# 偏振视觉高精度三维成像技术研究

## 孙岩标1.2, 赵永强2,晏艺真3, 崔家梁3, 晏磊3

1.( 孙岩标的单位)  
2.西北工业大学  
3.北京大学 遥感所 空间信息与3s技术实验室, 北京 100871

摘 要**:**精确三维点云数据及衍生出来表面等模型数据是数字城市构建基础数据，广泛应用于航空、国土资源、城市建模等领域。其中，基于可见光影像视觉三维重建技术方法是目前工业及学界构建三维点云常用方案，诞生出包括Photoscan、Pixel4D和Smart3D等工业级摄影测量软件。由于依靠有误差的像点匹配技术实现三维重建方法无法有效保证精度，造成表面不连续、不广泛情况出现。为了解决此技术带来问题，依靠偏振信息可以有效反演出精确法向量信息；故本论文重点阐述偏振信息和可见光视觉数据融合核心技术点，概括了偏振视觉高精度三维成像技术流程。

关键词**:** 立体视觉，摄影测量，偏振，多视图三维重建

中图分类号(小五黑体)**:** TP701 (小五) 文献标志码(小五黑体)**:** A

引用格式：孙岩标,赵永强,晏艺真,崔家梁,晏磊.2017. 偏振视觉高精度三维成像技术研究.遥感学报

#### 1 引 言

三维重建是近年来计算机视觉、机器视觉中的热门话题。三维重建所需的传感器通常有可见光、RGBD相机、激光雷达、偏振相机等。本文着重分析可见光与偏振相机的技术融合。

在可见光技术方面，对极几何(epipolar geometry)、光束法平差(Bundle adjustment)等技术在上世纪就已经提出。SfM方法(Structure from Motion, 基于运动的结构构建)获取特征点云(Dellaert, F.,2000)已经可以使用Harris等角点检测技术初步实现。但受限于相机技术、计算速度、算法效率等因素，直到Lowa等人于2004年提出高效准确的SiFT方法(Lowe, D. G. ,2004)后，可见光稀疏点云的三维重建才有了质的飞跃。基于面片的稠密点云生成技术 (Patch-based Multi-view Stereo，PMVS)提出了一种高效的生成稠密点云的方法(Furukawa, Y., Ponce, J. ,2007)。该方法后来又得到原作者的完善，可以更高效的在更少的限制下完成稠密点云重建。与此同时，工业化的软件亦层出不穷，开源软件的代表有Visual SfM软件(Wu, C. ,2011)等。

然而可见光三维重建在弱纹理问题处理上并不理想。因此偏振技术被引入三维重建中。传统光学的原理已经足以解释偏振三维重建所用到的物理基础(Hetch, 1998)。但偏振三维重建还需要解决一些问题。Kadambi 等于2016年提出了一种很好的基于融合其他能覆盖物体表面的传感器结果的偏振歧义解决办法(Kadambi, A.et, 2016)。在弱纹理可见光三维重建空洞区域的歧义问题也得到了解决(Cui Zhaopeng, et al.2017)。

以上的所有研究均是国外的学着于机构进行的。偏振三维重建技术在国内还有待发展。

#### 2基本原理

##### **2.1** 基于可见光影像的三维点云模型构建本原理

近年来，立体视觉(Stereo vision)技术的发展已经可以基于可见光影像，初步构建出较为完整的三维特征点云或稠密点云。

###### **2.1.1** 特征点云的构建

特征点云是比较稀疏的点云结构，通常是使用某种角点特征，例如SiFT(尺度不变特征转换, Scale-invariant Feature Transform)特征(Lowe, D. G. ,2004)提取出的特征点在三维空间中的对应点构建出的三维点云。

由于特征点通常较少，构建出的特征点云通常较稀疏，但准确度通常较高。立体视觉处理中通常用SfM方法获取特征点云(Dellaert, F.,2000)。具体做法为先对拍摄的每张图片提取特征，再利用图片中的特征根据对极几何(epipolar geometry)方法确定各个图片拍摄相机的相对位置，即获取运动(motion)；之后利用相机位置、特征点在相片中的位置根据三角化算法(Andrew, A. M., 2003)重建出特征点云；最后使用光束法平差(Bundle adjustment)减少误差，获取较为准确的特征点云。

由于特征点多集中在纹理较强的区域，如建筑物的棱角区域，因此特征点云在物体边缘及纹理较

###### **2.1.2** 稠密点云的构建

稠密点云是在构建好的特征点云的基础上，利用立体视觉技术继续构建能覆盖整个物体表面的点云的技术。

稠密点云的构建通常使用PMVS进行构建(Furukawa, Y., Ponce, J. ,2007)。该方法将物体的表面离散为很多面片，每个面片即一个稠密点。面片的朝向为物体表面的法向量。先将特征点云转换为面片(增加法向量信息)，然后沿着现有面片的边缘添加新的面片，直至面片能覆盖每张拍摄的照片，即完成表面重建。该方法在初始化特征点云面片与新增加面片的过程中会使用非线性优化方法对面片的位置、方向角进行优化，以建出较为连续的表面。

