

文章编号: 1002-1582(2009)03-0474-05

基于 Sfs 的 3D 视觉测量研究^{*}

谢路生, 王磊, 出晓岚, 秦玉红, 黄元庆

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 提出了一种将 Shape from Silhouette (Sfs) 技术应用在三坐标机上的新方法, 即用摄像机获取图像, 用三坐标机作移动平台, 构建视觉测量系统, 应用 Sfs 技术对物体进行三维测量。该视觉测量系统扩展了坐标机功能, 扩大了其应用范围。实验结果表明, 该视觉测量系统具有 Sfs 技术和坐标机两者的优点, 重构物体三维模型的过程简单快捷, 精度高于 0.4mm, 其结果可作为坐标机智能测量的基础, 是一种非常实用的方法。

关键词: 视觉测量; Sfs; 智能测量; 三维重构; 空间雕刻

中图分类号: TP242.6⁺2 文献标识码: A

3D vision measurement based on shape from silhouette

XIE Lu-sheng, WANG Lei, CHU Xiao-lan, QIN Yu-hong, HUANG Yuan-qing

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Shape from Silhouette(Sfs) is a passive non-contact 3D measurement method which is used in 3D modeling and reverse engineering etc. Using Sfs method, a simple, low cost, efficient and accurate 3D information acquisition system can be established and the request of the surface material of the object that is measured is low. Compared to laser scanning, Sfs can also measure an object with hole. A new method that Shape from Silhouette is applied to measure the objects in coordinate metrology is proposed, that is the vision measurement system is made up of the camera, the coordinate metrology and Sfs. Intelligent measurement is carried out on the vision measurement system to 3D reconstruction and consequently the precision is improved. The functions of coordinate metrology are expanded and the applications of coordinate metrology are enlarged by the system. The running experiment results on the vision measurement system show that this system has Sfs and coordinate metrology's advantages. The approach to 3D reconstruction is very efficient and the accuracy is higher than 0.4mm. This approach is a much applied way and it can be a foundation of intelligent measurement.

Key words: vision measurement; Shape from Silhouette; intelligent measurement; 3D reconstruction; space carving

0 引言

三坐标测量机是 20 世纪 70 年代初期发展起来的一种精密测量仪器, 它是把光学、机械、电子技术和电子计算机技术融为一体的高精度、高效率的自动化检测设备。其应用范围广泛, 既可用于精密测量, 又可用于生产线上或生产现场检测等。坐标机测量的精度较高, 对于物体的边界的测量也相对精确。

但传统三坐标机测量是接触式测量, 该技术也具有明显的弱点: 不能测量高光洁易划伤的表面; 测量的速度慢, 效率比较低^[1]。

而 Shape from Silhouette^[2,3] (Sfs) 方法测量速度快, 效率高, 同时具有非接触测量的优点。Sfs 方法是计算机视觉领域中的一种重要方法, 也是热点

研究方向之一。将 Sfs 方法应用在三坐标机上, 实现智能化测量, 可以提高测量的效率和精度。基于 Sfs 的三维重构方法是一种被动式 3D 测量方法, 即不需要投射受控的主动光源光到扫描对象上。基于 Sfs 的三维模型构造方法所需要的器材只是一个普通的数码相机, 通过从不同角度对物体进行拍摄, 通过图像处理提取轮廓信息, 再通过空间雕刻获得物体的体积模型, 进而重构出逼真的物体三维模型^[4]。

目前, 在国内, 对 Shape from Silhouette 这种方法的研究还比较少。天津大学将 Sfs 法与激光扫描法结合构建了 3D 测量系统。在国外, 奥地利维也纳科技大学的 Martin Kampel 和 Robert Sablatnig 等人进行了这方面的研究, 他们用 Sfs 方法构建了考古器皿的三维模型, 为考古学家对考古陶器的分类

