

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700161

研究課題名(和文)画像記述子補間に基づいた大規模空間におけるローカリゼーション

研究課題名(英文)Large-scale localization based on image descriptor interpolation

## 研究代表者

鳥居 秋彦(Torii, Akihiko)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：20585179

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、位置姿勢情報付き画像データベースを用いて、探索範囲内で撮影された画像(カメラ)の3次元位置姿勢推定を目的とするビジュアルローカリゼーションの研究を行い、数十～数百kmといった広範囲探索から高速かつ高精度に位置姿勢情報を推定するアルゴリズムを開発した。パノラマ画像の分割表現を用い効率よく画像記述を行いながら高速に検索を行うアルゴリズム開発、都市部における繰り返しパターンの影響を抑えた画像記述表現によるローカリゼーション、ベンチマーク用のデータセット構築などを主な成果とする。

研究成果の概要(英文)：Given a large-scale database of geotagged images, this research aims at developing systems for fast and accurate visual localization of input query images. The main outcomes are the fast and efficient localization based on image description using tiled panoramic image representation, the accurate place recognition based on efficient repeated pattern detection using BoVW, and the construction of place recognition datasets for large-scale benchmarking.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：Visual localization Place recognition 大規模画像検索 位置姿勢推定 画像表現

## 1. 研究開始当初の背景

様々な位置、姿勢、時間、季節に撮影された大量の入力画像を用い、街全体を3次元復元することが可能になりつつある。大規模3次元復元は、コンピュータビジョンにおける中心的課題である画像検索(特定物体認識)とSfM(画像からの形状復元)の融合によって実現され、非常に魅力的なテーマとして、欧米を中心に盛んに行われてきた。

大規模復元の成功を背景に、画像情報のみから位置姿勢情報付きデータベースの構築を行えるようになるため、任意のユーザ/観測者が撮影した画像からカメラの位置と姿勢を瞬時に推定する“ローカリゼーション”がにわかに注目を集めている。このテーマ自体は、ロボットナビゲーション、ITSにおける古典的・典型的な課題であるが、画像情報のみを用いた方法では、GPSを利用できない環境でも自己位置認識が可能であること、姿勢(カメラの向き)も得られるという利点がある。さらに、画像さえネットワークを介して送信できれば、各端末上でローカルに処理する必要がないため、クラウドコンピューティングとの相性も良い。応用例として、携帯型カメラを通じた視覚障害者や迷子の詳細位置検索、災害救助ロボットや火星探査ロボットの自動ナビゲーションなどが挙げられる。広範囲を検索対象として、高速かつ高精度にローカリゼーションを行う手法の提案が期待されていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、位置姿勢情報付き画像データベースを用いて、探索範囲内で撮影された画像(カメラ)の3次元位置姿勢推定を行う、“ビジュアルローカリゼーション”の研究を発展・実現することである。数十~数百kmといった広範囲探索を可能としつつ、高速かつ高精度に位置姿勢情報を推定することを目標とする。

上記の実現に向けて、本研究では、Google Street View などから得られる位置情報が付随したパノラマ画像をデータベースとして用いる。そのパノラマ画像に対して、位置情報の無い画像をクエリとした検索を行い、最も類似した画像の位置からクエリ画像の撮影位置を推定する(図1)。具体的には、bag of visual word (BoVW)によって画像記述子として各画像を表現し、画像記述子を用いて画像マッチングを行うことで、画像の類似度を算出し、検索を行う。画像記述の表現方法や、効率のよいマッチング方法などの検討が主な研究課題である。さらに、開発されたアルゴリズムの性能を評価するためのデータセット構築、ベンチマークも重要な課題である。



図1: ビジュアルローカリゼーションのイメージ図。位置情報を持つ画像データベースに対して、入力となるクエリ画像を検索にかけるとして、位置を特定する。

## 3. 研究の方法

ビジュアルローカリゼーションは、画像検索、特徴マッチングなどの基礎技術の上に成り立つ。従って、関連技術を網羅的に研究調査したうえで、アルゴリズム開発に取り組む必要がある。関連技術の調査に関しては、研究協力者であり、画像検索に関して世界的な権威である Josef Sivic のアドバイスを受けた。

アルゴリズム開発については、申請者が得意とする幾何学的なアプローチを基に、画像検索手法に融合する形で進めた。また、アルゴリズムの評価方法、ベンチマーク方法に関しては、研究協力者である Tomas Pajdla, Josef Sivic と議論を重ね、世界基準に相応しい実験評価を行えるように環境を整えた。

