

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 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22300057

研究課題名（和文） これまでの常識を上回る精度を実現する画像からの幾何学量推定方法の研究

研究課題名（英文） Study of Super Accurate Methods for Geometric Inference from Images

研究代表者

岡谷 貴之 (OKATANI TAKAYUKI)

東北大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：00312637

研究成果の概要（和文）：

カメラで撮影した画像を元に、撮影対象の3次元形状をはじめとする幾何学情報を推定する問題について、その理論上最も高精度な方法を探求し、その応用を開拓した。研究成果は、行列因子分解の数値計算法、プロジェクタカメラシステムの校正法、高精度平面追跡法、車載カメラを用いた市街地の時空間モデリングと可視化の方法、車載ステレオカメラの校正法、光学的方法との融合に基づく高精度形状計測、マルコフ確率場の最適化計算法等である。

研究成果の概要（英文）：

This study is concerned with the problems of estimating geometric information such as the three dimensional shape of an object from its image(s) captured by a camera. We have sought for the theoretically most accurate methods along with development of their applications. Our achievements include a new numerical method for matrix factorization, a calibration method for projector-camera systems, a super-accurate planar tracking method, a method for spatiotemporal modeling and visualization of a city from its images captured by a vehicle-mounted camera, a calibration method for vehicle-mounted stereo cameras, a super-accurate shape measuring method based on the integration with photometric methods, new optimization methods for Markov random fields, etc.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2011年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2012年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	100,000,000	3,000,000	13,000,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 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

(1) 対象をカメラで撮影した画像から、その形状やカメラの姿勢などの幾何学的パラメータを推定することは、コンピュータビジョ

ン（以下 CV）の中核をなす技術である。カメラキャリブレーションや運動からの形状復元（SfM）といった個々の問題について、その幾何学的な計算原理は、本計画開始時点か

ら約 5-10 年遡ったころにほぼ解決済みであり、成果は映像製作などいくつかの分野ですでに欠かせない技術となっていた。

(2) これらの応用では、その性格上例外なく精度が重視される。幾何学的パラメータの計算には、最尤推定を理論的基礎とし数値的に非線形最小二乗問題を解く、バンドル調整の利用がスタンダードとなっていた。バンドル調整が精度の面で最良の方法であるという見方は、この分野の「常識」であった。これに対しわれわれは、この「常識」が実は正しくないことを、本研究計画以前の研究で明らかにした。つまり、バンドル調整よりも高い精度を得られる方法が存在することがわかってきた。

(3) バンドル調整は、統計学的には観測誤差に加算的ガウス分布を仮定した場合の最尤推定にあたり、最尤推定の最適性理論がバンドル調整の精度を保証する。しかしこの最尤推定の最適性は、観測誤差が十分小さいという条件の下で近似的に成立するに過ぎないものである。したがって、CV の様々な問題それぞれについて、観測誤差は本当に十分小さいと言えるのかどうか重要な問題となった。各種特徴抽出アルゴリズムにより、特徴点の画像上での位置決めがサブピクセルの精度で行い得るといっても、カメラの自己校正などで、バンドル調整を用いても満足な精度が得られないことはよく経験される。観測誤差が何と比較してどの程度まで小さくしなければならないかという問いに答えること、さらにその結果を様々な問題に応用することが求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、対象をカメラで撮影した画像から、その形状やカメラの姿勢などの幾何学的パラメータを推定する問題について、理論上最も高精度な方法がどのようなものを明らかにし、その応用を確立することである。その中心に、現在のスタンダードである最尤推定・バンドル調整を精度の面で上回る推定方法を実現することがある。達成すべきことは、数値計算アルゴリズムの開発、応用の開拓とその応用における精度の実証、および、最尤推定が最適でなくなるメカニズムの解明の3つに大別される。これまでの研究では扱っていなかった、SfM を含むより大規模で実用上重要な複数の問題を対象に、上述の精度の検証や挙動の分析を行う。