* 收稿日期: 2008-10-22; 收到修改稿日期: 2009-01-08

E-mail: xls706@tom.com

作者简介: 谢路生(1977) 男, 福建人, 厦门大学硕士研究生, 从事计算机视觉、测控技术研究。

和重构提供帮助^[5]。

本文提出了一种将SfS技术应用在三坐标机上的新方法,即用摄像机获取图像,用坐标机作移动平台,构建了视觉测量硬件系统;并应用SfS技术,采用MATLAB和VC混合编程,完成了视觉测量软件系统。用此视觉测量系统对物体进行三维测量,通过采集图像、提取轮廓、应用SfS技术对物体三维重构等主要步骤,完整地恢复了物体的3D轮廓信息。软件系统的关键算法有图像轮廓提取、八叉树节点投影、判断空间立方体位置、判断空间立方体与被测物体的相交情况等。

1 SfS法重构三维物体图像原理

在物体的图像中,包括轮廓、亮度、纹理和色彩等多种信息,从图像中提取有用的特征信息来获得物体3D轮廓是3D测量的目的。目前有多种方法可以从物体的二维图像构建三维模型,这些方法的主要难点在于可靠的特征提取和准确的数据合成。

Shape from Silhouette(SfS)方法是一种被动式三维测量方法,摄像机在多个不同的视角获取被测物体的背影轮廓图像序列,通过图像处理提取轮廓信息,将不同角度的轮廓信息有效地综合起来,最终获得物体的三维轮廓信息^[6,7]。如图1所示。

在每幅输入图像中,从每个摄像机的光心出发,通过各轮廓点的视线在后面形成一个锥形的体积,物体轮廓与实物坐标系中的锥形体相对

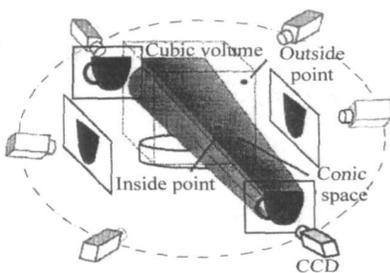


图1 Shape from Silhouette 测量原理图

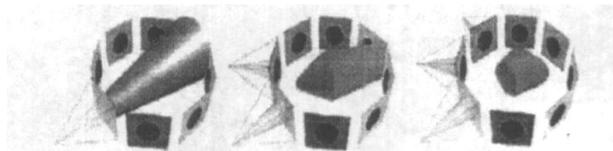


图2 空间雕刻原理

应^[8]。物体就包括在这个锥体内,而且锥体每一条母线刚好与物体相切,也就是这个锥体为物体的最小外接锥形,利用体交集的方法可以实现目标物体的三维重构。法国的Francis Schmitt提出了体积相交重构物体三维模型的方法^[9],如图2所示。物体由相交的空间区域组成,被测物体被轮廓束缚在这个空间中。各个角度的锥形体积相交就形成了物体

的三维体积模型。

定义物体的体空间为 V ,角度的最小束缚锥形物体为 V_i ,那么被测物体可以近似的表示为

$$V = \bigcap V_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

各个角度的锥形体积相交就形成了物体的三维体积模型。这就是体积生成的原理,又叫做空间雕刻(space carving)^[10,11]。

从上面的分析可以看到,随着圆锥数目的增加,也就是说随着测量角度数目的增加,生成的物体就越接近于真实物体。

这个体积合理的表示必须能降低复杂度和提高运算速度。一个行之有效的方法是八叉树表示。

八叉树又称为分层树结构,它将指定的三维空间区域分成8个卦限,在树上的每个非叶子节点处存储8个数据元素(体素)。

2 基于SfS的3D视觉测量实验系统

2.1 系统构成

整个测量系统由硬件和软件两大部分组成。硬件部分由摄像机和坐标机组成;软件部分主要由SfS算法组成,采用MATLAB和VC混合编程。图3是整个实验系统实物图。

运动机构选用BROWN & SHARPE公司的桥式测量机, X 、 Y 、 Z 方向运动范围分别为700mm、1000mm、700mm,重复定位精度大于 $0.1\mu\text{m}$,参照旋转台的半径规格,旋转扫描测量回转体的半径最大可达到350mm,最大被测高度范围为700mm。可看到扫描运动流程的重复定位精度较高,测量范围和测量精度完全满足测量的要求。

摄像机采用德国uEye公司的CMOS摄像机,输出复合视频信号经过图像采集卡A/D转换后进入计算机,图像采集整体最大分辨率为 1280×1024 像素,选取定焦距日本精工镜头 $f=12\text{mm}$ 。

