを装着した．

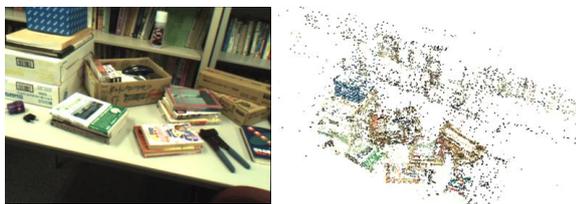


図 9: 実験環境と実験用グローバルデータ

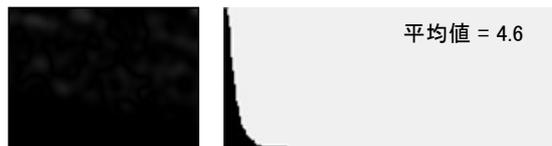
図10に環境変化を認識した際に生成した一部の差分画像とそのヒストグラムを示す．上は変化が無い環境に対して2.2.1で述べた手法を適用して求めた差分画像とそのヒストグラムであり，下は机の上の物体を一部に撤去した環境に対して2.2.1で述べた手法を適用して求めた差分画像とそのヒストグラムである．これらの結果により，環境に変化がある場合とない場合で差分画像が異なり，ヒストグラムに比較的に大きな違いが現れていることが分かる．図11にリアルタイムで計測したローカルデータを示す．この結果により，環境変化を認識した後，トラッキングを継続すると同時に，ローカルデータを計測できることが分かった．

### 4. むすび

本研究では，動的に変化する環境での自然特徴点を用

いた広域カメラトラッキングの安定性を向上させるため，カメラトラッキングと同時に，自然特徴点の分布の変化を分析することで環境変化を認識し，変化した部分とその周辺の自然特徴点データをリアルタイムで計測し，既存のデータを更新する手法を提案した．そして，実際に提案手法を用いて環境変化の認識およびローカルデータの計測を行い，提案手法の一部の有効性を確認した．今後は，ローカルデータを用いたデータベースの更新手法の有効性を評価する実験を実施する予定である．また，実際のプラント解体現場で本手法を通じ，実用性等を評価する予定である．

変化ない場合



変化ある場合

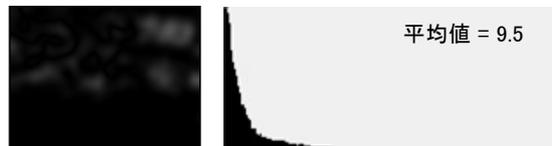


図 10: 差分画像とヒストグラム

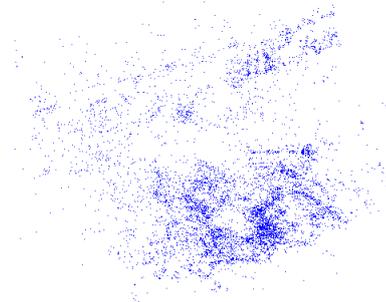


図 11: リアルタイムで計測したローカルデータ

謝辞 本研究は JSPS 科研費 23240016 の助成を受けたものです．

### 参考文献

- [1] Ishii, H. : Augmented Reality: Fundamentals and Nuclear Related Applications, International Journal of Nuclear Safety and Simulation, Vol. 1, No. 4, pp. 316–327, 2010.
- [2] Klein, G, Murray, D. : Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, ISMAR 2007, pp. 225–234, 2007.
- [3] Arth, C. et al. : Wide Area Localization on Mobile Phones, ISMAR 2009, pp. 73–83, 2009.
- [4] Ventura, J, Hollerer, T. : Wide-Area Scene Mapping for Mobile Visual Tracking, ISMAR 2012, pp. 3–12, 2012.