

文章编号: 0258-7025(2010)07-1868-05

激光再制造机器人双目视觉系统标定研究

高 贵 杨洗陈 张海明

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

摘要 将双目立体视觉系统引入到激光修复再制造机器人中,可以实现机器人对修复物体缺陷的自动识别,给出最佳修复路径和工艺参数。标定问题是视觉系统基本且关键的工作。将两个摄像机安装在机器人末端,随机器人一起移动,对二维平面靶标进行标定实验。通过机器人示教盒改变摄像机的位置,用左右摄像机各采集不同位置的靶标图片,采用 OpenCV 编程,求得摄像机的内外部参数,再用 Matlab 完成了机器人手眼标定。借助机器人示教盒显示的数据,检测了摄像机标定精度。结果表明,最大相对误差 1.08%,满足激光修复再制造要求。

关键词 激光技术;再制造;机器人;机器视觉;标定

中图分类号 TN249;TP242.6⁺2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103707.1868

Study of Binocular Vision System Calibration in Laser Remanufacturing Robot

Gao Gui Yang Xichen Zhang Haiming

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

Abstract Binocular stereo vision system is equipped in laser remanufacturing robot. The robot can automatically find the defect of objects to be repaired and give the best repairing path and technological parameters. Calibration is the basic and key task of vision system. Two cameras are installed in the robot terminal and calibrate the two-dimensional (2D) plane target. The right and left cameras acquire target images in different positions by changing the camera's positions through the robot teaching pendant. Internal and external camera parameters are calculated by OpenCV programming and robot hand-eye calibration is completed by Matlab. Calibration accuracy is analyzed with the help of robot teaching pendant. The result shows that the maximum relative error is 1.08%, which meets the requirements of laser-repairing remanufacturing.

Key words laser technique; remanufacturing; robot; machine vision; calibration

1 引 言

激光再制造技术是基于激光熔覆的全新概念的先进修复技术,它不仅能精确恢复损伤零部件的原有形状和尺寸,而且还可以大幅度地提高修复后的使用性能。它融合了激光熔覆、计算机辅助设计和计算机辅助制造(CAD/CAM)、数控、光电检测和先进材料等技术,以金属粉末为修复再制造材料,在具有修复零件原型的 CAD/CAM 软件支持下,由计算机数控(CNC)带动同轴送粉喷嘴移动,激光与金属粉末由同轴送粉喷嘴同轴输出,激光熔化金属粉末

并使基体材料微熔,形成良好的冶金结合层,如此层层堆积,构建原有零件的形状和尺寸结构,实现修复再制造^[1,2]。随着计算机技术和机器人技术的发展,自动化、智能化已经成为激光再制造技术的发展方向,激光再制造机器人也已成为下一代激光制造技术发展的主攻方向^[3]。激光再制造机器人要修复的对象是一些损伤或废旧的零部件,这些零部件个性突出,在对其修复之前,需要准确知道它们的尺寸、形貌、位置及缺损信息等,尤其要感知各种复杂曲面上的损坏深度,准确地获取三维缺损信息,而且

收稿日期: 2009-09-30; 收到修改稿日期: 2009-12-01

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: 高 贵(1965—),女,博士研究生,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: gaoui@126.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(通信联系人)

视觉系统不仅要对其初始加工位置进行导引,更要在修复过程中实时监控,给出最佳修复路径和工艺参数,直至完全修复。为获取三维信息,激光修复再制造机器人采用双目立体视觉,它就像人的双眼,从两个视点观察同一物体,通过不同视角下物体的两幅二维图像,来获取物体的三维信息^[4],给机器人提供正确的加工参数。

激光再制造机器人在执行修复任务时,不仅需要摄像机测定加工对象的三维缺损信息,还需要摄像机测定出机器人末端执行器与工件的相对位置,若完成这些测定过程首先要进行视觉系统的标定。本文重点研究视觉系统标定工作需解决的两个问题:摄像机标定和机器人的手眼标定。

2 摄像机标定原理

摄像机标定是双目立体视觉基本且关键的工作^[5],通过摄像机标定建立起摄像机图像像素位置与场景点位置之间的关系,由已知特征点的图像坐标和世界坐标求解摄像机的模型参数^[6]。

2.1 相关坐标系

与摄像机标定相关的坐标系有像素坐标系、图像坐标系、摄像机坐标系和世界坐标系。4种坐标系的关系如图1所示。像素坐标系是以构成图像的基本元素即像素为单位的坐标系。每个像素的亮度均可以用一个数值表示,整个图像可以表示为一个 $M \times N$ 的数组,每一个像素在图像中的列数、行数可以用该坐标系下的坐标 (u, v) 确定。图像坐标系是

