

## 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 8日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500172

研究課題名（和文） 高次元空間の直交射影による多画像からの最適な3次元復元

研究課題名（英文） Optimal 3-D Reconstruction from Multiple Images by Means of Orthogonal Projection in High-dimensional Spaces

研究代表者

金谷 健一（KANATANI KENICHI）

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：60125838

研究成果の概要（和文）：多画像からの3次元形状を高精度に復元する直交射影による方法を確立した。その過程で、誤差のあるデータから図形に性質を計算するさまざまな新しい最適化手法が発見された。これらは画像や3次元センサーデータを用いるさまざまな幾何学的計算に適用できる。発見された主な手法は、反復による厳密な最尤推定の計算法、反復を用いない高精度の「超精度最小二乗法」、反復による最尤推定解を上回る精度の「超精度くりこみ法」である。

研究成果の概要（英文）：We have established a high-accuracy method for reconstructing 3-D shapes from multiple images by means of orthogonal projection. As byproducts, many new optimization techniques have been discovered for computing geometric properties from noisy data, including an iterative technique for exact maximum likelihood computation, high-accuracy non-iterative “hyper-least squares”, and “hyper-renormalization” with higher accuracy than maximum likelihood.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：幾何学的推定，最適化手法，最尤推定，超精度最小二乗法，超精度くりこみ法，3次元形状復元，楕円当てはめ，カメラ校正

## 1. 研究開始当初の背景

ビデオ画像から計算のみのよって物体の3次元形状を復元する計算がさまざまな研究者によって研究されてきたが、精度や効率が十

分とはいえなかった。問題はデータに誤差があることであり、誤差のあるデータからのより高精度、より高効率の計算手法が望まれていた。

## 2. 研究の目的

観測データを、拘束条件（誤差がなければ満たすべき条件）を最適に満たすために、研究代表者は直交射影による方法を構想していた。これは多数のデータを高次元空間の1点と同一視し、それを拘束条件がその空間内に定義する多様体に反復的に直交射影を行おうとするものである。その有効性を実験的に確認し、問題点を明らかにし、それを改良するさまざまな手法を開発することが研究目的であった。

## 3. 研究の方法

シミュレーションや実画像を用いた実験により直交射影による方法を確認した。そして、関連する幾何学的計算手法に対して、データに誤差があるときそれが解に与える影響を厳密に評価する誤差解析を行った。その結果から新しい計算手法がいろいろ生まれ、それを3次元形状復元のみならず、カメラ校正、点列への楕円当てはめ、2画像からの基礎行列および射影変換行列の計算、3次元センサーやGPSデータに対する回転や相似変換の最適計算などの種々のコンピュータビジョン、ロボティクスに関連する問題に適用して、その有効性を確認した。

## 4. 研究成果

- (1) シミュレーションや実画像を用いた実験により直交射影による方法が有効であり、計算効率が著しく向上することが確認された（雑誌論文⑤, ⑩, ⑬）。
- (2) その過程から、厳密な最尤推定解を計算する新しい反復手法が発見した。それを一般的な形で数学的に定式化し、2画像からの基礎行列を計算する新しい手法を導出した（雑誌論文⑪, ⑫, ⑬）。
- (3) 詳細な誤差解析により、反復を用いないで最尤推定解に近い解を計算する高精度な計算法を発見し、これを「超精度最小二乗法」

と命名した。そして、これを点列への楕円当てはめ、2画像からの基礎行列および射影変換行列に適用し、非常に有効であることを確認した（雑誌論文④, ⑥, ⑦, ⑭, ⑮, ⑱）。

(4) この超精度最小二乗法を変形して反復すると、最尤推定解を上回る精度が達成できることを発見し、「超精度くりこみ法」と命名した。これは現在も検討中であり、学会発表を行っている段階であるが（学会発表②, ③, ⑤）、すでに国内から非常に注目され、それに関する招待講演を依頼された（学会発表①, ⑦, ⑧）。

(5) 得られたさまざまな計算手法をコンピュータビジョンやロボティクスに関連する次の問題に適用して、その有効性を確認した：多画像から3次元形状を復元するバンドル調整（雑誌論文⑨）、高精度の魚眼レンズカメラの校正（雑誌論文②）、3次元センサーやGPSデータに対する回転や相似変換の最適計算（雑誌論文①, ⑧）、形状や運動のモデル選択基準。（雑誌論文⑬）、複数の運動の分離（雑誌論文⑰）。

## 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19件）

- ① K. Kanatani and H. Niitsuma, Optimal computation of 3-D similarity: Gauss-Newton vs. Gauss-Helmert, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University*, 査読無, Vol. 46 (2012), pp. 21—23.
- ② K. Kanatani, Calibration of ultra-wide fisheye lens cameras by eigenvalue minimization, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University*, 査読無, Vol. 46 (2012), pp. 10—20.
- ③ K. Kanatani and H. Niitsuma, Optimal

computation of 3-D similarity from space data with inhomogeneous noise distributions, Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, 査読無, Vol. 46 (2012), pp. 1—9.

