

文章编号 :1009-038X(2001)02-0186-05

# 一种新的三维复杂曲面测量算法分析

罗晓晖, 王希

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**提出了一种全新的非接触式三维复杂曲面测量方法,利用片激光源产生的光切面在被测物表面形成一个封闭光带,并使光带同时成像在 3 个互成固定角度的 CCD 摄像机中.经过 CCD 摄像机像面和光切平面之间的空间映射变换及图象处理后,可一次获得被测物的某一个截面的二维轮廓信息.随着测量系统以固定的间距沿垂直于光切面的方向步进测量,最终以被测物表面的大量离散点数据非常近似地获得了整个被测物的三维曲面信息.

**关键词:**三维复杂曲面测量;骨架提取;三维重建

中图分类号:TP 301.6

文献标识码:A

## Analysis on Measurement of a 3-D Complicated Curving Surface

LUO Xiao-hui, WANG Xi

(Optoelectronic Engineering College, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** A new measurement method of 3-D complicated curving surface was proposed. A closed light strip on measured object was formed by laser sheet illumination. Images were attained through three CCD cameras. 2-D figure information of any section was also attained after spatial mapping transformation between CCD image plane and light-section plane. Eventually, the 3-D curving surface information of measured object was obtained in the form of discrete data through stepping measurement along the direction vertical to light-section plane.

**Key words:** 3-D complicated curving plane measurement; skeleton extraction; 3-D reconstruction

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纹法<sup>[1]</sup>、傅立叶变换法<sup>[2,3]</sup>、相位测量法<sup>[4]</sup>、光学三角测量法<sup>[5]</sup>、几何光学聚焦法<sup>[6]</sup>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.本研究以人脚为被测物,提出一种

收稿日期 2000-09-15;修订日期 2000-12-28.

作者简介:罗晓晖(1970-),男,重庆人,工学博士.

万方数据

全新的非接触式三维复杂曲面测量方法。它是一种新的光切法，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。

### 1 基本原理

光切法(Light-Section Method 简称 LS)是近 10 年来发展起来的一种非接触测量方法。它以激光线为光源，经柱面镜产生平面光照射在被测物上，在被测物表面产生一条明亮的光带，再通过 CCD 摄

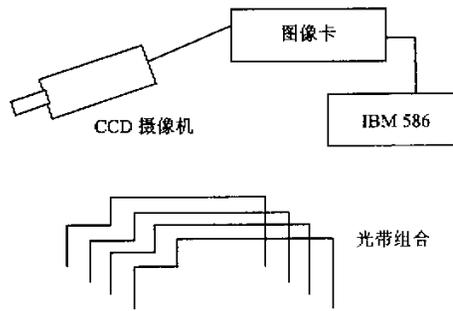
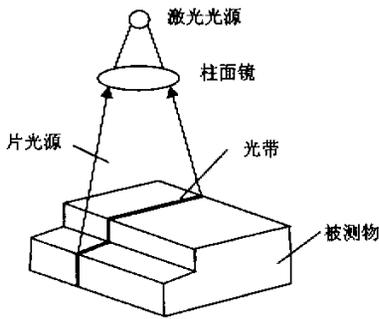


图 1 光切法示意图

Fig.1 Schematic diagram of light-section method

像机摄入并经数字信号处理(DSP),可获得光带得的数字图像,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,见图 1。

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 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。这样的设计可以减小测量仪器的体积,既能保证光程,使光带能成像在 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,这样有利于后续的处理。

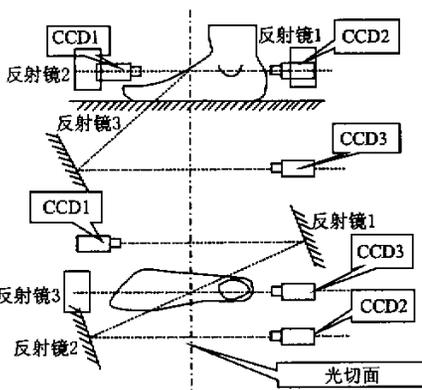


图 2 3 台 CCD 摄像机与被测脚之间的相对空间关系  
Fig.2 The spatial relation between foot and three CCD cameras

