

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博士論文概要

論文題目

視点依存の輝度変動に頑健なマルチベースライン
ステレオ法

Multiple-baseline Stereo Robust against
Brightness Variation Depending on Viewpoints

申請者

坂本	静生
Shizuo	SAKAMOTO

情報理工学専攻 画像情報研究

2014年 5月

異なる視点から撮影した画像をもとに三次元情報を得るステレオ法は、コンピュータビジョンの重要なテーマのひとつである。これまで非常に多くのステレオ法が研究され、二眼・三眼・マルチベースラインの各ステレオや移動カメラのシステムへ適用されてきた。本論文ではマルチベースラインステレオとして、ある直線上に一定間隔でカメラが設置されており、かつ全てのカメラ光軸が互いに並行であり、該直線とは垂直である、複数カメラで構成されるシステムを想定する。ここでベースラインとは、任意の二つのカメラを端点とする線分である。カメラ前面に存在する観察物体上のある一地点を本カメラ群により画像撮影すると、各画像上では座標のずれ（以下、視差と呼ぶ）が発生する。この視差の大きさは、ベースラインを含む直線から該地点を結ぶ線分をカメラ光軸へ投影した長さに反比例し、またベースライン長に比例する。一般にステレオ法の目的は画像上の各画素の輝度値を処理することで投影点の対応関係を探索し、三次元情報と一対一対応する視差を求めることであり、マルチベースラインステレオ法とはこのときに複数のベースラインから構成されていることを積極的に利用する手法である。以下に本論文の構成を説明する。

第1章では本論文の背景と目的を述べる。

第2章では三角測量の原理に基づく画像による三次元情報計測について、光パターンを投影するアクティブな手法と、投影しないパッシブな手法であるステレオ法を概観する。三角測量の原理に基づくと奥行き推定精度を向上するには、一般的にベースライン長を大きくすべきである。しかしベースライン長を大きくすると、対応点の探索は困難となる。アクティブな手法では光プロジェクタとカメラを対で用いてこの課題を解決する。申請者らは光パターンの投射角度を位相値でエンコードする方法において、複数位置に配置された光パターン投影装置及びカメラの幾何学的な拘束条件を利用することで、画像から観測した 2π モジューロな位相値を絶対位相値へ変換できることを示した。これによりスリットパターン投影法などと比較して撮影時間を大幅に削減しながら同等以上の奥行き推定精度を達成し、人の顔面や頭部全周を計測する装置を開発した。しかしアクティブな手法は計測対象へのパターン投射及び複数回に亘る画像撮影が必要となる。従って、投射なしで環境を乱さず一度の画像撮影で三次元情報を得るステレオ法は、依然としてアプリケーションから求められていることを述べる。

第3章ではステレオ法において奥行き推定精度を向上させるための課題を詳細に述べ、新しいマルチベースラインステレオ法を提案する。第1節では、精度向上に向けてベースライン長を大きくするときの課題を次の通り整理する。

- (a) 対応点探索範囲が広がることで、ある画素に対する対応点の候補が一つ以上現れる可能性が高くなる。
- (b) 対象物体が完全散乱特性でない等の理由により、正しい対応点であっても各

