



基于柱面反投影算法的三维物体表面纹理重建

钱炜燕¹, 胡晓彤²

(1.天津科技大学电子信息与自动化学院,天津 300222; 2.天津科技大学计算机科学与信息工程学院,天津 300222)

摘要: 从图像中提取纹理用作纹理映射是三维重建的常用方法之一,然而通过相机获取的照片纹理经常存在失真变形,不能直接用于纹理映射,故需要研究失真纹理的校正. 针对圆柱面物体提出一种柱面反投影算法,将物体在圆柱面上的影像纹理投影到二维视平面上显示,并用线性插值算法对缺损的像素值进行插值校正,然后利用 SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 尺度不变特征点匹配算法对校正后的纹理图像进行特征点提取与匹配,最后采用加权平滑算法实现图像的拼接,从而得到宽视角的纹理图像. 实验表明,利用上述方法能够有效地生成三维重建所需的纹理.

关键词: 柱面反投影; 纹理几何校正; 线性插值; SIFT 特征点; 图像拼接

中图分类号: TP181 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2009)03-0058-05

Surface Texture Reconstruction for 3D Object Based on Cylindrical Back-Projection Algorithm

QIAN Wei-yan¹, HU Xiao-tong²

(1. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China; 2. College of Computer Science and Information Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: Extracted texture from the image used for texture mapping is a commonly used method of 3D reconstruction. However, the texture obtained by camera will usually distortion, can not be directly used for texture mapping, so study the texture correction is necessary. An cylindrical back-projection algorithm was proposed for cylindrical objects, image texture on the cylindrical surface was projected onto 2D plane, and the defect pixels were corrected with linear interpolation algorithm, then SIFT algorithm was used for feature extraction and matching on corrected texture image. Finally, the seamless automatic image mosaic was completed with smoothing algorithm, wide viewing angle image was got. Experiments show that these methods can effectively generate the texture for 3D reconstruction.

Keywords: cylindrical back-projection; texture geometric correction; linear interpolation; SIFT feature point; image mosaic

目前在基于图像重建的纹理校正和映射中,一般讨论的是如何校正平面纹理的透视变形. 文献[1]中提出利用投影变换纠正平面纹理的透视变形,取得了较好的效果,但该方法不能适用于曲面纹理的校正. 文献[2]通过对摄像机和光学系统产生畸变的原理和现象的分析,提出一种等效球形模型来模拟这类畸变,但只能用于修正由于光学系统或图像传感器产生

的畸变. 对于一些柱面、球面等本身由曲面构成的物体,在成像过程中会发生表面纹理的失真变形,目前针对这类由于物体本身形状而导致表面纹理失真变形的研究还未见报道.

本文以圆柱面物体为研究对象,主要讨论圆柱体表面变形纹理的校正恢复,将拍摄得到的圆柱体表面影像纹理投影到圆柱面切平面上显示,即将柱面投影

收稿日期: 2008-11-19; 修回日期: 2009-02-22

基金项目: 天津科技大学引进人才科研启动基金(20060415)

作者简介: 钱炜燕(1984—),女,江西人,硕士研究生; 通信作者: 胡晓彤, huxt@tust.edu.cn.

转化为平面投影,这恰是一个柱面反投影过程^[3-4].通过对圆柱体在几何空间的投影进行分析,提出了一种柱面反投影算法,并用线性插值算法对缺损的像素值进行插值校正,实现了变形纹理的校正恢复.

为了得到三维重建所需要的宽视角纹理图像,利用照相机从不同角度获取同一场景中物体的多幅纹理照片,首先对其失真变形的纹理进行校正,进而利用SIFT(Scale Invariant Feature Transform)特征点匹配算法对校正后的纹理图像进行拼接,得到所需的纹理图像,为利用纹理映射实现三维重建打下良好的基础.

