

# 基于双目视觉原理的混联机器人 初始点坐标研究

罗继曼,魏泽明,刘思远,都 闯

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 获取混联机器人加工初始点的三维坐标,并将坐标应用于机器人的自动对刀过程,提高对刀效率及加工精度.方法 基于双目视觉原理进行了理论建模和实验分析,建立双目视觉系统的数学模型,推导出由图像像素坐标到三维坐标的坐标转换关系,利用 MATLAB 视觉工具箱进行摄像机的标定,并提取出被加工件上目标点的像素坐标,通过点的三维重建获得靶位目标点的三维坐标.结果 经仿真与实验,精确获取了加工初始点的三维坐标,相对误差在3%以内.结论 该方法应用于雕刻机器人自动对刀系统中,能降低人工对刀危险系数,提高了对刀效率和对刀精度.

**关键词** 双目视觉原理;混联机器人;三维坐标;自动对刀

中图分类号 TP391

文献标志码 A

## Acquisition and Application of the Machining Initial Point Coordinate of Hybrid Robot Based on Binocular Vision Principle

LUO Jiman, WEI Zeming, LIU Siyuan, DU Chuang

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to improve tool efficiency and processing accuracy the three-dimensional coordinates of the initial processing were obtained and applied to the robot's automatic tooling process. The mathematical model of the binocular vision system was established based on the binocular vision principle and experimental data, and the coordinate transformation relationship between the image pixel coordinates and the three-dimensional coordinates was deduced. The camera calibration was carried out using the MATLAB visual toolbox and the pixel coordinates of the target points on the workpiece were extracted. Three-dimensional coordinates of the target point were obtained by the three-dimensional reconstruction. The three-dimensional coordinates of the machining initial point is obtained by simulation and experiment, and the relative error is less than 3%. The simulation method can be applied to the automatic tooling system of the engraving robot, which can reduce the risk of manual knife and improve the working efficiency and machining precision.

收稿日期:2017-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51575365);辽宁省自然科学基金项目(20102185)

作者简介:罗继曼(1966—),女,教授,主要从事机器人设计和制造技术研究.

**Key words:** binocular vision principle; hybrid robot; three-dimensional coordinates; automatic tooling

人类通过视觉获取 80% 的外界信息,而双目是获取视觉信息过程中的核心器官<sup>[1]</sup>. 因此,人类希望机器人也拥有类似视觉的系统,帮助机器人主动认知环境,以期实现各种非接触式的功能. 所谓计算机视觉是利用各种成像系统代替人类的视觉器官作为输入敏感手段,由计算机代替大脑完成处理和解释<sup>[2]</sup>. 计算机视觉技术的诞生和应用显著地提高了生产自动化水平,改善了人类的生产生活现状<sup>[3]</sup>. 目前,雕刻领域<sup>[4]</sup>应用并联雕刻机器人<sup>[5-7]</sup>以及混联机器人进行各种产品的高效加工. 具有结构优势的混联机器人在高刚度、高强度、高速大范围等加工场合广泛应用. 由于雕刻加工的初始点是根据被加工件的特点而定,需要有加工初始点对刀过程. 目前该阶段多为人工操作,导致工作效率低,定位不精准,且危险性较大. 而且在对同一零件重新装卡进行二次精加工时,手动对刀产生误差也会导致加工质量下降. 通过双目视觉原理构建非接触式对刀平台,即通过双目摄像机获取加工初始点的三维空间位置关系,实现混联机器人刀具的自动定位,可提高工作效率及对刀精度. 笔者采用双目视觉原理<sup>[8-9]</sup>,建立了视觉系统坐标转换模型,通过摄像机对目标点标定,重建了被加工件上初始点的三维坐标. 将该三维坐标应用于机器人控制系统中,经过相应运算,可得到机器人刀具从当前点运动到被加工件的初始点所需运动的路径,进而实现自动对刀过程.

1 双目视觉系统模型的建立

1.1 各参考坐标系及其转换关系

目标图像的采集过程就是将客观场景进行投影转化,此转化过程可以通过成像坐标系之间的相互转换来实现. 这些坐标系主要包括图像像素坐标系 ( $O_0 - UV$ ); 图像物理

坐标系 ( $O - XY$ ), ( $u_0, v_0$ ) 为原点  $O$  在图像像素坐标系中的坐标; 摄像机坐标系 ( $O_c - X_c Y_c Z_c$ ) 及世界坐标系 ( $O_w - X_w Y_w Z_w$ )<sup>[10-11]</sup>.  $P$  点为目标点,各坐标系关系如图 1 所示.