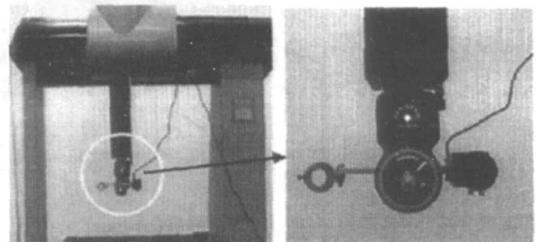


图3 实验系统实物图

2.2 摄像机参数标定

摄像机标定技术是利用物体的二维平面图像获取其三维信息过程中基本而关键的步骤。标定的目的就在于确定摄像机的参数。我们根据张正友的平

面模板标定方法^[14]对摄像机参数进行标定,如图 4 所示。

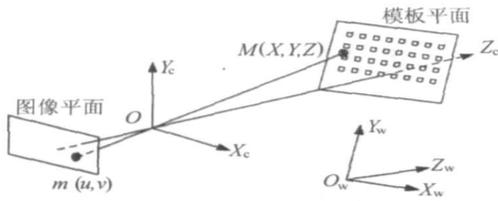


图 4 张正友平面标定方法原理图

根据张正友平面标定算法,先打印一张模板并贴在一个平面上,从不同角度拍摄若干张模板图像,然后检测出图像中的特征点,求出摄像机的参数,最后对结果优化求精。实验共拍摄了 18 幅图像,图像分辨率为 1280×1024 像素。

图 5 是实验中从其中一个角度的原图中提取出角点的效果图。

经过标定,得到 α 、 β 、 γ 、 u_0 和 v_0 等参数。其中, α 、 β 分别表示在 x 方向和 y 方向上像点的物理坐标到图像坐标的比例系数; γ 表示畸变系数; u_0 和 v_0 表示主光轴与图像平面交点的图像坐标。

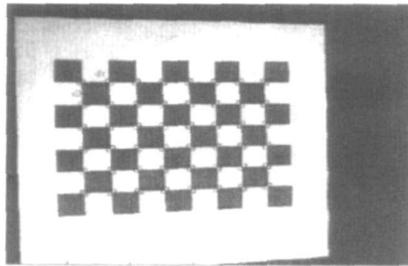


图 5 从原图中提取出角点

经标定得到的摄像机参数结果如下:

- $\alpha=2269.32257$ pixels
- $\beta=2269.32257$ pixels
- $u_0=639.50000$ pixels
- $v_0=511.50000$ pixels
- $\gamma=0$

2.3 软件系统实现

图像采集之后,使用软件对其进行处理,实现物体的三维重构。本文软件系统的关键算法有图像轮廓提取、八叉树节点投影、判断空间立方体与被测物体的相交情况等。

(1) 物体轮廓提取

物体轮廓提取的方法主要有阈值法和八邻域法。常用的阈值选取方法很多,有最大方差法、双峰法、 p 参数法等^[13]。

本文采用最大方差法计算分割阈值,因为以最大方差决定阈值不需要人为设定其他参数。然后根据计算得到的阈值分离图像区域,再使用膨胀、腐

蚀、填充等技术可提取得到比较理想的物体轮廓曲线。

(2) 空间立方体八叉树节点投影

首先根据物体的尺寸,定义一个初始立方体包围物体,再用八叉树法对其进行细分,然后将八叉树节点投影到摄像机像面上,八叉树顶点在像平面上的投影结果是节点对应立方体所有顶点的图像坐标,把节点的八个顶点投影到像面上^[6]。在一般情况下,投影看起来像一个多边形,如图 6 所示。

下面讲述节点的投影过程。对于世界坐标系中的一个已知点 $P(x, y, z)$,为摄像机建一个归一化图像平面,该平面平行于摄像机的物理成像平面,且到针孔的距离为单位长度。光轴与该平面的交点作为归一化图像平面坐标的原点,如图 7。