虽然理论上面片可以沿任何表面生长，但由于面片位置的精度是由生长出该面片的上一个面片确定的，因此生长后的面片会有累计误差。由于优化新增加的面片依然需要使用到目标表面的纹理信息，因此纹理信息强的区域面片也会生长得较为准确，纹理区域太弱德区域面片生长依然会遇到困难。

通常PMVS算法已经能大致建立物体的表面，但一些弱纹理区域任会有空洞和错误出现。

特征点云和稠密点云均可用Visual SfM软件(Wu, C. ,2011)快速获取。

虽然SfM法重建得到的结果会在弱纹理大表面上产生许多表面空洞，但通常能准确得获取目标物体整体的“骨架”。

##### **2.2** 基于偏振影像的法向量信息提取

本文所提出的所有有关偏振处理的理论都建立在光被光滑表面反射后会产生偏振性这一前提下。

菲涅尔反射原理(Hetch, 1998)定量的描述了偏振反射的特性。反射光可以用光强，相位角和偏振度定量的描述(Atkinson, G. A., & Hancock, E. R. ,2007)。

本文中，默认所有光源都是非偏振光，即

。若某物体对于非偏振光的反射光强分布中最大的光强为，最小光强为为。在理想漫反射和理想镜面反射时分别有(Cui Zhaopeng, et al.)：

公式(2,1)

公式(2,2)

其中dp代表漫反射(diffuse reflection)的情况，而sp代表镜面反射(specular reflection)。是偏振角度，是亮度，是物体表面的方向角。

用偏振片+相机测得物体在各个角度的偏振图像，将与拟合后即可求得角。这就是基于偏振影像的法向量信息提取原理。

该方法由于提取出的是法向量，因此对弱纹理，均匀度高，连续性强的表面区域有较好的效果，但在变化表面形状变化剧烈的地方效果会变差。

事实上，偏振法无法独立完成表面重建，因为歧义与歧义(Zhaopeng Cui, et. , 2017)。

###### **2.2.1** 歧义问题

事实上，在公式(2.1)中与表面形成的函数是完全一样的。因此拟合出函数后还需要确定方向角的倾斜方向。该问题称为歧义。

歧义问题通常只要有少量的辅助即可解决。比如用SfM或其他深度相机获取粗略的三维表面结果，即可解决歧义问题。

###### **2.2.1** 歧义问题

由于仅从偏振得到的影像无法确定表面时漫反射还是镜面反射，因此存在的歧义偏差。该问题称为歧义问题。

相对于能构建“骨架”的较为全局的SfM法，偏振法得到的结果通常是片面的。单纯使用偏振法需要一个基准点，再基于该基准点利用法向量进行“生长”。这样做会在离基准点较远的位置产生累计误差，甚至生长“断裂”后会无法完成表面重建。

##### **2.3** 可见光与偏振法三维重建融合

由于基于偏振的法向量提取可以轻易为PMVS法提取弱纹理平面，而SfM与PMVS法可以为偏振法提供一个整体的框架作为基准，因此将SfM-PMVS法与偏振法结合可以提高重建的效果。

#### 3 基于偏振影像的多视图重建方法

在本文中，偏振法与SfM法的的整体思路为，直接使用偏振相机对目标进行多视角拍摄，将多视角拍摄的多张结果先运用SfM与PMVS法进行三位构建与表面重建，得到一个粗略的模型；同时对每张图进行偏振法向量分析，分析得到覆盖每张图像的法向量信息；将法向量结果与多视图重建的结果融合，最终得到融合的三维重建结果。

##### **3.1** 图像采集与预处理

图像采集主要要满足基于可见光的三维重建要求。SfM方法与PMVS方法通常在同一区域需要较多副图像。PMVS要求每个面片至少被2至3个相机清晰的拍摄到，即PMVS算法原文中的参数(Furukawa, Y., Ponce, J. ,2007)。而基于偏振的法向量提取也需要多张图片从不同角度拍摄同一区域以获取不同角度的光强。因此图像采集至少要保证一定的覆盖度。

预处理可以使用Visual SfM等软件进行SfM与PMVS的处理。

**3.2** 处理歧义

本文中，默认需要重建的表面为漫反射表面(显示世界中很少有镜面反射表面)。因此直接用得到结果即可。

**3.3** 处理歧义与表面融合

虽然单独的偏振表面法向量提取方法完全无法解决歧义问题，但结合可见光三维重建结果的优化方法可以解决这个问题。

###### **3.3.1** 表面优化与PMVS覆盖区域下的歧义问题

在PMVS的结果能覆盖的区域，可以在与之间直接取与已知结果更加相似的一个表面梯度。因为PMVS虽然会有一定的误差，但通常误差会小于。因此可以直接近似的处理歧义(Kadambi, A.et, 2016)。通过优化得到：