1 柱面反投影算法原理

在不考虑拍摄照片的透视失真的前提下,图像由柱面空间到二维平面的映射关系如图1所示.视点处为数码相机镜头位置,设圆柱体半径为 r ,物体高为 H ,宽为 W ,视点为中心点 o 的距离 l (即正视水平线)垂直于照片的投影面, a 、 b 为圆柱体上下两个椭圆弧面的短半轴长度, α 、 β 为视点与圆柱体上下边缘的夹角,由投影示意图中的几何关系可得

$$\tan \alpha = \frac{a}{r} = \frac{a+h_1}{l} \quad (1)$$

$$\tan \beta = \frac{b}{r} = \frac{b+h_2}{l} \quad (2)$$

$$h_1 + h_2 = h \quad (3)$$

$$H = h + a + b \quad (4)$$

$$W = 2r \quad (5)$$

其中 a 、 b 可通过检测椭圆弧的短半轴得到,从而求出 l 、 h_1 、 h_2 .

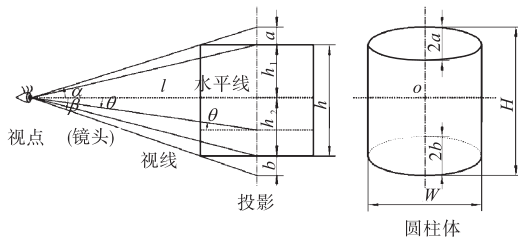


图1 圆柱体投影示意图

Fig.1 Cylindrical projection sketch map

值得注意的是,图1中的正视水平线 l 并不位于圆柱体的中位线处,介于上下底面之间即可,并且 l 垂直于照片的投影面也只是一种特殊情况,允许适当范围的俯仰角度,只需改变相应的 α 、 β 值即可.

设 $P(x_p, y_p)$ 为原始照片图像中任意一点,对应纹理校正后图像中点 $P'(X_p, Y_p)$.在图2中,圆柱体截

面示意图中的圆为投影柱面过点 P 的水平截面, γ 为点 P 偏离圆心 o 的夹角,由 h_1 、 h_2 可确定两图的视觉中心点 o ,从而以圆柱体中轴为 y 轴,水平方向为 x 轴建立坐标系,得到式(6)和式(7).

$$\sin \gamma = \frac{x_p}{r} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{X_p}{r} \quad (6)$$

θ 为图1中点 P 偏离正视水平线 l 的夹角,从而可以得到点 P 在两图像中对应点坐标 (X_p, Y_p) 和 (x_p, y_p) 的映射关系:

$$y_p = Y_p + r \cos \gamma \sin \theta \quad (7)$$

$$x_p = r \sin \gamma \quad (8)$$

由于从圆柱面照片图像校正生成平面矩形纹理图像是一个类似于将圆柱体表面展开成矩形的过程,所以校正恢复后的纹理图像的宽度明显增加,导致出现一些缺损像素的区域.采用“逆向映射”法,将目标图像中(还原的平面矩形纹理图像)像素点坐标经过变换,得到基于原始图像的像素点坐标.对于目标图像中,在原始图像中无法找到对应点的像素点,利用线性插值算法进行填充,从而得到完整的纹理图像.

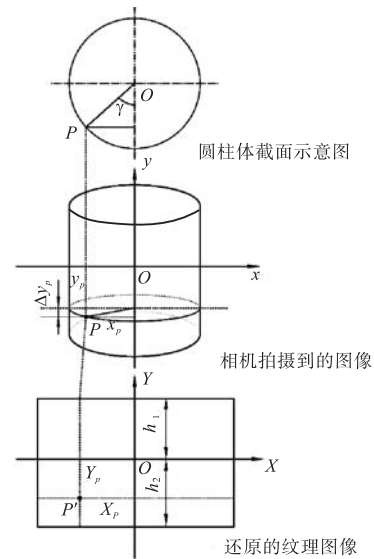


图2 图像纹理校正空间几何关系

Fig.2 Space geometrical relationship of texture correction

2 图像拼接

为了得到宽视角的纹理图像以映射三维模型,需要将经过纹理校正的多幅图像进行图像拼接,即将一组互相有重叠部分的图像进行空间配准,拼成一幅宽视角的新图像.

