

脚型三维曲面测量技术

罗晓晖 居 琰 王 希 陈雍乐

(重庆大学光电工程学院, 重庆, 400044)

摘要: 提出了一种新的三维曲面测量方法, 利用激光片光对脚进行光切, 在脚的某一个截面上形成封闭光带, 用 3 个 CCD 摄像机对截面光带成像, 可一次获得脚的某一个截面的二维轮廓信息, 再沿光切面的垂直方向步进测量, 经 CCD 摄像机像面和光切平面之间的空间映射变换后可得到脚的整个三维曲面信息。

关键词: 脚型测量 光切法 三维重建

3D foot profile measurement through light-section method

Luo Xiaohui, Ju Yan, Wang Xi, Chen Yongle

(Optoelectronic Engineering Institute, Chongqing University, Chongqing, 400044)

Abstract: A new technique of light-section method is proposed to measure 3D profile. A closed light strip in a certain section of foot is formed by laser sheet illumination. Its image can be obtained by 3 CCD cameras, then the real world coordinate of the section of the foot can be worked out through transformation between the coordinate of the section plane and the camera coordinate. Finally, the coordinate of the 3D foot profile can be obtained through measurement along the direction vertical to the light section plane.

Key words: 3D foot profile measurement light-section method 3D reconstruction

引 言

光学的三维曲面测量, 由于其非接触、高精度、易于自动控制等优点, 日益受到人们的重视。现有的方法包括莫尔条法^[1]、傅里叶变换法^[2,3]、相位测量法^[4]、光学三角测量法^[5]、几何光学聚焦法等。就其本质而言, 都是通过分析受到三维物体轮廓曲面调制的空间光场, 从而获得物体三维轮廓曲面的信息。这些方法已广泛地应用于人工视觉、实物仿形、自动测量及加工等领域。

在光学三角测量法中, 需预先制作一个高度映射表, 把探测器接收到的物面上的光点位置信息转换成实际高度信息。通常的光学三角测量法只能逐点测量和逐点转换, 需对被测物进行逐点扫描。因此, 在要求测得被测物的 360° 三维轮廓数据时, 必须实现被测物与测量装置之间的相对旋转。而在测量某些物体如人脚时, 由于空间的限制, 难以实现这种相对旋转。我们提出的光切法, 是利用 3 台激光片光对脚进行光切, 在脚的某一个截面上形成封闭光带, 用 3 个 CCD 摄像机对截面光带成像, 可一次获得脚的某一个截面的二维轮廓信息, 再沿光切的垂直方向步进测量, 就可以得到脚的整个三维曲面信息。

* * *

作者简介: 吉选芒, 男, 1965 年 4 月出生。工学硕士, 副教授。现从事物理教学和光折变非线性光学的研究工作。

收稿日期: 2000-05-22

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www>

1 基本原理

光切法 LS(light-section method) 是近 10 多年来发展起来的一种非接触测量方法。它用激光光源,经柱面镜产生平面光照射在被测物上,在被测物表面上产生一条明亮的光带,通过 CCD 摄像机摄入经数字信号处理(DSP)可获得光带的数字图像,再经计算机处理即得物体在该光切面上的二维轮廓信息,若进一步沿第三维步进测量,就可得到物体的三维轮廓全貌,如图 1。

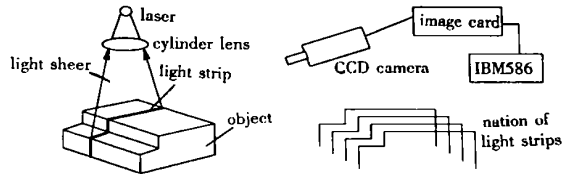


Fig. 1 Schematic diagram of light-section method

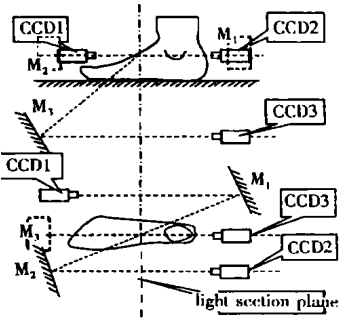


Fig. 2 The spatial relation between foot and 3 CCD cameras

在对脚的实际测量中,用一台 CCD 摄像机显然不能摄得光切面上的全部光带,因此,采用了 3 台 CCD 摄像机从不同角度进行摄像,3 台 CCD 摄像机与被测脚的相对位置如图 2 所示。这样设计可以减小测量仪器的体积,同时既能保证光程,使光带成像在 CCD 摄像机的视场之内,又能减小 CCD 摄像机的光轴与测量系统的步进扫描轴线之间的夹角,使 CCD 摄像机所摄得的光带投影像不会因角度太大而产生较大形变,这有利于后续的处理。

