

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0312-05

基于光电视觉的激光机器人姿态检测

陈 卓 杨洗陈

(天津工业大学激光工程中心, 天津 300160)

摘要 提出了一种基于光电视觉技术,运用 VC++ 及 Matlab 等工具的机器人末端的姿态测量方法。通过机器人单目或双目立体视觉技术,获得机器人作业路径图像,根据摄像机成像原理,建立相机及图像的标定方法。详细描述了由光电视觉技术得到空间点的位置坐标,确定其空间曲面法向量及机器人末端姿态。针对机器人离线编程技术中,离线规划时实现实际作业对象与机器人末端的特殊姿态要求,达到理想的加工要求及效果。

关键词 测量;机器人;光电视觉;离线编程技术;姿态测量

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0312

Based on Machine Vision Laser Robot Pose Measurement

Chen Zhuo Yang Xichen

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract Based on cablevision technology, a robot ending's attitude measurement using VC++, Matlab and other tools is proposed. By the monocular or binocular stereo vision technology, the robot operating path image is acquired. According to the camera imaging principle, the camera and the image calibration is established. How to use the cablevision technology to get the space point coordinates is described in detail, and the spatial surface normal vector, which is the robot ending attitude, is determined. When the robot offline planning is making, towards the special posture requirements of the operational targets and the robots ending offline planning, the method can achieve a desired effect.

Key words measurement; robot; cablevision technology; off-line programming; attitude measurement

1 引 言

离线编程技术是在脱离生产线的情况下进行的轨迹规划,用以提高生产率、降低成本和增加安全性等。目前流行的离线变成系统是基于三维图形化的屏幕示教编程。随着研究的深入,针对不同激光加工作业中对机器人末端姿态的要求的不同,如在激光熔覆时要求加工头要与加工表面垂直,激光焊接时要求加工头轴线要与焊缝法线夹角不超过 7° ^[1]。在传统的离线编程系统中,通常采用对加工物体进行三维建模,再求出其中所需部位的法向量,再传输到激光机器人,从而达到对机器人末端的姿态控制^[2]。可是传统方法存在很大的局限性,这种方法

只能对外形规则的物体建模,可一般的加工工件和所需加工的缺陷部位都是不规则的,建模难度很大,且实用性不高。本文根据光电视觉传感技术,对所得的图像信息的深度提取,通过点的位置坐标求出小平面区域的法向量。针对不同激光加工作业中对机器人末端姿态的要求的不同,在实际工作中对机器人加工头位姿的控制。

2 实验原理及方法

2.1 摄像机的标定方法

在双目立体视觉中,摄像机的标定是至关重要的。标定的方法和精度直接影响机器视觉系统的定

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(60478004)和天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFGX02300)资助课题。

作者简介: 陈 卓(1983—),男,硕士研究生,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: Lordi_4@163.com

导师简介: 杨洗陈(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料相互作用和激光加工理论及应用等方面的研究。

E-mail: yangxich@126.com

位精度。针对摄像机标定问题已经提出很多标定方法。传统的摄像机标定是在一定的摄像机模型下，基于特殊约定的实验条件，如形状、尺寸已知的标定物，经过对其进行图像处理，利用一系列数学变换和相关算法，求取摄像机模型的内部参数和外部参数^[3]。在基于光视觉的机器人路径规划中，一般划分为三个坐标系，分别为世界坐标系、摄像机坐标系以及图像坐标系。为了在视觉系统中建立统一的坐标系，需要将工件在世界坐标系中的位置和姿态转换为工件在相机坐标系中的位姿，然后再将其转换为在图像坐标系下的位姿。这就需要确定三个坐标系间变换关系，即对相机的内外参数进行规划。

2.1.1 内部参数

根据相机的针孔模型，一个空间点坐标为 $P_w = [x_w, y_w, z_w]$ ，在相机坐标系下的坐标 $P_c = [x_c, y_c, z_c]$ ，在图像坐标系下的坐标为 $p = [u, v]$ 。则相机内参数矩阵为

$$M_{in} = \begin{pmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 (u_0, v_0) 为相机光心在图像坐标系中的坐标， k_x, k_y 分别为相机在 x 方向和 y 方向上的横向放大率。

