

机器人航空铆接的视觉定位方法研究*

姜春英,牛祥鑫,张诚然,叶长龙,于苏洋

(沈阳航空航天大学机电学院,沈阳 110136)

[摘要] 研究工业机器人自动铆接视觉辅助定位方法,通过多项式拟合十字线结构光的相平面曲线获得铆接孔附近壁板的三维信息,并利用图像中位置关系信息,运用插值法完成铆接孔的位置和姿态的理论计算。这种方法能够引导机器人末端在规划路径下实现铆接孔位置与姿态的修正,满足常规铆钉通用应用范围内的工业机器人自动铆接在线定位与施铆的精度与实时性要求。

关键词: 自动铆接;机器视觉;十字线结构光;Hessian 矩阵;相机标定;工业机器人

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.04.055



姜春英

博士、副教授,研究方向为面向航空航天的机器人化成套装备技术与应用,主持沈阳市科技计划项目、辽宁省自然科学基金项目、中科院科学仪器研制项目,参与完成 921、863 等国家项目,完成企业委托项目多项。在航空航天测控技术、机器人技术、机器视觉技术等方面进行了较深入的研究。

铆接具有操作简单、连接强度稳定可靠的优点,是飞机装配中主要的连接方法^[1]。自动钻铆系统的提出有助于提高铆接质量的一致性,同时缓解人工工作压力,降低工作中对人体的危害和操作风险,是减少人为操作性失误的有效措施^[2-3]。然而对于飞机壁板,由于定位工装本身存在的误差^[4]和在施铆过程中壁板变形量较大引起孔位偏移^[5],机器人离线编程方式难以满足铆接定位的精度需求。在航空装配的检测和调整方面,公茂震等^[6]设计了采用激光距离传感器的垂直度智能调节方法,被用在铆接制孔环节;Song 等^[7]人通过三维激光扫描仪进行了壁板的在位检测设计和误差分析;Zhang 等^[8]在航空铝管装配方面采用了视觉引导的机器人系统。

结合上述发展和问题,提出一种自动铆接系统的机器视觉定位方法,该方法在机器人原有的离线定位的基础上,采用在线自动检测调整执行器末端姿态,使得定位精度满足插钉

需求,同时姿态精度满足施铆时铆钉受力方向要求。

工艺分析

某机身壁板铆接工艺要求见表 1 和图 1,表 1 为铆接轴孔配合关系;图 1 为铆钉镦头与铆接件表面平行度要求,所标高度 h 应小于铆接孔所

表 1 铆接轴孔配合关系要求 mm

铆钉直径	铆钉孔直径	铆钉孔极限	偏差
2.0	2.1	0.10	0
2.5	2.6	0.10	0
2.6	2.7	0.10	0
3.0	3.1	0.10	0
3.5	3.6	0.10	0
4.0	4.1	0.15	0
5.0	5.1	0.15	0
6.0	6.1	0.15	0
7.0	7.1	0.20	0
8.0	8.1	0.20	0
10.0	10.1	0.20	0

* 基金项目:沈阳市科技计划项目(F16-216-6-00)。

用铆钉直径 D 的 10%。

飞机壁板多为异形曲面结构,表面连续平滑,通过对铆钉孔附近壁板表面法向信息和孔位置信息的判别,在选用通用铆钉直径 4mm 时,对插钉精度和施铆方向与壁板垂直的精度要求要满足插钉的定位误差小于 $\pm 0.075\text{mm}$,施铆方向的角度误差应小于 $\arctan 0.15$,即 8.5° 。

结构光检测

采用单目视觉结合十字结构光检测方法,通过相机采集的铆接孔图像识别铆接孔,并通过结构光在壁板上的投影线条计算壁板曲面结构。相比一字线和点光源,十字线结构光能够采集更多信息,且未过多增加计算成本和标定复杂度^[9]。相机、光源和壁板位置关系如图 2 所示。

