

基于数字图像的煤矿巷道三维模型重建

山 维, 刘厚泉

(中国矿业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 如何建立煤矿井下巷道的三维建模是构建煤矿虚拟环境的核心问题, 针对现有的一些建模方法工作量大, 无法实现快速巷道建模, 研究了基于数字图像的三维重建方法, 并将之应用到了巷道三维模型的快速建立上, 通过角点检测和匹配获取巷道图像匹配点对, 并计算出空间点坐标, 最终由Delaunay三角剖分技术实现曲面恢复, 给出了使用OpenCV实现的巷道三维重建系统的实验效果。

关键词: 巷道; 三维重建; 虚拟现实; 角点匹配

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)10-0133-04

Digital Image-based Three-dimensional Model Reconstruction of Coal Mine Laneway

SHAN Wei, LIU Hou-quan

(School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The 3D modeling of coal mine laneway is the core issue of constructing coal virtual environment, but the work of the existing laneway modeling method is large, and it's unable to realize fast modeling. This paper investigates digital image-based three-dimensional reconstruction method, and applies to the fast three-dimensional modeling of laneway, obtains matching points of laneway images by corner detection and matching, and calculates the coordinates of space points, ultimately implements surface restoration by the Delaunay triangulation technology, and gives the experimental results of a laneway three-dimensional reconstruction system using OpenCV.

Key words: laneway; three-dimensional reconstruction; virtual reality; corner matching

1 引言

虚拟现实技术近几年来取得了飞速的发展并得到了广泛的应用, 这使得利用虚拟现实技术创建矿山三维虚拟环境成为了可能. 矿山虚拟化对提高煤矿安全生产、矿工安全具有重要的实用价值. 巷道系统是矿山三维虚拟场景的重要组成部分, 是构建虚拟矿山的基础^[1-4]. 然而, 井下巷道错综复杂, 工作环境和条件不断变化, 对具体巷道用三维建模软件建立模型不仅工作量大, 而且模型并不适合推广, 因此, 如何快速建立巷道的三维模型, 成为矿山虚拟化建设一个关键问题. 本文从快速建立三维模型的方面思考, 运用基于数字图像的三维重建方法来完成巷道的建模工作.

2 三维重建原理

基于数字图像进行三维重建, 主要是指通过数码相机获取所要重建对象的一系列图像序列, 利用图像处理和计算机视觉的相关技术, 计算出重建对象的三维信息, 从而恢复三维模型.

相机模型描述了三维场景投影到二维图像的过程, 确定了相机模型后, 就可以计算三维空间中某点在二维平面上的投影点位置. 相机针孔模型的成像几何关系如图1所示^[1].

图像坐标系 xO_1y 定义在图像上, 以 O_1 为坐标原点; 像素坐标系的原点 O_0 在图像的左上角; O_1 在像素坐标系 uv 中的坐标为 (u_0, v_0) . 相机坐标系的原点 O_c 在相机的光心上, X_c 轴和 Y_c 轴分别平行于

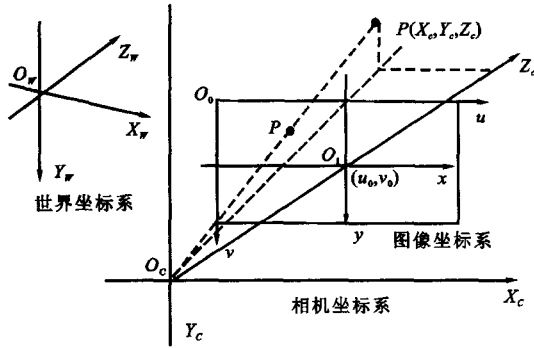


图1 相机针孔成像模型

图像坐标系中的 x 轴和 y 轴, 而 Z_c 轴是相机的光轴, 垂直相交于图像平面的点 O_i 即为图像坐标系的原点. $O_c O_i$ 为相机的有效焦距. 世界坐标系是用于描述相机位置的参考坐标系, 可以固定在场景中的某个物体上. 图1中 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 是相机坐标系中的一个点, p 是 P 在图像坐标系中的投影点.

