

三维脚型测量中的标定及轮廓图像处理技术

The technology of calibration and profile image processing in a three-dimensional foot measurement system

(中国科学院合肥物质科学研究院信息中心) 刘琼 李晓风 谭海波 吕波
LIU Qiong LI Xiao-feng TAN Hai-bo LV Bo

摘要: 本文主要描述了一个基于激光扫描的 3CCD 三维脚型测量系统,介绍了系统的测量原理以及系统的模块校准、光带轮廓线提取技术。

关键词: 脚型测量; 激光扫描; 图像预处理; 细化后去毛刺; 标定
中图分类号: TP391.1 **文献标识码:** A

Abstract: The paper introduces a 3D foot measuring system with 3-CCD based on laser scanning. The measuring principle, the technology of calibration of the system and the method of obtaining profile data of the light band is presented.

Key words: Foot measuring; Laser scanning; Pre-process; Deburring after thinning; Calibration

技术创新

引言

伴随着人们生活水平的提高,产生了个体消费者对量脚制鞋的需求。现有的足部测量方法多种多样,主要有机械法、投影法、光学法。这些方法虽然都能对足部进行测量,但也存在一些不足之处。例如机械式测量系统结构较为复杂,对系统控制、制造以及结构参数都有很高的要求,这类仪器成本较高,不便于广泛推广;光学法数据处理繁复,且不能完整地测出脚型轮廓参数。

本文论述了基于激光扫描的脚型测量系统的组成及原理,即利用激光平面光对脚进行光切,某一时刻在脚的某一截面上形成封闭光带,用三个 CCD 摄像机对截面光带成像,一次性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,便可得到脚的整个三维曲面信息。

1 基本测量原理

线光源产生的光平面照射被测物体,在被测物体表面产生一条明亮的光带。通过 CCD 摄像机获得光带的数字图像,并经计算机处理即得物体在该光切面上的二维轮廓信息,再沿光切的垂直方向步进测量,可以得到物体的三维轮廓全貌。

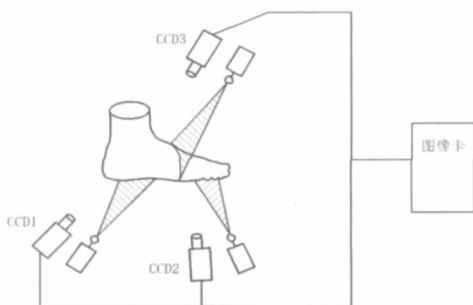


图 1-1 三维脚型测量仪模型

本测量仪以激光扫描为基础,利用三组 CCD 三组激光器,配合步进电机扫描设计。图中 CCD1, CCD3 用于摄取脚光带的左右轮廓图像, CCD2 用于摄取脚底光带的轮廓图像,从而保证了摄取的光切面轮廓信息的完整性。

2 模块校准

CCD 摄像机得到的光带图像怎样转化为真实的物理空间的图像是得到真实脚型数据的前提。解决这个问题的关键在于建立 CCD 像面坐标与空间坐标的映射关系,这个过程可以称为系统校准过程。

典型的校准方法分为结构参数法和模块校准法。结构参数校准需要知道系统结构参数的精确值,而这些结构参数值往往是通过测量估计得到的,由于结构参数估计值的精度对校准结果的影响极大,而实际测量中要精确测定这些参数值几乎是不可能的。一次校准非常麻烦,而且实际测量中测量系统由于搬动或其他原因容易导致系统参数的变化。而模块校准通过对一特定设计的模块进行一次或几次测量,然后根据已知模块的特征与 CCD 图像的对应关系,通过拟合曲面或查找表的方式,建立测量系统 CCD 像面坐标与空间坐标的映射关系,这种方法不关心系统的结构参数的变化环境,不需要镜头的焦距及光源与 CCD 的距离等系统参数,这样的校准程序较为简单。