1 系统标定

相机标定采用张正友标定法^[9];结构光标定方法较多,可分为立体标定靶和平面标定靶,其中棋盘格靶标因操作简单、易于获取被广泛使

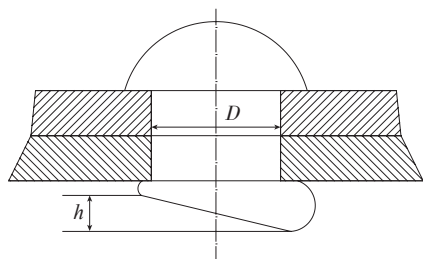


图1 铆钉墩头平行度要求
Fig.1 Parallelism requirement of rivet pier head

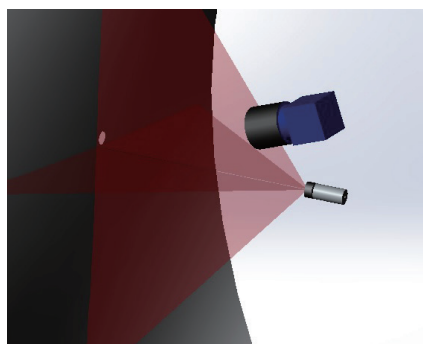


图2 相机光源和壁板位置关系
Fig.2 Relationship between camera light source and position of panel

用^[10-11]。本文使用平面标定靶,标定过程如图 3 所示。

光平面通过相机捕获的多条标定板上的光条获得,由于十字结构光照射在平面标定板上,两个不同光面的光条可以由角度区分。如图 4 所示,将世界坐标系放置在标定板上,采用两点表示光条所在直线。通过公式(1)进行点在世界坐标系位置 P_w 和相机坐标系位置 P_c 的变换,旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 由标定得出。

$$P_c = \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} P_w \quad (1)$$

在获得足够点后,采用最小二乘法求得两个光面在相机坐标系位置表达式如公式(2)所示。

$$\begin{cases} A_1 X_c + B_1 Y_c + C_1 Z_c + D_1 = 0 \\ A_2 X_c + B_2 Y_c + C_2 Z_c + D_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

2 光条中心提取

由于无实时性要求,本文采用文献[12]中的 steger 方法提取结构光光条中心。Hessian 矩阵如公式(3)所示,其中 r_{xx} 、 r_{xy} 、 r_{yy} 分别代表图像与高斯微分卷积核进行卷积运算的结果。Hessian 矩阵具有两个特

征值和特征向量,设绝对值较大的特征值为 $e(x, y)$,对应的特征向量为 $n(x, y)$ 。

$$H(x, y) = \begin{pmatrix} r_{xx}(x, y) & r_{xy}(x, y) \\ r_{xy}(x, y) & r_{yy}(x, y) \end{pmatrix} \quad (3)$$

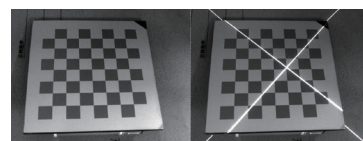
图 5 (a) 为十字结构光被球体反射的图像,5 (b) 为光条中心提取结果,可以将结果分为两条曲线,在图像坐标系中,曲线 L_1 上任一点的 $\vec{n}(x, y)$ 方向在 $(0, \pi/2] \cup (\pi, 3\pi/2]$ 范围内,曲线 L_2 上的点方向在 $(\pi/2, \pi] \cup (3\pi/2, 2\pi]$ 范围内。光条中心上的点被分为两个集合,分别是曲线 L_1 上的点集和曲线 L_2 上的点集。

3 计算空间点坐标

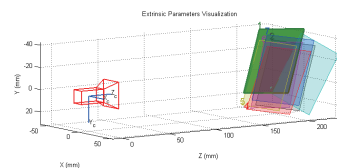
如图 6 所示,对于被测物反射的结构光,其上任意点在相机坐标系下的位置 $(X_c, Y_c, Z_c)^T$ 满足公式(3)约束,同时光条被相机观察,满足公式(4)关系,联立求得相机捕捉的物体表面反射的结构光在相机坐标系下的位置如公式(5)所示。

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f/dx & 0 & u_0 \\ 0 & f/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

(1) 采集标定板图像和结构光图像



(2) 采用张正友标定法标定相机参数



(3) 提取光平面在相机坐标系下的位置

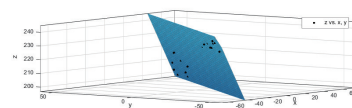


图3 标定过程

Fig.3 Calibration process

$$\begin{cases} X_c = \frac{(u-u_0) \cdot dx \cdot D}{A(u-u_0) \cdot dx + B(v-v_0) \cdot dy + fC} \\ Y_c = \frac{(v-v_0) \cdot dy \cdot D}{A(u-u_0) \cdot dx + B(v-v_0) \cdot dy + fC} \\ Z_c = \frac{D \cdot f}{A(u-u_0) \cdot dx + B(v-v_0) \cdot dy + fC} \end{cases} \quad (5)$$