画像上では異なる輝度値をもつ可能性がある。

課題(a)はマルチベースラインステレオ法を利用することにより低減できることが知られている。しかし複数のカメラを校正することは容易なタスクではないため、もし対象物体が完全散乱特性であっていても、各カメラで観測される正しい対応点の輝度値はばらつきをもつ可能性が高い。単一の校正カメラを利用する移動カメラシステムを利用すればカメラに起因する輝度値のばらつきは抑えられる一方、同時に複数位置から画像を撮影できないため、カメラやカメラを動かす機構、それら背後で動く何らかの物体等の影等で、やはり対応点の輝度値変動が生じる可能性がある。近年、課題(a)は画像のマルコフモデル化及びグラフカットなどの強力な最適化手法の適用により大きく改善してきた。しかし多くのステレオ法では物体反射特性として完全散乱特性を仮定し続けている。領域相関等により対応点を探索するステレオ法では、輝度値変動の影響を緩和することができると言われる。だが、観測対象地点周辺の表面パッチの法線ベクトルが、カメラの視線ベクトルと並行でない場合には、各カメラ画像上における投影パッチ形状が一定とならないことから、正対する平面状の物体以外に適用するには不十分である。従って、これまでは課題(b)についての十分な検討がされてこなかったと考えられる。第3章第2節では、単一の校正カメラを移動させながら撮影した、正しい視差が合わせて計測された公開ステレオ画像データセットを検証することにより、ベースラインが短い場合には対応点間の輝度値変動は小さいものの、長くなると輝度変動が大きくなることを示す。同第3節では、マルチベースラインステレオ法に近傍カメラの概念を新しく導入することで、視点依存の輝度変動に頑健なアルゴリズム1を提案する。このアルゴリズムでは対応点探索の際あらかじめ定義する近傍カメラ毎に、近傍中央のカメラの対応画素の輝度値を該近傍内の対応画素の輝度平均値とだけ直接比較する。これにより近傍内における輝度変動がカメラ位置に線形で近似できる場合に悪影響がないよう構成できる。対照実験として完全散乱反射特性を仮定する、従来の二眼ステレオ及び全カメラの画素値を直接比較するマルチベースラインステレオの例を説明するとともに、大きな輝度変動が存在する公開ステレオ画像データセットに適用する。各ステレオ法をできるだけ客観的に比較評価するために、各ステレオ法に複数の最適化手法を組み合わせ、さらに正規化パラメータを網羅的に探索して得た最良のRMS誤差により比較評価し、優位性を示す。

第4章では第3章の手法を改良した、さらに新しいアルゴリズムを提案する。まず第1節において、完全散乱反射特性を仮定した理論的な三次元情報推定精度評価を、従来の二眼ステレオ法及びマルチベースラインステレオ法とともに、前章で提案したアルゴリズム1に適用する。これによりアルゴリズム1が、近傍カメラがもつベースライン長に比例する推定視差のRMS誤差しか得られないこと

を示す。第2節ではこれら三つのステレオ法に対して実験データを拡充して実施することで、提案アルゴリズムが従来の二眼ステレオに及ばないことを示し、近傍カメラ内の線形変動の許容は、条件を緩和しすぎであったことを明らかとする。本結果に基づき第3節では、あるカメラの画素輝度値を比較する際、提案アルゴリズム1と同様該カメラを中央とする近傍内対応画素の輝度平均値とともに、その前後の近傍に属するカメラの対応画素の輝度平均値とも比較する、二つ目のアルゴリズム2を提案する。このアルゴリズム2は、近傍内における線形な輝度変動はもはや許容しないものの、依然として遠方のカメラとは輝度を直接比較しないことから、提案アルゴリズム1と従来のマルチベースラインステレオとの中間的な手法にあたる。第4節では第1節と同様に完全散乱反射特性の仮定のもとで理論的な精度評価を行い、提案アルゴリズム2は、最大のベースライン長をもつ従来の二眼ステレオ法と同等のRMS誤差であることを示す。さらに最大ベースライン長と近傍カメラの台数を固定しながら全カメラ数を増やしていくと、全カメラ台数が15台を越えたところで最大ベースライン長の二眼ステレオ法のRMS誤差を逆転することを示す。この場合全カメラ台数増加は近傍カメラのベースライン長を小さくすることを意味しており、即ち視点依存の輝度変動には大きさに応じてカメラ台数を増やすことで影響を削減できることを示している。第5節では提案アルゴリズム2の実験的評価を行い、理論的な評価では同等程度であった従来の二眼ステレオよりも良好な結果を、またより良好な理論的精度であった従来のマルチベースラインステレオとほぼ同等な結果をそれぞれ得たことを示す。テクスチャに乏しく輝度変動が大きい物体では、従来のマルチベースラインステレオ比較して半分程度のRMS誤差と大きく改善したことを示す。

