

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月20日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22800018

研究課題名（和文） 複合トラッキングによるアダプティブなビジュアルスラム

研究課題名（英文） Adaptive visual SLAM by composite tracking

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

研究成果の概要（和文）：環境の変化に対して柔軟に適応可能な特徴点とカメラ位置姿勢のトラッキング、3次元復元を行うビジュアルスラムシステム（VSLAM）を目的とした．本システムの実現に重要な、特徴点トラッキング法を精査・比較し、提案するアダプティブなVLSAMにおいて、SURFによるトラッキングが効率・安定性において優位であることを、様々な画像データを用いた実験を通して確認した．さらに、画像の高速索引付けに基づいた画像類似度を用いることで、効率よくキーフレーム画像を選択し、高速にカメラトラッキングを行うアルゴリズムを開発、実装を行い、提案システムを発展した．主に屋外シーンにおいて、様々なカメラ運動を想定して撮影した画像列を用いた実験を通して、提案するビジュアルスラムシステムの性能評価を行い研究成果としてまとめた．

研究成果の概要（英文）：We aimed at proposing visual simultaneous localization and mapping (VSLAM) system which is adaptive and flexible to large changes of scenes and views in image sequences. We deeply studied several feature tracking approaches and figured out that SURF feature tracking is an appropriate choice for accomplishing 3D reconstruction with our VSLAM system. Further, we extended the efficiency of camera tracking algorithm using the key-frame selection algorithm based on a fast image indexing method. Experimental validations and performance evaluations w.r.t. the state of the art structure-from-motion system have achieved on challenging real image sequences acquired under various scene and camera conditions.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011年度	1,160,000	348,000	1,508,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：コンピュータビジョン

## 1. 研究開始当初の背景

ヴィジュアルスラム(VSLAM)は、ロボッ

トの運動制御、自動車の運転支援など、様々なシステムの基盤技術となっている。既存のVSLAMでは、視点の緩やかな移動による撮

影を仮定することで、高速に3次元復元計測を遂行する。しかし、実環境下での撮影では、アクシデント・障害により、急激な視点移動が生じ、計測不能に陥ることも少なくない。一般に知的計算機システムが、柔軟な対応を苦手とするように、既存 VSLAM も想定外の状況には対応できない。

一方、未整列画像の集合、いわゆる写真の集合から、3次元位置情報を計測する技術 Structure from Motion(SfM)は、特にエンターテインメント分野において広く応用されている。SfM では、撮影時の条件に制約を与えないため、自由なカメラ運動からの計測が可能である。しかし、SfM の基本的なアルゴリズムが全探索に基づくため、計算コストが高い。

VSLAM に SfM の技術をバランスよく融合することで、外界の環境変化に柔軟に対応し、高速に計測を行うシステム(図1)の実現は、産業界、宇宙開発など、様々な分野への貢献が期待できる。さらに、画像のみを用いた計測技術の発達は、コスト面のみならず、マルチモーダル認識システム実現にとっても不可欠である。

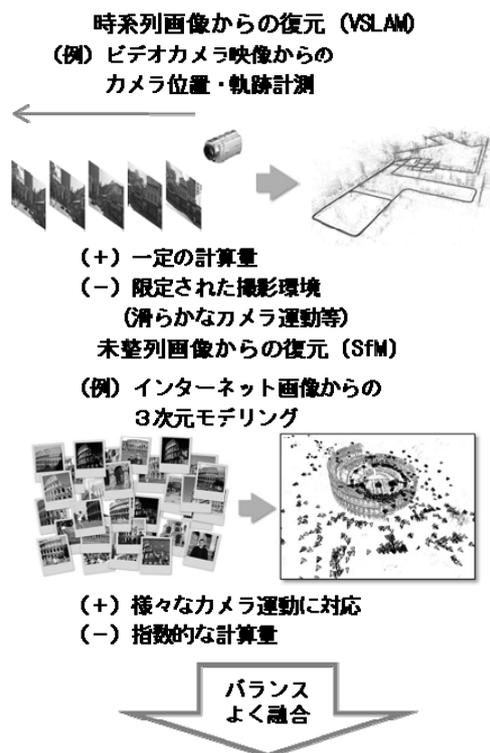


図1：環境変化に柔軟に対応し、高速に3次元計測を行うシステム

効率化に特化した既存の VSLAM 研究に対し、環境の変化への柔軟な適応性を考慮した、バランスの良い計測システムの開発を本研究の目標とした。自由なカメラ運動により撮