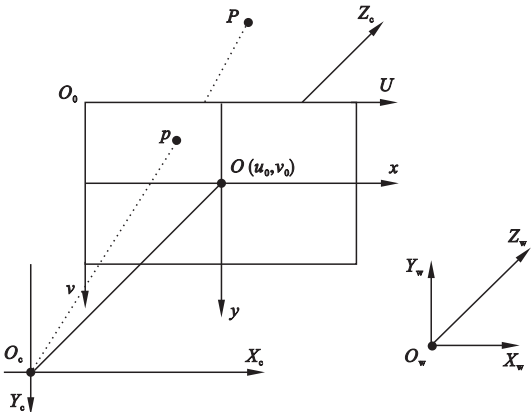


图 1 各坐标系位置关系图

Fig. 1 The coordinate system position relationship

图 1 中图像像素坐标系与物理坐标系的转换关系为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $u, v$  为目标点在图像像素坐标系中的横纵坐标;  $dx, dy$  为尺度因子;  $x, y$  为目标点在图像物理坐标中的横纵坐标.

图像物理坐标系与摄像机坐标系相应坐标转换关系为

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $X_c, Y_c, Z_c$  为目标点在摄像机坐标系中的坐标;  $f$  为摄像机焦距.

摄像机坐标系与世界坐标系相应坐标转换关系为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中: $X_w、Y_w、Z_w$  为目标点在世界坐标系中的坐标; $R$  为旋转矩阵; $t$  为平移向量。

1.2 单摄像机模型

建立了4种空间坐标系后,为了建立世界坐标系中目标物体的三维坐标点到二维图像像素点的空间对应关系,需要进行各个坐标系之间的相互转换。

整理各坐标之间的转换公式,可得目标点图像像素坐标与其世界坐标的数学表达式为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M X_w. \tag{4}$$

式中: $f_x = \frac{f}{dx}, f_y = \frac{f}{dy}$ ;  $M$  为  $3 \times 4$  的投影矩阵。

$M_1$  完全由  $f_x, f_y, u_0, v_0$  决定,这些参数只与摄像机内部结构有关,称为摄像机内部参数,  $M_2$  完全由摄像机相对世界坐标的位置决定,称为摄像机外部参数, 旋转矩阵  $R$  和平移向量  $t$  可通过摄像机标定得到<sup>[12-15]</sup>。

1.3 双目立体视觉模型

双目立体视觉的基本原理<sup>[16]</sup> 与人类视觉的立体感知过程相似,是从两个不同的视点观察同一事物,以获取在不同视角下的图像,通过成像几何原理计算图像像素间的位置偏差(视差),进而获取目标的三维信息<sup>[17]</sup>。根据两台摄像机摆放时光轴是否平行,双目立体视觉系统又分为平行双目视觉系统和非平行双目视觉系统。

双目视觉模型如图2所示,从图2中可获取单个空间点的三维信息,空间中任意一点为  $P$ ,两个摄像机分别为  $C_1, C_2$ ,坐标系分别为  $O_1-X_1Y_1Z_1, O_2-X_2Y_2Z_2$ ,其中图2(a)中两摄像机光轴平行,为理想的双目视觉模型,通常实际应用中无法达到该要求。因此,一般两摄像机光轴都以任意角度放置,如图2(b)所示。可通过投影变换矩阵,利用最小二乘法求得  $P$  点的三维空间坐标。

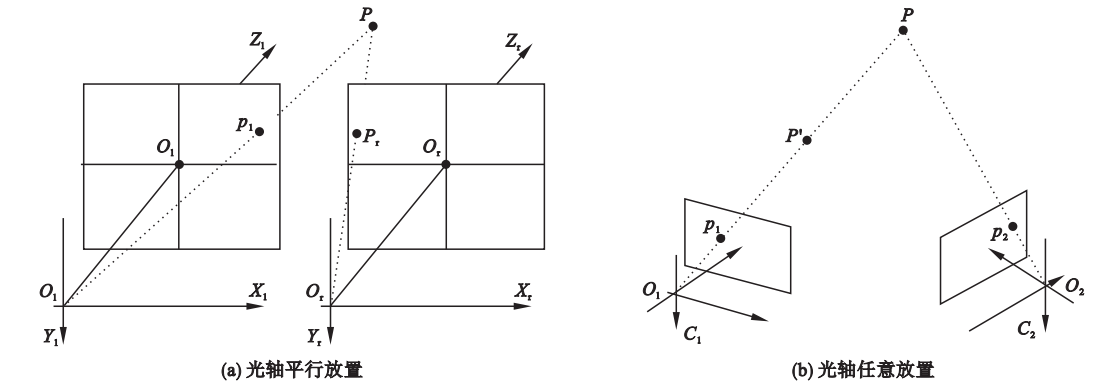


图2 双目视觉模型

Fig. 2 Binocular vision model

在非平行放置的双目视觉模型下,获得空间点  $P$  的三维坐标过程如下. 假设  $P(x_w \ y_w \ z_w)$  为世界坐标系中的坐标,在

左右两个摄像机中的图像像素坐标分别为  $P_1(u_1 \ v_1), P_r(u_r \ v_r)$ , 则:

$$z_l \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} = M_l \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{l11} & m_{l12} & m_{l13} & m_{l14} \\ m_{l21} & m_{l22} & m_{l23} & m_{l24} \\ m_{l31} & m_{l32} & m_{l33} & m_{l34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$z_r \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ 1 \end{bmatrix} = M_r \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{r11} & m_{r12} & m_{r13} & m_{r14} \\ m_{r21} & m_{r22} & m_{r23} & m_{r24} \\ m_{r31} & m_{r32} & m_{r33} & m_{r34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中:  $M_l, M_r$  分别为左、右两摄像机相对世界坐标系的投影矩阵, 两式分别消去  $z_l, z_r$  可整理为

$$\begin{bmatrix} m_{l31}u_l - m_{l11} & m_{l32}u_l - m_{l12} & m_{l33}u_l - m_{l13} \\ m_{l31}v_l - m_{l21} & m_{l32}v_l - m_{l22} & m_{l33}v_l - m_{l23} \\ m_{r31}u_r - m_{r11} & m_{r32}u_r - m_{r12} & m_{r33}u_r - m_{r13} \\ m_{r31}v_r - m_{r21} & m_{r32}v_r - m_{r22} & m_{r33}v_r - m_{r23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{l14} - m_{l34}u_l \\ m_{l24} - m_{l34}v_l \\ m_{r14} - m_{r34}u_r \\ m_{r24} - m_{r34}v_r \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由已标定好的左、右摄像机的内外参数以及目标点的图像像素坐标, 代入式(7)便可求出  $P$  点在世界坐标系中的三维坐标。

## 2 视觉系统实验与分析

### 2.1 摄像机标定

在图像测量过程以及机器视觉应用中, 为确定空间物体表面某点的三维几何位置与其在摄像机成像中对应点之间的相互关系, 必须建立摄像机成像的几何模型, 这些几何模型就是摄像机参数, 包括摄像机内部几何

光学特性, 图像中心, 焦距, 镜头畸变的参数称为摄像机的内参数; 以及摄像机相对世界坐标的方位称为外参数。而求解这些参数的过程就称为摄像机标定<sup>[18-19]</sup>。

为了验证笔者方法的可行性与准确性, 搭建了双目视觉平台, 实验采用单位方块长宽分别为 50 mm × 50 mm 的黑白相间的棋盘标定板。将双摄像头调整到合适的角度, 便于提取混联雕刻机器人平台上的被加工件初始点的位置。将采集好的被加工件区域的图片通过 Matlab 视觉工具箱进行处理以及标定摄像机, 相机标定流程图如图 3 所示, 通过该过程可以标定出摄像机的内外参数。