3. 研究の方法

(1) 上述の推定問題を高精度に解く方法を数理統計学に基づいて理論的に探求する。また、この計算を実効可能な数値計算アルゴリ

ズムの開発を行う。

(2) これらは様々な応用を想定したものとするが、特に次の5種類の問題を選び、それらに適用することで性能の検証等を行う：①平面射影変換(2枚の画像の点対応から平面射影変換を推定)、②基礎行列(2枚の画像の点対応から基礎行列を推定)、③SfMおよびカメラの自己校正(複数視点から同一シーンを撮影した画像間で求めた点対応から、カメラの姿勢と内部パラメータおよび対象の3次元構造を推定)、④プロジェクタカメラの校正(複数のプロジェクタからの平面への投影像をつなぎ合わせて1枚の高解像度画像投影を実現するシステムや、運動プロジェクタによる平面上への投影像を幾何学的に望ましいものに補正するための校正)、⑤プロジェクタカメラによる形状復元(1対以上のプロジェクタとカメラを用いて、システムの校正と形状復元を、自己校正によって同時に行う。正弦波パターン投影にて得られる投影画像と撮影画像間の点対応を利用)。以上5つの問題は、当該分野での重要性と問題の構造や規模の差異を基準に選んだものだった。

4. 研究成果

(1) カメラを動かして撮影した画像を元に、カメラの動きと対象の3次元形状を同時に復元するSfMの問題をはじめとし、さまざまな問題に適用可能な、低ランク行列分解の新しいアルゴリズムを開発した。この方法は、推定精度の犠牲を最小限にとどめ、高速に計算できるものである。成果をまとめた論文は、2011年開催の同分野で最高水準の国際会議ICCVに採択され、そこで成果を公表した。

(2) プロジェクタとカメラを組み合わせたプロジェクタカメラシステムを対象に、運動するプロジェクタからスクリーン等対象物に投影した映像をカメラで撮影し、その映像からシステム全体のキャリブレーションを高精度に行う方法を開発し、その性能を実証した。この方法を使えば、手に持ったプロジェクタから平面スクリーンに投影した映像が、常にスクリーン正面から見て正しい矩形の画像に見えるようにリアルタイムで補正しながら、これと同時にシステムのキャリブレーションを高精度に行い得る。この技術はたとえば、近年小型化の著しい携帯型のプロジェクタでの利用が考えられ、ユーザーは見たいコンテンツを投影しているだけで、何ら付加的な作業を要さず自動的に映像補正が行えるようになる。また同手法は、システムの断続的時間変化をも扱えるようにしている。たとえば、映像投影中にカメラやスクリーンが移動した場合でも、数秒後には自動的に映像を正しく補正するに至る。以上の成果

は、2010 年開催のトップレベルの国際会議 ACCV にて発表され、また国際会議の招待講演にて公表された。

(3) 拡張現実感やビジュアルサーボで特に良く使われる平面の画像追跡の新しいアルゴリズムを開発した。従来の方法は、画像の標本化過程を考慮していなかったため、追跡対象平面がカメラから遠ざかったり、あるいは著しく傾く場合に、追跡性能が大きく低下する問題があったが、これを解決することができた。成果をまとめた論文は、2011 年開催の同分野で最高水準の国際会議 ISMAR のオーラルセッションに採択され、そこで成果を公表した。

(4) 車載カメラで撮影した多視点画像を元に長いシーンのパノラマ画像を自動生成する方法を実現し、2012 年開催の国際会議 FSR にて発表した。第二に、市街地地図と車載カメラで撮影した画像列から、地図上の建物の存在の有無を推定する方法を実現した。予備的な成果は国内研究会で発表し、今後の国際会議発表を準備している。第三に、市街地シーンの時間変化を車載カメラで異なる時期に撮影した画像列から推定する方法を世界で初めて実現した。成果は 2013 年 6 月の国際会議 CVPR で発表予定である。これらは、東日本大震災のような広域災害発生時に損害の程度を短時間に把握し、あるいは復旧過程を可視化し、今後の防災・都市計画に役立てるなどの用途があり、今後の研究の進展が期待されている。

