

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330305

研究課題名(和文)サーバ通信を利用したカメラの自己位置配信と特徴点ベース地図の開発

研究課題名(英文)Self-Localization via Server Communication and Development of Keypoint Map

研究代表者

阪野 貴彦 (Banno, Atsuhiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・ロボットイノベーション研究センター・研究チーム長

研究者番号：70356187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では初期地図として対象市街地の基幹ルートの全方位画像を取得し、Structure from Motionの技法を用いて画像のみから3次元情報を取得する手法を開発した。基幹ルートを設定し高精細全方位カメラで動画画像を取得した。取得した画像を用いて、シーケンシャル・グローバルによる3次元復元手法2つを開発した。さらに、全方位画像を2次元の従来型画像として扱うのではなく、球面画像として立体的な画素配列のグリッドを設定し、その球面上から直接抽出できる特徴点、特徴点記述子を考案した。これらを用いて、未知画像から地図上のどの地点で撮影されたかを、高速に算出するシステムを開発した。

研究成果の概要(英文)：We developed a method to acquire three-dimensional map only from images taken by several types of cameras using the technique of Structure from Motion. We set up a route of Tsukuba Mobility Robot Experimental Zone, and acquired a lot of movies with high definition omnidirectional cameras. Two types of methods for 3D reconstruction were produced: sequential and global methods. In order to cope with an increase of the number of images, we introduced an approximate solution method was introduced. As a result, computation time was reduced less than 3% of the conventional method while suppressing accuracy degradation. Furthermore, instead of treating the omnidirectional image as a two-dimensional conventional image, three-dimensional pixel grid was set as a spherical image, and feature points and feature point descriptors could be directly extracted from the spherical surface. Using these, we developed a system that calculates the self-position on the map when a query image was taken.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：3次元環境構築 自己位置推定 画像特徴点

1. 研究開始当初の背景

開始当初、乗用車の自動運転がニュースとして取り上げられることが多くなりつつあった。自動運転を行うためには、自車の周辺の状況の把握はもちろん、現在自分がどの場所にいるのかを認識することが重要である。公道での自動運転車や、工場内での自動搬送車などは、自己位置を推定するため主に GPS やレーザレンジセンサが使用されている。特に、屋内や高層ビルに囲まれた環境では、GPS 信号が受信しにくい場合、事前に取得しておいた 3 次元地図と、走行時に取得するレンジセンサの出力とをマッチングさせて自己位置を算出するシステムが隆盛である。

ただし、公道を走行する乗用車ではなく、歩道を移動するような移動支援ロボットにレンジセンサを搭載することは現実的ではない。レンジセンサはコストが高く、実用化を見据えるならば、自己位置推定をもっと安価なセンサ、例えばカメラに置き換える必要がある。また、自己位置推定のユニットを小型化するにはコンピュータを本体に搭載せず、計算はサーバに任せ、通信によって結果のみを送り返すことが現実的である、と考えた。

2. 研究の目的

人間と共生するロボットが自律的かつ安全に行動するためには、移動に必要な周囲の環境情報を取得し、地図と比較照合してロボット自身の 3 次元位置や姿勢を知ることが不可欠である。しかも、安価なセンサで実行できることが望ましい。そこで本研究では、移動ロボットが、カメラを主たるセンサとして、自律的かつ安全に移動するために必要な 3 次元地図作成と、自己位置推定システムの開発を行う。

最終的には、市街地においてタブレット端末やスマートフォンからサーバに画像や動画を送信すると、撮影したカメラの位置姿勢情報を、クライアントにリアルタイムで返信するシステムを構築することを目的とする。そこで、画像上に現れる自然特徴点の 3 次元座標や特徴点記述子をデータベース化することで、広域都市空間の 3 次元地図を構築する。クライアントから送られた画像は、地図データを更新するための入力にも利用することで、初期の地図データから自動的に更新・拡大を行えるフレキシブルな地図を開発する。