图 2 中 CCD1, CCD2 用于摄取脚上光带的左右轮廓图像, CCD3 用于摄取脚底光带的轮廓图像,3 台 CCD 摄像机

所摄图像各有部分信息重合,从而保证了摄取的光切面轮廓信息的完整性。在系统设计中,由于严格保证了 3 台 CCD 摄像机光轴交汇于光切面上的基准点,则 CCD 摄像机的光敏面与光切面有确定的空间投影关系,可以通过空间几何变换,将光敏面上的光带投影像转换成实际坐标。

如图 3 所示,光切面的坐标系为 XOY , CCD 摄像机光敏面的坐标系为 $X'O'Y'$, OO' 在 XOZ 平面上,且与 OZ 轴的夹角为 α , 设光切面上某点 P 在光切面坐标系中的坐标为 (x_w, y_w, z_w) , z_w 的坐标可通过光切扫描的移动距离确定。 P 点在摄像机光敏面的投影像点为 P_t , 在坐标系 $O'X'Y'Z'$ 平面 $X'O'Y'$ 上像点坐标为 (x_t, y_t) 。在

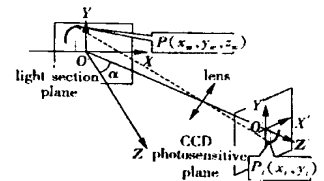


Fig. 3 Transformation between the coordinate of light-section plane and the camera coordinate

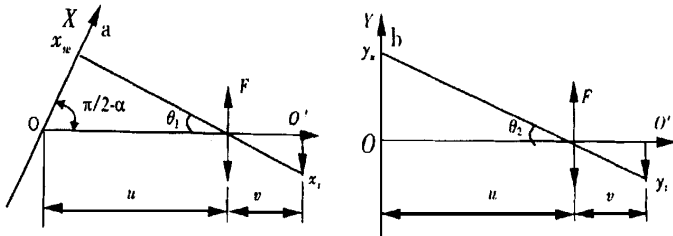


Fig. 4 a- the projection of point P on plane $XO'X'$ b- the projection of point P on plane $YO'Y'$

平面 XOZ 及 YOZ' 内,考察 P, P_t 点对应位置关系,从图 4a,由三角定理可得:

$$\frac{x_w}{\sin \theta_1} = \frac{u}{\sin(\pi - \pi/2 + \alpha - \theta_1)}, \quad x_w = \frac{u \sin \theta_1}{\sin(\pi/2 + \alpha - \theta_1)} \quad (1)$$

由图 4b 可得:

$$\frac{u}{\sin(\pi/2 - \theta_1)} = \frac{y_w}{\sin \theta_2}, \quad y_w = \frac{u \sin \theta_2}{\sin(\pi/2 - \theta_2)} = u \cdot \tan \theta_2 = \frac{u \cdot y_t}{v} \quad (2)$$

(1) 式和 (2) 式中, $\theta_1 = \arctan(x_t/v)$, $\theta_2 = \arctan(y_t/v)$, u 为物距, v 为像距。

由 (1) 式、(2) 式可知, 在得到 CCD 摄像机光敏面的图像坐标 x_t, y_t 后, 通过坐标变换, 即可得到脚型实际空间位置 x_w, y_w 的坐标。



Fig. 5 The original images of a closed light strip taken by 3 CCD cameras

2 光切面轮廓线提取

图 5 所示是 3 台 CCD 摄像机对某一光切面分别摄得的光带部分。依据光切法的

测量原理, 光切面上被测脚的轮廓提取就是要准确地找到无限薄光平面与被测脚表面的相贯线, 即所摄得的光带图像应为单像素宽。而实际测量中, 由于半导体激光器经柱面镜产生的光平面有一定的厚度, 再加上脚表面形状的不规则和投影角度的影响, 所以, 最终在光切面上形成的光带有一定的宽度并且带宽是不规则的。我们应从所摄得的光带中提取出一条单像素宽的线。理论上, 这条线上的每一点都应该是光带在每处走向的法线上的中点。

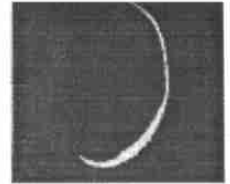


Fig. 6 The image of light strip through segmented and filtered

以 CCD2 为例, 先对光带图像进行预处理, 包括分割和去噪滤波, 图 6 为分割和平滑滤波后的结果。

提取线条中轴的过程称为中轴变换, 亦称作细化或骨架化, 有多种算法。各种算法的差异在于提取中心点的方向的不同。常见的算法, 通常是从 X 和 Y 两个方向进行中心点提取, 精确一点的, 再加上 45° 方向, 这一类算法比较简便易行, 但是提取的准确性不高。另一