以物理长度为单位的坐标系,其坐标轴 X 轴, Y 轴分别平行于 u, v 轴,一般地,原点选在摄像机光轴与图像平面的交点,该点一般位于图像中心。像素在图像中的位置用 (X, Y) 表示。摄像机坐标系是以摄像机光心为原点, x_c 轴与 y_c 轴分别和图像坐标系中的 X 轴, Y 轴平行, z_c 轴即为摄像机光轴,与图像平面垂直。世界坐标系是用来描述物体在环境中的位置的坐标系,可以任意建立,它由 X_w, Y_w, Z_w 轴组成。

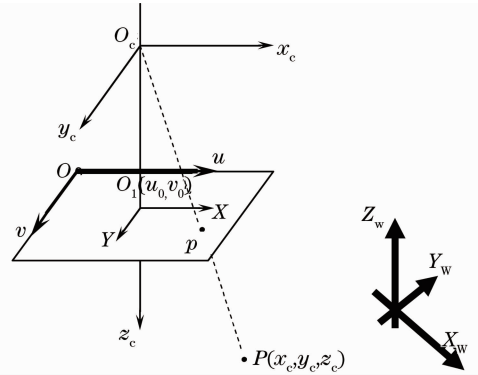


图1 摄像机标定坐标系

Fig.1 Coordinates of camera calibration

2.2 摄像机成像模型

摄像机模型是物体成像到图像平面的物理过程的数学描述,有线性模型和非线性模型^[7]。在忽略所有镜头光学畸变前提下,物体通过摄像机光轴中心点投射到成像平面上的摄像机模型,就为线性模型即针孔模型。在针孔模型下,得到世界坐标系下任一点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 与其投影点 $p(u, v)$ 的关系为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{Q} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{Q} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\alpha_x = f/dX, \alpha_y = f/dY$ 分别为 u 轴, v 轴上尺度因子,称为 u 轴, v 轴上归一化焦距, u_0, v_0 为光轴与像平面交点的图像坐标,中心坐标 $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 仅与摄像机的焦距 f ,像素尺寸 (dX, dY) 以及光学中心有关,是摄像机线性模型的内部参数,标定中认为 u 轴, v 轴严格垂直,即采用4参数模型。 $\mathbf{Q} = [0 \ 0 \ 0]$,

\mathbf{R}, \mathbf{t} 为旋转矩阵和平移向量,它们由摄像机相对于世界坐标系的方位决定,称为摄像机外部参数。

实际上,畸变存在于任何光学系统,它使得物体的成像偏离线性模型描述,所以引入透镜畸变的非线性模型才能更加真实地反映实际物体成像的几何关系。光学系统的畸变误差主要有径向畸变、偏

心畸变和薄棱镜畸变,第一类畸变只产生径向位置的偏差,后两类畸变则既产生径向偏差,又产生切向偏差。因此从径向偏差和切向偏差两方面建立非线性模型。径向、切向畸变模型可以分别近似描述为^[7]

$$\delta \begin{bmatrix} u^r \\ v^r \end{bmatrix} = k^r \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, k^r = k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots, \quad (2)$$

$$\delta \begin{bmatrix} u^t \\ v^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 x, y 为图像像素在成像平面坐标系根据针孔模型得到的归一化投影值, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, k_1, k_2, \dots 为径向畸变系数,一般情况下,取 1 到 2 项系数就足以描述镜头的径向畸变, p_1, p_2 为切向畸变系数, k_1, k_2, p_1, p_2 为摄像机非线性模型的内部参数。

2.3 摄像机标定过程

激光再制造机器人的摄像机标定采用二维平面靶标,以靶标上的方格点为标定点,建立非线性模型,通过不同的多个视点采集靶标图像,实现摄像机的标定。

在不考虑摄像机畸变的情况下,通过求解线性方程,计算出摄像机的线性模型参数,以此为非线性参数标定的近似初值,再采用非线性优化算法估计求解非线性参数即畸变系数。为提高标定精度,再利用标定出的非线性参数重新计算线性参数,如此循环往复,直至线性参数和非线性参数的值收敛为止,求出全部参数^[8]。

3 机器人手眼标定原理

通过机器人手眼标定确立机器人手爪平台坐标系和摄像机坐标系之间的对应关系,有了这个关系就可以把摄像机所测物体相对于摄像机坐标系的方位转换成相对于机器人手爪平台的方位,实现全局坐标系的统一,从而使机器人得到加工数据信息。

