

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.11.014

基于 OpenCV 的结构光三维视觉在泥石流表面重建中的应用

李洪雷¹, 管群¹, 胡凯衡^{2,3}, 杨宇¹

(1. 四川大学 计算机学院, 四川 成都 610065;

2. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

3. 中国科学院-水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 为了快速处理泥石流动力学实验中所采集到的数据, 采用结构光三维视觉原理, 选用多线结构光方式的主动式测量方法对其表面进行三维重建。先分析泥石流堆积扇的表面特征, 并根据泥石流动力学实验的实验要求, 成功地还原出泥石流堆积扇。实验结果表明: 该方法所使用的设备较简单, 能快速方便地满足泥石流表面的三维测量要求。

关键词: 结构光; 三维重建; 泥石流; 堆积扇; OpenCV**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A

Application of Structure Light 3D Vision Based on OpenCV in Reconstruction of Debris-Flow Surface

Li Honglei¹, Guan Qun¹, Hu Kaiheng^{2,3}, Yang Yu¹

(1. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Key Laboratory of Mountain Disaster & Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. Institute of Mountain Disaster & Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to process data collected in the debris-flow dynamics experiment quickly. Under structured light 3D vision principle, reconstruct 3D surface of debris-flow alluvial fan by using multi-line structured light active measurement. Firstly, analyze the surface characteristics of the debris-flow alluvial fan, and then reconstruct debris-flow alluvial fan successfully according to the requirements of debris-flow dynamics experiment. Experimental results show that this method, by using simple equipment, can meet the requirements of debris-flow surface measurement quickly and conveniently.

Keywords: structure light; 3D reconstruction; debris-flow; alluvial fan; OpenCV

0 引言

从物体的二维图像还原出其三维形状是计算机视觉领域中的重点研究内容之一。目前, 基于结构光的三维重建技术以其大量程、大视场、较高的精度、光纹信息提取简单、实时性强和主动受控等特点, 被广泛地应用在工业检测、医学诊断、航空航天和机器人自主导引等领域^[1]。

由 Intel 公司开发的 OpenCV 是一个优秀的开放源代码的计算机视觉库, 它实现了图像处理和计算机视觉方面的很多通用算法, 具有良好的跨平台移植性, 是二次开发的理想工具^[2]。故根据泥石流动力学实验的实验要求, 利用结构光三维视觉原理对泥石流堆积扇表面进行三维重建。

1 OpenCV 中的三维重建

1.1 三维重建的分类

三维曲面重建技术可分为接触测量法和非接触

测量法, 而非接触测量法又包括主动式测量和被动式测量两大类。一般来说, 接触式测量法精度很高, 但速度慢, 而且只适合测量几何形状简单的物体; 非接触测量方法速度较快, 但一般情况下, 精度低于接触式测量方法^[3]。在泥石流动力学仿真实验中, 由于泥石流流速很快, 既必须保证在不能破坏泥石流堆积扇原始形状, 又不能干扰实验正常进行的情况下, 对其表面进行三维重建, 故接触测量方法不适合用于泥石流表面的三维重建。被动式测量采用非结构光照明方式, 通常需要通过特征点匹配运算来获取被测物体的三维数据, 但该方法需要进行大量的数据运算, 当被测物体上的各反射率没有明显差异时, 运算将变得更加困难^[4]。

1.2 OpenCV 中的三维重建

OpenCV 使用被动式测量中的立体视觉法进行三维重建。该方法需要经过摄像机标定、特征提取、特征点匹配等步骤实现。而特征点匹配是其中的关

收稿日期: 2010-05-23; 修回日期: 2010-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40701014); 中科院知识创新重要方向项目 (KZCX2-YW-302); 中科院成都山地灾害与环境研究所创新工程项目基金资助项目 (1100001062)

作者简介: 李洪雷 (1982-), 男, 山东人, 硕士研究生, 从事计算机视觉和数字图像处理。

键步骤, 但由于环境变化的复杂性, 使得要得到一个可靠、稳定的匹配算法变得十分困难^[2]。

特征点匹配可分为稀疏点匹配和密集点匹配两种方法, 其中, 稀疏点匹配主要是对图像中的角点、轮廓点等强特征点进行匹配, 然后再进行插值运算; 而密集点匹配是对图像中的所有像素点进行匹配^[2]。