文献[5]对10种最具代表性的算子(如不变矩,

互相关, SIFT 等)进行了实验和性能比较,结果表明, SIFT 特征描述符在光照变化、图像旋转、比例缩放、几何变形等情况下性能最好. 本文采用一种优化的 SIFT 特征点匹配方法实现图像的无缝拼接, 图像拼接流程如图 3 所示. 其实现过程包括: 图像获取、特征点提取与匹配、图像配准、图像融合. 其中图像获取部分的输入图像就是利用柱面反投影算法经过纹理校正后的纹理图像.

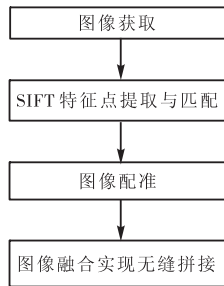


图 3 图像拼接流程图

Fig.3 Image mosaic flow chart

2.1 特征点的提取与匹配

SIFT^[6] 算法又称尺度不变特征点提取方法, 主要包含 4 个步骤: (1) 测量尺度空间极值; (2) 精炼特征点位置; (3) 计算特征点的描述信息; (4) 生成本地特征描述符.

即先使用高斯过滤器对原始图像进行若干次连续滤波建立第一个尺度组, 再把图像减小到原来的一半, 进行同样的高斯滤波形成第二个尺度组, 重复操作直到图像小于给定阈值为止; 对每个尺度组中的高斯图像进行差分, 形成高斯差分尺度组 (DoG 图像); 然后取这些高斯差分图像中的局部极值, 得到尺度空间域上的图像特征点; 最后, 用 128 维的向量 (包括位置、尺度、方向等信息) 表示每个特征点, 这样便生成了用于图像特征匹配的图像特征描述符. 该算法在空间域和尺度域上同时对特征点进行计算和提取, 因此得到的特征点具有尺度空间不变性, 能够正确的提取尺度和视角变化较大的两幅图像中存在的特征点, 有效地克服了输入图像中的噪声干扰.

SIFT 特征点匹配采用两个特征点描述符之间的欧氏距离进行相似性度量, 即取图像 I 中的某个关键点, 找出其与图像 I' 中欧氏距离最近的前两个关键点, 如果最近的距离除以次近的距离小于某个比例阈值, 则接受这一对匹配点. 降低这个比例阈值, SIFT 匹配点数目会减少, 但匹配更稳定可靠.

2.2 图像配准

2.2.1 图像配准流程

图像配准是一种确定待拼接图像间的重叠区域

以及重叠位置的技术, 它是整个图像拼接的核心. 本文采用了基于特征点的图像配准方法, 即通过匹配点对构建图像间的变换矩阵 H , 从而完成图像的拼接. 为了提高图像配准的精度, 采用 RANSAC^[7] 随机抽样一致性算法, LM^[8] 非线性最小化迭代算法对图像变换矩阵 H 进行初值求解与精炼, 达到了较好的图像拼接效果. 计算图像间变换矩阵 H 的算法流程如下:

- (1) 计算每幅图像中的特征点;
- (2) 计算特征点之间的匹配;
- (3) 计算 H 的初始值: RANSAC 鲁棒估计, 重复 N 次采样 (N 由自适应算法确定);
- (4) 迭代精炼 H : 由划分为内点的所有的匹配重新估计 H , 使用 LM 算法来最小化代价函数;
- (5) 引导匹配: 用估计的 H 去定义对极线附近的搜索区域 (定义与对极线的距离小于 1.5 像素的区域为搜索区域), 进一步确定特征点的对应匹配;
- (6) 反复迭代 (4)、(5) 直到对应点的数目稳定为止.

