

旋转体三维重建方法研究

郑顺义^{1,2} 徐刚³ 张祖勋¹ 张虎龙⁴

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 辽宁工程技术大学地理空间信息技术与应用实验室, 阜新市中华路 47 号, 123000)

(3 立命馆大学理工学部情报学科, 日本滋贺县草津市野路东 1-1-1, 520072)

(4 中国飞行试验研究院测试所, 西安市阎良区 73 信箱, 710089)

摘要:提出了一种新的旋转体三维重建方法。在该方法的实现过程中, 首先利用旋转平台获取了旋转体的影像, 然后基于物方的空间圆重建方法精确测量旋转体的上口, 从而得到旋转体的旋转轴, 再根据影像的方位元素对影像进行纠正, 使得旋转体的轮廓线在影像上的成像左右对称, 最后直接用纠正后的影像精确计算旋转体的形状。在理论上讲, 利用一张影像就可以实现旋转体的三维重建, 但在本文中使用了多张照片, 主要是为了获取整个旋转体的纹理。对实际的旋转体进行三维重建, 结果证明该方法是有效的。

关键词: 旋转体; 三维重建; 经线; 纬线; 轮廓线

中图法分类号: P234

1 旋转体

旋转体的三维重建在文物保护、考古、工业测量等方面具有重要的意义。如古文物中有许多瓷器、铜器、铁器等都是旋转体, 这些文物非常容易破碎或被锈蚀, 因此, 需要对其进行三维测量和重建, 用最新的数字信息技术来记录这些三维模型, 然后可以存档或在网上发布。在工业测量中, 有许多工业零件都是旋转体或由旋转体组成, 如圆柱、圆台、圆锥等, 常常需要对这些零件的生产尺寸进行检测。上述情况中都涉及到旋转体的三维重建, 因此, 研究旋转体的精确三维重建意义重大。

对于旋转体的三维重建, 传统的视觉测量方法难以实现。如传统的摄影测量技术利用相机中心、像点、物点三点共线的条件对物体进行三维测量和重建, 该项技术已经相当成熟^[1,2]。但对于旋转体及其影像, 常常很难确定点与点之间的对应, 因此, 需要研究新的方法来实现旋转体的三维重建。文献[3]提出了一种基于八叉树和侧轮廓

的旋转体重建方法, 速度很慢且精度不高。文献[4,5]也提出了一些方法, 但这些方法只能得到旋转体的一个相似模型, 没有实现旋转体的绝对测量与重建。本文方法可以认为是这些方法的一个扩展。

2 旋转体重建原理

2.1 旋转体成像的对称特性

可以通过将一个平面曲线 C 绕一个轴旋转得到一个旋转体 S 的表面, 如图 1 所示, 该旋转轴与平面曲线 C 在同一个平面内。经过 S 上的任意一点 r , 存在一条经线, 该经线与旋转到对应位置时的平面曲线 C 重合, 经过该点还存在一条纬线, 它是通过 r 且圆心在旋转轴上的一个圆。经过同一点的经线与纬线互相垂直^[4]。

如图 2, 旋转体 S 的轮廓线 Γ 由旋转体 S 上的一组与光线相切的点 X 组成。轮廓线 Γ 在影像上的成像 p 由 X 在影像上的成像组成。轮廓线 Γ 由相机中心和旋转体的相对位置惟一确定。轮廓线 Γ 在影像上的成像 p 可由像平面与到轮廓线的光线相交得到。一般地, 在透视投影中, 轮

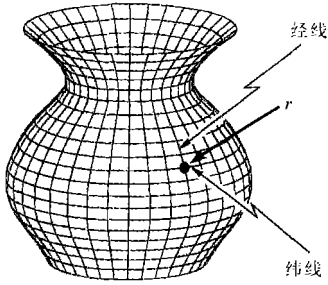


图1 经线与纬线

Fig.1 Meridian Curve and Latitude Curve

廓线 Γ 是一条空间曲线。

在透视投影中,如果相机主光轴指向旋转体的旋转轴,则旋转体的轮廓线在影像上的成像就会左右对称。与文献[1]利用旋转轴与灭点定义的平面透视变换来纠正影像不同,本文通过旋转体成像的对称特性定义一个平面透视变换来纠正影像。