根据图像坐标系、相机坐标系和世界坐标系之间的关系, 经过理论可以推导出像素坐标 $(u \ v \ 1)^T$ 与世界坐标 $(X_w \ Y_w \ Z_w \ 1)^T$ 之间的转换关系:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ \dots\dots\dots \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

式中, f_x, f_y, u_0, v_0 称为相机的内参数, R, t 称为相机的外参数. 从式(1)可知, 计算重建目标的三维信息, 需要获取相机的内参数, 从而计算出给定空间点的像素坐标. 但是, 在仅知道某一点的像素坐标时, 是无法计算出它在空间中具体位置的. 这就需要该像素点在另一张图像上的匹配点的坐标, 通过投影关系, 可以唯一求解空间点.

综上所述, 基于数字图像的三维重建方法的简要流程如图2所示.



图2 三维重建简要流程

3 相机标定

计算相机的内参数需要进行相机标定. 相机标定的过程既给出了相机的几何模型, 也给出了透镜的畸变模型. 这两个模型定义了相机的内参数.

相机标定方法大致分为三种: 传统的标定方法、自标定的方法以及基于主动视觉的标定方法. 传统的标定方法可以得到比较精确的标定结果, 但对参照物的要求较高; 自标定的方法不需要任何标定参照物, 只需要获取同一静态场景的多角度图像序列, 利用相互之间的约束关系就可以进行标定, 但是精度不高. 张正友^[2]提出了介于自标定法和传统标定法之间的一种平面标定法, 我们称之为“张正友标定法”, 它既避免了传统标定法对设备要求高、操作繁琐等缺点, 又比自标定法得到的结果精度高、鲁棒性好. 本文正是在张正友标定法基础上实现的相机标定, 该方法主要步骤如下:

- (1) 制作一张棋盘图案, 并将其贴在一块平面上作为标定模板;
- (2) 从不同角度拍摄若干张模板图像序列;
- (3) 对每张模板图像序列进行角点检测, 并检测出所有角点;
- (4) 利用旋转矩阵的正交性求解线性方程, 从而得到相机的内参数;
- (5) 利用最小二乘法, 估算出相机的径向畸变系数;
- (6) 利用再投影误差最小准则, 优化相机内外参数.

在本文所做实验中, 标定板为自制的棋盘模板, 由 A3 白纸打印的 9×7 的黑白棋格棋盘, 每个棋格的边长的实际大小为 30 mm, 使用的数码相机型号为 SONY WX1, 从不同角度拍摄一组图像, 如图3所示.

实验采用文献[3]中使用的 OpenCV 视觉库编程实现角点的检测, 并进行标定, 结果如图4所示. 得到的内参数为: $f_x = 458.6747$, $f_y = 460.3217$, $u_0 = 320.2947$, $v_0 = 231.6820$; 畸变系数为: $k_1 = -0.0496$.

4 角点检测与匹配

角点是指图像中一类具有明显梯阶性的特征点, 它与邻域中的临近点有明显差异. 检测角点的算法可以分为两类: 一类是检测图像的边缘, 以链码形式表示, 取曲率最大的点作为角点; 另一类是计算灰

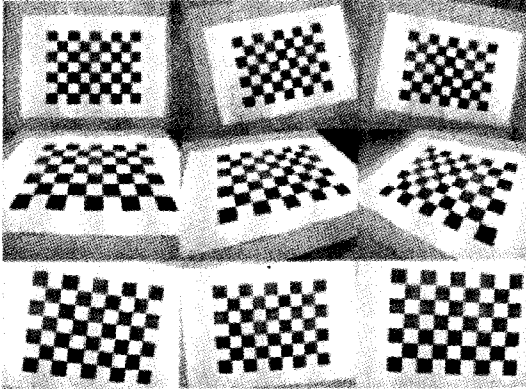


图3 多角度拍摄的标定模板图像序列

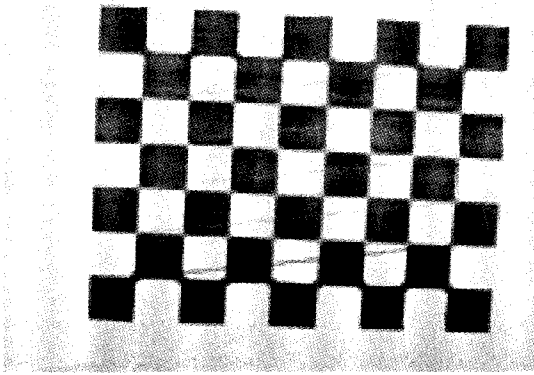


图4 相机标定效果

度图像的灰度分布曲率, 取其中的最大曲率点作为角点^[3]. 本文实验中用到的 Harris 角点检测法属于后一类方法.