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 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。

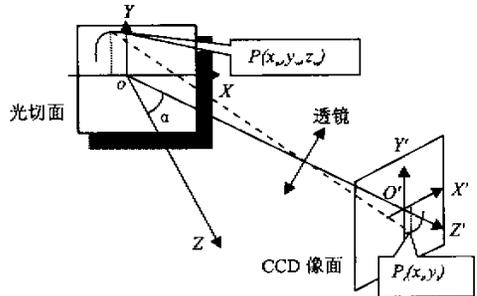


图 3 CCD 摄像机的光切面与光切面之间的空间投影关系  
Fig.3 Transformation between the coordinates of light section plane and the camera coordinate

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  $X'O'Y'$ ,  $O'O'$  在  $XOZ$  平面上,且与  $OZ$  轴的夹角为  $\alpha$ 。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  $P_i$ ,在坐标系  $O'X'Y'Z'$  平面  $X'O'$

$Y'$ 上像点坐标为 $(x_t, y_t)$ . 在平面  $XOZ$  及  $YOZ'$  内, 考察  $P, P_t$  点对应位置关系, 根据三角定理由图 4a, 4b 得:

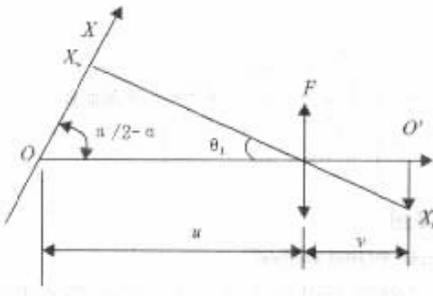
$$\frac{x_w}{\sin \theta_1} = \frac{u}{\sin \left[ \pi - \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) - \theta_1 \right]}$$

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

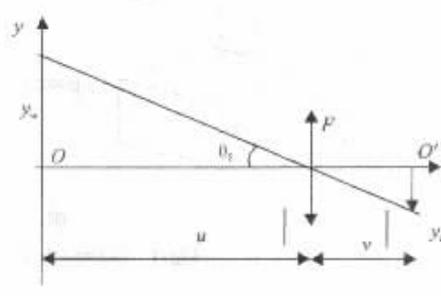
$$\frac{u}{\sin \left( \frac{\pi}{2} - \theta_2 \right)} = \frac{y_w}{\sin \theta_2}$$

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

其中  $\theta_1 = \arctan \frac{x_t}{v}, \theta_2 = \arctan \frac{y_t}{v}, u$  为物距,  $v$  为像距.



a. P 点在  $XOO'X'$  平面上的投影



b. P 点在  $YOO'Y'$  平面上的投影

图 4 P 点在  $XOO'X'$  和  $YOO'Y'$  平面上的投影

Fig.4 The projection of point P on plane  $XOO'X'$  &  $YOO'Y'$



图 5 对某一光切面三台 CCD 摄像机分别摄得的光带部分

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

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  $45^\circ$  方向, 这类算法比较简便易行, 但提取的准确性

由式(1)(2)可知, 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.

## 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. 而在实际测量中, 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, 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. 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.

不高. 在另一类算法中, 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, 作者提出了一种简便实用, 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

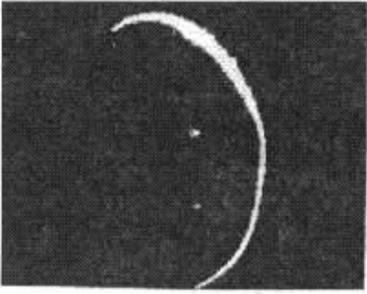


图 6 分割和滤波后的光带图像

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

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 $(\frac{X_1 + X_2}{2}, \frac{Y_1 + Y_2}{2})$ 。图 7 所示为 CCD2 轮廓中心线提取的结果。