④ K. Kanatani, P. Rangarajan, Y. Sugaya and H. Niitsuma, HyperLS and its applications, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 査読有, Vol. 3 (2011), pp. 80—94.

⑤ K. Kanatani and H. Niitsuma, Optimal two-view planar triangulation IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 査読有, Vol. 3 (2011), pp. 67—79.

⑥ K. Kanatani and P. Rangarajan, Hyper least squares fitting of circles and ellipses, 査読有, Computational Statistics and Data Analysis, Vol. 55, No. 6 (2011), pp. 2197—2208.

⑦ K. Kanatani, P. Rangarajan, Y. Sugaya and H. Niitsuma, Hyper least squares and its applications, Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, 査読無, Vol. 45 (2011), pp. 20—31.

⑧ K. Kanatani and H. Niitsuma, Optimal computation of 3-D rotation under inhomogeneous anisotropic noise, Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, 査読無, Vol. 45 (2011), pp. 10—19.

⑨ K. Kanatani and Y. Sugaya, Bundle adjustment for 3-D reconstruction: Implementation and evaluation, Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, 査読無, Vol. 45 (2011), pp. 1—9.

⑩ K. Kanatani, Y. Sugaya and H. Niitsuma,

Optimization without search: Constraint satisfaction by orthogonal projection with applications to multiview triangulation IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, Vol. E93-D, No.10 (2010), pp. 2836—2845.

⑪ K. Kanatani and Y. Sugaya, Unified computation of strict maximum likelihood for geometric fitting, Journal of Mathematical Imaging and Vision, 査読有, Vol. 38, No. 1 (2010), pp. 1—13.

⑫ K. Kanatani and Y. Sugaya, Compact fundamental matrix computation, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 査読有, Vol. 2 (2010), pp. 59—70.

⑬ K. Kanatani, Geometric BIC, IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, Vol. E93-D, No.1 (2010), pp. 144—151.

⑭ K. Kanatani, H. Niitsuma, and P. Rangarajan, High accuracy homography computation without iterations, Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, 査読無, Vol. 44 (2010), pp. 50—59.

⑮ K. Kanatani and P. Rangarajan, Hyperaccurate ellipse fitting without iterations, Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, 査読無, Vol. 44 (2010), pp. 42—49.

⑯ K. Kanatani, H. Niitsuma, and Y. Sugaya, Optimization without Search: Constraint Satisfaction by Orthogonal Projection with Applications to Multiview Triangulation, Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, 査読無, Vol. 44 (2010), pp. 32—41.

⑰ K. Kanatani and Y. Sugaya, Improved multistage learning for multibody motion segmentation, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University*, 査読無, Vol. 44 (2010), pp. 24–31.

⑱ K. Kanatani and Y. Sugaya, Unified computation of strict maximum likelihood for geometric fitting, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University*, 査読無, Vol. 44 (2010), pp. 13–23.

⑲ P. Rangarajan and K. Kanatani, Improved algebraic methods for circle fitting, *Electronic Journal of Statistics*, 査読有, Vol. 3 (2009), pp. 1075–1082.

〔学会発表〕(計 32 件)

① 金谷健一, 幾何学的推定のための最適化手法: 最小化を越えて, 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, 16 March, Tokyo, Japan.

② 菅谷保之, 金谷健一, 基礎行列と射影変換の計算精度の比較: 最小二乗法から超精度くりこみ法まで, 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, 16 March, Tokyo, Japan.

③ 金谷健一, アリ・アルシャラドカー, ニコライ・チェルノフ, 菅谷保之, 精度くりこみ法: 複数拘束, 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, 16 March, Tokyo, Japan.

④ 横田健太, 村田和洋, 菅谷保之, 金谷健一, 楕円当てはめの精度比較: 最小二乗法から超精度くりこみ法まで, 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, 20 January, Osaka, Japan.

⑤ 金谷健一, アリ・アルシャラドカー, ニコライ・チェルノフ, 菅谷保之, 超精度くり

こみ法, 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, 20 January, Osaka, Japan.

⑥ 横田健太, 中原龍一, 有本尚也, 本田卓士, 丸茂哲平, 金澤智子, 橋詰謙三, 西田圭一郎, 築山尚司, 樫山佳美, 金谷健一, 千田益生, 尾崎敏文, Kinect を用いた動作解析システムの構築, 第 33 回中国四国リハビリテーション医学研究会, 4 December 2011, Okayama, Japan.

⑦ K. Kanatani, Optimal estimation for computer vision applications, Winter School for Young researchers on Mathematical Aspects of Image Processing and Computer Vision, 26 November 2011, Sendai, Japan.

⑧ 本田卓士, 新妻弘崇, 金谷健一, 3次元相似変換の最適化計算: ガウス・ニュートン法 vs. ガウス・ヘルマート法, 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, 17 November, Tsukuba, Japan.

⑨ 丸茂哲平, 中村遼平, 金谷健一, 超広角魚眼レンズカメラの固有値最小化法による校正, 第 16 回パターン計測シンポジウム, 5 November 2011, Gifu, Japan.