2 泥石流堆积扇表面三维重建

图 1 为实验过程中所拍摄的泥石流堆积扇, 由于图中并没有明显的强特征点, 因此不适合采用稀疏点匹配算法对其进行重建。同时, 图像中大部分点不具有很强的特征性, 且大部分区域灰度分布均匀, 因此采用密集点匹配算法时将很容易产生误匹配。由此可以看出, 也不适合用立体视觉法被动三维测量技术对其进行三维重建, 而应采用主动式测量原理。

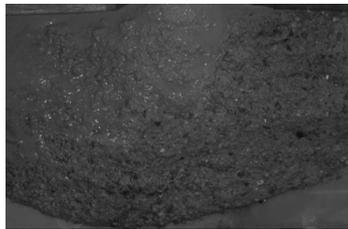


图 1 实验过程中所拍摄的泥石流堆积扇

由于实验过程较长, 所获取的数据较多, 要求采用快速、简单的方法来完成实验任务。从图 1 还可以看出: 泥石流堆积扇表面起伏不是很大, 其表面高度没有剧烈的变化。根据泥石流堆积扇的表面特征以及实验要求, 选用多线结构光方式的主动式测量方法对其表面进行三维重建: 将一组能够发出正交十字线的激光器所形成的激光网格均匀地照射在泥石流堆积扇表面, 然后经过摄像机标定、结构光标定和三维重建 3 个步骤, 便可将结构光网格照射处的泥石流堆积扇表面重建出来。这样, 既避免了激光扫描法中精密复杂的机械扫描设备的使用, 又克服了光栅编码法中需要对结构光进行编码和解码的困难^[5]。

2.1 摄像机标定

OpenCV 中使用介于传统标定方法和自标定方法之间的一种由张正友^[6]提出的 closed-form 标定方法。该方法通过在至少 3 个不同位置获取平面靶标的图像, 并利用摄像机坐标系与空间坐标系间的变换关系:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

求出摄像机的内参数。其中, (X, Y, Z) 为任一空间点坐标, (u, v) 为该点相应的图像坐标, A 为摄像机内参数矩阵。

在实验中, 首先使用 `cvFindChessboardCorners` 函数计算棋盘格中角点的位置, 当检测到角点位置的粗略值时, 再利用 `cvFindCornerSubPix` 求取角点位置坐标的精确值。最后, 使用 `cvCalibrateCamera2` 便可计算得到摄像机的各内外参数值。

2.2 结构光标定

图 2 为结构光标定的示意图。

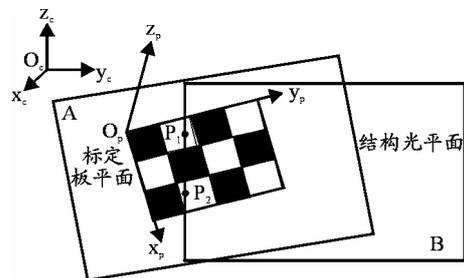


图 2 结构光标定

结构光的标定^[4]是根据式 (2)~式 (7) 确定结构光平面在摄像机坐标系下的平面方程。

在实验中, 通过摆放标定板的不同位置获得 2 条相交直线 L_1 、 L_2 的直线方程, 然后求出 L_1 、 L_2 所在的结构光平面方程, 见式 (8)。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} + T \quad (2)$$

$$x_n = \begin{bmatrix} x_c \\ z_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$x_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+k_c(1)r^2+k_c(2)r^4+k_c(5)r^6 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + dx \quad (4)$$

$$dx = \begin{bmatrix} 2k_c(3)xy+k_c(4)(r^2+2x^2) \\ k_c(3)(r^2+2y^2)+2k_c(4)xy \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_c(1) & ac \cdot f_c(1) & cc(1) \\ 0 & f_c(2) & cc(2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (7)$$

$$ax_c + by_c + cz_c + d = 0 \quad (8)$$

其中, R 和 T 分别为标定板相对摄像机的旋转和平移矩阵, x_c 、 y_c 和 z_c 为空间任意一点在摄像机坐标系下的三维坐标, x_i 和 y_i 为该点的像素坐标, fc 为相机焦距, cc 为摄像机光心坐标, kc 为相机畸变因子, ac 为不确定因子。

在标定过程中, 从图像上选取 2 条相交直线 L1、L2 时存在一定的误差, 通过使用 `cvFitLine` 函数对选取的多个点进行拟合, 可减少这种由于操作不当所引起的误差。