2.2 旋转体轮廓线的参数化

定义旋转体 $S(s, \theta) = [X(s) \cos\theta, Y(s), X(s) \sin\theta]^T$ 由旋转体上的一条经线 $C = [X(s), Y(s), 0]^T$ 绕 Y 轴旋转得到,定义相机中心的坐标为 $c = [0, 0, -d]^T$, 其中 $d > 0$ (图2)。

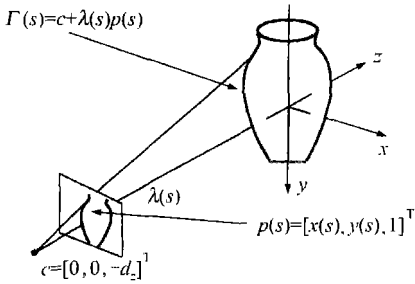


图2 旋转体成像示意图

Fig.2 Sketch of Imaging of Revolution

旋转体的轮廓线可以参数化为^[1]:

$$\begin{aligned} \Gamma(s) &= c + \lambda(s)p(s) \\ p(s)n(s) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $p(s) = [x(s), y(s), 1]^T$ 为对应于轮廓线 $\Gamma(s)$ 从 c 到像平面的视线向量; $\lambda(s)$ 为 $\Gamma(s)$ 的深度, 即从 c 到 $\Gamma(s)$ 的距离在 z 轴上的投影; $n(s)$ 为 $\Gamma(s)$ 点处旋转体的单位法向量, 可以由 $p(s)$ 与影像上的轮廓线 γ 在 $p(s)$ 处的切线方向的叉乘确定^[4]。

不难证明, 点 $S(s_0, \theta_0)$ 处的法线垂直于经过该点的经线, 而且存在于由点 $S(s_0, \theta_0)$ 和 Y 轴确定的平面内, 这个共面约束可以描述为:

$$n(s)^T [n_y]_y \Gamma(s) = 0 \quad (2)$$

式中, $n_y = [0, 0, 1]^T$ 。由该式可以计算深度:

$$\lambda(s) = \frac{d_z n_1(s)}{n_1(s) - n_3(s)x(s)} \quad (3)$$

式中, $n_1(s), n_3(s)$ 为向量 $n(s)$ 的第一和第三个分量。

将轮廓线表示为齐次坐标, 有:

$$\Gamma(s) = \begin{bmatrix} d_z y(s)x(s) \\ d_z y(s)y(s) \\ d_z \alpha_r(s) \\ y(s) - \alpha_r(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\alpha_r(s) = (x(s)y(s) - y(s)x(s))x(s)$ 。

利用式(4)计算出的轮廓线, 可以很容易地得到旋转体的三维形状。

3 算法与实现

3.1 影像获取

利用旋转平台来获取旋转体的影像, 如图3所示。该旋转平台由一个平面格网板和能够驱动平板旋转的步进电机组成, 可以由计算机控制旋转平台旋转, 另外还有一个由计算机控制的 CCD 相机获取黑白影像。首先, 在获取影像之前, 对平面格网板拍摄 4 张影像, 利用二维 DLT 和光束法平差方法对 CCD 相机进行检校^[6]。然后将旋转体放在平面格网板上, 获取旋转体的影像, 同时根据影像上的格网点坐标以及检校得到的相机内方位元素计算相机的外方位元素。



图3 影像获取

Fig.3 Image Capture

3.2 旋转轴的确定

获取了旋转体的影像并计算出影像的参数之后, 利用基于物方解的方法可以直接计算出旋转体上口的圆心坐标和半径^[7]。由于旋转体放在平面格网板上, 因此, 旋转体的旋转轴必然垂直于平面格网板, 再根据计算出的旋转体上口的圆心坐标就可以惟一确定旋转体的旋转轴。这里假设旋转体的底面与旋转体的旋转轴垂直, 这对于一般的旋转体, 如碗、罐、盆等, 都可以满足该条件。