2.1.2 外部参数

摄像机的外参数模型，是景物坐标系在摄像机坐标中的描述。

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = M_{wc} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 (x_c, y_c, z_c) 表示景物点在相机坐标系中的坐标， (x_w, y_w, z_w) 为景物点在世界坐标系中的坐标 M_{wc} 为外参数矩阵， $n = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ 是 X_w 轴在摄像机坐标系中的方向向量， o, a 同理可得。 $p = [p_x \ p_y \ p_z]$ 是世界坐标系的原点在相机坐标系中的位置坐标。

2.2 机器人末端位姿的测量方法

在激光机器人工作过程中，比如激光熔覆、焊接等，都需要对加工头的姿态优化，机器人末端的姿态对获取空间位置下完好的焊缝有至关重要的影响，

比如，在激光熔覆过程中要求加工头尽量要和工件表面垂直，在激光焊接过程中要求激光焊枪要与工件成一定角度。人工操作则通过操作工人的经验来实时地保证焊缝质量，而机器人作为一种柔性的操作手，它要求根据不同工件的几何信息，通过各种处理手段，获取加工路径上一点的最佳位姿需求。

基于立体视觉和基于矩形的两种末端姿态测量方法，分别适用于所求法向区域是否为矩形或不规则四边形。当所取区域不规则时，通过立体视觉测得的四边形的四个顶点坐标运用“四点法”进行计算区域中心法向。当所取区域为规则矩形且边长已知时，适用基于矩形平面的位姿测量方法。

2.2.1 基于立体视觉的位姿测量

摄像机采用小孔模型，内参数采用四参数模型由(1)式确定，外参数由(2)式确定。由双目立体视觉所得的点云数据，对所需加工平面中心的法向，取其中任意四点所组成的矩形中心，或近似的四边形的质心建立目标坐标系，如图1所示。 x 轴和 y 轴分别与矩形或四边形的两个边平行， z 轴垂直于目标所在平面，这四个顶点 $P_1 \sim P_4$ 分别为特征点^[4]。

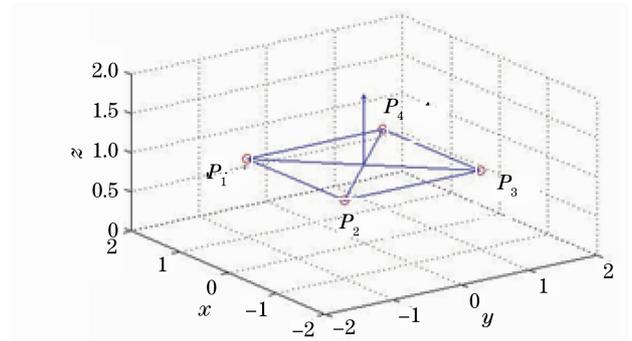


图1 空间内四点图

Fig. 1 Four feature points in the space

利用立体视觉技术测量出4个特征点 $P_1 \sim P_4$ 在世界坐标系下的三维坐标，分别记为 $P_i = (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$, $i = 1, 2, 3, 4$ 。四个特征点坐标的平均值，作为目标坐标系中原点在世界坐标系下的坐标，其对应的位置平移量为 $p = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ ，可以表述为

$$p = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 P_i = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 [x_{wi} \ y_{wi} \ z_{wi}], \quad (3)$$

取点 P_1 和 P_4 的中心与 P_2 和 P_3 的中心点构成目标坐标系的 x 轴方向， P_1 和 P_2 的中心点与 P_4 和 P_3 的中心点构成的向量为目标坐标系的 y 轴方向，其相对于世界坐标系的旋转矩阵为

$$\mathbf{n}' = \frac{1}{2}(P_2 + P_3) - \frac{1}{2}(P_1 + P_4) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_{w2} + x_{w3} - x_{w1} - x_{w4} \\ y_{w2} + y_{w3} - y_{w1} - y_{w4} \\ z_{w2} + z_{w3} - y_{w1} - y_{w4} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{n}'}{\|\mathbf{n}'\|}, \quad (5)$$

$$\mathbf{o}' = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) - \frac{1}{2}(P_3 + P_4) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_{w1} + x_{w2} - x_{w3} - x_{w4} \\ y_{w1} + y_{w2} - y_{w3} - y_{w4} \\ z_{w1} + z_{w2} - y_{w3} - y_{w4} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{o} = \frac{\mathbf{o}'}{\|\mathbf{o}'\|}, \quad (7)$$