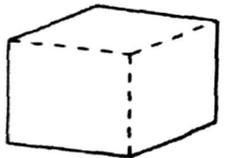


图 6 节点投影图

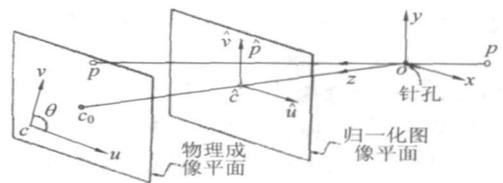


图 7 物理成像和归一化图像坐标

定义光轴穿过物理成像平面的主点为 $C_0(u_0, v_0)$ 。世界坐标系中的点 $P(x, y, z)$ 的坐标与投影到像机坐标中的点 $p(u, v)$ 的像素坐标之间的关系为

$$\begin{cases} u = \alpha \frac{x}{z} + u_0 \\ v = \beta \frac{y}{z} + v_0 \end{cases}$$

其中, α 、 β 、 u_0 和 v_0 是由文中 2.2 节标定得到的摄像机参数。

由此,便获得了节点的八个顶点的像面坐标,完成了节点的投影过程。

(3) 空间立方体与物体的相交算法

在立方体节点被投影到像面上,得到多边形之后,就可用此多边形与背影轮廓图的相交情况来判断空间立方体与被测物体的相交关系。如图 8 所示。

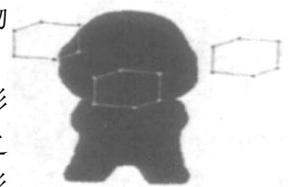


图 8 节点分别在物体外、内和边缘上的示意图

本文判断空间立方体与被测物体的相交算法采用下面途径构造物体的三维模型:首先,所有的图

像被转化为二值化图像, 所有被标志为黑色的节点, 也就是属于物体的, 被投影到第一幅输入图像中, 测试与物体轮廓的交集。根据交集测试的结果, 节点可能为黑(属于物体), 也可以为白(属于背景), 或者在部分属于物体部分属于背景的情况下标志为灰, 在下一层被划分为八个黑色子节点。当前层剩下的黑色节点被投影到下一幅图像中重复上述测试过程。在这一层中所有图像被处理过后, 进入下一层重复处理, 直到划分到满足测量分辨率级别的立方体。在最后一层处理后剩下的八叉树结构就是最终的物体三维模型^[6]。

判断空间立方体与物体关系的算法流程图如图 9 所示。

3 实验与结果

3.1 精度评估

为了获得基于 SfS 的 3D 测量的测量精度, 我们对标定使用的直径为 $30 \pm 0.001\text{mm}$ 的标准球进行测量, 将标准球放置在旋转台上, 使球体尽量位于旋转中心, 为了尽可能地获得比较准确的球体数据, 以 30° 为旋转间隔, 共采集了 12 幅不同旋转视角背影轮廓图, 获得 SfS 法的测量数据如图 8 所示(在 CATIA 软件中的显示效果图)。拟合坐标数据并求出球心坐标 O 和半径值 R 。

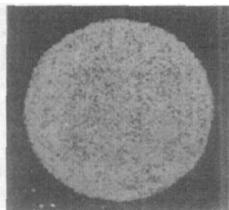


图 10 球点云数据

球心:

$$O(0.312, 0.267, -399.695)$$

半径: $R = 15.156\text{mm}$

计算标准球球表面测量数据与球心 O 的距离 d_i , 与反求半径 R 的平均差值

$$\Delta R = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i - R|}{n} = 0.289\text{mm}$$