如果定义平面格网所在的平面为坐标系的 XY 平面, 则旋转体的上口所在的平面的方程为

$Z = Z_0$ 。这时, 如果 Z_0 已知, 则利用一张影像就可以确定旋转体上口的圆的方程, 从而确定圆心和半径; 如果 Z_0 未知, 则至少需要两张影像才能确定旋转体上口的圆的方程。一旦确定了旋转体上口的圆的圆心, 就确定了旋转体的旋转轴。

3.3 影像纠正

综上所述, 如果使得旋转体轮廓线在影像的成像左右对称, 就可以利用影像上左右对称的成像计算出旋转体的轮廓线, 从而计算出整个旋转体的三维形状。

当相机绕相机中心旋转时, 设空间点 X 在旋转前和旋转后的成像分别为 x 和 x' , 则存在下列方程:

$$x' = K^{-1}RKx \quad (5)$$

式中, K 为由相机的内部参数构成矩阵, 也叫内部矩阵; R 为旋转矩阵。

将相机绕相机中心旋转, 使得相机的主光轴指向并垂直于旋转体的旋转轴时(图 4), 旋转体的轮廓线在影像的成像就会左右对称。这时, 可以利用式(4)计算出旋转体轮廓线。

4 试验

为了验证上述算法的有效性和正确性, 利用实际物体进行了一些试验。影像获取与参数计算借助于旋转平台, 该旋转平台最初为工业零件检测所设计, 如果没有旋转平台, 可以利用一般的平面格网板并从不同的角度获取影像来代替旋转平台。边缘提取采用了 EDISON 算法^[7]。然后根据影像参数以及计算出的旋转体的旋转轴进行影像纠正。最后根据纠正后的影像计算旋转体的轮

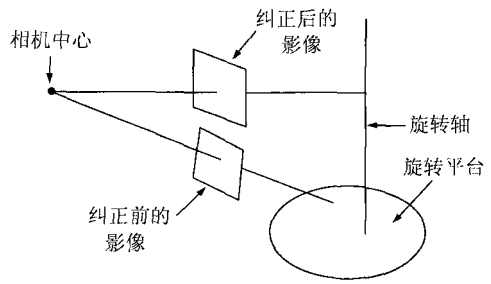


图 4 影像纠正原理图

Fig. 4 Concept of Image Rectification

廓线以及完成旋转体的三维重建, 其中为了计算旋转体轮廓线在影像上的成像线的切线方向, 可以参考附近的点拟合一个二次多项式, 然后根据该二次多项式的一阶导数计算切线方向。图 5 与图 6 是利用上述方法实现的对一个花瓶和一个瓷碗的三维重建结果。计算被测旋转体的几何模型, 只用一张影像就可以了。为了获取整个旋转体的纹理, 每个被测物体用了四张照片。将利用该方法对旋转体进行三维重建的结果与游标卡尺测量的结果进行比较, 主要比较的是旋转体的底面和顶面的直径以及旋转体的高。比较结果表明, 本文提出的方法的测量误差在 1~ 1.5 mm 以下。获取了旋转体的三维模型之后, 可以将该三维模型投影到影像上获取纹理, 并根据旋转体的高度和角度对该纹理进行纠正, 产生一个以高度和角度表示的纠正图像, 从而可以全面审查旋转体表面的图形。该项功能对于古文物研究非常有用。