式中 \mathbf{n}' 是 P_1 和 P_4 的中心点与 P_2 和 P_3 的中心点构成的向量; \mathbf{o}' 是 P_1 和 P_2 的中心点与 P_4 和 P_3 的中心点构成的向量。 \mathbf{n} 是 x 轴在坐标系下的表示; \mathbf{o} 是 y 轴在世界坐标系下的表示。目标坐标系相对于世界坐标系的旋转向量的第三个分量 \mathbf{a} , 可由 \mathbf{n} 和 \mathbf{o} 利用叉乘得到向量 \mathbf{a} , 即 z 轴在世界坐标系中的表示。即激光机器人在熔覆过程中所要求的与加工工件表面垂直的平面法向量^[4]。

2.2.2 基于矩形平面的位姿测量

相机采用小孔模型, 内参数采用(1)式, 并实现标定。在所求的矩形平面中心建立坐标系。该矩形的尺寸已知^[5], 长度为 $2x_w$, 宽度为 $2y_w$ 。如图 2 所示, 在目标平面内, $z_w = 0$ 。

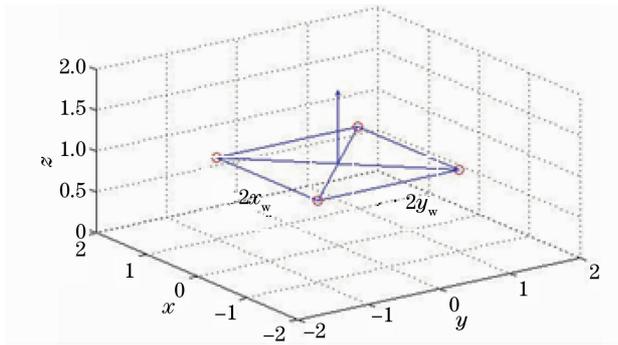


图 2 空间内矩形图

Fig. 2 Rectangle plate in the space

通过(2)式, 根据其旋转矩阵的正交约束, 得

$$\begin{cases} o_x x_c + o_y y_c + o_z z_c = y_x p_x + o_y p_y + o_z p_z \\ a_x x_c + a_y y_c + a_z z_c = a_x p_x + a_y p_y + a_z p_z \end{cases}. \quad (8)$$

令 $A_1 = y_w + o_x p_x + o_y p_y + o_z p_z$, $B_1 = a_x p_x + a_y p_y + a_z p_z$ 。由于 A_1, B_1 不为 0, 且 $z_c \neq 0$, 故有

$$\frac{o_x x'_c + o_y y'_c + o_z}{a_x x'_c + a_y y'_c + a_z} = C_1, \quad (9)$$

式中 $C_1 = \frac{A_1}{B_1}$, $x'_c = \frac{x_c}{z_c}$, $y'_c = \frac{y_c}{z_c}$, 可由(1)式通过图像坐标求得。

对于平行于 x 轴的同一条直线上的点, 其 y_w 不变, 故 A_1 和 B_1 不变。在该直线上任取两点 i, j 得

$$\frac{o_x x'_{ci} + o_y y'_{ci} + o_z}{a_x x'_{ci} + a_y y'_{ci} + a_z} = \frac{o_x x'_{cj} + o_y y'_{cj} + o_z}{a_x x'_{cj} + a_y y'_{cj} + a_z}. \quad (10)$$

对(10)式展开, 并利用 M_{wc} 旋转矩阵的正交约束条件化简, 得

$$n_x (y'_{ci} - y'_{cj}) + n_y (x'_{cj} - x'_{ci}) + n_z (x'_{ci} y'_{cj} - x'_{cj} y'_{ci}) = 0. \quad (11)$$