图像处理中为了描述图像局部灰度的变化程度, 需要使用自相关函数, 而自相关函数的曲率与图像中的角点有关. 自相关函数可以表示为

$$E(x, y) = \sum_{u, v} W_{u, v} |I_{u+x, v+y} - I_{u, v}| \quad (2)$$

式中, $E(x, y)$ 是图像窗口偏移 (x, y) 后图像灰度的平均变化, I 表示图像灰度, W 表示图像窗口. $E(x, y)$ 在角点附近随着窗口的偏移, 变化显著. $E(x, y)$ 在像素点 (u, v) 处可以近似表示为

$$E(x, y) = [x \ y] M \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M(x, y) =$$

$$\begin{bmatrix} (\frac{\partial I}{\partial x})^2 \otimes h(x, y) & (\frac{\partial I}{\partial x}) \cdot \frac{\partial I}{\partial y} \otimes h(x, y) \\ (\frac{\partial I}{\partial x}) \cdot \frac{\partial I}{\partial y} \otimes h(x, y) & (\frac{\partial I}{\partial y})^2 \otimes h(x, y) \end{bmatrix}$$

=

$$\begin{bmatrix} A(x, y) & C(x, y) \\ C(x, y) & B(x, y) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $h(x, y)$ 是一阶高斯平滑滤波函数.

$E(x, y)$ 在像素点 (u, v) 处的极值曲率, 可以用矩阵 M 的特征值来近似的表示. 当矩阵 M 的两个特征值都很大时, $E(x, y)$ 在该点的两个正交方向上的极值曲率就都比较大, 即可认定该点为角点. 计算角点的响应函数即 Harris 角点探测器定义为

$$R(x, y) = \det [M(x, y)] - k \cdot \text{trace}^2 [M(x, y)] \quad (5)$$

式中, $\det [M(x, y)] = AB - C^2$, $\text{trace}^2 [M(x, y)] = A + B$. 当 $R(x, y)$ 的值超过某一阈值时, 就把点 (x, y) 作为角点. Harris 建议 k 取 0.04, 这样可以得到较好的结果.

本实验采用 Harris 角点探测器检测巷道图像角点的效果如图 5 所示.



图5 巷道图像角点检测效果

对于目标场景重建的图像, 需要寻求同一空间点在不同视角下的投影图像上的像素点间的一一对应关系, 即提取一幅图像中的角点后, 寻找它在另一幅图像中的对应点, 这两点是同一空间点在两幅图像上的投影, 由此可以求得该空间点的三维坐标, 进而由稀疏的三维坐标点恢复整个曲面. 归一化互相关技术 (Normalized Cross Correlation, NCC) 正是这样一种求取匹配点的经典算法^[4], 它具有一定的抗噪能力, 匹配比较准确, 实现简单, 因此本文选择 NCC 方法来匹配角点.

5 三维重建

在完成角点匹配之后, 根据上文所述, 可以通过一对二维平面的匹配点对来计算该点在三维空间中的坐标. 从像素坐标系中的某一像素点来求解世界坐标系中的空间点, 需要用到相机标定实验中求得的相机内参数. 于是, 我们可以建立方程组,

求解各个对匹配点在世界坐标中的坐标值. 当所有匹配点的三维坐标都计算出来后, 我们需要对它进行 Delaunay 三角剖分, 从而得到一个比较满意的重建结果.