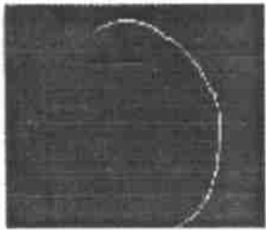


Fig. 7 The skeleton line of light strip

类算法的提取方向是线条每处走向的法线方向, 虽然提取的准确性高, 但是计算繁复, 实现困难, 实用性差。为此, 我们提出了一种简便实用, 而且准确性较高的提取算法。这种中心提取算法是基于脚的大致形状类似于柱状物, 其截面轮廓类似封闭椭圆形而提出的。算法如下: 先找到光带的两个端点, 从一个端点出发按两个不同方向跟踪光带边缘到另一个点, 提取出光带的内外边缘, 然后根据外边缘找出其大致曲率中心, 那么每一个外边缘点 (X_1, Y_1) 都可以找到一个内边缘点 (X_2, Y_2) , 使它们相对于曲率中心的角度最接近, 这样, 容易求出光带中心点的坐标 $(X_1/2 + X_2/2, Y_1/2 + Y_2/2)$ 。如图 7 所示, 为 CCD2 轮廓中心线提取的结果。

3 实验结果

本测量系统采用的是 MTV-188IEX 摄像机, 其光敏面的尺寸为 $7.95\text{mm} \times 6.45\text{mm}$, 像素数为 795×596 , 焦距为 15mm , 物距为 355mm , 像距为 15.662mm 。

实际测量中, 两光切面之间的平移步进量为 2mm , 图 3 中 CCD 摄像机光轴与光切面法线夹角 α 为 $\arctan(110/370)$ 。

前面已经分析过 CCD 摄像机光敏面与实际光切面的空间投影关系,得到的光带中心线必须经过坐标变换才可以获取光切面上脚的实际轮廓线的空间坐标。投影关系如前所述。虽然对整个照明系统和摄像系统都作了精确的定位,并且坐标的变换是在同一基准坐标系下进行的,但是,坐标变换后的轮廓线还需处理才可进行图像合成,因为系统不可避免地会引进一些误差,如摄像镜头的像差等。对误差进行理论上的校正较为困难,在实际测量中,我们修正误差的方法是让摄像机对标准物体进行摄像,然后根据标准物体的标准尺寸对摄像机所摄得的结果进行逐点修正,并建立一个面修正模板,每次摄像结果的误差根据这个模板进行查表修正。这种实际修正方法可以综合修正由系统引入的所有误差,实用性较好。

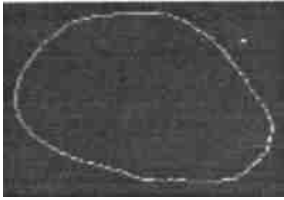


Fig. 8 The closed profile line of a foot section

轮廓线合成后,会出现个别截面轮廓线由于数据缺损(如脚趾部分和后跟部分)而不封闭,原因主要是由于光带盲区和图像处理过程所产生的像素点丢失,可采用插值进行弥补。如图 8 所示,为被测脚某一个截面的二维轮廓。对每个所测得断面的轮廓数据进行一定的平滑处理,然后进行三维重建,结果如图 9 所示。图 9 中脚踝以上在程序中人为截断,重建后数据能如实映射脚型轮廓。

4 结 论

我们提出了光切法测量脚型三维曲面,分析了整体测量原理和测量系统的空间投影变换,提出了一种简便准确的光带骨架提取方法。该测量方法实用于要求测得被测物的 360° 三维轮廓数据,而难以实现被测物与测量装置之间的相对旋转时。实验结果证明了该方法在三维面形测量中具有实用价值。

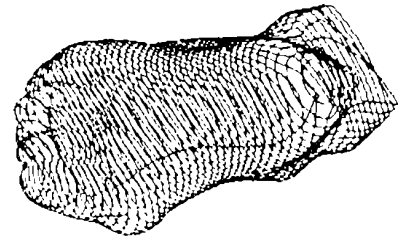


Fig. 9 3D reconstruction of a foot profile

参 考 文 献

- 1 Takasaki H. Appl Opt, 1970; 9(9): 1467~ 1472
- 2 Takeda M, Mutoh K. Appl Opt, 1983; 22(24): 3977~ 3982
- 3 Li J, Su X Y, Guo L R. Opt Engng, 1990; 29(12): 1439~ 1444
- 4 Srinivasan V, Lui H C, Halioua M. Appl Opt, 1984; 23(18): 3105~ 3108
- 5 Cheng X X, Su X Y, Guo L R. Appl Opt, 1991; 30(10): 1274

* * *

作者简介: 罗晓晖,男,1970 年出生。硕士,博士研究生。主要研究方向为计算机视觉、模式识别、图像测量、图像处理及相关应用研究。

收稿日期: 2000-05-22 收到修改稿日期: 2000-08-14