对两个光条的空间曲线通过二次多项式进行拟合,如式(6)所示。由于铆接孔不一定在光条上,通过插值法可获得铆接孔中心位置和姿态。

$$\begin{cases} X = a_x t^2 + b_x t + c_x \\ Y = a_y t^2 + b_y t + c_y \\ Z = a_z t^2 + b_z t + c_z \end{cases} \quad (t \in R) \quad (6)$$

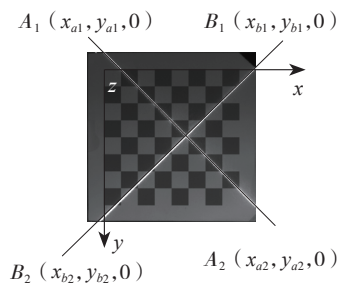
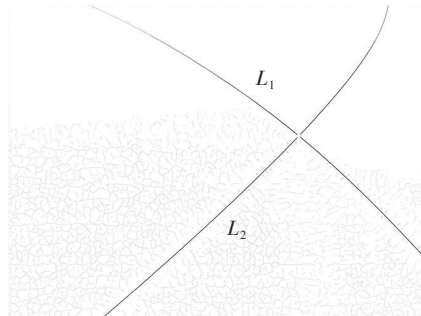


图4 标定板上光条的表示方法
Fig.4 Expression of light strip on calibrated board



(a) 结构光原图



(b) 光条中心提取结果

图5 结构光原图及光条中心提取结果

Fig.5 Original structured lights & extraction results of light bar center

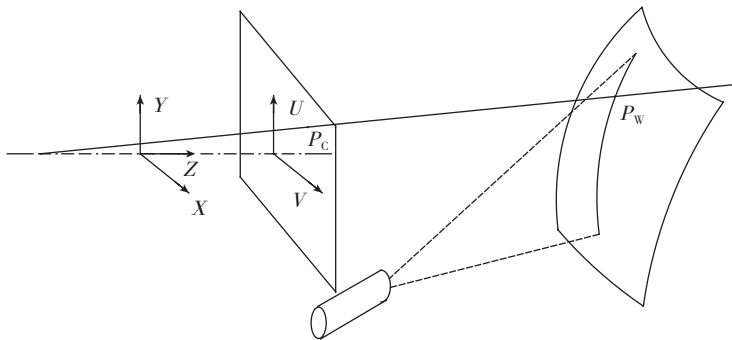


图6 结构光在相机平面投影图

Fig.6 Plane projection of structured light in camera

如图7所示,建立坐标系 O_{xyz} 原点位于曲线 L_1 与 L_2 的交点处, z 轴沿着两光面的交线, x 轴与 y 轴分别在两光面上。对于铆接孔中心 H 点, H 的位置和方向由 H_x 和 H_y 叠加得到,其中直线 $H_x H$ 与 L_2 在 O 点的切线平行, $H_y H$ 与 L_1 在 O 点的切线平行。在确定 H_x 与 H_y 点后,叠加得到 H 在相机坐标系 C_{xyz} 下的位置与姿态,如公式(7)和公式(8)所示,其结果为 H 点在相机坐标系下的位置,其中 ${}^o P_H$ 与 ${}^c P_H$ 为 H 点在坐标系 O_{xyz} 下的位置, ${}^o n_H$ 与 ${}^c n_H$ 为 H 点在坐标系 O_{xyz} 上壁板的法方向, ${}^c T$ 为相机坐标系和坐标系 O_{xyz} 之间的变换关系。坐标系 O_{xyz} 与相机坐标系变换关系可以根据两个光平面求得。

$${}^c P_H = {}^c T [{}^o P_H, {}^o P_H] \quad (7)$$

$${}^c n_H = {}^c T [{}^o n_H, {}^o n_H] \quad (8)$$

试验验证

使用 130 万像素工业相机和十

字结构光,检测环境如图8所示,壁板上铆接孔直径 4.1mm。首先标定工业相机与结构光,使用棋盘格标定板,标定板角点数量为 7×7 ,方格尺寸为 10mm 正方形,表2为相机内参,表3为光平面参数。试验流程,如图9所示。

壁板上采样点数量为 10×10 ,使用三维曲线对壁板上的光条进行拟合时,拟合优度 $R^2=0.9918$ 。铆接孔定位误差与铆接孔位置关系如图10所示,其中坐标系原点为十字结构光光条交点位置, x 轴与 y 轴为实际铆接孔在图像平面上相对于坐标原点的位置, z 轴表示测量误差。由图10可知,在结构光条附近具有较高的测量精度,并随着铆接孔远离结构光光条,铆接孔定位误差逐渐增大。当铆接孔位置距离结构光交点在 $\pm 50\text{mm}$ 范围内时,孔位置识别误