2.2.2 计算图像间变换矩阵初始值

设图像序列之间的变换为投影变换

$$H = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & h_8 \end{bmatrix}$$

式中 H 的自由度为 8. 设 $p=(x, y), q=(x', y')$ 是匹配的特征点对, 则根据投影变换公式

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & h_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}$$

选用 4 组最佳匹配计算出矩阵 H 的 8 个自由度参数 $h_i (i=0, 1, \dots, 7)$, 并以此作为初始值. 为了得到较为精确的 H 初始值, 采用 RANSAC 算法重复 N 次随机采样, 通过寻找匹配误差的最小值得到一组与 H 一致的数目最多的内点, 并从这些内点中重新计算出精确的 H 初始值.

2.2.3 精炼图像间变换矩阵

由初始 H 值迭代精炼图像间变换矩阵的算法流程如下:

- (1) 对于图像 I 中每个特征点 (x, y) . ① 计算图像 I' 中的对应点 (x', y') ; ② 计算对应点间的误差 $e = I'(x', y') - I(x, y)$; ③ 计算 H 各分量相对误差 e 的偏导数; ④ 构造 H 增量计算函数 $(A + \lambda I) \Delta h = b$;
- (2) 求解 H 增量函数得到 Δh , 修正 H ;
- (3) 判断误差 e , 若误差减小但未小于阈值则继续

计算新的 Δh , 否则增大 λ 值重新计算 Δh ;

(4) 当误差小于规定阈值时停止计算, 得到 H . 即使用迭代的方法计算所有点对间距离之和 E 的最小值. 当距离小于规定阈值时停止迭代, 得到最终图像间变换矩阵 H .

$$E = \sum_{i=1}^N e_i^2 - \sum_{i=1}^N [I'(x', y') - I(x, y)]^2$$

为了在较少步骤内迭代收敛到较为精确真实的 H 值, 采用 LM 算法, 通过计算 H 各分量 $h_i (i=0, 1, \dots, 7)$ 相对于 e_i 的偏导数来构造计算 H 增量的函数 $(A + \lambda I) \Delta h = b$, 从而通过获得的 H 增量来逐步精炼 $H^{[8]}$. 其中, H 各分量 $h_i (i=0, 1, \dots, 7)$ 相对于 e_i 的偏导数为

$$\begin{cases} \frac{\partial e}{\partial h_0} = \frac{x}{D} \frac{\partial I'}{\partial x'} \\ \frac{\partial e}{\partial h_1} = \frac{y}{D} \frac{\partial I'}{\partial x'} \\ \vdots \\ \frac{\partial e}{\partial h_7} = \frac{y}{D} \left(X' \frac{\partial I'}{\partial x'} + y' \frac{\partial I'}{\partial y'} \right) \end{cases}$$

2.3 图像融合

根据图像间变换矩阵 H , 对相应图像进行变换以确定图像间的重叠区域, 并将待融和图像注册到一幅新的空白图像中形成拼接图像. 在融和过程中还需要对缝合线进行处理, 采用了加权平滑算法, 该算法的主要思想是: 重叠区域中像素点的灰度值 $Pixel$ 由两幅图像中对应点的灰度值 $pixel_L$ 和 $pixel_R$ 加权平均得到, 即

$$pixel = k \times pixel_L + (1 - k) \times pixel_R$$

其中 k 是可调因子 ($0 < k < 1$). 为使图像重叠区域中的点与两幅图像建立更大的相关性, 取

$$k = \frac{d_1}{d_1 + d_2}$$

其中 d_1, d_2 分别为重叠区域中的点到两幅图像重叠区域的左边界和右边界的距离.