3. 研究の方法

(1) 広域 3 次元地図生成

初期地図として対象市街地の基幹ルートの 3 次元情報を取得する。本研究では、つくばモビリティロボット特区を対象区域とする。基幹ルートにおいては、通常のカメラや

高精細全方位カメラ、超広角レンズなどで動画像を取得し、Structure from Motion (SfM) の技法を用いて、撮影時のカメラパラメータや環境の 3 次元情報を取得する。本研究では、広域を高精度に復元できる SfM の開発とともに、全方位カメラ画像(図 1)や超広角画像に対応できる画像特徴点の抽出手法を確立する。



図 1 本研究で取り扱う全方位画像

(2) マップデータベース化と現在位置推定
撮影カメラの位置姿勢を推定するためのクエリ画像を入力したとき、地図上のどの位置かを検出するため、特徴点バンクとしての地図データベースを構築する。見栄えのする地図ではなく、画像の撮影位置を算出するのに適した地図データを構築する。すなわち、画像上に現れる特徴点の記述子と特徴点の 3 次元座標からなる地図データである。クエリ画像が入力されたときには、特徴点をランドマークとして撮影位置および姿勢を推定する。本研究では、従来画像や全方位画像を統一的に扱える全方位画像特徴点記述子を開発する。

これらが実現できた後、入力画像として撮影位置が不明な画像を入力すると、地図データ上のどこから撮影されたものであるかを返すシステムを構築する。

4. 研究成果

今回、2 種類の 3 次元復元手法を開発した。入力画像を連続的に処理し、形状復元と自己位置推定を行うシーケンシャルな手法と、使用する画像を一度全て蓄積したうえで、全体的な処理を行うグローバルな手法である。シーケンシャルな手法では、局所的には高精度な結果を出力できるが、誤差が累積するという問題が発生する。グローバルな手法では、誤差を分散できるため、累積誤差を避けることができるが、大量のデータ処理手法や高精度な初期解が必要となる。また、本研究では、全方位画像を使用するため、撮影カメラ位置が近い場合であっても、画像間の見えの違いが大きくマッチングが難しくなる、というのが共通の問題点である。

(1) シーケンシャルな 3 次元復元

撮影で取得した順に 3 次元復元を行う手法は、将来的にリアルタイムで処理できる可能性がある。移動しながら撮影しているため、

フレームの近い撮影シーンには、高い類似性がある。したがって、基本的にはフレーム順に画像間のエピポラ幾何を復元していけばよい。

その際、フレーム間での特徴点マッチングが必要になるが、従来的特徴点手法を用いた場合、全方位画像は見えの歪が大きいため、図2の左のように誤対応が発生することがある。同じようなパターンが繰り返されるシーンでは、誤対応の方が見えの類似性が高い場合があるためである。本研究では、対応点探索に見えの情報以外に特徴点の3次元位置情報を考慮した手法を開発した。図2の右のように、提案手法では見えの類似性より、復元される3次元形状の整合性の重みの方が大きいため、正しく対応点が取れていることが分かる。

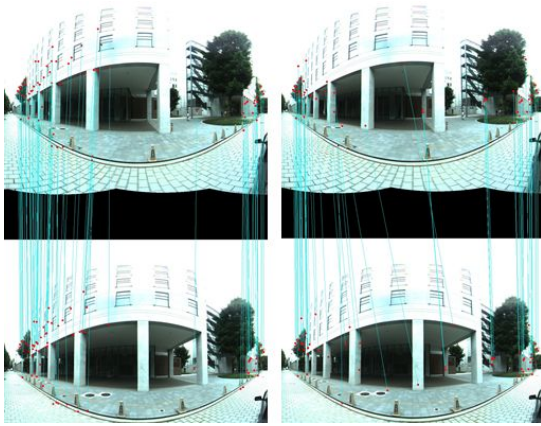


図2 全方位画像での特徴点マッチング
(左：従来手法、右：提案手法)