Delaunay 三角剖分是指, 对于任意平面上的点集, 有且仅有一种剖分方法, 使得剖分产生的三角面片满足“最大—最小角”原则^[5]. Delaunay 三角剖分

具有以下两个重要特性:

(1) 最小角最大: 在所有剖分方法产生的三角形中, Delaunay 三角剖分产生的三角形, 其最小内角之和最大。

(2) 空外接圆: Delaunay 三角剖分产生的任意一个三角形的外接圆, 都包含且仅包含形成该三角形的三个点, 而不包括任意其他点。

因此, Delaunay 三角剖分形成的三角网格是唯一的最优的网格。

现在有很多种算法计算 Delaunay 三角剖分, 其中一些很有效, 但内部描述却很难描述。其中一种较为简单且容易实现的算法步骤如下^[6]:

(1) 添加外部三角形, 并从它的一个顶点处开始。

(2) 加入一个内部点, 在三角形的外接圆内搜寻该点, 去掉包含该点的三角剖分。

(3) 重新构造三角图, 在刚刚去掉的三角形外接圆内包括新的点。

(4) 返回(2), 直到没有新的点加入。

本文实验采用 Delaunay 三角剖分后所得的三维重建效果如图 6 所示。

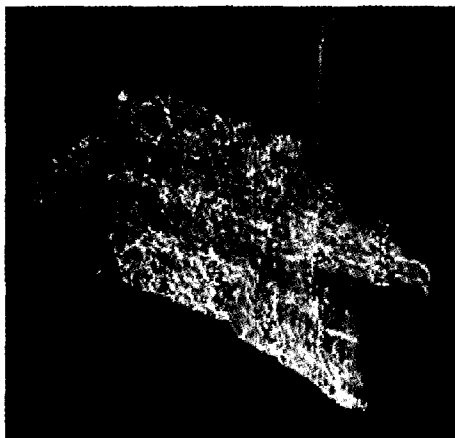


图 6 三维重建效果图

由图 6 可以看出, 有很多飘逸点影响了模型的恢复效果, 这是因为在角点匹配过程中, 匹配点中存

在一些误配点, 这主要是由于匹配图像中相似特征的干扰造成的, 这些可以通过增大匹配窗口和提高图像精度方面来解决。

6 结束语

本文出于快速建立煤矿巷道三维模型的考虑, 初步探讨了使用基于数字图像的三维场景重建技术的可能性, 并利用 OpenCV2.1 视觉库开发了一套基于巷道图像重建三维模型的系统, 并取得了初步效果。三维重建是计算机视觉研究的热点, 它直接模拟人的双目观察景物的方法, 获取景物的立体信息, 对它的研究, 无论是在仿生角度还是工程应用角度都具有重要意义。而本文提出把三维重建技术应用到煤矿巷道的建模上, 有助于巷道三维模型的快速建立, 进而为虚拟矿山的漫游奠定了基础。

参考文献:

- [1] 薛耀红. 基于二维图像的人脸三维数据获取[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [2] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334
- [3] 陈乐, 吕文阁, 丁少华. 角点检测技术研究进展[J]. 自动化技术与应用, 2005, 24(5): 1-8
- [4] 孙卜郊, 周东华. 基于 NCC 的快速匹配算法[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(9): 104-106.
- [5] 万琳. 基于三角网格的图像表示方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [6] Gary Bradski, Adrian Kaehler. 学习 OpenCV (中文版)[M]. 于仕琪, 刘瑞楨, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009.

作者简介:

山 维 男, (1986-), 硕士研究生. 研究方向为计算机视觉.

刘厚泉 男, (1963-), 博士, 教授. 研究方向为虚拟现实、计算机视觉.

(上接第 132 页)

南京: 南京理工大学, 2007.

- [8] 聂卉. 基于本体的查询扩展与规范[J]. 现代图书情报技术, 2007(3): 35-38.
- [9] 何琳, 曹玲. 农业古籍本体的构建及其检索机制研究[J]. 现代图书情报技术, 2006(12): 37-40.
- [10] 何琳, 曹玲. 农业古籍本体的构建及其检索机制研究[J]. 现代图书情报技术, 2006(12): 37-40.

作者简介:

赵 冬 男, (1980-), 硕士生. 研究方向为知识本体研究.

牛 强 男, (1974-), 博士, 副教授. 研究方向为数据挖掘与知识获取研究.

刘晓明 男, (1987-), 硕士生. 研究方向为时间序列研究.