(5) 近年市販されるようになった車載ステレオカメラを対象に、そのカメラシステムの高精度校正を行う方法を研究開発した。従来は専用のチャートを用いて、熟練者が長時間をかけて校正していたところ、われわれの方法では車両を普通に走行させるだけで校正を自動的に行うことができる。予備的成果は国内研究会(CVIM 研究会)で発表し、今後専門誌への投稿を準備している。

(6) 幾何計測と陰影計測の融合による 3 次元形状計測の高精度化手法：3 次元形状を計測するのに、例えば三角法などの幾何学的方法と、陰影を用いる方法とを融合し、精度を大幅に向上する方法を実現した。統計的原理を用いて、理論的に最適な両手法の融合方法を考案したのが成果のポイントである。以上は、2012 年開催の国際会議 CVPR にて発表した。

(7) マルコフ確率場のための新しい最適化手法：統計物理の既存手法を、それに必要な変更を加える事で、画像認識の諸問題に応用できるようにした。また、連続領域での推定

問題を離散領域での推定問題に直して計算を実行可能にする戦略において、変数空間の離散化を柔軟に行い、それによって精度や計算速度を向上させる方法を実現した。前者は 2012 年 6 月の国際会議 CVPR にて発表し、後者は 2013 年 6 月の同会議で発表予定である。

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 11 件)

- ① Ken Sakurada, Takayuki Okatani, and Koichiro Deguchi, Detecting Changes in 3D Structure of a Scene from Multi-view Images Captured by a Vehicle-mounted Camera, Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 査読有, 2013, 掲載確定
- ② Masaki Saito, Takayuki Okatani, and Koichiro Deguchi, Discrete Maximum Posterior Marginal Inference for Non-uniformly Discretized Variable Space, Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 査読有, 2013, 掲載確定
- ③ 岡谷貴之, 櫻田健, 出口光一郎, 東日本大震災被災地を対象とした市街地の時空間モデリング, 0 plus E, 査読無, 34 巻, 2012, 1133-1139, ISSN 0911-5943
- ④ Takayuki Okatani, Jun Yanagisawa, Daiki Tetsuka, Ken Sakurada, Koichiro Deguchi, Creating multi-viewpoint panoramas of streets with sparsely located buildings, Proceedings of International Conference on Field and Service Robotics, 査読有, 巻数無, 2012, 1-14
- ⑤ Masaki Saito, Takayuki Okatani, Koichiro Deguchi, Application of the mean field methods to MRF optimization in computer vision, Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 査読有, 巻数無, 2012, 1680-1687, 10.1109/CVPR.2012.6247862
- ⑥ Takayuki Okatani and Koichiro Deguchi, Optimal integration of photometric and geometric surface measurements using inaccurate reflectance/illumination knowledge, Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 査読有, 巻数無, 2012, 254-261, 10.1109/CVPR.2012.6247683
- ⑦ Eisuke Ito, Takayuki Okatani, Koichiro Deguchi, Accurate and robust planar tracking based on a model of image sampling and reconstruction

process, Proceedings of The 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 査読有, 巻数無, 2011, 1-8, 10.1109/ISMAR.2011.6092364