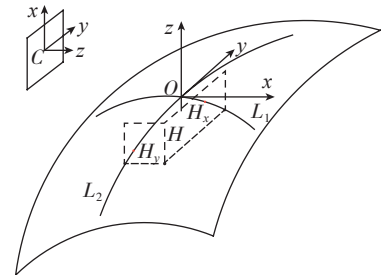


图7 像平面上的结构光与铆接孔中心位置关系

Fig.7 Relationship between structured light on plane and center position of riveting hole

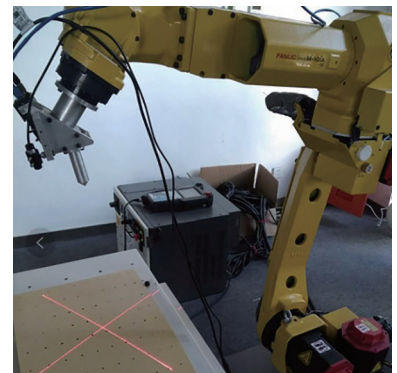


图8 带有十字结构光检测系统的工业机器人

Fig.8 Industrial robot with a cross structured light detection system

表2 相机内参标定值

参数	标定值
f/dx	-9.5843247604370117e+002
f/dy	-9.4306005859375000e+002
u_0	1.1541700710007468e+004
v_0	-4.7486223955961731e-003

表3 光平面参数

参数	标定值
A_1	-1.63543
B_1	1.67084
C_1	-1.0
D_1	222.195
A_2	-2.64527
B_2	-3.12347
C_2	-1.0
D_2	228.545

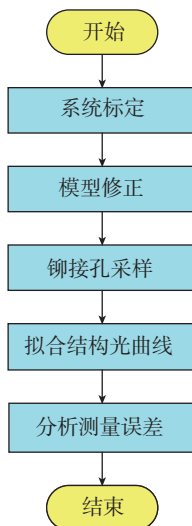


图9 试验过程流程图

Fig.9 Flow chat of the experiment

差均小于 0.1mm。当试验用板铆接孔间距为 30mm, 铆钉直径 4mm, 上述方法铆接孔识别精度能够满足要求。使用 core i5 处理器, 主频 2.5GHz, 4G 内存, 数据采集和处理时间为 300ms, 能够满足实时性要求。当定位误差无法满足测量要求时, 依据检

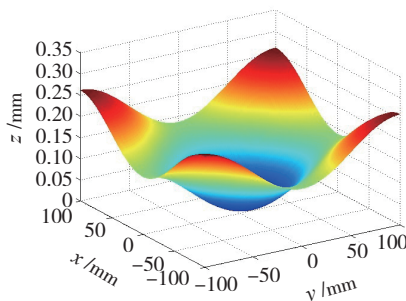


图10 检测精度与铆接孔位置关系
Fig.10 Relationship between testing precision and riveting hole position

测结果移动机器人后可以再次检测, 通过这种边看边动的检测方法, 多次检测能够达到在规划路径下的铆接孔检测定位并实时进行插钉锤铆的精度与实时性要求。

使用高精度加工中心加工出的曲面铆接孔板, 应用三维模型及加工中心精度确定铆接孔位置数据, 与本文所述十字结构光视觉识别铆接孔中心点的方法比较, 能够验证本文所述方法的合理有效性。

结论

(1) 使用 steger 方法提取光条中心, 通过相机模型和结构光面解析式求取结构光光条在相机坐标系下的位置。

(2) 在定位方面, 光条曲线使用二次多项式拟合, 适合大部分检测情况, 对壁板曲面复杂或铆接孔远离结构光的时候, 检测误差将较大, 需要预先规划工业机器人轨迹进行配合, 使系统始终保持在精度允许的条件下工作。

(3) 在铆钉直径 4mm 铆接孔距离为 30mm 的应用范围内, 铆孔检测识别结果能够满足铆接工艺要求, 孔位置识别精度在 0.1mm 范围内, 省略了一般结构光检测扫描的过程, 使得工业机器人锤铆过程更加高效。

参考文献

[1] 陈先有, 崔晶. 先进的装配连接技术在航空制造领域的应用分析 [J]. 机械制造,

2007, 45(11): 53-55.