影された画像列からの3次元復元計測は、計算コストが増大するという常識を、適応的にトラッキング手法を切り替えることで打ち破り、画像間の運動変化を判別するための事前知識として、画像辞書データを利用し、画像索引手法を取り入れるという試みは、十分に独創的である。

## 2. 研究の目的

単眼カメラ時系列画像から、撮影者の視点位置・姿勢の復元、物体の3次元位置を計測する Visual Simultaneous Localization and Mapping(VSLAM, ビジュアルスラム)システムを開発・実装する。様々な物体特徴のトラッキング手法を融合し、画像からのカメラ運動量推定アルゴリズムを適用することで、高速かつ外界の変化に適応的な VSLAM を実現する。さらに、画像検索・索引技術を取り入れることで、効率の良い計測システムを構築する。これらにより、計測中にアクシデント・障害が発生しても、適応的に計測を続けられる点が、提案システムの特徴である。

## 3. 研究の方法

本研究では、既存の VSLAM で用いられる高速なトラッキング法と、我々が開発してきたカメラ運動に対して柔軟なトラッキング法を融合し、自由なカメラ運動により撮影した単眼カメラ時系列画像からの、実時間3次元計測を目標とする。主に以下の検討を行う。

(1) カメラ運動量推定に基づいた複合トラッキングアルゴリズム開発：特徴点、カメラトラッキング手法を予め複数用意し、各フレーム間のカメラ運動量に応じて、最も適切なトラッキング方法を適応的に選択する。大きな画像変化にも対応できるがコストの高いトラッキング法は必要な時のみ用いることで、大幅に計算コストを削減する。ここで、高速かつ信頼度の高いカメラ運動量推定を行うために、画像検索・索引で用いられる画像辞書データ、画像類似度算出法を応用、融合する。

(2) 信頼度・精度検証：様々な屋外環境で撮影された映像から3次元計測を行い、アルゴリズムの信頼度を測る。さらに、既存手法、または、レンジセンサなどにより計測した情報との照合をとり、復元計測精度の検証を行う。

上記の研究目的を達成するために、はじめに、これまでの研究成果を利用し、2フレーム画像間のカメラの運動量を高速に推定するアルゴリズムを開発し、その実装を行う。さらに、様々なトラッキング手法の融合、実装を行う。自由なカメラ運動に伴い撮影された画像データに対し実験を行い、運動量推定

アルゴリズムの性能評価を行う。その上で、トラッキングを適応的に選択するアルゴリズムを構築する。提案する複合トラッキングに基づいて、画像から自動で3次元復元を行うシステムを設計、実装する。

次に、運動に拘束条件を与えず撮影した様々な単眼カメラ時系列画像から、カメラ位置・姿勢、物体位置の計測を行い、システム全体の信頼度、計測精度の評価を行う。様々なアクシデントを発生させた映像を用意し、そのような映像に対して実験、解析を重ねることで、システムの信頼性を測る。さらに、アクシデント等のイベントの無い状況では、実時間で動作し、イベント発生後は、ジョブを分割し、バックグラウンド処理を行えるようなシステム設計を目標にする。最後に、VLSMの結果を直観的に理解可能であり、幅広く普及するように、計測結果を効果的な表示方法を検討する。

#### 4. 研究成果

平成22年度の主な研究成果を以下示す。

(1)環境の変化に対して柔軟に適応可能なビジュアルスラムシステムを実現するために重要な、特徴点トラッキング法を精査・比較し、実装、実験評価を行った。具体的には、コーナー検出に基づいた高速トラッキング法(KLT法)と、様々な画像変化、照明変化に対してロバストな特徴量SIFT、SURF、MSERを用いたWide baselineトラッキング法を比較評価し、SURF特徴量を用いたトラッキング法が、最も効率よく、平均的に安定な特徴量のトラッキングを行うことを確認した。そして、SURFトラッキング法を基にしたVisual SLAMシステムを開発・実装し、従来のKLT法のみをベースにしたVisual SLAMシステムでは復元計測が困難な画像列に対しても、安定かつ高精度に3次元計測が可能なことを実証した。

(2)画像の索引付け法を利用した画像類似度計算法を用いることで、効率よくキーフレーム画像を選択するアルゴリズムを開発・実装した。具体的には、画像中のSURF特徴量に対しベクトル量子化を行うことで、データ量を削減し、tfidf法による重み付けを行うことで、非識別的な特徴に対する頑健性を保った画像インデックスを作成する。このようにして算出された画像インデックスを用い隣り合うフレーム間の画像類似度を測ることで、高速かつ信頼度の高いキーフレームの選択が可能であることを実証した。

