

京都大学	博士 (情報学)	氏名	山下 浩平
論文題目	Reflectance Maps for Non-Lambertian 3D Reconstruction (反射マップを用いた非ランバート面の3次元形状復元)		
(論文内容の要旨)			
<p>自然な光源環境において撮像された画像からの物体の三次元形状復元は、ロボットの実世界インタラクションや仮想・複合現実感システムを支える基盤技術として、その重要性がますます高まりつつある。本博士論文は、この背景を受け、未知の自然環境光下で撮像された少数枚の画像から、様々な反射特性を持つ物体の三次元形状復元を主題としている。</p> <p>従来の三次元形状復元手法では、複数の視点から撮影された画像間で、物体表面上の対応する点を見えの近さを基準に求め、これら対応点を用いてカメラ姿勢および物体形状を順に推定する方策が一般的であった。これらの従来手法は、模様が豊富にある理想的な拡散反射面 (ランバート面) の時のみ仮定できる見えの視点不変性を利用しているため、模様がなく複雑な反射特性を持つ物体 (非ランバート面) には適用できない。本研究では、この大きな制約を脱し、物体の見えから光学的解析によって抽出されうる法線などの視点不変な幾何情報を画像特徴として用いることにより、視点間の対応を取りつつ全体三次元形状を復元する手法を導出し、反射特性が未知である場合およびカメラ視点も未知である場合にも適用できるよう拡張している。本論文は、これらの新たな物体形状復元手法の導出、並びにその学習および評価のためのデータセット構築についてまとめたものであり、8章から構成される。</p> <p>第1章では、実世界における画像からの三次元形状復元の重要性を説き、見えに基づいて視点間の対応検出を行う従来手法の限界について議論している。その上で、物体の反射特性および周囲の光源環境が既知である場合、それらから物体の見えと法線の関係を表す反射マップを計算することができること、さらに、その反射マップを利用して法線を推定することにより、法線を視点不変な特徴量とした視点間の対応検出を行う方法の概要を述べている。また、この方策を物体の反射特性、周囲の光源環境、およびカメラ姿勢が未知である場合に拡張する可能性を示している。さらに、提案手法の評価基盤として合成画像と実画像からなるデータセットの構築方法を概説している。これらの研究課題の解決が画像のみを入力とした実世界における非ランバート面の三次元形状復元につながることを議論し、研究主題をまとめている。</p> <p>第2章では、画像における物体の見えが光学的・幾何的な要素の両方に依存していることに言及し、画像の光学的および幾何的な生成過程について詳説している。また、反射マップが光源環境・物体の反射特性の近似的な畳み込みとなる仮定を導出し、第3章以降に必要となる背景となる光学的理論を説明している。</p> <p>第3章では、画像からの三次元形状復元手法について従来手法を俯瞰するとともに、本研究の位置づけを行っている。本研究は、従来手法では不可能であった、2~10枚程度のまばらな視点からの画像のみを入力とした非ランバート面の形状復元を実現するものであり、過去の研究に対する優位性を確認している。見えから推定した法線を視点不変な特徴量として用いる点、形状と反射マップの同時推定として定式化を行う点などが提案する手法の主たる新規性であることを論じている。</p> <p>第4章では、画像・カメラ姿勢・物体形状等の組からなる合成画像・実画像データセットの構築を行っている。従来のデータセットは物体や光源環境の種類が限られていることに言及し、提案するデータセットが物体形状・反射特性・光源環境の種類の観点で他に類を見ない規模のものであることを述べている。</p> <p>第5章では、見えから法線を推定し、視点不変画像特徴量として用いる手法を詳説している。この際、反射マップを用いた光学的解析によって得られる法線の仮説と観測の尤度の関係が複雑であり、そのままでは視点不変な特徴量として用いることがで</p>			

きないことを確認している。この解決策として、尤度の方向分布を画像平面上で再帰的に集約し、より曖昧性の少ない法線の確率密度分布へと変換する法線推定手法を提案している。また、推定された確率密度分布を視点不変な特徴量として用いる深層多視点形状復元手法、並びに形状と反射特性の交互推定法を導出することにより、既知の光源環境下において撮影されたカメラ姿勢既知の多視点画像からの三次元形状復元を実現している。

第6章では、物体の反射特性と周囲の光源環境の両方が未知の場合に、反射特性と光源環境の同時推定が本質的に曖昧性を持つことを説明し、これを回避する方策として形状と反射マップを同時推定する手法を提案している。反射マップと法線の推定をそれぞれ行う二つのニューラルネットワークを用い、それぞれの推定値を逐次的に互いの入力とすることにより交互推定を行っている。これにより、カメラ姿勢既知の多視点画像のみを入力として両者の推定を実現し、画像からの三次元形状復元の適用範囲を広げている。

第7章では、さらにカメラ姿勢が未知の場合、カメラ姿勢・物体形状・反射マップの推定に根本的な曖昧性が存在することを詳説している。この曖昧性の解消のために、反射マップに写りこんだ周囲の環境に関する視点間の対応関係を用いることを提案している。反射マップ上の対応点の深層検出手法、並びに検出された対応点を利用した形状とカメラ姿勢の交互推定法を導出し、二視点から撮像された画像からカメラ姿勢と三次元物体形状の同時推定を行っている。これにより、カメラ位置の較正を必要とせず手軽に撮像された画像から、模様のない複雑な反射特性を持った物体の三次元形状復元を実現している。

第8章では、本論文の目的、提案手法、および貢献についてまとめを行うとともに、今後の課題と応用について議論している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、実環境に置かれた様々な反射特性を持つ物体の三次元形状復元を主題としたものである。物体表面の模様や理想的な拡散反射特性を仮定する必要がなく、物体表面の光学的な解析によって得られる幾何形状にまつわる情報（法線）を視点不変の画像特徴量として用いることにより、反射特性および光源状況のみでなく、カメラ視点も未知である場合の物体三次元形状復元を実現する手法の導出および評価基盤の構築を行ったものであり、得られた成果は以下の通りである。

- (1) カメラ姿勢、物体形状、および反射特性の様々な組み合わせからなる合成画像と実画像データセットの構築を行い、模様のない非ランバート面の三次元形状復元に関する評価基盤の確立を行った。
- (2) 視点ごとに法線を推定し、法線を視点不変な特徴量として視点間の対応検出に用いる形状復元手法を導出した。反射特性と光源環境から計算される反射マップを入力として用い、法線を画素ごとの確率密度分布として推定する深層学習手法、並びに推定された確率密度分布を入力特徴量として用いる深層学習を用いた多視点形状復元法を導出した。
- (3) 画像から反射マップを直接推定することにより、反射特性と照明の間に存在する本質的な曖昧性を回避できることを示し、物体形状と反射マップの同時推定を行う深層学習手法を導出することにより、カメラ姿勢既知の少数の観測画像のみから物体形状復元を行えることを示した。
- (4) 反射マップに写りこんだ周囲の環境における点对応関係を利用することにより、形状とカメラ姿勢の同時推定の曖昧性を解消できることを示し、反射マップ間の対応点の検出とそれらを利用した形状とカメラ姿勢の交互推定を行う手法を導出し、カメラ姿勢未知の二視点画像のみからの、表面模様のない複雑な反射特性の物体の三次元形状復元を実現した。

以上、本論文は、従来手法で困難であった物体表面に模様がなく複雑な反射特性を持つ物体の、少数枚の画像列からの三次元形状復元を初めて実現し、新たに構築された合成画像・実画像データセットにおいてその有効性を実証したもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年2月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。また、本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。