- ⑧ Takayuki Okatani, Takahiro Yoshida, Koichiro Deguchi, Efficient Algorithm for Low-rank Matrix Factorization with Missing Components and Performance Comparison of Latest Algorithms, Proceedings of International Conference on Computer Vision, 査読有, 巻数無, 2011, 1-8, 10.1109/ICCV.2011.6126324
- ⑨ 阿部大輔, 岡谷貴之, 出口光一郎, モバイルプロジェクタカメラシステムのオンライン自動校正, 画像の認識理解シンポジウム予稿集, 査読有, 巻数無, 2010, 625-632
<http://www.ieice.or.jp/iss/prmu/jpn/miru/archive/MIRU2010/pdf/OS2-1.pdf>
- ⑩ 岡谷貴之, 関拓郎, 出口光一郎, 陰影からの物体形状の微分量の高精度推定と位置の形状計測との統合, 画像の認識理解シンポジウム予稿集, 査読有, 巻数無, 2010, 26-33
<http://www.ieice.or.jp/iss/prmu/jpn/miru/archive/MIRU2010/pdf/OS1-4.pdf>
- ⑪ Daisuke Abe, Takayuki Okatani, Koichiro Deguchi, Flexible Online Calibration for a Mobile-Projector-Camera System, Proceedings of Asian Conference on Computer Vision, 査読有, 2010, 1-14 (Lecture Notes in Computer Science Volume 6495, 2011, 565-579)
http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-19282-1_45

[学会発表] (計 15 件)

- ① 岡谷貴之, プロジェクタカメラシステムの幾何キャリブレーション, 質感脳情報学研究集会「投影型ディスプレイ」, 2013 年 02 月 21 日, 大阪大学
- ② 佐藤慎也, 岡谷貴之, 出口光一郎, 過去の町並みを可視化するスマートフォンを用いた拡張現実, 情報処理学会 CVIM 研究会, 2012 年 5 月 23 日, 中京大学
- ③ 岡谷貴之, 被災地の時空間モデリングの研究, 社会的課題抽出・展開専門委員会研究会, 2012 年 04 月 03 日, 東北大学
- ④ 折笠達郎, 岡谷貴之, 出口光一郎, 両眼視差と被写界深度ボケを同時に提示する注視反応ディスプレイ, 画像の認識・理解シンポジウム, 2011 年 7 月 22 日,

金沢

- ⑤ 岡谷貴之, 震災特別セッション「震災復興へのビジョン」講演, 画像の認識・理解シンポジウム, 2011 年 7 月 22 日, 金沢
- ⑥ 伊藤栄介, 岡谷貴之, 出口光一郎, 画像の標本化過程を考慮した高精度かつ頑健な平面の追跡, 画像の認識・理解シンポジウム, 2011 年 7 月 22 日, 金沢
- ⑦ 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 CVIM 研究会, 2011 年 5 月, 大阪
- ⑧ Takayuki Okatani, Toward more accurate statistical inference of geometric structures from images, 10th Mathematical Aspects of Image Processing and Computer Vision, November 25 - 27, 2010, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University
- ⑨ Ito, E., Saga, S., Okatani, T., GPU based high-speed and high-precision visual tracking, SICE Annual Conference, August 18 - 20, 2010, Grand Hotel, Taipei, Taiwan
- ⑩ Taira, R., Saga, S., Okatani, T., Deguchi, K., 3D reconstruction of reflective surface of reflection type tactile sensor using constrains of geometrical optics, SICE Annual Conference, August 18 - 20, 2010, Grand Hotel, Taipei, Taiwan
- ⑪ 岡谷貴之, 被写界深度ボケからのシーンの絶対スケールの単眼推定: ミニチュア化画像の説明とディスプレイへの応用, 生理学研究所研究会「視知覚の理解へ向けて—生理、心理物理、計算論による探求—」, 平成 22 年 6 月 10 日, 自然科学研究機構 岡崎コンファレンスセンター
- ⑫ 米田雅樹, 岡谷貴之, 出口光一郎, 階層構造を利用したワイヤハーネスの姿勢認識, 第 15 回画像センシングシンポジウム, 2010 年 6 月 11 日, パシフィコ横浜アネックスホール, 横浜

[図書] (計 1 件)

- ① 岡谷貴之, アドコムメディア株式会社, コンピュータビジョン最先端ガイド (CVIM チュートリアルシリーズ), 2010, 1-32 ページ

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.vision.is.tohoku.ac.jp/jp/research/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡谷 貴之 (OKATANI TAKAYUKI)

東北大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：00312637

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし