

# 基于视觉的机器人轨迹误差测量技术

齐 越<sup>1</sup>, 刘伟军<sup>2</sup>, 董再励<sup>2</sup>, 于光平<sup>1</sup>

(1. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110023; 2. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

**摘 要:** 提出了一种基于视觉的机器人轨迹精度测量系统, 该系统以计算机视觉为基础, 结合激光测量等技术, 可实时测量机器人的运动轨迹误差. 完成了高精度图像快速采集与处理、系统标定、三维计算及计算结果可视化等关键技术研究及系统研制工作, 并在机器人上进行了实验, 大量的实验表明, 该系统的测量精度和速度均可满足机器人的轨迹测量的需要.

**关 键 词:** 轨迹误差; 计算机视觉; 摄像机标定

中图分类号: TP 242. 62 文献标识码: A

机器人性能的评价有两个方面, 一是位姿性能, 一是轨迹性能. 位姿性能好坏反应了机器人运动过程中的实际位置姿态和给定的期望位置姿态的偏差大小及位姿的重复偏差量, 而轨迹性能则体现了实际运动轨迹与预定的轨迹之间的偏差. 两者对一个实际的机器人来讲均至关重要, 本文主要讨论机器人的轨迹误差的测量. 轨迹误差是动态的, 它随着机器人的运动状态(比如速度的大小)而变化, 测量比较困难. 由于控制的要求, 机器人的轨迹可能是各种各样, 但最简单的运动是沿直线运动. 同时给出了一种基于激光三角原理的非接触测量方法, 以测量机器人在与其轨迹直线垂直的平面上的偏离误差.

## 1 系统的构成

图 1 为整个测量系统构成图. 将一扇面激光投射到测量量规上(见图 2), 该平面与摄像机定义在同一个参考坐标系下, 且它们之间的相对位置关系不变. 激光面为量规所截, 在量规的表面形成一亮条, 该亮条被量规参考棱分为两段, 该图像为摄像机所摄取, 经图像处理可求得两段激光连接点的图像坐标, 再根据已标定好的坐标关系, 可求得该点的三维坐标. 也既是激光光平面截参考棱所得的点相对于参考坐标系的三维坐标. 当机器人手臂带动摄像机沿着参考棱作直线运动时, 可得到一系列的三维坐标数据, 根据这些数据即可描述出机器人手臂末端的运动轨迹. 当使机械手臂带

动摄像机沿着参考棱作往复直线运动, 可将测得的多组数据用于轨迹重复性检测和误差分析.

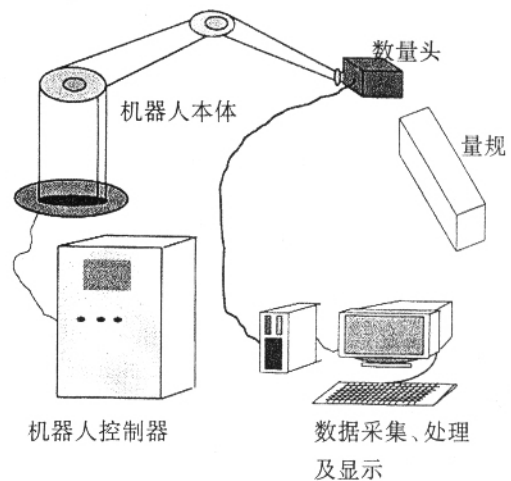


图 1 检测系统的构成

本系统由机器人本体、机器人控制器、测量头、测量量规、数据采集及处理系统构成. 测量头内装有线激光光源、CCD 摄像机及镜头, 它们之间的相对位置关系是固定的. 测量头安装在机械手的末端, 测量时, 它将随机械手一起运动. 在整个测量过程中, 要保证测量头的姿态不变. 数据采集及处理系统包括计算机、图像采集卡及相关软件等, 数据采集及处理系统主要完成图像的采集及处理、系统标定及三维坐标计算等工作. 测量量规是一块长方体, 测量是以其一条棱为参考, 编程机器人控制器使其沿长方体参考棱的直线方向运动. 测量时, 固定测量量规, 使测量头正对着参考棱. 适当调整测量头到参考棱的距离, 使棱上

与测量头正对的点处于摄像机适当的视场之内。然后,在参考棱两端适当的位置处取两点进行示教,使这两点在摄像机中的成像基本上处于相同的位置。

## 2 图像采集及处理

如图2所示,激光光源  $O$  发出的激光以扇面向外投射而形成光平面  $\pi$ 。光平面与量规相切,交参考棱于点  $A$ ,交参考棱两侧的两个量规侧面于线  $AB, AC$ 。这两个亮条为摄像机所摄取并成像,所成的图像通过图像采集卡传入计算机,并由软件显示于监视器,如图3所示。