将计算结果与标准值进行比较, 分析可知基于 SfS 的 3D 测量精度高于 0.4mm 。

3.2 实验实例一

本实验对陶瓷小人进行测量, 先采集图像, 然后用本文的软件系统对其提取轮廓, 应用 SfS 技

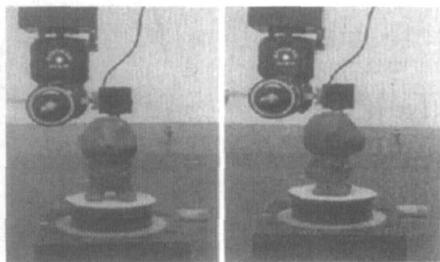


图 11 被测量的陶瓷小人实物图

术对陶瓷小人进行三维重构, 实验结果完整地恢复了陶瓷小人的 3D 轮廓信息。

3.2.1 陶瓷小人实物图

图 11 是陶瓷小人实物图, 实物图(a)和(b)的角度相差 90° 。

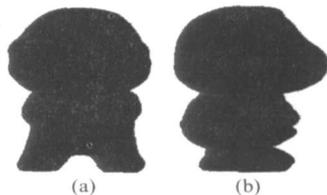


图 12 阈值分割后的图像

3.2.2 轮廓提取

根据采集的图像, 应用本文的软件系统对其进行处理, 首先进行陶瓷小人的轮廓提取。图 12 (a)和 (b)分别对应图 11 实物图(a)和 (b)的阈值分割后的图像。

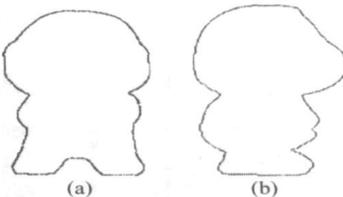


图 13 轮廓提取效果图

图 13 (a)和 (b)分别对应图 12 阈值分割后图像(a)和(b)的轮廓提取效果图。

3.2.3 三维重构陶瓷小人

利用 SfS 法对陶瓷小人进行测量实验, 将陶瓷小人放在旋转台上, 以 45° 为旋转间隔, 共获取 8 个角度位置的背影轮廓图像, 对所有角度图像进行阈值分割, 结果如图 14 所示。

被测量的陶瓷小人, 长约为 40mm , 宽约为 45mm , 高度约为 70mm , 如图 11 所示, 因此选定边长为 80mm 的初始立方体, 然后对其进行细分, 用 SfS 法对 8 幅背影轮廓图进行计算, 实验结果的立方体显示如图 15(a)示, 某一角度的点云数据(边缘立方体中心点数据)显示如图 15(b)所示。图 16 为被测量陶瓷小人几个典型角度的点云数据。

3.3 实验实例二

本实验对叶片进行测量,实验步骤与测量陶瓷小人相同。以 45° 为旋转间隔,共获取 8 个角度位置的叶片轮廓图像,对所有角度图像进行阈值分割、提取轮廓,然后用八叉树法细分,将空间立方体八叉树节点进行投影,最后用 SfS 法对叶片进行三维重构,得到叶片的 3D 轮

