

## 審査の結果の要旨

氏名 モンコンマーン ウィーンナート  
Wiennat Mongkulmann

本論文は「Photometric Stereo with Auto Radiometric Calibration」（カメラ応答関数の自動校正を伴う照度差ステレオ）と題し、英文で記され全体で6章により構成される。本論文では、複数の異なる光源下で撮影された画像から物体表面の法線を推定する照度差ステレオについて、従来手法では予めカメラが光学的に校正され線形のレスポンス関数を持つと仮定されていたのに対し、非線形の応答関数を持つカメラにより撮影された画像であっても、正しく物体表面の法線を求めることが可能な3つの手法を新たに提案している。具体的には、完全拡散反射物体を対象に、カメラ応答関数の自動校正を伴う照度差ステレオの基本手法を提案した後、物体が拡散反射成分のみならず鏡面反射成分も持つ場合への拡張を提案している。さらに、光源の方向と強度が未知となる未校正照度差ステレオに対しても、光源方向と強度を用いることなく複数の陰影画像からカメラ応答関数を校正する手法を提案することにより、物体表面の法線を高い精度で推定することを可能としている。

第1章「Introduction」（はじめに）では、複数画像から物体形状に関する情報を取得するアプローチとして、複数視点位置から撮影された画像から物体表面の3次元位置を求める多視点ステレオと複数光源下で撮影された画像から物体表面の法線を求める照度差ステレオの関係を述べた後、照度差ステレオ法における基本的な仮定についてまとめている。その上で、本論文では特にカメラ応答関数に関する仮定に着目し、一般のカメラで撮影された画像ではカメラ応答関数が非線形となるために、照度差ステレオで正しく表面法線を求めることが出来ないという点を指摘している。最後に、本論文で提案する3つの手法の概要についてまとめている。

第2章「Preliminaries」（準備）では、本論文の提案手法で用いる拡散反射成分と鏡面反射成分の反射モデルについて説明した後、カメラ応答関数ならびにその校正のための代表的な既存手法についてまとめている。

第3章「Auto Radiometric Calibration for Diffuse Photometric Stereo」（拡散反射物体を対象とした照度差ステレオのためのカメラ応答関数の自動校正）では、方向および強度が既知の複数光源下で完全拡散反射物体を撮影した画像から、カメラ応答関数と物体表面の法線およびアルベドを同時推定するアプローチを提案している。ここでは、完全拡散反射を表現するLambert反射モデルにより表現される輝度値と、入力画像で記録された画素値からカメラ応答関数の逆関数により得られた輝度値が一致するという

点に注目し、この誤差を最小化する形で法線、アルベドおよび逆カメラ応答関数を同時に求めている。逆カメラ応答関数の近似に多項式と主成分解析で得られた線形基底を用いた場合について、シミュレーション画像と実画像の両方を用いた実験によりその有効性を検証している。

第4章「Photometric Stereo with Auto Radiometric Calibration for non-Lambertian Surfaces」（非ランバート面を対象としたカメラ応答関数の自動校正と照度差ステレオによる形状推定）では、3章で提案したアプローチを完全拡散反射成分以外の反射成分も持つ物体へ拡張するために、代表的なロバスト推定法として知られるRANSAC (Random Sampling Consensus) の考え方に基づく手法を提案している。まず、3章の手法を用いて、複数の入力画像からランダムに選択された光源方向（画像）と画素の値から逆カメラ応答関数を求め、照度差ステレオ法により法線とアルベドを得る。次に、この形状情報と Lambert 反射モデルから計算される輝度値と入力画像の画素値から得られる輝度値の誤差に基づき鏡面反射成分を持つ画素（外れ値）を検出する。この手順を繰り返し、外れ値を最小化する形で法線とアルベドならびに逆カメラ応答関数を求める。この手法について3章と同様にシミュレーション画像と実画像の両方を用いた実験でその有効性を示している。

第5章「Auto Radiometric Calibration for Uncalibrated Photometric Stereo」（未校正照度差ステレオのためのカメラ応答関数の自動校正）では、完全拡散反射物体を対象に、光源の方向と強度が未知の場合においてもカメラ応答関数を校正可能な手法を提案し、未校正照度差ステレオの問題設定へのカメラ応答関数の自動校正の適用を実現している。ここでは、Lambert 反射モデルに基づく物体では、複数光源下で観察された画像の画素値から得られる観測行列のランクが3となるのに対し、カメラ応答関数が非線形の場合、その影響で観測行列のランクが3とならないことに着目し、観測行列のランクを手掛かりに逆カメラ応答関数を推定している。この手法により得られたカメラ応答関数で画素値を補正することにより、未校正照度差ステレオ法により得られる形状情報の精度を大幅に完全出来ることを実験により示している。

第6章「Conclusion」（まとめ）では、本論文における主たる成果をまとめるとともに、今後の課題と展望について述べている。

以上これを要するに、本論文は、複数の異なる光源下で撮影された画像から物体表面の法線を求める照度差ステレオについて、カメラ応答関数の自動校正を伴う照度差ステレオというアプローチに基づき、光学的に未校正で任意の応答関数を持つカメラにより撮影された画像に対しても有効な照度差ステレオ法を新たに提案し、完全拡散反射物体、拡散反射と鏡面反射の両方を持つ物体、方向と強度が未知の光源下の完全拡散反射物体の3つの場合についてその有効性を実験により検証したものであり、電子情報学上貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。