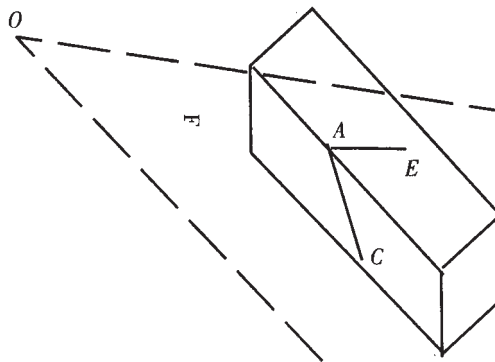


图2 光平面

理论上要求激光亮条  $AB, AC$  极窄,但实际上它们都有一定的宽度。又由于量规表面的反射、测量时周围环境光干扰等因素的影响,实际所成的像如图3所示。它是一幅多灰度级图像,而且图像不是一个像素宽。为了便于处理,必须对其进行二值化、细化,使其成为单像素宽,这样才能进行点的搜索。处理时,首先对图像进行滤波,以削弱环境光和噪声的影响。进行二值化时,阈值的选取非常关键,阈值过大,则会丢失亮条上的部分信息,甚至可能使二值化后的图像断裂,造成以后处理的困难。阈值过小,则噪声干扰信息就会加进来,降低处理精度。本文采用了一种称为判断分析的阈值算法,该方法通过统计计算确定的阈值可使前景和背景之间的方差最大,大大提高了阈值选择的精度,二值化后的图像如上图4所示。

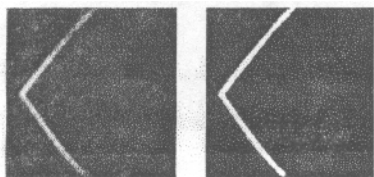


图3 原始图像 图4 二值化图像

对图像处理的最终目的是从一幅原始的图像中提取量规上投射的激光亮条  $AB, AC$  的交点  $A$  在图像上的坐标  $(u, v)$ ,以便根据摄像机的标定数据计算出  $A$  点的三维坐标  $(x, y, z)$ ,这样就需要对得到的二值图像进行细化。细化算法是复杂的迭代过程,计算较为费时。许多算法对图像扫描一次仅能细化去两个像素宽度,因而需要对图像进行多次扫描、迭代计算才能得到单像素宽的图像。本文采用一种并行细化算法<sup>[2]</sup>,扫描迭代次数较少,计算速度快。细化后的图像如图5所示。

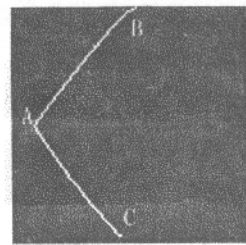


图5 细化图像

因为点  $A$  就是曲线  $BAC$  的拐点,而此时曲线又是单像素宽,可直接从曲线上搜索出  $A$  点的图像坐标  $(u, v)$ 。但这样得到的  $(u, v)$  值较为粗略,因为  $A$  点是两亮条的交汇转折之点,它附近的细化误差较大。本文是利用这个粗略的坐标作为分界点把曲线  $BAC$  分为  $AB, AC$  两段,分别搜索  $AB, AC$  上的所有点,并去处两端边缘附近之点以减小细化在边缘处的误差影响。然后以这些点用最小二乘法分别拟合出两条直线,再求出这两条直线的交点即是  $A$  点的坐标。

## 3 系统标定及三维坐标计算

### 3.1 摄像机标定

视觉系统的标定是建立某一参考坐标系下的可观测对象与视觉系统之间的相互关系。以典型摄像机针孔模型为例,空间某参考坐标系  $F$  中点  $P(X, Y, Z)$  与对应摄像机成像坐标系  $F'$  的图像点  $P'(u_i, v_i)$  间坐标关系为  $P' = MP$ ,其中  $M$  为代表两坐标系间关系的投影矩阵,它是一个  $3 \times 4$  矩阵。上式的展开式为式(1),  $t_i$  为点  $P$  在摄像机坐标系下的  $Z$  坐标,和摄像机线性针孔模型有关。

$$t_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据式(1), 给定足够的空间点  $P_i$  和其所对应的图像点  $P'_i$  就可以唯一确定其投影矩阵  $M$ . 在本文中, 标定时采用一个三维移动平台, 在平台上固定一个标定靶面, 靶面上共有五个位置关系已知的目标点(如图 6 所示), 其中四个大的目标点用于摄像机标定, 中间小的目标点用于光平面标定. 当靶面移动到某一位置时, 由人机交互方法得到 4 个大目标点在摄像机图像中的图像坐标  $u, v$ , 这 4 个目标点的三维空间坐标由三维平台读出, 这样反复多次可得到多个目标点的图像坐标及其对应的空间坐标, 然后用上述方法就可计算出摄像机所对应的投影矩阵  $M = \{m_{ij}\}$ .