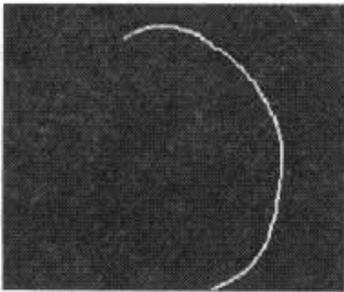


图 7 提取出的轮廓中心线

Fig.7 The skeleton line of light strip

### 3 实验结果

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  $795 \times 596$ ,焦距为  $15 \text{ mm}$ ,物距为  $355 \text{ mm}$ ,像距为  $15.662 \text{ mm}$ 。在实际测量中,两光切面之间的平移步进量为  $2 \text{ mm}$ 。图 3 中 CCD 摄像机光轴与光切面法线夹角  $\alpha$  为  $\arctan(110/370)$ 。

分析 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。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存在一些误差,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,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的结果进行逐点修正,并建立一个面修正模板,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。轮廓线合成后,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,主要是由于光带盲区和图像处理过程产生的像素点丢失,可采用插值进行弥补。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 中脚踝以上部分在程序中人为截断,重建后数据能如实映射脚型轮廓。

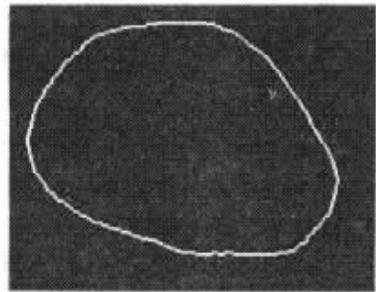


图 8 轮廓中心线的合成

Fig.8 The closed profile line of a foot section

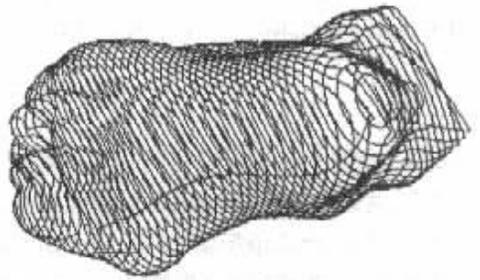


图 9 脚型的三维重建结果

Fig.9 3-D reconstruction of a foot profile

### 4 结论

作者研究了光切法测量脚型三维曲面法,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算法。该测量方法适用于难以实现被测物与测量装置之间相对旋转的情况时,被测物的三维轮廓数据的测量。实验结果证明,该方法对包括人的脚型在内的大量三维复杂曲面轮廓的测量具有推广价值。

(下转第 195 页)

(上接第 189 页)

## 参考文献：

- [ 1 ] TAKASAKI H. Moire topography[ J ]. **Appl Opt** , 1970 , 9( 9 ) : 1467 ~ 1472.
- [ 2 ] TAKEDA M. MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes[ J ]. **Appl Opt** , 1983 , 22( 24 ) : 3977 ~ 3982.
- [ 3 ] LI JIAN , SU XIAN-YU , GUO LU-RONG. Improved fourier transform profilometry of the automatic measurement of three-dimensional object shapes[ J ]. **Opt Eng** , 1990 , 29( 12 ) : 1439 ~ 1444.
- [ 4 ] SRINIVASAN V , LUI H C , HALIOUA M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse object[ J ]. **Appl Opt** , 1984 , 23( 18 ) : 3105 ~ 3108.
- [ 5 ] CHENG XIAO-XUE , SU XIAN-YU , GUO LU-RONG. Automated measurement method for 360° profilometry of 3-D diffuse object[ J ]. **Appl Opt** , 1991 , 30( 10 ) : 1274 ~ 1278.
- [ 6 ] 陈泽光. 采用准正旋投影光场的三维面形测量系统[ J ]. 仪器仪表学报 , 1989 , 10( 4 ) : 719 ~ 724.

(责任编辑:李春丽)