2.3 三维重建

三维重建是结构光三维测量过程中最后的重要步骤, 通过该步骤可以将被测物体的表面三维轮廓还原出来, 还可以检测前面 2 个步骤, 即摄像机标定和结构光标定的结果正确与否, 而提取结构光光带中心又是三维重建中非常重要的步骤。目前, 提取线结构光光带中心的算法主要有: 灰度阈值法、灰度极值法、灰度重心法、梯度重心法等。由于实验要求能够对图像进行快速处理, 精度要求在像素级别, 因此, 实验中选用灰度极值法或灰度阈值法来对光带中心进行提取。三维重建的流程如图 3。

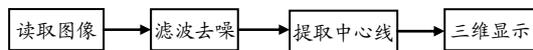


图 3 三维重建流程

在实验过程中, 由于被测物体和周围物体的表面反射、背景光照以及各种噪声的影响, 需要对采集到的图像进行滤波处理, 以去掉噪声信号。可通过 `cvSmooth` 函数利用中值滤波对结构光图像进行处理, 去除大部分的随机噪声^[7]。

由于结构光条纹的灰度近似呈高斯分布, 灰度阈值法将大于给定阈值的像素区域认为是结构光条纹, 并利用灰度领域属性确定结构光条纹的中心^[8]; 而灰度极值法则将光带区域的光强最大值处作为光带的中心位置。

由于实验中使用的是能发出正交十字线的激光器, 照射在泥石流堆积扇表面的是 2 组互相垂直的结构光平面 (如图 4), 在两方向结构光交点处的灰度值将出现陡增, 为防止提取时在交点处偏离至另外的结构光, 还需要考虑刚提取过的结构光条纹方向。当提取完结构光条纹的中心线后将中心线上的像素坐标代入式 (3)~式 (8), 即可得到泥石流堆积扇表面的三维点云。

图 5 为选定的某处需重建的泥石流堆积扇区域, 图 6 为使用 OpenGL 从 2 个侧面 4 个角度所观

察到的重建后的泥石流堆积扇表面三维轮廓。为了便于观察和计算泥石流堆积扇的高度, 图 6 中将实验所用的水槽的侧壁和槽底也重建了出来。

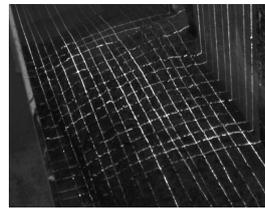


图 4 照射在泥石流堆积扇表面的结构光

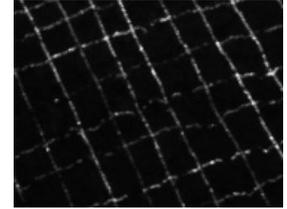


图 5 需重建的泥石流堆积扇图像

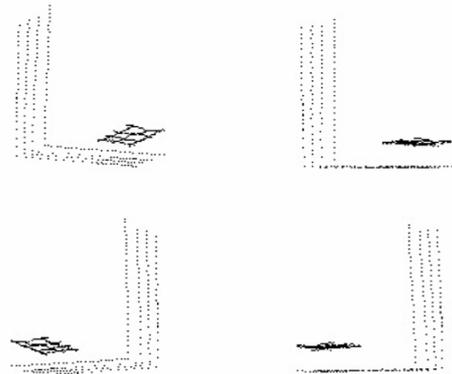


图 6 重建后的泥石流堆积扇表面三维轮廓

3 结束语

实验结果证明: 该方法快速简单, 既避免了使用精密复杂的机械扫描设备, 又不需要对结构光进行编码和解码。同时, 还充分利用了 OpenCV 开源计算机视觉库在图像处理和计算机视觉方面的优势, 在一定程度上提高了开发效率、降低了开发难度。

参考文献:

- [1] 刘国文, 闫达远. 一种基于线结构光的三维视觉曲面测量方法[J]. 光学技术, 2005, 31(4): 554-556.
- [2] 陈胜勇, 刘盛, 等. 基于 OpenCV 的计算机视觉技术实现[M]. 北京: 科学技术出版社, 2008.
- [3] 杨萍, 唐亚哲. 结构光三维曲面重构[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(19): 3057-3060.
- [4] 吴占伟. 泥石流表面三维形状获取及运动分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [5] C.P.Keferstein, M.Marxer. Testing bench for laser triangulation sensors[J]. Sens.Rev,1998, 18(3): 183-187.
- [6] Z.Zhang. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2000, 22(11): 1330-1334.
- [7] Rafael C.Gonzalez, Richard E.Woods. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [8] 雷海军, 李德华, 王建永, 等. 一种结构光条纹中心快速检测方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(1): 74-76.