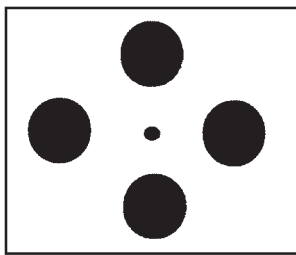


图 6 标定靶面

### 3.2 光平面标定

光平面的标定就是利用位于光平面上的一些空间已知点的坐标来求取光平面的平面方程. 在本文中, 光平面标定的具体实现过程如下: 打开激光光源, 利用三维移动平台调整标定靶面, 使激光光条通过图 6 标定靶面上中间的小点(为减小误差, 应使小圆半径尽可能小), 此时小圆圆心正好位于光平面上, 读取该圆心就可得到光平面上一个空间点的坐标. 重复以上步骤, 反复调整三维移动平台并使激光光条通过标定靶面上中间的小点, 可得到光平面上不同点的空间坐标, 然后由这些点用最小二乘法拟合出光平面的方程

$$D: AX_i + BY_i + CZ_i = 1$$

式中  $X_i, Y_i, Z_i$  为上述得到的光平面上空间已知点的三维坐标,  $A, B, C$  为通过标定求得的平面方程的系数. 值得注意的是: 在摄像机和光平面的标定过程中, 要保证所读取点的三维坐标都是相对于同一个固定坐标系的, 并将这一坐标系定义为测头坐标系.

### 3.3 三维数据的计算

通过上述方法标定好摄像机模型和光平面后, 就可利用其来计算空间点的三维坐标数据. 如图 7 所示, 设  $O$  为摄像机的光心,  $S$  为激光光源, 当用激光照射被测物体时可在物体上形成一条亮

的光条, 如果设光条上一点  $P(X_i, Y_i, Z_i)$  在图像上的投影为  $P'(u_i, v_i)$ , 则  $P(X_i, Y_i, Z_i)$  点必为通过光心  $O$  和投影点  $P'(u_i, v_i)$  的直线与光平面  $D$  的交点.

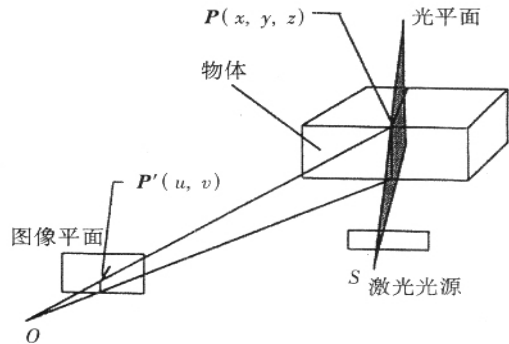


图 7 激光条成像示意图

式(1)包含三个方程

$$t_i u_i = m_{11} X_i + m_{12} Y_i + m_{13} Z_i + m_{14} \quad (3)$$

$$t_i v_i = m_{21} X_i + m_{22} Y_i + m_{23} Z_i + m_{24} \quad (4)$$

$$t_i = m_{31} X_i + m_{32} Y_i + m_{33} Z_i + m_{34} \quad (5)$$

将式(5)分别代入式(3)和式(4), 消去变量  $t_i$  可得

$$X_i m_{11} + Y_i m_{12} + Z_i m_{13} + m_{14} - u_i X_i m_{31} - \quad (6)$$

$$u_i Y_i m_{32} - u_i Z_i m_{33} = u_i m_{34}$$

$$X_i m_{21} + Y_i m_{22} + Z_i m_{23} + m_{24} - v_i X_i m_{31} - \quad (7)$$

$$v_i Y_i m_{32} - v_i Z_i m_{33} = v_i m_{34}$$

式中  $\{m_{ij}\}$  为摄像机的投影矩阵,  $(X_i, Y_i, Z_i)$  为  $P$  点的三维坐标,  $(u_i, v_i)$  为  $P$  点在图像上的投影. 若由图像处理得到图像坐标  $(u_i, v_i)$ , 则通过将方程(2)(6)(7)联立并求解, 既可得到点  $P$  的三维坐标  $(X_i, Y_i, Z_i)$ .