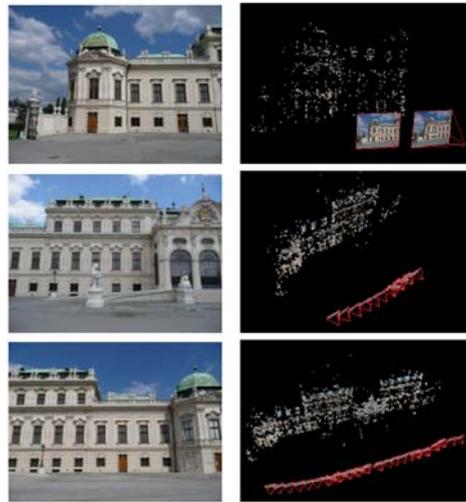


図2：画像列からのVSLAMによる復元結果例

(3)VSLAMシステム開発と同時に、画像からの3次元計測において、基盤となるカメラの内部パラメータ推定に関する基礎研究を行い、特に焦点距離をロバストに推定するアルゴリズムを開発し、実装、その成果を発表した。

(1)、(2)による研究成果は[2][5]の一部として発表した。(3)に関しては、[7]の一部として発表、最優秀プレゼンテーション賞を受賞した。

平成23年度は、昨年度までに行った研究の完成度を高めるべく、主に以下に焦点を置いて研究を遂行した。

(1)復元に不適切な画像の検出による処理の効率化：画像検索と類似度評価を発展し、3次元復元に適切・不適切な画像を判別するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムにより、過剰なシーン変化を含む、復元に適さない入力を高速に検出し、無駄な処理を省くことで、さらなるシステムの効率化を実現した。

(2)計測結果の表示インターフェースの構築：入力画像、復元されたカメラ位置、3次元点を逐次的に表示するためのインターフェースの構築し、実装を行った。これにより、現在どのような復元が行われているか直感的に把握できるため、専門的知識を持たないユーザであっても、容易に画像からの3次元復元計測を行えるようなシステムとなった。

(3)様々なシーンからの復元と性能評価：主に屋外シーンにおいて、様々なカメラ運動を想定した撮影を行い、3次元復元実験を行った。復元処理の効率と精度を評価するために、オフラインSfMとして現在最も標準的な既存手法Bundlerによる復元と比較を行った。実際に画像から3次元復元を行った結果を図2、図3に示す。処理効率、精度に関して、提案システムは既存手法と同等またはそれ以上の性能を持つことを実証した。



図3：パノラマ画像列からのVSLAMによる復元結果例

## 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1件)

[1] Torii, A., Havlena, M., Pajdla, T.: Omnidirectional image stabilization for visual object recognition. International Journal of Computer Vision, Vol. 91(2), Springer, pp. 157-174, 2011.

〔学会発表〕(計7件)

[1] 鳥居秋彦, Josef Sivic, Tomas Pajdla, 奥富正敏: 画像記述子の線形結合によるヴィジュアルローカリゼーション. 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, Vol. 2011-CVIM-181, No.1, 3月15日, 2012.

[2] Souza, R., Okutomi, M., Torii, A.: Real-time image mosaicing using non-rigid registration. Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology (PSIVT), Gwangju, South Korea, November 21, 2011

[3] Torii, A., Sivic, J., Pajdla, T.: Visual localization by linear combination

of image descriptors. In 2nd IEEE Workshop on Mobile Vision, Barcelona, Spain, November 7, 2011.

[4] Akihiko Torii: Feature matching, tracking and 3D reconstruction from omnidirectional images. Workshop on Visual Tracking and Omnidirectional Vision, San Francisco, USA, September 26, 2011. (招待講演)

[5] 鳥居秋彦, 半澤悠樹, 奥富正敏: 誰でも簡単オンライン3次元復元. 第17回画像センシングシンポジウム(SSII2011)講演論文集. IS2-11-1-6. 7月9日, 2011.

[6] 鳥居秋彦, 岡谷貴之, 延原章平: 多視点3次元復元の研究動向. 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, Vol. 2011-CVIM-176, No.1, 3月17日, 2011.

[7] Torii, A., Kukulova, Z., Bujnak, M., Pajdla, T.: The six point algorithm revisited. Computer Vision in Vehicle Technology: From Earth to Mars, Queenstown, New Zealand, November 8, 2010.

[8] Havlena, M., Torii, A., Pajdla, T.: Efficient structure from motion by graph optimization. 11<sup>th</sup> European Conference on Computer Vision (ECCV 2010), Heraklion, Crete, Greece, September 6, 2010.

〔図書〕(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://okutomi-lab.ctrl.titech.ac.jp/res/OSfM/index.html>

## 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