## 4. 研究成果

(1) 本提案研究の枠組みでは、クエリ画像はパノラマ画像でなく、一般的な透視投影画像も併せて用いることを想定している。画像検索に基づくローカリゼーションの高精度化を検討するなかで、クエリ画像とデータベース画像間の画角の差と検索精度の関係を、網羅的に評価した。十分に大規模な実画像パノラマデータベースを用意し、実験評価を行った。クエリの画角に十分近くなるように、データベースのパノラマ画像を切り出した上で、画像記述子を構成すると検索精度が向上することを確認した(パノラマカットアウトによる方法と呼ぶ)。

しかしながら、実利用において様々なクエリ画像の画角が存在することから、各画角に対応するデータベース画像記述子を用意するのはメモリ使用量の面で非効率的である。そこで、クエリ画像、パノラマ画像ともに同じ間隔で短冊状に分割表現した画像記述子を構築し、順序拘束取り入れたマッチングにより、効率良く検索を行うアルゴリズムを提案し、その性能評価を行った。この結果、提案したパノラマ画像分割表現に基づいた検

索引によるローカリゼーションは、メモリ効率の面で優位でありながら、クエリ画像の画角が広がるに連れて、検索精度の面でもパノラマカットアウト法に比べ、優位であることを実証した。

さらに、より実用に近い形での評価を行うために、スマートフォンのパノラマ撮影機能を利用して撮影した新しいビジュアルローカリゼーション用のデータセットを作成した。そのデータセットを用いた場合でも、メモリ効率の面で非常に優位でありつつ、クエリ画像の画角が広がるに連れて、検索精度の面でも既存手法に比べ、優位であることを確認した。

以上の研究成果は、論文誌、学会等で発表した。データセットの一部は、プロジェクトページを通して公開した。

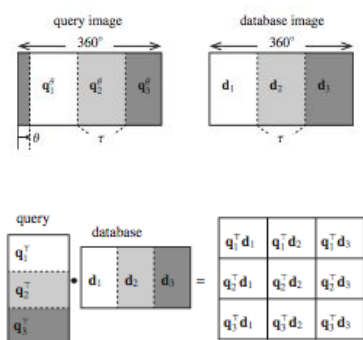


図2：パノラマ画像の分割表現による画像記述(上図)とそのマッチング(下図)。

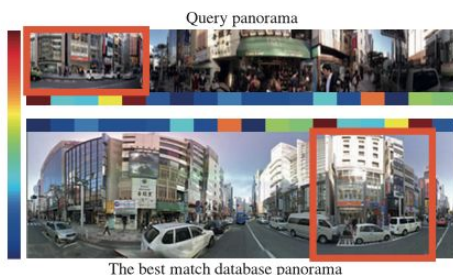


図3：作成したデータセットの画像例

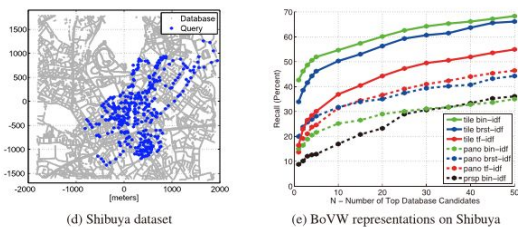


図4：大規模空間におけるローカリゼーション結果(左図)データベース画像位置(灰・),クエリ画像位置(青・)。(右図)既存手法(赤)に比べ、提案手法(緑、青)による性能向上

が認められる。

(2) 本申請研究を遂行する中で、特に近代都市部におけるローカリゼーション問題では、高層ビル、マンションなどの繰り返しパターンが非常に多く存在し、それらがローカリゼーションの性能に大きく影響を与えることを確認した。この問題への対策は実応用へ向けて非常に重要であることから、研究テーマのひとつに加え遂行した。

本課題の中では、画像中から繰り返しパターンを検出し、それらの影響を抑えた画像記述子の作成、検索アルゴリズムを開発した。繰り返しパターン検出においても、画像記述子作成で用いる visual word を共通して利用することで、無駄な処理のない効率の良いアルゴリズムとした。

本アルゴリズムの性能向上を厳密に評価するために、性能評価においては、パノラマカットアウトによる画像データセット(San Francisco dataset, Pittsburgh dataset)のみを用いた。