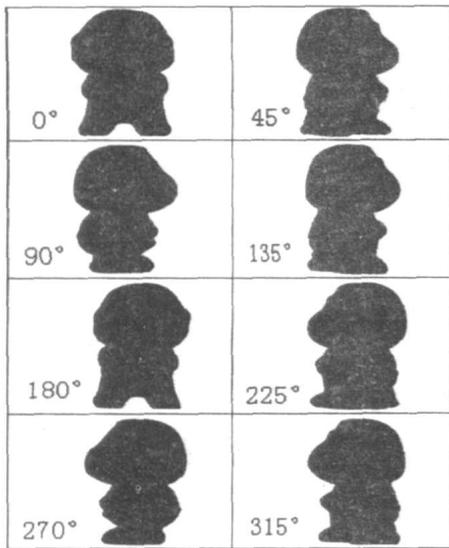


图 14 阈值分割后各角度位置的轮廓图像

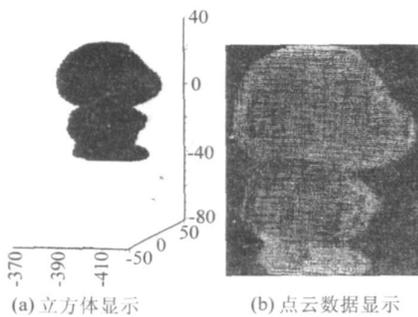


图 15 陶瓷小人三维重构数据

两者的优点,将这两种测量技术融合在一起。该视觉测量系统扩展了坐标机的测量功

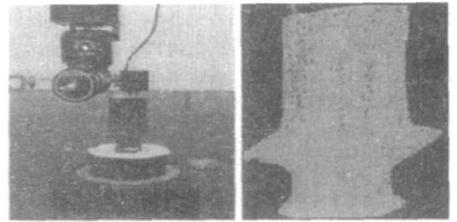


图 17 叶片三维重构数据

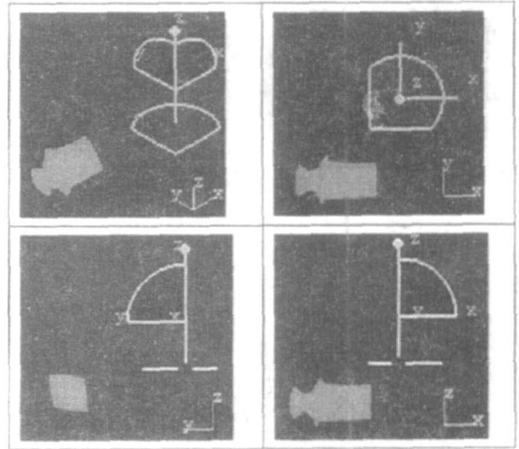


图 18 叶片几个典型角度的点云数据

能,扩大了其应用范围。由实验结果可见,用基于 SfS 的视觉测量系统重构物体三维模型的过程简单快捷,精度较高,可以完整地恢复物体的 3D 轮廓信息。是一种非常实用的方法。此结果可作为下一步进行路径规划、智能化测量等研究的基础。

参考文献:

- [1] 王磊. 基于旋转对称三角测量视觉传感器的高分辨率三维信息获取技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [2] Wolfgang N. Automatic reconstruction of 3D objects using a mobile camera[J]. Image and Vision Computing, 1999, 17(2): 125-134.
- [3] Richard S. Rapid octree construction from image sequences[J]. CVGIP: Image understanding 1993, 58 (1): 23-32.
- [4] 谢路生, 胡天林, 王磊, 等. 基于 shape from silhouette 的三维重构方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4) 增刊: 103-106.
- [5] Kam pel M, Sablatnig R. Rule based system for archaeological pottery classification[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(6): 740-747.
- [6] 何丽. 多视角背影轮廓 3D 测量方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [7] Schmitt F, Yemez Y. 3D color object reconstruction from 2D Image Sequences[C]. Image Processing, ICIP 99, 1999, 3: 65-69.
- [8] 沈军行, 孙守迁, 黄琦等. 基于 shape from silhouette 方法的虚拟物体构造[J]. 中国图像图形学报, 2002, 7(10): 1089-1093.
- [9] Hern C, Estelan A, Schmitt F. Multi-stereo 3D object reconstruction[C]. Proceedings of the First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission (3DPVT' 02), IEEE, 2002.
- [10] Kutulakos K N, Seitz S M. A theory of shape by space carving[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 38, (3): 199-218.
- [11] Yemez Y, Schmitt F. 3D reconstruction of real objects with high resolution shape and texture[J]. Image and Vision Computing, 2004, 22: 1137-1153.
- [12] Zhang Z Y. Camera calibration with one dimensional objects[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 7(26): 892-899.
- [13] 余成波. 数字图像处理及 MATLAB 实现[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.

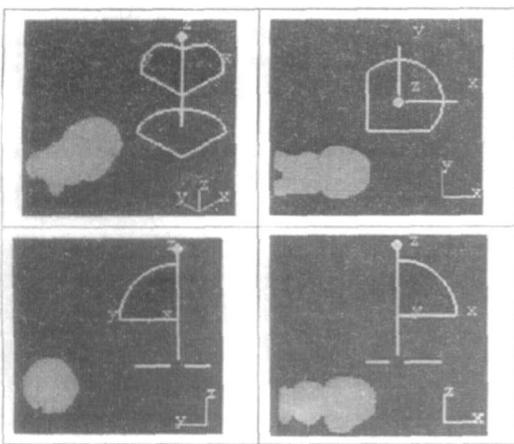


图 16 陶瓷小人几个典型角度的点云数据

廓图。图 17(a)是叶片的实物图和图 17(b)是叶片某一角度的三维重构实验结果图(在 CATIA 中的点云数据显示)。图 18 为叶片几个典型角度的点云数据。

4 结论

我们新构建的视觉测量系统结合 SfS 和坐标机