3 实验

依据本文物体表面纹理重建方法, 在 VC++6.0 环境下编程实现了纹理几何校正. 图 4(a) 是用数码相机近距离拍摄的圆柱体测试图像, 通过程序检测提取出物体的特征信息, 实现步骤如下:

(1) 检测物体的边缘, 确定纹理图像的目标区域, 提取包络圆柱体的最小矩形轮廓;

(2) 在矩形轮廓的基础上, 通过检测圆柱体上下边缘的椭圆弧计算出短轴 a, b (长轴近似为矩形宽度), 为纹理几何校正提供参数, 如图 4(b) 所示;

(3) 依据已知的参数, 利用柱面反投影算法原理对照片纹理图像进行几何校正, 结合线性插值算法, 最终把照片失真变形的倒鼓形纹理校正恢复为矩形图像纹理, 如图 4(d) 所示. 其中图 4(c) 是没有经过线性插值处理的图像, 可以看出存在像素值的缺损.



(a) 原始照片图像 (b) 检测提取轮廓信息



(c) 未经插值处理的图像



(d) 经过插值校正的图像

图 4 图像纹理校正结果

Fig.4 Result of texture correction

利用上述方法, 对从不同角度获得的两张图像纹理进行校正后, 得到如图 5 所示结果, 随后进行拼接, 得到如图 6 所示结果. 实验结果表明, 本方法能够完成两幅图像的拼接操作, 生成仅通过一次成像无法得到的宽视角纹理, 且效果较好. 另一方面, 由于柱面的不同部位感光程度不同, 使得柱面的中部和两侧间存在亮度差异, 导致拼接后的图像缝合线两端出现明显的明暗变化. 这一点有待通过今后的研究加以改

善. 现拟采用基于色度空间变换方法^[9],将 RGB 图像进行 HLS 变换,在 HLS 色彩空间对拼接缝两侧的亮度信息等进行校正,从而改善拼接效果.



图5 纹理校正后的两幅图像
Fig.5 Image of texture correction



图6 图像拼接融合结果
Fig.6 Result of image mosaic

4 结 论

通过对圆柱体在几何空间的投影进行分析,提出一种柱面反投影算法,并结合线性插值算法实现了圆柱体表面失真变形的影像纹理的几何校正,同时利用 SIFT 特征点匹配算法实现图像的无缝拼接,得到宽视角的纹理图像以映射三维模型. 实验结果表明,利用上述方法能够有效地生成三维重建所需的纹理,为利用纹理映射实现三维重建打下良好的基础.

柱面反投影算法可以有效地校正圆柱体表面失真变形的纹理,实现方法简单,从原理上对椭球面、球面等其他曲面纹理的校正均可适用,具有比较广泛的实用性. 另外,柱面反投影算法对于相机拍摄时视点和方向的局限性较小,只要拍摄范围介于圆柱体上下底面之间即可,并且允许带有适当范围的俯仰角度. 利用本文方法拍摄时,对手持相机的局限性小,操作简单方便,具有比较广泛的适用性.

参考文献:

- [1] 孟维亮,孙济洲,孙小兵. 基于两视图重建的平面纹理校正和映射[J]. 中国图象图形学报,2005,10(12):1498-1503.
- [2] 韩广良,宋建中. 一种基于畸变等效曲面的图像畸变校正[J]. 光学技术,2005,31(6):122-124.
- [3] 赵敏. 基于图像的柱面全景图生成算法研究[D]. 贵州:贵州大学计算机科学与技术学院,2006.
- [4] 潘华伟,邹北骥. 一种圆柱形全景图生成新算法及其实现[J]. 计算机工程与科学,2003,25(6):13-16.
- [5] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence,2005,27(10):1615-1630.
- [6] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision,2004,60(2):91-110.
- [7] Hartley R,Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision[M]. 2nd. London:Cambridge University Press,2004:8-11.
- [8] 智平华,孙季丰. 真实场景的图像拼接方法[J]. 中国图象图形学报,2003(8):377-380.
- [9] 周廷刚. 遥感彩色影像镶嵌拼接缝的消除方法研究[J]. 计算机工程与应用,2004(36):84-86.