5 结语

本文提出了一种基于影像的旋转体重建方

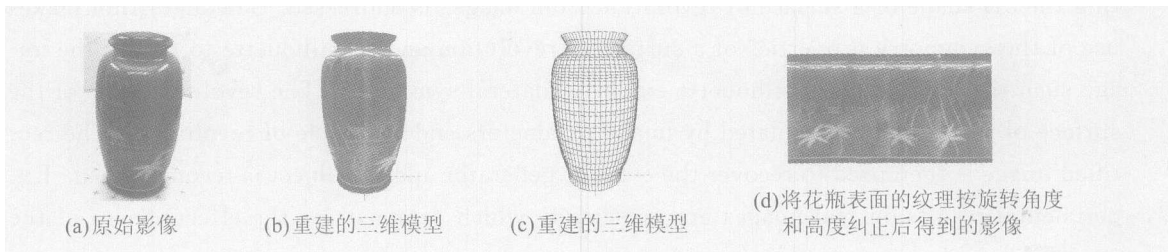


图 5 花瓶的三维重建

Fig. 5 3D Reconstruction of Vase

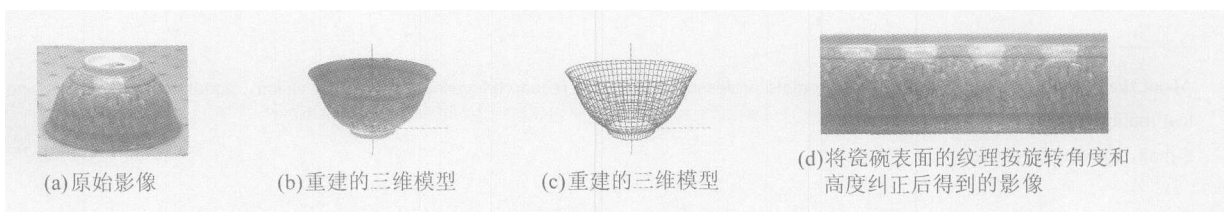


图 6 瓷碗的三维重建

Fig. 6 Reconstruction of a Bowl

法。首先利用旋转平台获取旋转体的影像,借助旋转平台的功能获取影像的参数,然后基于物方重建的方法计算旋转体的旋转轴,根据影像的参数和旋转体的旋转轴可以对影像进行纠正,利用纠正后的影像可以计算出旋转体的轮廓线,从而最终计算出整个旋转体的三维几何模型。试验结果表明,本文提出的方法对于旋转体的三维重建是有效的。该方法的实现在文物保护、考古、工业测量等领域具有一定的实用价值。在今后的工作中,将进一步提高边缘提取的精度以及各种参数的计算精度,从而使得该方法的使用更简易,测量与重建的精度更高。

参 考 文 献

- [1] 王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京: 测绘出版社, 1979
- [2] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996
- [3] 张永军. 基于序列影像的工业钣金件三维重建与视觉检测[D]. 武汉: 武汉大学, 2002
- [4] Wong K Y K, Mendonca P R S, Cipolla R. Reconstruction of Surfaces of Revolution from Single Uncalibrated Views[C]. British Machine Vision Conference, British, 2002
- [5] Utcke S, Zisserman A. Projective Reconstruction of Surfaces of Revolution[C]. DAGM03, Magdeburg, Germany, 2003
- [6] 张永军, 张祖勋, 张剑清. 利用二维 DLT 及光束法平差进行数字摄像机标定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(6): 566-571
- [7] 张永军, 王乘. 基于物方直接解的圆匹配与重建[J]. 机械工程学报, 2004, 40(2): 92-95
- [8] 江万寿. 航空影像多视匹配与规则建筑物自动提取方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004

第一作者简介: 郑顺义, 副教授, 博士。主要研究方向包括计算机视觉、数字摄影测量和虚拟现实等。

E-mail: syzheng@263.net

On Reconstruction of Revolution

ZHENG Shunyi^{1,2} XU Gang³ ZHANG Zuxun¹ ZHANG Hulong⁴

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Geometrics and Applications Laboratory, Liaoning Technical University, 47 Zhonghua Road, Fuxin 123000, China)

(3 Department of Computer Science & Media Technology, Ritsumeikan University, 1-1-1 Kusatsu, Shiga 520072, Japan)

(4 Test Department, Chinese Flight Experiment Institute, P. O. Box 73, Yanliang District, Xi'an 710089, China)

Abstract: In the process of reconstruction of textured 3D models of revolution from images, the precise 3D shape of the revolution must be obtained in advance. This can be done using computer vision technique and from symmetry property of potteries. The problem of recovering the 3D shape of a surface of revolution from images is addressed. The algorithm makes use of the symmetry properties of a surface of revolution and its silhouette to rectify the image such that the resulting silhouette exhibits bilateral symmetry. The revolution axis of the surface of revolution is calculated by image parameters and top circle of revolution. The rectified image is then used to recover the contour generator and the object is reconstructed. Experimental results on real images are presented, which demonstrate the effectiveness of the approach.

Key words: revolution; 3D reconstruction; meridian curve; latitude circle; contour

About the first author: ZHENG Shunyi, associate professor, Ph.D. His research focuses on computer vision, digital photogrammetry and virtual reality.

E-mail: syzheng@263.net