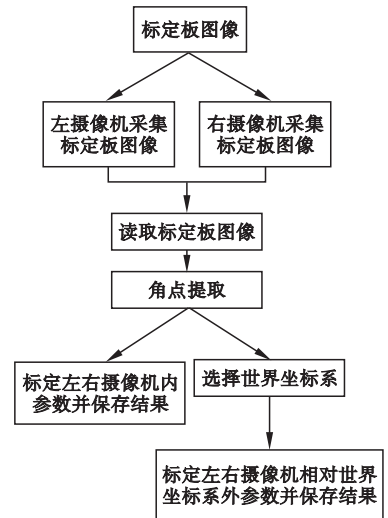


图 3 双摄像机标定流程图

Fig. 3 Dual camera calibration flow chart

双目摄像机经标定过程后, 可得左右两摄像机内外参数相对应的标定结果。

左摄像机内参矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 208.334 & 0 & 305.465 & 0 \\ 0 & 1 & 239.056 & 347.187 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

左摄像机外参矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0.233 & 0.953 & 0.191 & -157.036 \\ 0.642 & -0.003 & -0.766 & -142.721 \\ -0.729 & 0.301 & -0.613 & 1076.681 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

右摄像机内参矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 244.265 & 0 & 422.830 & 0 \\ 0 & 1 & 250.667 & 229.148 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(10)

右摄像机外参矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0.153 & 0.980 & 0.125 & -263.175 \\ 0.592 & 0.010 & -0.805 & -42.495 \\ -0.791 & 0.197 & -0.578 & 1\,069.879 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(11)

为验证该实验的精度误差,将目标点反投影.如图4为右摄像机的角点坐标误差,该误差表示的是标定使用的所有角点反投影到图像空间的图像像素坐标误差,单位为像素.从图4可以看出,在X方向,像素误差最大在1个像素以内,Y方向像素误差最大在1.5个像素以内.误差较小,满足实验要求.

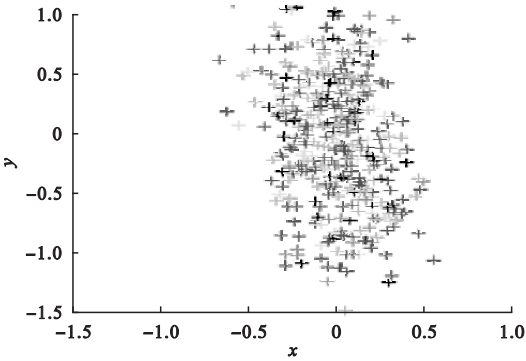


图4 摄像机角点坐标误差分析

Fig. 4 Error Analysis of Camera Corner Coordinate

2.2 坐标获取的实验测试

混联雕刻机器人在每次加工新零件时,被加工件的初始加工位置以及加工初始点的位置不是固定的.因此,每次加工都需对初始加工点进行标定.当双目摄像机的内参数以及与世界坐标系对应的外参数标定完成后,因摄像机的位置及参数已固定,所以每次只需对贴有靶标的被加工件进行左、右摄像头同时拍照一次,选取所需的加工初始点位

置,即可根据双目视觉原理获取加工初始点在世界坐标系中的坐标,其世界坐标系与机床坐标系关系如图5所示.

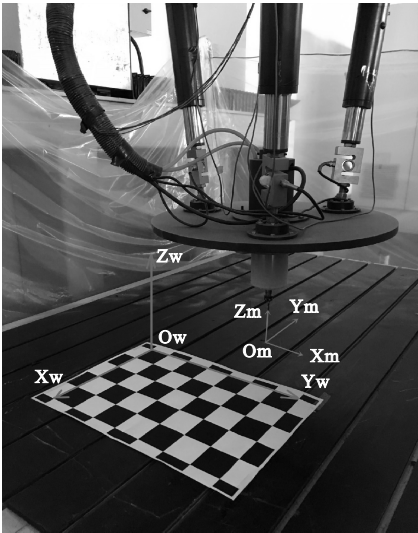


图5 世界坐标系与机床坐标系关系图

Fig. 5 The relationship between world coordinate system and machine coordinate system

被加工件上贴有靶标,方便计算机识别被加工件位置以及提取加工初始点坐标.将该图像进行反投影,可得各角点在左摄像机中反投影后图像(见图6),将该点区域放大可得局部放大图像(见图7),两图中坐标单位为像素.从反投影的图像中可以清楚地看到加工初始点在左摄像机中的位置及其像素坐标( $u_1, v_1$ )为(573, 276).同理可得该点在右摄像机中图像坐标( $u_r, v_r$ )为(565, 274).

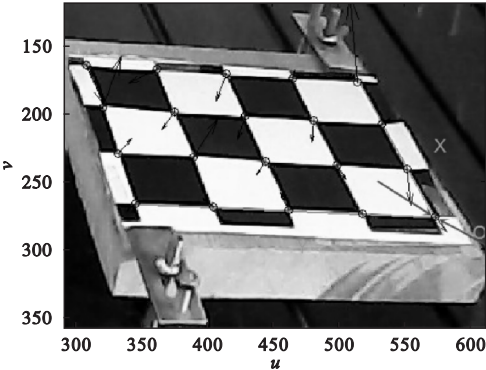


图6 各角点在左摄像机中反投影后图像

Fig. 6 Reprojected grid points in left camera



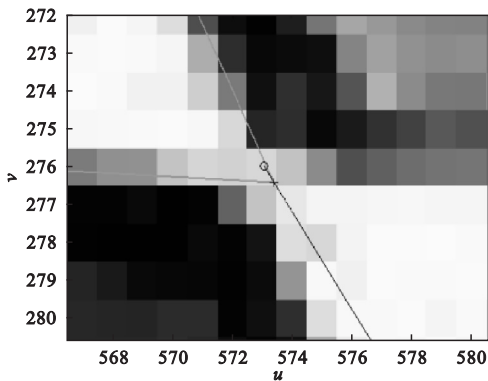


图 7 局部放大图像

Fig. 7 Partially magnified image

在摄像机标定过程中,已经通过 Matlab 视觉工具箱标定得到了左、右摄像机的内外参数矩阵,利用式(4)进行运算,可得左、右摄像机的投影矩阵,即  $M_l, M_r$ . 将投影矩阵和经反投影所得的目标点在左、右两个摄像头中的像素坐标  $(u_l, v_l), (u_r, v_r)$  代入式(7)中,便可计算出目标点  $P(X_w \ Y_w \ Z_w)$  在世界坐标系中的三维坐标,其值为  $(187.590, 345.540, 45.569)$ .

3 误差分析与应用

3.1 误差分析

为了测试该方法的精度,设计了一组实验,求取了被加工件靶位中 10 个角点的三维坐标,并通过机器人控制面板获取了角点的实际三维坐标,两者偏差值如表 1 所示. 定位精度误差作为机器人运动精度评定的重要指标之一<sup>[20]</sup>,其计算式为

$$\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2}. \tag{12}$$

式中: $\Delta$  为定位精度,  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$  分别表示目标点各计算坐标值与实际坐标值之差.

为获得更高的测量可信度,计算了 10 个角点的相对误差,以及其均值和标准差. 坐标点计算值与实际值的相对误差计算式如式(13),标准差计算式如式(14),计算结果如表 2 所示.

$$\delta_l = \frac{\Delta_l}{L_l} \times 100\%. \tag{13}$$

$$s_l = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \tag{14}$$

式中: $\delta$  为均值,  $L$  为目标点实际坐标值,  $S_l$  取  $x, y, z, s$  为标准差,  $n$  为目标点个数.

表 1 定位精度误差

Table 1 The positioning accuracy error				
角点	$\Delta_x/\text{mm}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$\Delta_z/\text{mm}$	$\Delta/\text{mm}$
1	3.322	-1.688	3.227	4.929
2	-1.790	-1.954	1.237	2.924
3	2.721	-0.744	2.630	3.856
4	0.101	-1.442	-1.308	1.949
5	0.000	-1.445	2.912	3.255
6	2.576	1.568	1.625	3.425
7	0.106	1.139	0.036	1.144
8	-0.301	-2.792	-1.010	2.984
9	0.767	1.515	0.620	1.807
10	4.061	2.135	2.040	5.021

表 2 目标点的相对误差

Table 2 Relative error of target point			
角点	$\delta_x/\%$	$\delta_y/\%$	$\delta_z/\%$
1	1.8	0.5	7.6
2	1.0	0.6	3.0
3	1.5	0.3	6.2
4	0.1	0.7	3.0
5	0.0	0.1	6.8
6	0.1	0.5	3.8
7	0.1	0.4	0.1
8	0.2	1.1	2.4
9	0.6	0.8	1.4
10	3.0	1.4	4.8

由表 2 及式(14)可得出角点在  $x, y, z$  三个坐标方向的方差分别为 0.91%, 0.36%, 2.29%, 均控制在 3% 以内. 由表 1 可计算可得摄像机重建点与实际点之间定位精度误差均值为 3.13 mm. 由此可知, 机器人视觉系统定位精度误差远小于手动对刀误差. 又由于对刀过程与加工过程相互独立, 不会影响加工精度.