最後に第6章では、本研究の成果と意義、今後の課題をまとめる。

本論文では、これまでステレオ法で十分に解決されてこなかった視点依存の輝度変動に着目し、マルチベースラインステレオ法に新しく近傍カメラの概念を導入することで頑健性を高めることを試みた。さらに二種類のアルゴリズムを提案し、近傍内の輝度値線形変動を許容するモデルでは条件を緩和しすぎであり、奥行き推定精度が上げられないことを明らかにした後、従来法との中間的なモデルに基づいたアルゴリズム2を提案した。このアルゴリズム2は、完全散乱反射特性の仮定のもとで二眼ステレオと同等の精度であることを理論的に示すとともに、視点依存の輝度変動を含む画像セットに適用することで、二眼ステレオだけでなく従来のマルチベースラインステレオと同等あるいは優れる精度をもつことを実験的に示した。本手法により、従来よりもベースライン長を伸ばして奥行き推定精度を向上させたステレオシステムの構築が可能となり、様々な応用への展開が期待できる。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 坂本 静生 印

(2015年 1月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>○<u>Shizuo Sakamoto</u>, Ingemar J. Cox and Johji Tajima: "A Multiple-baseline Stereo for Precise Human Face Acquisition," Pattern Recognition Letters, Vol.18, No.9, pp. 923-931 (1997)</p> <p>○坂本静生, 甲藤二郎: "視点依存の輝度変動に頑健なマルチベースラインステレオ法," 画像電子学会誌, Vol.43, No.3, pp.280-291 (2014)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Koya Abe 他 79 名: "Search for the Top Quark in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s}=50\text{GeV}$: the First Result from the Venus Detector at Tristan," Journal of Physical Society of Japan, Vol.56, pp.3763-3766 (1987) • 坂本静生, 宮尾陽子, 田島譲二: "顔画像中からの目の特徴点抽出," 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.76, No.8, pp.1796-1804 (1993) • Rui Ishiyama, Masaiko Hamanaka and <u>Shizuo Sakamoto</u>: "An Appearance Model Constructed on 3-D Surface for Robust Face Recognition against Pose and Illumination Variations," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.35, No.3, pp.326-334 (2005) • 石山壘, 濱中雅彦, 坂本静生: "顔の三次元見えモデルを用いた任意姿勢・照明変動下の顔画像認識," 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.88, No.10, pp.2069-2080 (2005) • Rui Ishiyama, Masahiko Hamanaka and <u>Shizuo Sakamoto</u>: "Face Recognition under Variable Pose and Illumination Conditions Using 3D Facial Appearance Models," Systems and Computers in Japan, Vol.38, No.2, pp.57-70 (2007) • Rui Ishiyama, <u>Shizuo Sakamoto</u>, Johji Tajima, Takayuki Okatani and Koichiro Deguchi: "Absolute Phase Measurements using Geometric Constraints between Multiple Cameras and Projectors," Applied Optics, Vol.46, Issue 17, pp.3528-3538 (2007)
国際講演	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Shizuo Sakamoto</u>: "Extracting Feature Points on Human Eye Photographs," Proceedings of International Workshop on Machine Vision Applications, pp.461-464 (1992) ○<u>Shizuo Sakamoto</u>, Ingemar J. Cox and Johji Tajima: "A Multiple-baseline Stereo for Precise Human Face Acquisition," Proceedings of the First International Conference, Audio- and Video-based Biometric Person Authentication, 1997, pp. 419-428, (1997). • Gregory House, <u>Shizuo Sakamoto</u> and Johji Tajima, "Multiple Object Labeling in Video Sequences without Skill," Proceedings of IEEE Workshop on Content-based Access of Image and Video Libraries, pp.101-105 (1998) • Rui Ishiyama, <u>Shizuo Sakamoto</u> and Johji Tajima: "A New Face Recognition System with Robustness against Illumination Changes," Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications, pp.28-30 (2000) • Rui Ishiyama and <u>Shizuo Sakamoto</u>: "Geodesic Illumination Basis: Compensating for Illumination Variations in Any Pose for Face Recognition," Proceedings of International Conference on Pattern Recognition, Vol.4, pp.297-301 (2002) • Atsushi Marugame, <u>Shizuo Sakamoto</u>, Tomohiro Yoshinaga, Kazuyori Miyaoka, Osami Fujimori, Yoshinobu Yamada, Masahide Kitano, Harumi Kabano, Weiqing Tong and Johji Tajima: "A Fast and Precise System for Taking High-density Human Head Measurements with Surrounding Range Finders," Proceedings of 16th International Conference on Pattern Recognition, Vol.3, pp.978-982 (2002) • Rui Ishiyama and <u>Shizuo Sakamoto</u>: "Fast and Accurate Facial Pose Estimation by Aligning a 3D Appearance Model," Proceedings of International Conference on Pattern Recognition, pp.388-391 (2004)