当相机光轴垂直于目标平面时, 即 $n_z = 0$ 时, 对于任意平行于 x 轴的同一条直线上的任意两点, 均符合(11)式。由直线上的两个点可得到另一个方程。与(11)式联立解出 n_x, n_y , 前者取正, 后者符号由(11)式确定。

$$\begin{cases} n_x^2 = \frac{(x'_{cj} - x'_{ci})^2}{(y'_{cj} - y'_{ci})^2 + (x'_{cj} - x'_{ci})^2} \\ n_y^2 = 1 - n_x^2 \end{cases}. \quad (12)$$

当相机光轴不垂直于目标平面时, 即 $n_z \neq 0$ 时, 由直线上多个点得到一组(11)式, 并都除以 n_z , 得

$$n'_x (y'_{ci} - y'_{cj}) + n'_y (x'_{cj} - x'_{ci}) = x'_{cj} y'_{ci} - x'_{ci} y'_{cj}, \quad (13)$$

式中 $n'_x = \frac{n_x}{n_z}$, $n'_y = \frac{n_y}{n_z}$ 。解出 n'_x, n'_y , 利用 $\|\mathbf{n}\| = 1$ 得到 n_x, n_y, n_z 。

同理可得 a_x, a_y, a_z 。求出 \mathbf{n}, \mathbf{a} 后, 利用旋转矩阵的正交性得 $\mathbf{o} = \mathbf{a} \times \mathbf{n}$ 。故求得目标坐标系和相机坐标系的旋转矩阵, 其中目标坐标系中 z 轴的法向即为所求矩形平面中心法向向量^[6], 即激光熔覆或焊接时所要求的加工头所需位姿。

3 软件平台及开发环境

在离线条件下完成对摄像机内外参数的标定, 并通过光电视觉技术测出所需加工工件整体和局部缺陷部位的点云数据, 将特征点的坐标导入 Matlab 中, 以 Matlab 及 VC++ 为编程语言, 得到相关实验数据和图形。位姿测量流程如图 3 所示。

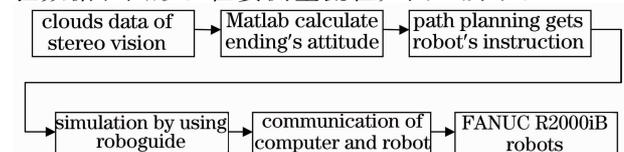


图 3 位姿测量流程图

Fig. 3 Flow chart for attitude measurement

4 实验仿真及结果

4.1 机器人末端位姿的测量方法在 Matlab 中的仿真实验

图 4 为由立体视觉技术测量所得点云数据,后

由逆向工程技术重构得到的 3D 模型^[7]。图 5 为将 3D 模型导入 Matlab 中进行矩形网格划分,然后采用 2.2.1 节方法求得的小平面中心点 P_1 和 P_2 的法向向量,如表 1 所示。

表 1 P_1 和 P_2 位姿

Tabel 1 Position of P_1 and P_2

	x	y	z	u	v	w
P_1	-0.25	0.4	-0.2	-0.548	-0.128	0.826
P_2	-1.25	0	-0.262	0.387	0	0.922