公式(3.1)

代表PMVS得到的表面梯度，表示偏振结果在经过覆盖全图的修正后得到的偏振结果。而对偏振结果的修正时二元的，即在在与之间二选一。

通常该方法还需要加上公式3.1中的正则项以保证的连续性，即保证表面连续性。当表面连续时较差，正则项的系数可以适当减小，即更加“信任”PMVS重建的结果。

###### **3.3.2** 表面生长

在弱纹理区域，PMVS的结果存在“空洞”时，需要利用偏振法向量法继续寻找寻找表面。即在PMVS无法继续生长面片的条件下，利用偏振得到的通常法向量结果对表面继续进行生长，以完成表面重建。

事实上，表面的生长是不需要关心歧义问题的，PMVS中的面片生长也仅仅需要确定面片的法向量的角度，而相差角的法向量通常被认为是相同的，即只关心面片的角度，不关心面片内外表面。因此仅仅用未经过歧义问题纠正的表面法向量结果对PMVS结果进行面片生长是可行的。

###### **3.3.3** 弱纹理区域的歧义问题与优化

PMVS法对一些弱纹理区域虽然无法求出连续的整个表面，但通常可以求得该区域得边界。因此偏振提取法向量法只需要“补洞”即可。由于边界是可信的，因此可以利用这些面片作为基准点，使用优化方法得到一个全局最优得结果，解决整个区域得歧义问题。

#### 4 结 论

本文描述了利用偏振相机，结合可见光影像对目标进行三维重建的核心步骤于整体流程。由于该方法并未工业化，继续探索、研究该方法具有重大意义。

在现有的偏振三维重建理论中，大多数都是提出了理论，但离真正融合、得到三维重建结果还有很大的距离。因此还需更多实验来发现问题，证明理论。

志 谢 此次研究获取得到了澳大利亚科学与工业研究组织大气与海洋研究所......在此表示衷心的感谢！

#### 参考文献(**References**)

Andrew, A. M. (2003). Multiple view geometry in computer vision. *Kybernetes,* *30*(9/10), 1865 - 1872.

Atkinson, G. A., & Hancock, E. R. (2007). Shape estimation using polarization and shading from two views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence,* *29*(11), 2001-17.

Cui, Zhaopeng, et al. "Polarimetric Multi-View Stereo."

Dellaert, F., Seitz, S. M., Thorpe, C. E., & Thrun, S. (2000). Structure from motion without correspondence. *Computer Vision and Pattern Recognition, 2000. Proceedings. IEEE Conference on* (Vol.2, pp.557-564 vol.2). IEEE.

Furukawa, Y., Ponce, J. (2007). Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR '07. IEEE Conference on* (Vol.32, pp.1-8). IEEE.

Hecht, E. (1998). Optics Third Edition. *Addison-Wesley*.

Kadambi, A., Taamazyan, V., Shi, B., & Raskar, R. (2016). Polarized 3D: High-Quality Depth Sensing with Polarization Cues. *IEEE International Conference on Computer Vision* (pp.3370-3378). IEEE.

Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision,* *60*(2), 91-110.

Wu, C. (2011). VisualSFM: A visual structure from motion system.

Zhaopeng Cui, Jinwei Gu, Boxin Shi, Ping Tan, and Jan Kautz. "Polarimetric Multi-View Stereo". CVPR 2017.

Research on High Precision 3D Reconstruction Technology of Polarization Vision

LI Xiaoying**1, 2**, GU Xingfa**1, 2**, YU Tao**1, 2**, CHENG Tianhai**1, 2**, GAO Hailiang**1, 2**,   
LI Jiaguo**1, 2**, YANG Xiaofeng**1, 2**

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;   
2. Demonstration Centre for Spaceborne Remote Sensing National Space Administration, Beijing 100101, China

**Abstract:** Accurate three-dimensional point cloud data and derived from the surface model data is the digital city to build the basic data, widely used in aviation, land resources, urban modeling and other fields. Among them, 3D visual reconstruction based on visible light image technology is the industrial and academic construction of three-dimensional point cloud commonly used program, including the introduction of Photoscan, Pixel4D and Smart3D and other industrial photogrammetry software. As the error-based image matching technology to achieve three-dimensional reconstruction method can not effectively guarantee the accuracy, resulting in surface discontinuity, not widespread situation. In order to solve this problem, the polarization information can be used to reflect the precise normal vector information. Therefore, this paper focuses on the polarization information and the visible core data fusion, and summarizes the high-precision three-dimensional imaging technology of polarization vision.

**Key words:** stereo vision, photogrammetry, polarimetric, multi-view stereo

**Supported by(基金项目)**