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<ul style="list-style-type: none"> • Rui Ishiyama, Hiroo Ikeda and <u>Shizuo Sakamoto</u>: “A Compact Model of Human Postures Extracting Common Motion from Individual Samples,” Proceedings of International Conference on Pattern Recognition, Vol.1, pp.187-190 (2006) • Hiroyuki Suzuki, <u>Shizuo Sakamoto</u>, Takashi Miyai, Kazuya Nakano and Masafumi Takeda: “A Novel Framework for Evaluation of ID Photo Quality,” International Biometric Performance Testing Conference 2012 (2012) • <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Latest Trend of ISO/IEC JTC 1/SC 17 Standards regarding Biometrics,” Biometric Consortium Conference (2012) • <u>Shizuo Sakamoto</u>: “A Perspective from NEC regarding Vulnerability in Biometrics,” Biometrics Institute, Workshop on Biometrics Vulnerability Assessment Expert Group (2013) • Toshiyuki Isshiki, Toshinori Araki, Kengo Mori, Satoshi Obana, Tetsushi Ohki and <u>Shizuo Sakamoto</u>: “New Security Definitions for Biometric Authentication with Template Protection: toward Covering More Threats against Authentication Systems,” Proceedings of International Conference of the Biometric Special Interest Group 2013, pp.1-12 (2013) • <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Advances in State-of-the-Art Face Recognition Solutions in Enabling Identity,” Biometrics 2013 (2013) • <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Facial Biometrics and Surveillance,” Biometrics Institute, Developments of Facial Biometrics Seminar (2014) • <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Facial Biometrics and Surveillance,” 1st Interpol Digital Security Research Seminar (2014) • <u>Shizuo Sakamoto</u>: “FR NIST Test Results,” Annual AFIS Internet Conference (2014) • <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Facial Biometrics and its Deployment to Surveillance Applications,” Global Identity Summit (2014)
特許	<ul style="list-style-type: none"> • <u>坂本静生</u>: “上まぶた領域、目頭・目尻・上まぶた領域及び目の構造の検出方法及び装置,” 特許 2500726 号 • <u>坂本静生</u>: “特徴量選択方法及び装置と高速識別方法及び装置,” 特許 2551212 号 • <u>坂本静生</u>: 田島譲二, “距離画像取得方法及び装置,” 特許 2576243 号 • <u>坂本静生</u>: “距離画像取得方法及び装置,” 特許 2641945 号 • <u>坂本静生</u>: “人物動き領域検出装置,” 特許 2663878 号 • <u>坂本静生</u>: “口裂線検出方法及び装置,” 特許 2671556 号 • <u>坂本静生</u>: “人物顔画像照合装置,” 特許 2735028 号 • <u>坂本静生</u>: “目尻検出装置,” 特許 2757756 号 • <u>坂本静生</u>: “赤目検出補正装置,” 特許 2907120 号 • <u>坂本静生</u>: “三次元構造推定方法及び装置,” 特許 2910698 号 • <u>坂本静生</u>: “エッジ・領域検出方法及び装置,” 特許 2940254 号 • <u>坂本静生</u>: “物体検出・背景除去方法、装置およびプログラムを記録した記録媒体,” 特許 3114668 号 • <u>坂本静生</u>: “画像レイアウトシステム、方法及び記録媒体,” 特許 3134827 号 • <u>坂本静生</u>: “動画像アンカー作成システム,” 特許 3175760 号 • <u>坂本静生</u>: “3次元形状計測方法および装置ならびにプログラム,” 特許 4985123 号 • 内田薫, <u>坂本静生</u>: “使用者認証方式、使用者認証装置、及びコンピュータプログラム,” 特許 5017905 号 • <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Device for Obtaining Distance Information from an Object by Instantaneously Illuminating the Object by a Light Beam,” US5200792

