

審査の結果の要旨

氏 名 池畑 諭

本論文は、「Photometric Stereo Using Constrained Regression (制約付き回帰に基づく照度差ステレオ)」と題し、英文で書かれており、6章よりなる。照度差ステレオは、逆問題であり、異なる光源下で撮像された複数の画像から、対象物体表面のランバート（完全）拡散反射面を仮定した画像生成モデルに従って、対象物体面上の点の法線方向を算出する。しかしながら、実世界の対象では多くの場合ランバート拡散反射モデルから逸脱しており、一部の鏡面反射や影などの外れ値の存在や材質の非ランバート反射が要因となり、正確な表面形状のモデリングの妨げになっている。本論文は、新しい制約付きの回帰を導くことで、この照度差ステレオの問題において拡張したモデルを扱うことを可能とし、外れ値、非ランバート反射の双方に対して、有効な手法を論じたものである。

第1章は「Introduction(序論)」であり、照度差ステレオの問題を画像生成モデルのパラメータと観測画像との間の関係を求める回帰分析であることを述べ、本論文の貢献について述べている。

第2章は「Preliminaries(準備)」と題し、画像生成モデルを紹介し、照度差ステレオにおいて生じる問題を、光源のセットアップ、カメラでの画像取得系、非ランバート反射のモデリングの3つの問題に大きく分け、さらにそれぞれの問題を詳細に整理し、既存研究についてまとめている。

第3章は「Robust Lambertian Photometric Stereo Using Sparse Regression (スパース回帰を用いた頑健なランバート照度差ステレオ)」と題し、局所的な鏡面反射や影やセンサの飽和などを外れ値として含む条件下でのランバート反射の頑健な推定を論じた。それらの外れ値がスパースであるとし、反射モデルの回帰分析に明示的に取り入れ、外れ値のL0ノルムを含むスパース回帰としての定式化を行った。一般にL0ノルムを含む最適化は、計算量の観点から困難であり、L1ノルムに条件を緩和して扱うことが多いものの、本論文では、SBL(Sparse Bayesian Learning)の手法を導入することで、L0ノルムのスパース回帰の求解を行った。複数のデータセットに対しての評価を行い、標準的な最小2乗解、外れ値を扱う既存手法に比して、格段に優れた精度での推定が可能であることを示した。

第4章は「Robust Photometric Stereo using Sparse Regression for General Diffuse Surfaces (一般的な拡散反射面に対するスパース回帰を用いた頑健な照度差ステレオ)」と題し、第3章の手法をより一般の拡散反射面に適用できる拡張を行っている。理想的なランバート拡散反射では、対象面の法線と光源方向の内積値と画素値との関係は線形であるものの、現実の材質にみられる一般の拡散反射では、非線形となり、法線の求解は非線形問題に帰着する。本論文では、一般の拡散反射において、両者の関係が線形からは外れるものの単調増加であることに着目し、反射

特性の逆関数を導入した拡散反射モデルの定式化を行った。その新たなモデルの上では、法線と光源方向の内積が、ある非線形関数を施した画素値に等しくなり、求めるべき法線に関する線形問題に帰することが可能となる。その非線形関数として、区分線形の単調増加関数を仮定し、法線と区分線形関数の両者を、線形問題として求めることができることを示した。前章と同様に、非拡散反射要素の外れ値を考慮した L_0 ノルムの導入を行い、SBL を用いることで、より一般の拡散反射に対しても、既存手法に比べて、格段に安定して精度の高い照度差ステレオが可能であることを示した。

第5章は「Constrained Bivariate Regression for General Isotropic Surfaces (一般の等方的な面に対する制約付き2変数回帰)」と題し、さらなる拡張を行い、反射特性に複数のローブを有する非拡散反射面においても精度の高い照度差ステレオが実現できることを示した。複数のローブを有するより一般の反射特性は、ローブの方向を加えたより複雑なものとなり、表面法線と光源方向に加えて、視線方向にも依存する。本論文では、前章の逆関数の考えを拡張することで、輝度値は、法線と光源方向の内積値、光源方向と視線方向の内積値の2変数に、単調に依存することを見出した。逆関数の利用、さらに単調性の性質からのバーンスタイン基底関数の利用により、非線形な問題を線形な問題に転換できることを示し、より一般の材質に対しても、照度差ステレオを安定して精度よく求めることが可能であることを示した。一般に利用されるデータセットに現れる100以上の材質のすべてにおいて安定して高い精度を示し、既存手法に対して格段に優れることを示した。

第6章は「Conclusions (結論)」と題し、本論文の貢献を述べるとともに、今後の課題について言及している。

以上これを要するに、本論文では、照度差ステレオの問題に対して、ランバート拡散反射モデル下でのスパース回帰を用いた頑健な手法、より一般の拡散反射モデルに対する区分線形近似による逆関数を用いた手法、そして複数ローブを有する一般の等方的な反射モデルに対する手法を提案し、安定して高い精度の結果を生むことを検証したものであり、コンピュータビジョンの基礎的な課題である照度差ステレオへの大きな貢献が期待され、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。