

氏 名 Diego THOMAS

学位（専攻分野） 博士（情報学）

学位記番号 総研大甲第 1517 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Range Image Registration Based on Photometry

論文審査委員 主 査 教授 杉本 晃宏
教授 佐藤 真一
准教授 PRENDINGER Helmut
准教授 佐藤 いまり
教授 佐藤 洋一 東京大学

Among all our five senses, vision plays the most important role in our daily life. The objective of 3D vision is to simulate the human visual perception. To formulate it in another way, our objective is to make the computer "see". Though it is an easy and natural task for the human, it is a difficult one for a computer.

Constructing 3D models of an observed scene is of outmost importance for computer vision. This allows us to interpret the captured images and to tell meaningful information from them. 3D modeling of a real scene stands for constructing a virtual representation of the scene, generally simplified that can be used or modified at our will. Constructing such a 3D model by hand is a laborious and time consuming task, and automating the whole process has attracted growing interest in the computer vision field. In particular, the task of registering (i.e. aligning) different parts of the scene (called range images) acquired from different viewpoints is of crucial importance when constructing 3D models.

During the last decades, researchers have concentrated their efforts on this problem and proposed several methodologies to automatically register range images. Thereby, key-point detectors and descriptors have been utilized to match points across different range images using geometric features or textural features. Several similarity metrics have also been proposed to identify the overlapping regions.

In spite of the advantages of the current methods, several limitation cases have been reported. In particular, when the scene lacks in discriminative geometric features, the difficulty of accounting for the changes in appearance of the scene observed in different poses, or from different viewpoints, significantly degrades the performance of the current methods.

We address this issue by investigating the use of photometry (i.e. the relationship between geometry, reflectance properties and illumination) for range image registration. We assume the rigid surface, known reflectance property and no inter-reflection neither cast shadows. We consider the scenario where the viewpoint and illumination are fixed while the pose of the object is changing, and we enforce to leverage as much as possible the assumptions on the surrounding illumination.

First, we propose a robust descriptor for the registration of overlapping Lambertian range images that make use of local distribution of albedo. We use adaptive regions to model the local distribution of reflectance, which enables us to stably extract reliable attributes of each point against illumination estimation. We use the popular level set method to grow robust and adaptive regions to define these attributes. A similarity metric between two attributes is also defined to match points in the overlapping area, and remaining mismatches are efficiently removed using

the rigidity constraint of surfaces. The proposed descriptor allows for accurate alignment of Lambertian range images even under rough approximation of the surrounding illumination.

Second, we propose a method for estimating albedo in parts of specular surfaces for the purpose of range image registration of specular objects devoid of salient geometric properties under a few unknown point light sources. Our method uses illumination consistency on two range images to detect specular highlights. Directions and intensities of the surrounding light sources are estimated from the detected specular highlights, which allows identification of regions where the diffuse reflection components can be extracted. This technique can handle various kinds of illumination situations and can be applied to a wide range of materials.

Third, we propose a photometric cost function for evaluating the goodness of a rigid transformation aligning two overlapping range images under unknown lighting, and under the assumption of Lambertian surface. Our metric is based on photometric re-projection error but not on feature detection and matching. By using the spherical harmonics representation of image formation, we estimate illumination and albedo from the correspondences induced by the input transformation. We then synthesize the color of one image using albedo of the other image to compute the photometric re-projection error. This way allows us to derive a photometric metric under unknown lighting for range image alignment. We use a hypothesize-and-test method to search for the transformation that minimizes our photometric cost function. Transformation candidates are efficiently generated by employing the spherical representation of each image.

With these proposed methods, we significantly enlarge the practicability and range of applications of range image registration. In particular, the ideal laboratory conditions are no more required for aligning overlapping range images.

博士論文は、「Range Image Registration Based on Photometry (光学解析に基づく距離画像の位置合わせ)」と題し、英文で書かれている。博士論文における研究は、未知の照明条件下で撮影された画像を用いて撮影物体の3次元モデルを構築することを目的とし、奥行きと色を同時に撮影できる距離画像センサを使って異なる位置から取得した2枚の画像(距離画像)の位置合わせを行う手法を提案している。撮影物体の幾何特徴を利用して位置合わせを行う従来手法に対して、本博士論文では、光学特徴を利用した位置合わせ手法を提案している。物体表面の色の見え方は、照明条件、視点、物体表面の向き、物体表面の反射特性によって決まるが、これらの関係に基づいて光学特徴を抽出し、それを用いた類似度によって位置合わせのための変換を評価し、頑健で正確な位置合わせを実現する手法を提案している。画像撮影の照明条件における仮定を、大まかに分かっている単一点光源の場合、未知の少数の点光源の場合、未知の複雑照明の場合、と段階的に緩和し、より一般的に適用できるように手法を順次、補強・拡張している。

博士論文は6章で構成されている。第1章では、3次元モデル構築の重要性を示し、3次元モデル構築のために必要となる3次元位置合わせ問題へのアプローチを幾何特徴、テクスチャ、光学特徴という利用する特徴に基づいた切り口で整理し、位置合わせ問題を扱う分野における本博士論文の位置づけを明確にしている。第2章では、それぞれの立場での従来研究をサーベイしその研究動向を示すとともに、利点と問題点を示している。引き続き3つの章が本論文の主要部分となっている。第3章では、拡散反射面を持つ物体、大まかに与えられた単一点光源による照明を前提とし、物体表面の各点における光学不変特徴としてのアルベド(物体表面の各点での反射係数)を局所的な分布で記述し、その記述子に基づく類似度で位置合わせのよさを評価する手法を提案している。提案手法による位置合わせの精度、ノイズに対する頑健性を他手法との比較を交えて多角的に評価し、その有効性を確固たるものとしている。第4章では、撮影物体表面に対する制約を緩和し、鏡面反射面を持つ物体を扱っている。照明条件に関しても未知の少数の点光源による照明を前提とし、2枚の距離画像を撮影する視点および照明条件の整合性に着目することで、拡散反射面の部分と鏡面反射面の部分とを分離し、アルベドを安定に抽出して位置合わせを行う手法を提案している。ここでもノイズに対する頑健性を丁寧に評価し、手法の有効性を確認している。また、第5章では、前提条件をさらに緩め、未知の複雑照明を前提とし、光源推定とアルベド推定を位置合わせ問題の枠組の中で定式化し、その推定結果を利用して、位置合わせのための変換を評価する手法を提案している。また、距離画像を球面上のパラメタ空間で表現することによって、評価すべき変換の候補を現実的な時間で生成する手法を提案している。これによって、これまでは実現できなかった未知複雑照明下での位置合わせが可能となった。実験や考察によって、提案手法の限界についても論じている。第6章では、まとめと今後の課題を示している。

出願者による発表もこの順で説明が行われ、その後、質疑応答があった。予備審査での論文をよくするための参考意見も十分に反映されており、学位研究としての完成度がさらに向上したと認められた。開発した手法のソースコードを公開して、多くの人に使ってもらおうようにしてはどうかとのコメントもあった。

質疑応答後に審査委員会を開催し、審査委員で議論を行った。本研究は独自の視点で位置合わせ問題に切り込む独創的な研究であることが評価されるとともに、インパクトファクターの高い国際学術論文誌への掲載論文1編、査読つき国際会議論文4編、国内シンポジウム論文1編の対外成果があることが確認された。審査委員全一致で、博士論文として十分な水準にある研究であると認め、博士の学位請求論文として合格であると結論づけた。