3.2 获取加工初始点坐标的应用

目前机床加工的初始阶段, 都避免不了

对刀过程,该过程大多数为人为操纵.首先将机器刀具回归零点,然后通过手动操作,将工作机构慢慢移动到工件加工初始点附件,最后靠近工件仔细观察同时移动刀具慢慢接近.有时还需开启工作机构将刀具与目标点接触后完成对刀工作.在需要二次对刀或者加工中断需要继续加工的过程,手动对刀不能满足加工精度,存在二次对刀误差,并且手动操作过程效率低,精度差,危险性高.因此,需要引入非接触式对刀过程取代传统手动对刀过程.

笔者研究方法可以快速精确地获得机床平台上被加工件表面上任意点在世界坐标系中的三维坐标,同时还可以获取刀尖点在空间中的任意位置.将该系统应用于各种加工的初始对刀阶段,实现非接触式对刀过程,提高了对刀精度,降低了对刀危险性,同时也消除了二次对刀的误差,同时也提高了加工的自动化和智能化程度.其自动对刀实现过程如图8所示.

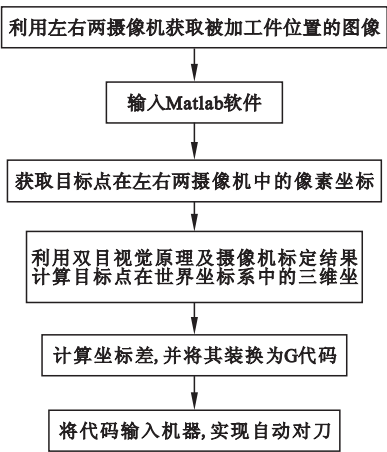


图8 自动对刀过程的实现

Fig.8 Automatic tooling process

将基于双目视觉原理的平台用于混联雕刻机器人自动对刀过程,能大大提高定位速度和定位精度,实验台只需两个高清摄像头.通过获取加工空间的图像,将加工件粘贴图像拾取靶标,在所需特征点的位置粘贴标记点,便可通过双目视觉原理获取图像中任一

点的三维空间坐标.通过计算在世界坐标系中刀尖点与加工初始点的三维坐标之差,就可获得自动对刀时机器所需运动的位移.将刀尖预期运动位移转换成机器可识别的G代码,输入到由雕刻专用软件 ArtCAM 所生成的程序头中,再将该程序载入雕刻机器人,刀具便可自动移动到加工初始点,实现自动对刀的过程.

4 结 论

(1)建立了坐标转换模型,利用 Matlab 视觉标定工具箱对左、右两个摄像机进行了精确标定,通过机器人控制系统对机器零点进行了标定,利用摄像机提取了加工初始点的图像像素坐标;建立双目视觉系统模型,通过计算获得目标点的三维视觉坐标值.

(2)经仿真与实验,精确获取了加工初始点的三维坐标,视觉系统的相对误差不超过3%.

(3)应用视觉系统搭建混联机器人的自动对刀平台,可以降低人工对刀的危险系数,提高对刀的准确度和对刀效率,并可消除在二次加工时因对刀所产生的误差.

参考文献

[1] 陆乐. 平面设计中的视觉流程概述[J]. 科技创新导报,2008(33):67.  
(LU Le. Visual process overview in graphic design[J]. Science and technology innovation, 2008(33):67.)  
[2] 马肖,舒博伦,李景春. 双目立体视觉测距技术[J]. 电子设计工程,2016(4):81-83.  
(MA Xiao,SHU Bolun,LI Jingchun. Binocular stereo vision ranging technology[J]. Electronic design engineering, 2016(4):81-83.)  
[3] 张祖勋. 数字摄影测量与计算机视觉[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004(12): 1035-1039.  
(ZHANG Zuxun. Digital photogrammetry and computer vision[J]. Journal of Wuhan university(information science edition), 2004(12): 1035-1039.)  
[4] 张世辉,孔令富. 一种新型6-PUS 并联机构雕刻机[J]. 机器人,2005,27(4):313-318.