2.1 校准原理

基于成像原理,对于在 CCD 量测范围内的空间中任意一点,皆会对对应成像到 CCD 像平面上的一个像素点,空间特征点坐标 $P_k(X_k, Y_k, Z_k) = P_0(X_0, Y_0, Z_0) \dots P_n(X_n, Y_n, Z_n)$ 对应到 CCD 摄像机像平面的像坐标为 $p_k(x_k, y_k) = p_0(x_0, y_0) \dots p_n(x_n, y_n)$, 可用多项式拟合的方式求得二维平面映射函数。

$$X_k = f_{p_k}(x_k, y_k) = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^{n-j} a_{ij} x_i y_j$$

$$Y_k = g_{p_k}(x_k, y_k) = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^{n-j} b_{ij} x_i y_j$$

其中 $p_k(x_k, y_k)$ 是空间中任意点 (x, y, z) 投影在 CCD 上的像点, $a,$

刘琼: 硕士研究生

b 为二维映射函数系数值,f,g 为拟合函数,n 为函数阶数;将特征点量测坐标值 $p_k(x_k, y_k)$ 与量测平面实际坐标 $P_k(X_k, Y_k)$ 带入上式的映射函数,求得该映射函数的校准系数 a,b. 参数求出后,量测时只须知道 CCD 所提取的激光光束像点的位置,就可以推算出其空间坐标。

2.2 校准方法

本文中设计了一个带有 28 个标准圆孔的平面孔型靶标,每个圆孔的圆心作为标定的参考点,其相互位置关系已知。圆孔型靶标的优点是孔心的图像坐标和孔心坐标可由孔的边缘准确测量,减少误差,便于提高系统扫描精度。

将该靶标放置于 CCD 摄像场中,由 CCD 摄取图像。通过提取 CCD 摄取图像中圆孔的坐标,找到空间二维坐标系与 CCD 像平面坐标系的对应关系。

由 CCD 摄取的标定靶标图像的圆孔,其形状可认为是一个椭圆,因此可以使用椭圆拟合来精确提取中心。标记检测函数在提取出椭圆中心后会按从左至右、从上至下的顺序进行排列,如图 2 所示。

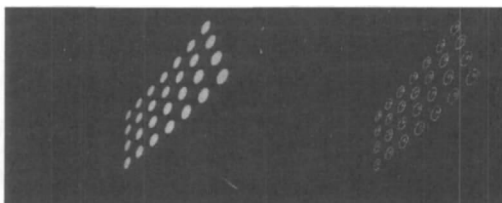


图 2-1 某个摄像头拍摄的标定靶图像和经椭圆拟合提取标定靶特征点即圆孔靶的圆心

由用户输入参考点的实际坐标,进行二维曲面拟合:

$$X = \sum_{m=0}^n \sum_{l=0}^m a_{l(m-l+1)} x^{m-l} y^l$$
$$Z = \sum_{m=0}^n \sum_{l=0}^m b_{l(m-l+1)} x^{m-l} y^l$$

其中 n 表示曲面拟合阶数,m=0...n。

2.3 方程组求解

对于上式,当 n=3 时,可化为:

$$X = a_{30}x^3 + a_{21}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{03}y^3 + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 + a_{10}x + a_{01}y + c1$$
$$Z = b_{30}x^3 + b_{21}x^2y + b_{12}xy^2 + b_{03}y^3 + b_{20}x^2 + b_{11}xy + b_{02}y^2 + b_{10}x + b_{01}y + c2$$

每个特征点的像面坐标表示为 (x_i, y_i) , 空间坐标表示为 (X_i, Z_i) , 代入上式可得:

$$\begin{bmatrix} x_1^3 & x_1^2y_1 & x_1y_1^2 & y_1^3 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^3 & x_2^2y_2 & x_2y_2^2 & y_2^3 & x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^3 & x_3^2y_3 & x_3y_3^2 & y_3^3 & x_3^2 & x_3y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{28}^3 & x_{28}^2y_{28} & x_{28}y_{28}^2 & y_{28}^3 & x_{28}^2 & x_{28}y_{28} & y_{28}^2 & x_{28} & y_{28} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{30} \\ a_{21} \\ a_{12} \\ a_{03} \\ a_{20} \\ a_{11} \\ a_{02} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_{28} \end{bmatrix}$$