⑩ 本田卓士, 新妻弘崇, 金谷健一, 3次元相似変換の最適化計算: ガウス・ニュートン法 vs. ガウス・ヘルマート法, 第 16 回パターン計測シンポジウム, 4 November 2011, Gifu, Japan.

⑪ H. Niitsuma and K. Kanatani, Optimal computation of 3-D rotation under inhomogeneous anisotropic noise, 12th IAPR Conference on Machine Vision Applications, 13 June 2011, Nara, Japan.

⑫ H. Niitsuma and K. Kanatani, Optimal computation of 3-D similarity from space data with inhomogeneous noise

distributions, 第17回画像センシングシンポジウム, 10 June 2011, Yokohama, Japan.

⑬ K. Kanatani and Y. Sugaya,

Implementation and evaluation of bundle adjustment for 3-D reconstruction, 第17回画像センシングシンポジウム, 10 June 2011, Yokohama, Japan.

⑭ R. Nakamura, T. Marumo and K. Kanatani,

High accuracy calibration of ultra-wide fisheye lens camera by eigenvalue minimization, 第17回画像センシングシンポジウム, 10 June 2011, Yokohama, Japan.

⑮ 森安亮太, 中村遼平, 金谷健一, 帯状パターンによる魚眼レンズカメラの高精度な校正, 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, 19 May 2011, Osaka, Japan.

⑯ 原裕貴, 新妻弘崇, 金谷健一, 不均一な誤差分布をもつ空間データからの3次元相似変換の最適計算, 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, 19 May 2011, Osaka, Japan.

⑰ 原裕貴, 新妻弘崇, 金谷健一, 不均一な誤差分布をもつ空間データからの3次元回転の最適計算, 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, 20 January 2011, Kusatsu, Shiga, Japan.

⑱ 岩元祐輝, 菅谷保之, 金谷健一, 3次元復元のためのバンドル調整の実装とその評価, 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, 20 January 2011, Kusatsu, Shiga, Japan.

⑲ K. Kanatani, Hyperaccurate least squares and its applications, Symposium on Mathematical Aspects of Image Processing and Computer Vision, 25 November 2010, Sapporo, Japan.

⑳ K. Kanatani and H. Niitsuma, Optimal

two-view planar scene triangulation, 10th Asian Conference on Computer vision, 10 November 2010, Queenstown, New Zealand.

㉑ K. Kanatani, Hyperaccurate least squares and its applications, International Conference on Modern Stochastics: Theory and Applications II, 9 September 2010, Kiev, Ukraine.

㉒ P. Rangarajan, K. Kanatani, H. Niitsuma and Y. Sugaya, Hyper least squares and its applications, 20th International Conference on Pattern Recognition, 23 August 2010, Istanbul, Turkey.

㉓ H. Niitsuma, P. Rangarajan and K. Kanatani, High accuracy homography computation without iterations, 第16回画像センシングシンポジウム, 10 June 2010, Yokohama, Japan.

㉔ Y. Sugaya and K. Kanatani, Improved multistage learning for multibody segmentation, 5th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 19 May 2010, Angers, France.

㉕ K. Kanatani and P. Rangarajan, Hyperaccurate algebraic ellipse fitting without iterations, Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 18 May 2010, Angers, France.

㉖ 金谷健一, プラサンナ・ランガラヤン, 菅谷保之, 新妻弘崇, 超精度最小二乗法とその応用, 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, 18 March 2010, Tokyo, Japan.

㉗ 矢野直樹, 金谷健一, 平面シーンの最適三角測量, 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, 19 March 2010, Tokyo, Japan

- ㊸ 新妻弘崇, プラサンナ・ランガラヤン, 金谷健一, 反復を要しない射影変換の高精度解法, 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, 11 January 1010, Kyoto, Japan.
- ㊹ 新妻弘崇, 金谷健一, 最適な射影変換の新しい計算アルゴリズム, 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, 17 November 2009, Kanazawa, Japan
- ㊺ 山田健人, 金澤靖, 金谷健一, 菅谷保之, 画像からの3次元復元の最新アルゴリズム, コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 1 September 2009, Sendai, Japan.
- ㊻ 岩元祐輝, プラサンナ・ランガラヤン, 金谷健一, 楕円当てはめの超精度最小二乗法, コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 1 September 2009, Sendai, Japan.
- ㊼ 田中慎也, 田中勇桂, 原裕貴, 菅谷保之, 金谷健一, 一般主成分分析による複数運動分離の多段階最適化, コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 31 August 2009, Sendai, Japan.

[図書] (計 1 件)

金谷健一, 「理数系のための技術英語練習帳 一 さらなる上達を目指して 一」, 共立出版, 2012, 265.

[その他]

ホームページ等

<http://www.suri.cs.okayama-u.ac.jp/~kanatani/j/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金谷 健一 (KANATANI KENICHI)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号: 60125838

### (2) 研究分担者

新妻 弘崇 (NIITSUMA HIROTAKA)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・助教  
研究者番号: 60452562

### (3) 連携研究者

菅谷 保之 (SUGAYA YASUYUKI)  
豊橋技術科学大学・工学部・准教授  
研究者番号: 00335580