本アルゴリズムの新規性、性能が高く評価され、研究成果の一部は、本分野における最も競争的な国際会議、国際論文誌などに採択された。これらの成果を効果的に発信すべく、プロジェクトページを作成、ソースコードの公開を行った。

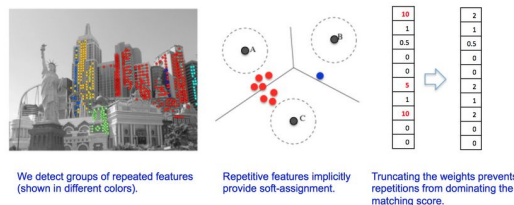


図5：Visual word を用いた繰り返しパターン検出と画像記述アルゴリズム



図6：繰り返しパターン検出アルゴリズムによる窓などの検出例。

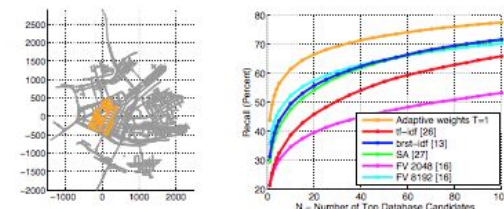


図7: 繰り返しパターンを考慮したローカリゼーション結果(Pittsburgh dataset)。(左図) データベース画像位置(灰・), クエリ画像位置(黄・)。(右図) 既存手法(黄以外)に比べ, 提案手法(黄)による性能向上が認められる。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Akihiko Torii, Josef Sivic, Masatoshi Okutomi and Tomas Pajdla .  
Visual Place Recognition with Repetitive Structures .  
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015(掲載予定)。(査読有)

Akihiko Torii, Yafei Dong, Masatoshi Okutomi, Josef Sivic and Tomas Pajdla .  
Efficient Localization of Panoramic Images Using Tiled Image Descriptors .  
IPSA Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.6, pp.58-62, July, 2014 .  
(査読有)

Masayuki Tanaka, Akihiko Torii and Masatoshi Okutomi .  
Fisher Vector based on Full-Covariance Gaussian Mixture Model .  
IPSA Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.5, pp.50-54, July, 2013 .  
(査読有)

[学会発表](計 8 件)

董亜飛, 井上優希, 鳥居秋彦, 奥富正敏 .  
インスタント 3D 復元による画像データベース構築と分割画像記述子を用いた自己位置・方位推定 .  
ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2014)講演論文集, December 4, 2014 .  
パシフィコ横浜 (神奈川県).

鳥居秋彦, 井上優希, 董亜飛, 杉浦貴行, 奥富正敏 .  
インスタント 3D 復元による位置情報付き画像データベース構築とその利用 .  
第 20 回画像センシングシンポジウム (SSII2014), p.DS2-07-1, June 12-13, 2014 .  
パシフィコ横浜 (神奈川県).

Torsten Sattler and Akihiko Torii .  
Large-scale visual place recognition and image-based localization .  
Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition

(CVPR2014)(チュートリアル講演), June 23, 2014 . Columbus (USA). (査読有)

Akihiko Torii, Josef Sivic, Tomas Pajdla and Masatoshi Okutomi .  
Visual Place Recognition with Repetitive Structures .  
第 16 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2013), August 1, 2013 . 国立情報学研究所 (東京都)。(招待講演)

奥富正敏, 鳥居秋彦  
多視点画像からの 3 次元復元 ~基本原理から大規模復元まで~  
第 19 回画像センシングシンポジウム (SSII2013)チュートリアル講演, June 12, 2013 . パシフィコ横浜 (神奈川県)。(招待講演)

董亜飛, 鳥居秋彦, 奥富正敏 .  
BoF の分割表現を用いた画像検索による自己位置・方位推定 .  
情報処理学会研究報告(コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)), Vol.2013-CVIM-187, No.15, pp.1-6, May 20, 2013 . 東京農工大学 (東京都).

Akihiko Torii, Josef Sivic, Tomas Pajdla and Masatoshi Okutomi .  
Visual Place Recognition with Repetitive Structures .  
Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2013), pp.883-890, June 25, 2013 . Portland (USA)。(査読有)

Akihiko Torii. Large Scale Structure from Motion and Localization.  
Tutorial Course, the IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA2013), May 20, 2013. 立命館大学 (京都府)。(招待講演)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]  
ホームページ等

<http://www.ok.ctrl.titech.ac.jp/~torii/project/shibuya/>

<http://www.ok.ctrl.titech.ac.jp/~torii/project/repttile/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

鳥居 秋彦 ( TORII, Akihiko )  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：20585179