本研究で開発した全方位画像を用いたSFMでの結果を図3に示す。本手法では、Sliding Windowを導入し、一定フレーム遊った情報を利用した3次元復元を行った。このデータセットは大域的なループを有していないが、近隣フレーム間で局所的なループ検出を行っているため、精度良く復元できたことを確認した。なお、本プログラムでは、カメラパスに大域的なループを検出した場合に、クローリングを行う機能、GPS情報によるグローバル座標合わせの機能を実装してある。

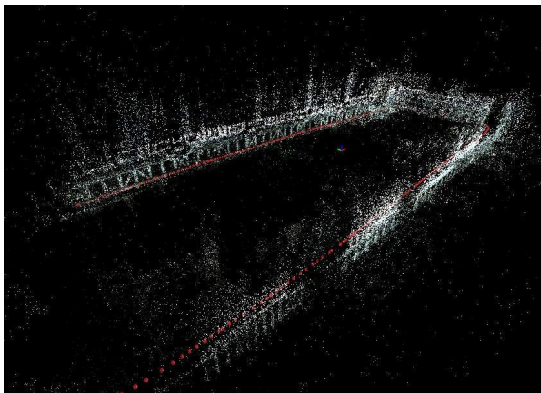


図3 シーケンシャル手法による復元

(2) グローバルな3次元復元

シーケンシャルな復元はリアルタイム処理の可能性があるものの、累積誤差により精度低下を招くという問題が生じる。そのため、3次元復元に利用する画像を撮り貯め、全体的に処理する。そのため使用する画像すべてを一度取り扱うことが必要になる。また、大規模データを処理することによる計算時間の増大も課題となる。

大規模データと高速処理を可能にするため、並列処理可能な階層的SFM手法を開発した。エピポラ幾何を算出するため、大量の画像から高速に類似画像を探索、L1ノルムを利用した高精度な3次元形状復元、最適化サンプリングによりデータを間引き、GPUによるスパース行列演算で処理することで、最終的には計算時間を30分の1以下にまで短縮することができた。

図4に本手法での3次元復元の結果を示す。既存のグローバル手法では、カメラパラメータ復元は、姿勢と位置を分離して復元する手法がスタンダードになりつつあるが、提案手法では、カメラのTriplet復元を介することで、姿勢、スケール、位置の3段階復元を行った。その結果、従来手法より高精度に復元できることを確認した。

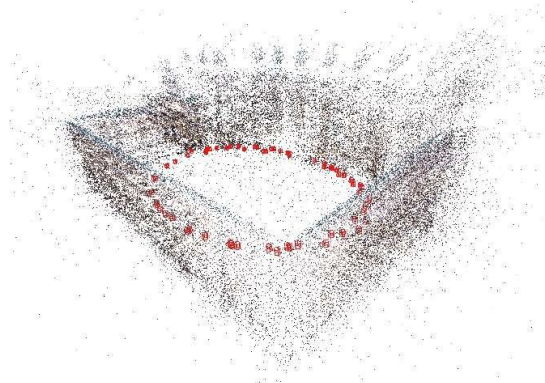


図4 グローバル手法による復元
(上：使用した画像の例、下：復元形状)

(3) あらゆる方向の情報が1枚の画像に収められた全方位画像は、球の表面上にマッピングされた球面画像として捉えることができる。ところが既存研究で提案されてきた画像処理に関する技術は、平面画像のみに対して適用できる手法であり、球面画像にそのまま適用できない。球を展開した平面画像であればそのまま適用することができるが、展開したことによる画像歪みが発生する。この画像から従来手法による特徴点抽出を行うと、視点移動により見えの変化が発生し、対応すべき特徴点がマッチングされないケースが多

く生じる。そこで、本手法では、球面に均等に配置したグリッドを球面ピクセルに見立て、球面グリッドから特徴点と記述子を抽出する手法を開発した。

提案手法では、球面グリッド上から局所的な学習を行うことで特徴点抽出を行い、特徴点周辺での画像勾配を基に記述子を策定した。また、グリッドの密度を変えることで、スケール変化にも対応できるようにした。従来の平面画像、球面画像からの特徴点抽出手法と比較したところ、SIFTと同程度の計算時間で、従来手法よりも高精度にマッチングを行えることが確認できた(図5参照、IPOSが提案手法)。