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Method for Detecting Eye Structure and Its Apparatus,” US5432866 ・ <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Red-eye Detection / Retouch Apparatus,” US5990973 ・ <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Method of and an Apparatus for 3-dimensional Structure Estimation,” US6049625 ・ <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Method and Device of Object Detectable and Background Removal, and Storage Media for Storing Program Thereof,” US6333993 ・ <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Method of and an Apparatus for 3-dimensional Structure Estimation,” US6480620 ・ <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Method and Device of Object Detectable and Background Removal, and Storage Media for Storing Program Thereof,” US6603880 ・ <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Three-dimensional Shape Measurement Technique,” US7315643
その他 (総説)	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>坂本静生</u>: “顔画像から個人性と照明変動による見えの変化を見分ける,” 電子情報通信学会誌, Vol.87, No.3, pp.182-186 (2004) ・ <u>Shizuo Sakamoto</u>: “Development of Face Recognition Techniques at NEC Laboratories,” eNewsletter of IEEE Systems, Man and Cybernetics Society, Issue 12 (2005) ・ <u>坂本静生</u>: “顔画像の自動検索・照合技術～精度阻害要因抑制の立場から～,” 日本法科学技術学会誌, Vol.10, No.Supplement pp.9-10 (2005) ・ <u>坂本静生</u>: “顔認証の技術動向,” 電気学会誌, Vol.131, No.8, pp.550-553 (2011) ・ 共著: 電子情報通信学会誌 1 件
その他 (講演)	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>坂本静生</u>, Ingemar J. Cox, 田島譲二: “視点に依存する画素値変動に強いマルチベースライン・ステレオ法,” 電子情報通信学会大会講演論文集, Vol.1997 No.Sogo, pp.156 (1997) ・ <u>坂本静生</u>, 宮尾陽子, 田島譲二: “顔画像中からの目の特徴点抽出,” 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.92, No.3, pp.II.143-II.150 (1992) ・ <u>坂本静生</u>, 田島譲二: “人物の顔照合のための特徴量解析,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.94, No.341 (HC94 58-62), pp.7-14 (1994) ・ <u>坂本静生</u>, 新井雅年, 楠実奈子, 井上晃, 田島譲二: “新聞紙面向け顔画像処理,” 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.98, No.10, pp.II.397-II.403 (1998) ・ <u>坂本静生</u>: “顔画像による人物照合,” 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, Vol.2000, pp.19-22 (2000) ・ <u>坂本静生</u>: “顔画像認識技術の現状と将来 –変動要因抑制の立場から–,” 日本法科学技術学会学術集会 (2005) ・ <u>坂本静生</u>: “IC 旅券における顔認識技術,” 電気四学会関西支部専門講習会 (2007) ・ <u>坂本静生</u>: “顔認証技術とその応用,” 日本鑑識学会秋季大会特別講演 (2013) ・ その他発表: 日本物理学会学術集会 2 件/電子情報通信学会全国大会 6 件/画像センシングシンポジウム 1 件/計測自動制御学会パターン計測部会研究会 1 件/保安通信協会セミナー2 件/日本防犯設備協会特別セミナー1 件/ビジネス機械・情報システム産業協会セミナー1 件/自動認識システム協会自動認識セミナー3 件/自動認識システム協会国際標準化セミナー2 件/日本自動認識システム協会バイオメトリクス部会セミナー1 件/国際協調問題研究会 1 件/京大、つくば大、横国大、電通大講義各 1 件、立命館大セミナー1 件 ・ 共同発表: 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU 11 件/電子情報通信学会全国大会 5 件/情報科学技術フォーラム 5 件/情報処理学会研究報告 CVIM 1 件/情報処理学会情報企画調査会 NEWSLETTER 1 件/画像センシングシンポジウム 2 件
その他 (著書)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物性研究 1 件/画像ラボ 3 件/機能材料 1 件/自動認識 2 件/New Breeze 1 件/ニューメディア開発協会研究成果レポート 1 件/NEC 技報 2 件/NEC Research and Development 1 件、共著: ニューメディア開発協会研究成果レポート 1 件/NEC 技報 2 件.