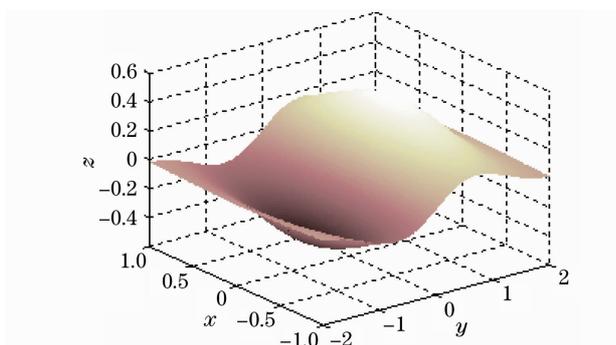


图 4 凹凸曲面 3D 模型

Fig. 4 3D model of surfaces

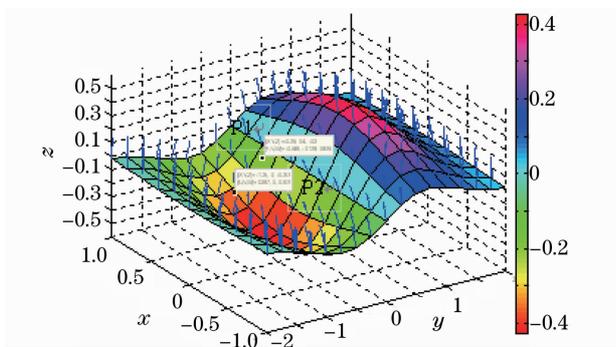


图 5 计算所得的法向向量

Fig. 5 Calculated normal

4.2 机器人末端位姿的测量方法在实际激光再制造中的应用

在实际激光淬火加工中,分别利用基于立体视觉和基于矩形的位姿测量方法,测得所加工机床导轨水平面和斜平面的法向向量,并导入机器人控制柜进行实际加工。图 6 为采用 2.2.1 节方法求得的基于水平面中心的法向向量,然后对导轨水平面进行淬火加工时的照片。从图 7 可见,淬火效果均匀整齐,表面成型平整,纹路均匀,无烧边现象^[8]。试验表明机器人末端与水平加工面实时垂直,位姿测量结果比较精确。



图 6 水平面位姿测量图

Fig. 6 Attitude of level plate



图 7 基于立体视觉测量加工的效果图

Fig. 7 Image of stereo vision measurement

图 8 为采用 2.2.2 节方法求得基于斜平面中心法向向量,对导轨斜平面进行淬火加工时的照片。图 9 为淬火效果,纹路均匀整齐,无烧边现象。试验表明机器人末端与斜加工面实时垂直,位姿测量方法测量的斜平面法向向量结果准确。



图 8 斜平面位姿测量图

Fig. 8 Measuring attitude of slope



图 9 基于矩形平面测量加工的效果图

Fig.9 Image of the measurement of rectangle

5 结 论

提出了基于光电视觉技术,对机器人末端姿态进行测量的方法。分为基于立体视觉的位姿测量方法和基于矩形的位姿测量方法,两种方法所需的条件不同,适应于不同条件下的测量。在 Matlab 中进行仿真,能够得到精确的特征点处的位置坐标和方向向量。上述方案,已在实际激光加工中得到验证。

参 考 文 献

- 1 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2780~2798
杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2780~2798
- 2 Jin Xiaoshu, Yang Xichen. Off-line programming of a robot for laser re-manufacturing [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2009, **14**(s1): 186~191
- 3 Wu Bin, Xue Ting, Zhu Jigui *et al.*. Novel high-precision calibration method for stereo visual measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(12): 66~70
吴 斌, 薛 婷, 郝继贵等. 一种立体视觉测量高精度标定新方法 [J]. *光电工程*, 2005, **32**(12): 66~70
- 4 Zuo Aiqiu, Wu Jiangning, Li Shilun *et al.*. Measurement of position and orientation of a parallel 6-DOF electrohydraulic servo platform based on stereo vision [J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, **11**(7): 814~816
左爱秋, 吴江宁, 李世伦等. 基于立体视觉的六自由度平台位姿检测基础研究[J]. *中国机械工程*, 2000, **11**(7): 814~816
- 5 Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. 134
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 134
- 6 Wang Jianhua, Han Hongyan, Wang Chungping *et al.*. Theoretic research on double CCD stereoscopic measurement system [J]. *Electronic Optics & Control*, 2007, **8**: 94~96
王建华, 韩红艳, 王春平等. CCD 双目立体视觉测量系统的理论研究 [J]. *光电与控制*, 2007, **8**: 94~96
- 7 Hao Yingming, Zhu Feng, Ou Jinjun. 3D visual methods for object pose measurement [J]. *J. Image and Graphics*, 2002, **12**: 1247~1251
郝颖明, 朱 枫, 欧锦军. 目标位姿测量中的三维视觉方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2002, **12**: 1247~1251
- 8 Li Li, Yang Xichen, Dong Zhe. CCD measurement of temperature field of coaxial powder flow in laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2431~2437
栗 丽, 杨洗陈, 董 哲. 激光熔覆中同轴粉末流温度场的 CCD 检测 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2431~2437