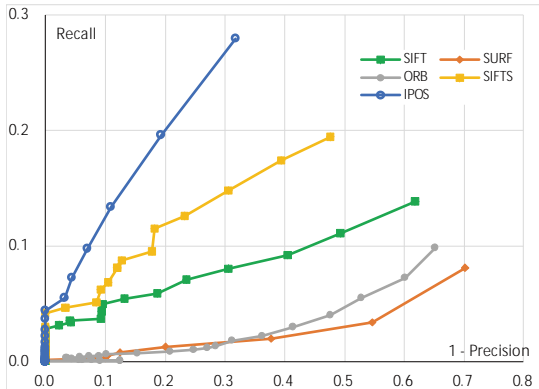


図5 従来手法との比較

(4)高精度な自己位置推定

特徴点すなわちランドマークの3次元復元と、撮影時のカメラ位置姿勢をデータベースとして保存しておき、あらたに取得した画像の位置姿勢を推定する手法を開発した。2D-3Dの対応による位置姿勢推定は、PnP問題として知られているが、なかでも3点のみで行うP3P解法はノイズの多いデータセットでもインライアを抽出できる確率が高い。そこで、本研究では従来手法と同程度の精度で、高速に推定する手法を開発した。また、2D-3D対応を検出するうえで重要な類似画像探索においても、前項で提案した球面特徴点を利用することで、ロバストな検索手法を開発した。

提案するP3P解法では、各フレームを撮影したカメラのパラメータをベクトルの線型結合として表現できることに注目し、結合時の係数が3変数の3元連立2次方程式に変形した。これらを、グレブナー基底を用いて1変数の4次方程式に帰着することができ、解析的に算出することができた。提案手法による解の精度に関するヒストグラムを図6に示す。最新手法と同程度の精度で推定できていることが分かる。

また、類似画像探索においては、球面画像特徴量を用いたVocabulary Treeを構築し、逆引き辞書と直積型探索を行うことで、大規模データベースからリアルタイムで類似画像探索が可能となった。

現在、Wi-Fi通信によって画像を送信し、現在位置推定を行うことが可能となってい

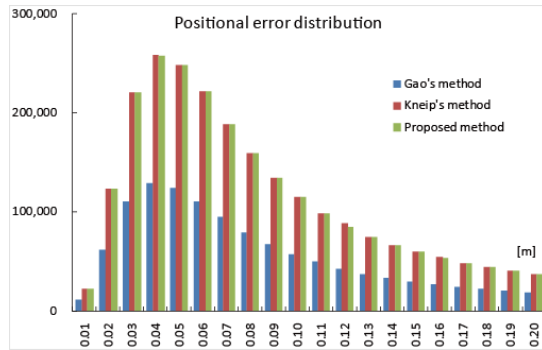


図6 提案手法による推定精度ヒストグラム

るが、アプリ開発まで至っていない。直ちにテストが行えるよう準備し、運用する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

阪野貴彦、信頼できるインフラストラクチャーの更新に向けて、検査技術、査読無、21巻、2016、1-4

〔学会発表〕(計3件)

M. Yokozuka, K. Tomita, O. Matsumoto, A. Banno, Accurate Depth-Map Refinement by Per-Pixel Plane Fitting for Stereo Vision, International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2016), Mexico, Cancun, 2016

A. Banno, Keypoint Extraction and Matching for Generalized Image Grid, Workshop on Brain Circulation Project, Germany, 2015

横塚将志、阪野貴彦、松本治, SFMによるつくばモビリティ実験特区の環境復元, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会、富山県、2014

〔図書〕(計1件)

阪野貴彦、機械工業年鑑「18. ロボット・メカトロニクス」、日本機械学会、2016

6. 研究組織

(1)研究代表者

阪野 貴彦 (BANNO Atsuhiko)

産業技術総合研究所・ロボットイノベーション研究センター・研究チーム長

研究者番号：70356187

(3) 研究協力者

横塚 将志 (YOKOZUKA Masashi)