

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博士論文審査報告書

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

2015 年 2 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ことは、コンピュータビジョンの重要なテーマの一つである。三角測量の原理に基づく三次元情報の取得には、光パターンを投射するアクティブな手法と、投射しないパッシブな手法（ステレオ法）がある。アクティブな手法は、一般的に光パターンの投影と複数回の撮影が必要で、高精度な計測には適切であるが、より自然な環境下での計測には適さない。パッシブな手法は、これまで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に適用されてきた。一般的に三次元情報推定精度を上げるには、カメラ間距離を大きくする必要はあるが、距離を大きくすることは対応点探索を困難にする。また、現実には撮影対象となる物体は完全散乱反射特性ではないなど視点依存の輝度変動があり、視点間距離が大きくなるほど影響が大きい。そこで本論文では、アクティブな手法として、複数視点からの幾何拘束を利用する多眼正弦波格子位相シフト法について述べると共に、パッシブな手法として、視点依存の輝度変動に頑健な二種類のマルチベースラインステレオ法について論じている。

第1章では、本論文の背景、目的、構成について述べている。

第2章では、アクティブな手法として、多眼正弦波格子位相シフト法を提案すると共に、人間の顔及び頭部全周を計測するレンジファインダの試作について述べている。第1節では、アクティブな手法の原理を説明し、第2節では、光パターンの投影方法に応じて、各種のアクティブな手法の分類を行っている。第3節では、正弦波格子位相シフト法の拡張として、光パターンを正弦波で輝度変調すると共に、その位相値によって投射角度がわかるようにエンコードを行う多眼正弦波格子位相シフト法の提案を行っている。正弦波による輝度変調では画像上で観測される位相値が 2π モジュロであるため、三次元情報を求めるためには絶対位相値に変換する必要がある。従来はノイズや物体形状によって動作が不安定となる位相接続処理に結果が依存していたが、光パターン投影装置を複数位置に配置し、かつカメラの幾何学的な拘束条件を利用することにより、絶対位相を安定的に決定できることを示している。これにより、短い画像撮影時間と高精度かつ高密度な計測の両方を高いレベルで両立することが可能となった。また、第4節では、申請者らが試作した顔用レンジファインダと頭部全周レンジファインダの説明を行っている。前者は人間の顔面を撮影 0.6 秒、奥行き推定精度 0.2 mm で計測し、後者はより多数の光プロジェクタとカメラを組み合わせたもので、人間の頭部全周を撮影 1 秒、奥行き推定精度 0.5 mm で計測する。

第3章では、パッシブな手法であるステレオ法に関して、申請者による第一のマルチベースラインステレオ法の提案を行っている。第1節では、視差の正解値が付与されたステレオ画像データセットの検証を行っている。Web上に公開され

ている Middlebury ステレオデータを活用し、ベースラインが短い場合は対応点間の輝度値変動は小さく、長い場合は輝度変動が大きくなることを示し、ベースラインが長くなると完全散乱仮定から外れていく実例を説明している。次に第2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導入し、視点依存の輝度変動に頑健なステレオアルゴリズムを提案している。このアルゴリズムでは、カメラごとに隣接する近傍カメラ群を定義し、当該カメラの対応画素の輝度値を近傍内のカメラの対応画素の輝度平均値とだけ比較する。これにより、近傍内における輝度変動を線形近似でき、散乱反射の影響を小さく抑えることができる。第3節では、第1節で説明した画像データセットを用いた評価実験を行っている。比較実験として、全カメラの画素値を比較する従来のマルチベースラインステレオ法を使用し、大きな輝度変動が存在する画像データセットに適用する。その結果として、提案方式による視差推定の精度改善効果を実証している。

第4章では、第3章の手法を改良した、第二のマルチベースラインステレオ法の提案を行っている。第1節では、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共に、第3章で提案したアルゴリズムに対して完全散乱反射特性を仮定した場合の理論的な三次元情報の推定精度評価を行っている。これにより、第3章で提案したアルゴリズムでは、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精度しか得られないことを示す。次に第2節では、第1節で扱った三つのステレオ法に対して、別の実験データによって評価実験を行うことで、第3章の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近似の仮定は評価画像によっては当てはまらないことを明らかにする。次に第3節では、カメラ間の画素輝度値を比較する際に、当該カメラを中央とする近傍内のカメラの対応画素の輝度平均値と共に、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、第二のマルチベースラインステレオ法アルゴリズムを提案している。この第二のアルゴリズムは、近傍内における輝度変動の線形近似は仮定しないものの、依然として遠方のカメラとは輝度を比較しないことから、第一の提案アルゴリズムと従来のマルチベースラインステレオとの中間的手法に相当する。次に第4節では、第1節と同様の完全散乱反射特性の仮定の下での理論的な精度評価を行い、第二の提案アルゴリズムは、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視差推定精度を持つことを示す。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カメラ数を増やしていくと、最大ベースライン長の二眼ステレオ法の視差推定精度を途中で逆転できることを示す。この場合、カメラ台数の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、視点依存の輝度変動には、輝度変動の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。次に第5節では、第二の提案アルゴリズムのシミュレーション評価実験を行っている。そ

の結果として、完全散乱を仮定した理論評価では同等であった従来の二眼ステレオ、および劣っていた従来のマルチベースラインステレオに対して、テクスチャが豊富で輝度変動が存在する実画像に適用したところ、第二の提案アルゴリズムによって、二眼ステレオに対しては優位な結果を、従来のマルチベースラインステレオに対してはほぼ同等な結果が得られることを示している。また、テクスチャは乏しく輝度変動が大きい実画像に適用した場合には、第二の提案アルゴリズムは、従来のマルチベースラインステレオに比較して約二倍の視差推定精度の改善を実現できることを示している。

最後に第5章では、本論文の成果と意義、今後の課題をまとめている。

以上を要するに、本論文では、画像からの三次元情報の取得に関して、アクティブな手法として、多眼正弦波格子位相シフト法の提案とレンジファインダの試作を行うと共に、パッシブな手法として、画素値の参照をカメラ近傍に限定することで輝度変動に対する頑健性を提供する二種類のマルチベースラインステレオ法の提案を行っている。これらの研究成果は、三次元計測技術の今後の発展に寄与するところが多い。よって、本論文は、博士（工学）早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める。

2015年2月

審査員

主査	早稲田大学教授	博士（工学）（東京大学）	甲藤 二郎
	早稲田大学教授	Ph.D（New York Univ.）	石川 博
	早稲田大学教授	工学博士（東京大学）	森島 繁生