- (ZHANG Shihui, KONG Lingfu. A new 6 – PUS parallel mechanism engraving machine [J]. Robot, 2005, 27(4): 313 – 318. )
- [ 5 ] KONG L F, ZHANG S H. A novel parallel engraving machine based on 6 – PUS mechanism and related technologies [J]. Intech, 2005.
- [ 6 ] 张世辉. 并联机器人汉字雕刻技术的研究 [D]. 秦皇岛:燕山大学, 2005.  
(ZHANG Shihui. Research on the Chinese-engraving technique of parallel robot [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2005. )
- [ 7 ] 张世辉, 孔令富, 刘天洋. 一种面向并联机构的雕刻刀具系统设计 [J]. 机器人, 2007, 29(3): 244 – 249.  
(ZHANG Shihui, KONG Lingfu, LIU Tianyang. A novel engraving cutting tool system for parallel mechanism [J]. Robot, 2007, 29(3): 244 – 249. )
- [ 8 ] WANG F, CHEN K Z, FENG X Y, et al. Developing a manufacturing technology for the components made of a multiphase perfect material [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2009, 40 (7/8): 837 – 846.
- [ 9 ] 冯志友, 李永刚, 张策, 等. 并联机器人机构运动与分析研究现状及展望 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(9): 979 – 984.  
(FENG Zhiyou, LI Yonggang, ZHANG Ce, et al. Present state and perspectives of research on kinematics and dynamics of parallel manipulators [J]. China mechanical engineering, 2006, 17(9): 979 – 984. )
- [ 10 ] PARK J S. Interactive 3D reconstruction from multiple images: a primitive-based approach [J]. Pattern recognition letters, 2005, 26(16): 2558 – 2571.
- [ 11 ] BRUNO F, BIANCO G, MUZZUPAPPA M, et al. Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction [J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2011, 66(4): 508 – 518.
- [ 12 ] SUN J, GU H B. Research of linear camera calibration based on planar pattern [L]. World academy of science, engineering & technology, 2009(60): 627 – 631.
- [ 13 ] CHAPERON T, DROULEZ J, THIBAUT G. Reliable camera pose and calibration from a small set of point and line correspondence: a probabilistic approach [J]. Computer vision and image understanding, 2011, 115(5): 576 – 585.
- [ 14 ] LIU W, MA X, JIA Z, et al. A calibration method of binocular vision system for large forging dimension measurement [J]. Sensors and transducers, 2012, 145(10): 119 – 129.
- [ 15 ] 冀芳, 何红丽, 张建花. 基于立体视觉的天线阵面姿态测量技术 [J]. 科技与企业, 2016(2): 145 – 146.  
(JI Fang, HE Hongli, ZHANG Jianhua. Based on the stereo vision of the antenna posture measurement technology [J]. Technology and enterprises, 2016(2): 145 – 146. )
- [ 16 ] 李介谷. 计算机视觉的理论和实践 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1998.  
(LI Jiegu. Computer vision theory and practice [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1998. )
- [ 17 ] 邢怀学, 朱旻, 浦玉强, 等. 基于双目立体视觉的三维地形重构 [J]. 地理与地理信息科学, 2007(2): 1.  
(XING Huaixue, ZHU Min, PU Yuqiang. Dimensional terrain reconstruction based on binocular stereoscopic vision [J]. Geography and geography information science, 2007(2): 1. )
- [ 18 ] MARC P. From images to 3D models [J]. Communications of the ACM, 2002, 45(7): 50 – 55.
- [ 19 ] 胡国元, 何平安, 王宝龙. 视觉测量中的相机标定问题 [J]. 光学与光电技术, 2004(3): 9 – 12.  
(HU Guoyuan, HE Pingan, WANG Baolong. The problem of camera calibration in visual measurement [J]. Optics & optoelectronic technology, 2004(3): 9 – 12. )
- [ 20 ] 罗继曼, 李根标. 遥操作主手机器人精度标定研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(12): 19 – 22.  
(LUO Jiman, LI Genbiao. Research on teleoperation master hand robot with precision calibration [J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2015(12): 19 – 22. )