3.1 手眼标定的数学模型

与手眼标定相关的坐标系有世界坐标系 (W)、摄像机坐标系 (C)、机器人末端手爪平台坐标系 (H) 和机器人基坐标系 (R),如图 2 所示。由机器人基坐标系到机器人手爪坐标系的转换矩阵用 A 表示,它是机器人运动学矩阵;从摄像机坐标系到世界坐标系的转换矩阵用 B 表示;机器人手爪坐标系与摄像机坐标系的转换矩阵用 X 表示;机器人基坐标系和世界坐标系的转换矩阵用 D 表示。 A, B, X, D 为 4×4 矩阵,它们描述的两坐标系间的相对方位都可

以用旋转矩阵 R 和平移向量 t 表示。由图 2 可见,它们之间存在关系

$$D = AXB. \quad (4)$$

在机器人不同的末态位姿下,做摄像机标定。由于摄像机固定在机器人末端,且标定过程中靶标固定,所以 X, D 始终不变,可得

$$A_n X B_n = A_{n+1} X B_{n+1}, \quad (5)$$

这就是手眼标定的基本方程。式中 A_n, A_{n+1} 由机器人示教盒给出; B_n, B_{n+1} 为第 n 和 $n+1$ 次摄像机标定得到的外参数; X 即为待求参数。将(5)式用矩阵展开,就可以得到一组方程,从而求出矩阵 X 中的旋转矩阵 R 和平移向量 t 。

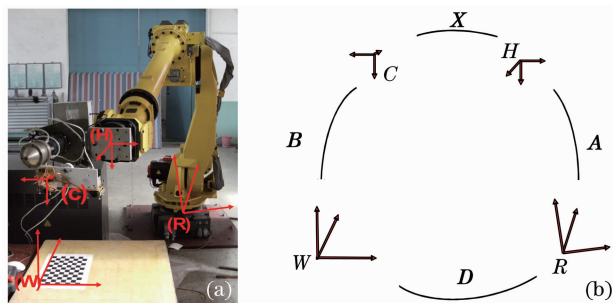


图 2 手眼标定坐标系

Fig. 2 Hand-eye calibration coordinates

3.2 手眼标定过程

摄像机固定在机器人末端,靶标位置固定,控制机器人末端从位置 1 移动到位置 2 和位置 3,在三个位置上分别做摄像机标定,求出其外参数,从而得到 R_{B_n}, t_{B_n} 。由机器人示教盒读出末端平台运动参数 R_{A_n}, t_{A_n} 。代入矩阵展开式(5),获得两组约束方程,求出 R, t 。

4 标定实验及误差分析

4.1 实验过程

标定实验装置如图 3 所示。图 3 靶标采用棋盘式黑白相间的平面靶标,8 行 12 列,每格边长 2 cm,由激光打印机打印,粘贴在平整度良好的面

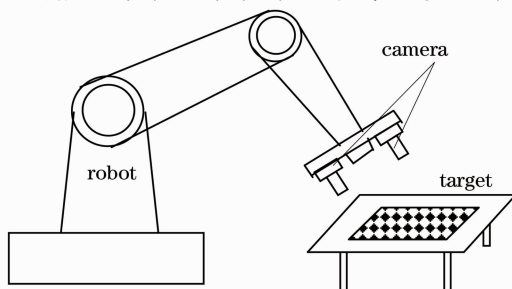


图 3 标定实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of installation calibration experiment

板上制成标定模板。两个摄像机均为 MV-1300UC-Mini 型高分辨率数字工业摄像机,相机最高像素是 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$, 镜头焦距 8 mm 。机器人 FANUC 的 R-2000iB/125L 6 自由度机器人。将两个摄像机固定在支架的左右两端,再安装在机器人末端,工作中摄像机相对于机器人末端位置始终保持不变。通过机器人示教盒改变摄像机的位置,在 12 个不同位置上用左右摄像机各采集靶标的 12 幅图片(为了提高标定精度,选择 12 个位置标定),图 4 为部分摄像机采集的靶标图片,这些原始图片为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,处理后为 $512 \text{ pixel} \times 410 \text{ pixel}$ 。