式中只有 10 个变量,而却有 28 个方程,可由求解线性最小二乘问题的豪斯荷尔德变化法。

2.4 拟合阶数选择

选择合适的曲面阶数进行曲面拟合是建立映射关系的最重要一步。不同的曲面拟合阶数产生的校准误差不同。由于我们使用的模块有 N 个特征点,根据 n 阶多项式曲面有 $(n+1)(n+2)/2$ 个待确定系数。于是根据 $(n+1)(n+2)/2 \leq N$, 得到 $n_{max}=6$ 。

通过对多套校准数据的实验结果进行统计,当 N=6 时方差及最大绝对误差最小,因此选择 N=6。

3 光切面轮廓线提取

原始摄取的光切图像包括光带图像和背景,而我们感兴趣的则是准确的一像素点宽的光切面轮廓线,因此在进行数据处理前需要分离出感兴趣的光带图像。在测量过程中,因为不能保证在无外光干扰条件下进行,测量仪内光源来源会掺杂一些外部光,而被测物表面的反射光强又随表面特性(表面粗糙度、光洁度、法线方向)的不同有很大差异,使得得到的光带图像带有大量噪声。要想得到感兴趣的光带图像,要经过以下几步处理:



本测量系统摄像头采集到的图像是 24 位 RGB 图像,因此首先需要将得到的图像灰度化得到 8 位灰度图。再对灰度图进行二值化、腐蚀和膨胀处理,使得图像明亮的细节尺寸变小,再利用滤波对图像噪声进一步的去除。

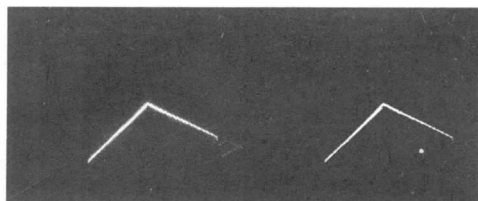


图 3-1 对某时刻的光切图采集并进行预处理的对比图

这时得到的图像是具有一定宽度的光带图。我们需要提取光带重心线作为物体表面的轮廓线。本文采取了细化算法用来提取重心线。

3.1 细化算法

细化算法是一种特殊的多次迭代收缩算法,在每次迭代中,图像 X 应该有规律地缩小,并且 X 的连通性质保持不变。判断一个像素点在细化过程中是否可以删除,应该和该点周围 8 邻域内的其他 8 个点综合来判断。

在上图中,每幅小图的中心点是我们要判断的是否满足条件的像素点:图一图二不能删,因为中心点是内部点,需要构建骨架;图三可以删,这样的点不是构建骨架的必要元素;图四不能删,删掉后相连的部分就断开了;图五可以删,这样的点不是构建骨架的必要元素;图六不能删,因为是端点。

综上所述,内部点,孤立点,直线端点不能删除;如果是边界点,去掉改点后,连通分量不增加,则该点可以删除。通过数学逻辑计算,设置一个 5*5 的邻域 S 模板,模板中各个位置上的取值取决于模板所对应图像中不同像素位置,如果 S 模板某一个位置上所对应的像素值为白,则模板上该位置的值为 1,否则为 0。

| | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| s[0][0] | s[0][1] | s[0][2] | s[0][3] | s[0][4] |
| s[1][0] | s[1][1] | s[1][2] | s[1][3] | s[1][4] |
| s[2][0] | s[2][1] | s[2][2] | s[2][3] | s[2][4] |
| s[3][0] | s[3][1] | s[3][2] | s[3][3] | s[3][4] |
| s[4][0] | s[4][1] | s[4][2] | s[4][3] | s[4][4] |

$N(s[2][2])$ 表示以 $s[2][2]$ 为中心的 $3*3$ 邻域内目标像素(即白点)的个数。 $T(s[2][2])$ 表示序列 $s[1][2]s[1][1]s[2][1]s[3][1]s[3][2]s[3][3]s[2][3]s[1][3]s[1][2]$: 中 $1 \rightarrow 0$ 的变化次数。同理可得 $T(s[1][2])$, $T(s[2][1])$ 。当像素点同时满足 4 个条件时,这个点就可以删除。这

技术创新