CHEN Xianyou, CUI Jing. The application of advanced assembly connection technology in the field of aviation manufacturing[J]. Machinery, 2007, 45(11): 53-55.

[2] YU C, JIN Z, KE Y, et al. A robot assisted assembly system for small components in aircraft assembly[J]. Industrial Robot, 2014, 41(5): 413-420.

[3] BALAJI H, SELVARAJ P, RAO V S. Trends in manufacturing and assembly technologies for next generation combat aircraft[J]. Journal of Engineering & Applied Sciences, 2014, 9(6): 668-673.

[4] 殷俊清, 王仲奇, 康永刚, 等. 自动钻铆环境下铆接工艺研究 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(1): 79-83.

YIN Junqing, WANG Zhongqi, KANG Yonggang. Research on riveting process in automatic rivet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(1): 79-83.

[5] 齐振超, 张开富, 李原, 等. 大型壁板自动钻铆定位误差分析与优化 [J]. 航空学报, 2015, 36(10): 3439-3449.

QI Zhenchao, ZHANG Kaifu, LI Yuan, et al. Analysis and optimization for locating errors of large wing panel during automatic drilling and riveting[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3439-3449.

[6] 公茂震, 袁培江, 王田苗, 等. 航空制孔机器人末端垂直度智能调节方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(10): 1400-1404.

GONG Maozhen, YUAN Peijiang, WANG Tianmiao, et al. Intelligent verticality-adjustment method of end-effector in aeronautical drilling robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(10): 1400-1404.

[7] SONG T, XI F, GUO S, et al. A comparison study of algorithms for surface normal determination based on point cloud data[J]. Precision Engineering, 2015, 39: 47-55.

[8] ZHANG Z, LI H, HAN Q, et al. Visual sensor-guided robotic adaptive assembly of aero aluminum alloy tube[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9-12): 2057-2068.

[9] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on

Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[10] 张曦, 张健. 线结构光标定方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020001.

ZHANG Xi, ZHANG Jian. Summary on calibration method of line-structured light

sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020001.

[11] KIDDEE P, FANG Z, TAN M. A practical and intuitive calibration technique for cross-line structured light[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(20): 9582-9602.

[12] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.

通讯作者: 姜春英, E-mail: jiangchunying@hotmail.com。

Research on Visual Positioning Method for Robot Aeronautical Riveting

JIANG Chunying, NIU Xiangxin, ZHANG Chengran, YE Changlong, YU Suyang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] The vision aided positioning method of automatic riveting for industrial robot is studied. The cross link structured light curves which are reflected on the camera plan can be obtained by polynomial fitting method, are used to calculate the three dimensional information of aircraft surface. Position and posture of riveting hole can be calculated by the interpolation method according to the three dimensional information of aircraft surface and the corresponding relationship between the riveted hole and the curves of the cross link structured light. The position and the attitude of the riveted hole can be revised well for the end of an industry robot that is working with the planning route mode. The accuracy and the real time performance can be realized when industry robot automatic riveting under a common application range with common rivets.

Keywords: Automatic riveting; Machine vision; Cross line structure light; Hessian matrix; Camera calibration; Industrial robot

(责编 铃兰)

(上接第 40 页)

Approaches for Improving Structure Stiffness and Joint Accuracy of Robots

FANG Lijin¹, SUN Longfei², XU Jiqian¹

(1. Faculty of Robot Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

[ABSTRACT] Traditional industrial robots have advantages of large workspace, compact structure, and good flexibility, and have been gradually used in the high precision metal cutting fields of drilling, milling and grinding instead of material handling, spot welding, spray painting and other operations. However, the stiffness of industrial robots is weak compared with metal cutting machine tools. The weak stiffness of the robot makes the tool deviate from the desired machining trajectory, and makes the robot easy to chatter when it is subjected to the external excitation force, which affects the machining accuracy of the robot; in addition, the internal backlash of the joint reducers is also one of the most important factors affecting the machining accuracy of the robot. The research status of robot stiffness optimization, robot machining error compensation, backlash compensation of the robot and vibration suppression of the robot are summarized. Two kinds of robot structure improvement design are proposed to increase the accuracy of the robot, the robot structure of non-backlash driving based on dual-motor drive and the high stiffness robotic arm based on parallelogram mechanisms are respectively described. And the structural characteristics of the robot are elaborated.

Keywords: Industrial robot; Machining accuracy; Structure stiffness; Joint accuracy; Transmission backlash; Anti-backlash

(责编 文竹)