采用 OpenCV 编程,经过输入图片、提取角点、标定、评价及保存结果等步骤,实现基于二维平面靶

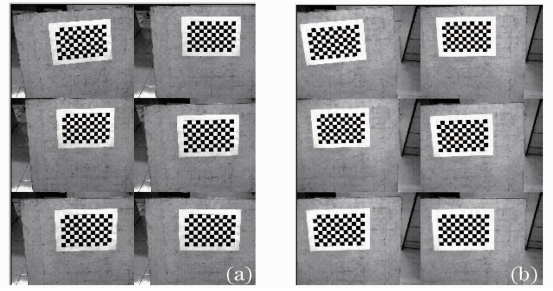


图 4 左(a)、右(b)摄像机采集的部分标定靶标图片
Fig. 4 Left (a) and right (b) camera gathering part calibration target image

标的非线性摄像机的标定,获得摄像机的内外参数;通过 Matlab 编程最终求出摄像机与手爪平台的转换矩阵,标定实验结果如表 1 所示。

表 1 视觉系统标定结果

Table 1 Calibration results of vision system

	Left camera			Right camera		
α_x	659.392			684.956		
α_y	655.231			683.449		
u_0	284.344			237.170		
v_0	169.098			168.160		
R	-0.99549	0.06697	0.06719	-0.99792	0.06452	0.00130
	0.05204	0.97761	-0.20389	0.06255	0.97206	-0.22626
	-0.07934	-0.19947	-0.97669	-0.01586	-0.22571	-0.97407
k_1	-0.11203			-0.13296		
k_2	0.566309			0.6269		
p_1	-0.0145621			-0.0137165		
p_2	-0.000857342			-0.00978151		
t	127.4804	-4.0142	18.9231	-130.5743	-5.3045	16.1062

表 2 测量距离误差表

Table 2 Distance measurement error table

L / mm	L_0 / mm	$\Delta L / \text{mm}$	$(\Delta L / L) / \%$
18.6398	18.7416	-0.1048	0.56
21.0309	21.1433	-0.1124	0.53
7.5884	7.5791	0.0093	0.12
5.2747	5.3323	-0.0576	1.08
16.0589	15.9410	0.1179	0.74
10.6512	10.6295	0.0217	0.20
9.3420	9.3571	-0.0151	0.16
13.6951	13.8234	-0.1283	0.93
8.7876	8.7992	-0.0116	0.13
23.4953	23.3708	0.1245	0.53
7.5613	7.5467	0.0146	0.19

4.2 误差分析

为了验证摄像机标定精度,对 12 组靶标图像的每一特征点(图中任意的角点)进行了匹配,并计算出它们的相对空间距离 L ,由于这 12 组图片是通过

机器人示教盒改变摄像机的位置获取的,根据示教盒显示的机器人末端坐标数据,可计算出机器人末端在拍照各组图片时移动的距离 L_0 ,理论上这两个距离应该相等,比较这些数据如表 2 所示,可见其标定误差。11 个距离 L 的最大相对误差为 1.08%,测量误差的均方根为 0.0820 mm。一般地,激光再制造机器人要修复对象的损坏深度为几毫米,而激光熔覆层厚度为 0.5~1 mm,这样的标定精度完全可以满足激光再制造的需要。

5 结 论

标定仅是激光再制造机器人视觉工作的基础,通过标定将由机器人“眼”获取的信息转换为机器人“手”可以执行的加工参数,实现机器人手眼的统一。通过建立非线性模型,用 OpenCV 编程实现了基于二维平面靶标的摄像机标定,求出了摄像机的内外参数;再用 Matlab 编程求出了摄像机坐标系和机器

人手爪平台坐标系的转换矩阵,完成了机器人手眼标定。标定实验结果表明,标定精度满足激光再制造需要,该标定方法可以用于激光再制造机器人视觉系统。

参 考 文 献

- 1 Yang Xichen. Momentum and mass transferences of coaxial powder stream in laser manufacturing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1664~1679
杨洗陈. 激光制造中同轴粉末流动量和质量传输[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1664~1679
- 2 Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan *et al.*. Laser refabricating technology for repairing expensive and important equipments [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(10): 53~57
杨洗陈,李会山,王云山等. 用于重大装备修复的激光再制造技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(10): 53~57
- 3 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
- 4 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
- 5 Qiu Maolin, Ma Songde, Li Yi. Overview of camera calibration for computer vision[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(1): 43~55
邱茂林,马颂德,李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. *自动化学报*, 2000, **26**(1): 43~55
- 6 Gao Lizhi, Fang Yong, Lin Zhihang. A new camera calibration technique for 3D machine vision metrology[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, **27**(2): 12~14
高立志,方勇,林志航. 立体视觉测量中摄像机标定的新技术[J]. *电子学报*, 1999, **27**(2): 12~14
- 7 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,郑继贵等. 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
- 8 Z. Y. Zhang. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334