## 4 实验结果

本套装置采用加拿大 Matrox 图像采集板, 日本 Computa 黑白摄像机,  $650 \times 10^{-10}$  激光光源, 在沈阳自动化研究所新松公司自行研制的机器人 K10 上进行了试验.

图 8 和图 9 分别表示机器人手臂以  $11 \text{ mm/s}$  的速度运动, 采样间隔为  $200 \text{ ms}$  的条件下, 所得的  $x, z$  坐标变化趋势图, 横坐标为采样点序号. 实验精度可达  $0.15 \text{ mm}$ .

在实验中由几个示教点很难保证机械手所走的理论直线和量规参考棱平行. 实际上严格要求它们平行也是没有必要的. 当它们平行时,  $x, z$  坐标理论上将不随采样点的变化而变化, 因而图 8

所示的理论线将平行于坐标横轴。当机械手所走的理论直线和量规参考棱不平行时,参考点 A 与摄像机坐标系的位置关系随采样点的变化而变化,从而  $x, z$  坐标也变化,如图 8 中的理论线所示,它不与坐标横轴平行。图 8 所示的实测线是根据实际测得的数据所绘。将图中的实测线和理论线进行比较,即可看出实测线的偏差变化趋势,也即是机器人的运动轨迹在  $x$  方向上的误差。图 8 所示的回归线是由实测数据所拟合的线性回归线

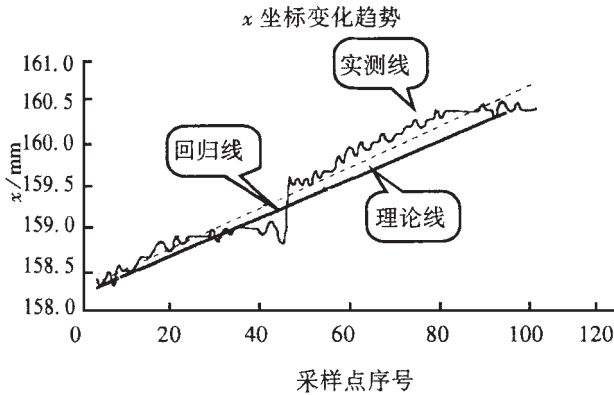


图 8 实例结果

由图 9 可以看出,机器人的轨迹在  $z$  轴方向上,实测线相对与理论线偏差较小,变化较缓(图中线性回归线与理论线几乎重合,因而没有画理论线)。由图 8、图 9 还可知,在采样点 43 点附近曲线变化较为剧烈,这是由于为了保证较长距离的直线运动,机器人的机械手在运动了一定的距离后,其关节要改变姿态(测量头的姿态不变)

以保证机械手继续沿直线运动。在关节姿态转换时,出现了轻微的振动。

## 5 结论

机器人运动轨迹性能检测在机器人的性能评定中占有重要地位。本文给出了一种测量机器人末端运动轨迹的测量系统,该系统以非接触测量为基础,综合利用计算机视觉,图像处理,激光测量等技术,完成了机器人运动轨迹性能检测。大量的试验数据表明,该系统具有测量速度快,实时性强,精度较高等特点,满足了机器人的一般测试要求。

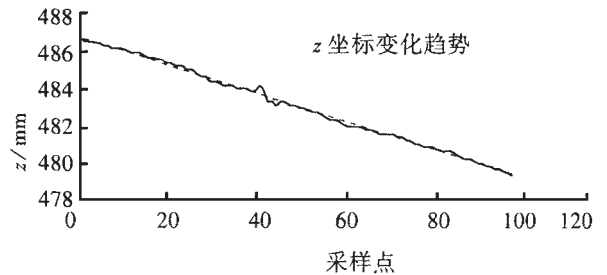


图 9 坐标变化趋势

参考文献:

- [1] 王煦法, 庄镇泉, 王东生. C 语言图像处理程序设计[M]. 北京: 中国科技大学出版社, 1994.
- [2] 吕岳, 施鹏飞. 一种实用并行细化算法及其实现[J]. 计算机工程与设计, 2000, 21(4): 53-55.
- [3] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

## Research on measurement technique of robot track error based on computer vision

QI Yue, LIU Wei-jun, DONG Zai-li, YU Guang-ping

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

**Abstract:** A measuring system on robot track error has been demonstrated in this paper. Based on computer vision and utilizing laser measuring technologies, this system can realize on line the track error measurement of a robot. The key technologies such as rapid image collecting and processing, three dimension calculation and result data analysis had been developed and applied. Many experiments had been conducted on robots, showing that the measurement precision and speed of this system can meet the need of the track measurement.

**Key words:** track error; computer vision; camera calibration