基于十字线结构光的铆钉孔定位 技术研究



毕超*,郝雪,周鹏,杨辉

北京航空精密机械研究所 精密制造技术航空科技重点实验室,北京 100076

摘 要:针对自动钻铆过程中的铆钉孔定位问题,应用工业级摄像机、镜头、十字线投射器和夹持工装等搭建了一套十字线 结构光视觉传感器,并通过建立其单目成像模型和内外部参数标定,确立了十字投影光条上的采样点的二维图像坐标与其 三维空间坐标之间的映射关系。在应用过程中,对于摄像机视野范围内的多个铆钉孔特征,提出了一种由被测铆钉孔孔心 的等效投影点的空间坐标而合成出孔心空间坐标的方法,从而完成被测铆钉孔的定位任务,并进行了试验验证。试验结果 表明,铆钉孔孔心坐标*X*_w、*Y*_w和*Z*_w的单次测量的极限误差均≤±0.06mm,因而该传感器在检测铆钉孔的位置方面所能达到的 重复性精度水平可以满足使用要求。

关键词:定位; 铆钉孔; 自动钻铆; 结构光视觉

中图分类号:TH74

文献标识码:A

在航空航天领域中,蒙皮是覆盖在飞机、火箭和导弹等 飞行器骨架结构之外的维形零件,用于保持机体的气动外 形,主要分布于机身、机翼、尾翼和整流罩等部位。在飞行 器的制造过程中,蒙皮类零件通常采用铆接方式进行装配, 其质量高低会对飞行器的气动特性和服役性能产生很大影 响^[1]。当前,随着机械装配与自动化技术的进步,基于工业 机器人的自动钻铆技术与系统,不仅能够克服人工钻铆方 式的效率低、一致性差和劳动强度高等缺点,而且降低了操 作难度和生产成本,因而得到了越来越广泛的应用。

在自动钻铆过程中,"插钉入孔"是其中的重要环节之一,即通过多功能末端执行器将铆钉钉杆准确插入到蒙皮上的铆钉孔中,而铆钉孔直径的极限偏差为0.1~0.2mm^[2]。 在实际装配现场,蒙皮本身及其定位夹具都存在着由制造、 变形等引起的形位误差,这些都会造成铆钉孔在自动钻铆 系统中的定位偏差,使得实际孔位与理论孔位之间难以建 立起精确的映射关系,导致铆钉的插入困难或失败^[3]。因 此,为了确保铆钉的顺利入孔,需要在插钉之前由相应的检 测模块获取到铆钉孔的实际位置,并反馈给控制系统,使末 端执行器运动到对应的空间方位,从而使铆钉对准相应的

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.05.010

铆钉孔以完成插钉入孔任务。

当前,针对铆钉孔的定位或位置参数检测问题,国内外 学者已经开展了相关研究工作。例如,美国 Electroimpact 公司与英国空客公司联合开发了一套机器人柔性装配系统 ONCE,其末端执行器上集成有具有铆钉孔定位功能的同 步视觉模块,用于确定和修正实际孔位与期望孔位之间的 偏差,以通过实时补偿来实现准确插钉。在国内,苏同标等 为检测铆钉孔的孔心位置而搭建出了一套孔位测量系统, 应用光电传感器和光栅尺同时发出的信号来检测铆钉孔边 缘点的位置信息,进而拟合出了孔心的坐标¹⁴,但其采用了 铆钉板运动而夹钉机械手固定的插钉方式,不适用于大型 飞机蒙皮类零件的自动铆接。谢松乐等提出了一种基于机 器视觉的铆接机送料装置定位方法,利用单目电荷耦合器 件(charge-coupled device, CCD)相机获取铆钉孔图像, 然后 通过图像预处理和质心法进行孔心坐标值的亚像素级提 取,所得结果能够满足铆接工艺要求^[5],但使用时需要将 CCD 相机固定在待铆接件的正上方,限制了其应用范围。 勾江洋等针对飞机蒙皮、骨架上的装配连接孔的快速、精确 检测需求,设计并开发了一套专用的在机视觉检测系统,通

收稿日期: 2020-10-26;退修日期: 2021-02-26;录用日期: 2021-03-03 基金项目:航空科学基金 (2018ZE43006)

*通信作者:Tel:18519777805 E-mail: 773721278@gg.com

引用格式: Bi Chao, Hao Xue, Zhou Peng, et al. Study on position inspection technology for rivet holes based on cross structured light[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(05): 72-78. 毕超, 郝雪, 周鹏, 等. 基于十字线结构光的铆钉孔定位技术研究[J]. 航空 科学技术, 2021, 32(05): 72-78. 过对连接孔图像的精确提取与定位实现了连接孔的非接触 式快速检测,重复性测量精度达到0.01mm^[6]。但整个系统 的体积和质量较大,且无法反馈蒙皮的三维轮廓信息,不便 于集成于机器人自动铆接系统中的末端执行器上。

为了实现蒙皮类零件上的铆钉孔定位,本文基于结构光 三维视觉原理,应用工业级摄像机、十字线投射器和夹持工 装等搭建了一套十字线结构光视觉传感器,并提出了一种由 被测铆钉孔孔心的等效投影点合成出孔心空间坐标的方法。 在该系统中,由十字线投射器将十字线结构光投射于被测蒙 皮表面并在其上形成受表面形貌调制的十字投影光条,而后 通过摄像机采集其视野范围内的、同时包含十字投影光条和 铆钉孔的二维图像,再经由光条中心线提取和系统标定等步 骤获取十字投影光条的位置与变化规律,并基于此解算得到 铆钉孔孔心的等效投影点,进而进行叠加运算而合成出铆钉 孔的孔心空间坐标,从而完成被测铆钉孔的定位任务。

1 传感器设计

蒙皮类零件的尺寸大而刚度小,在铆接过程中会产生 较大的变形量,因而无法同时保证蒙皮上的全部实际孔位 与理论孔位之间的精确映射关系,由此导致总体装配精度 较低^[7]。在自动钻铆过程中,要实现铆钉的插钉入孔,首先 要实现铆钉孔的定位,即获取铆钉孔的空间位置。这就需 要在多功能末端执行器上集成具有铆钉孔孔位检测功能的 传感器,从而通过对每个铆钉孔的实际位置进行测量而调 整末端执行器的相对位姿^[8]。在自动钻铆系统上辅助以先 进的测量与检测技术,可以极大地提高系统的柔性和铆接 质量、效率^[9]。在实际应用中,铆钉孔的位置参数可以由孔 心在蒙皮外表面上的三维空间坐标来表征。

为了实现孔位的实时测量补偿,本文基于结构光三维 视觉原理,应用工业级摄像机、镜头、十字线投射器和夹持 工装等搭建了一套十字线结构光视觉传感器,其硬件构成 如图1所示,从而为插钉环节提供视觉反馈信息。十字线 投射器用于标记出被测蒙皮表面上的两条空间曲线,从而 通过其二维图像解算得到蒙皮表面的三维轮廓信息。相比 于点结构光和一字线结构光,十字线结构光能够配合摄像 机采集到更多的三维几何信息,却不会过多地增加硬件成 本和实现难度^[10]。同时,摄像机具有较为开阔的视野,可以 同时观测到较多数量的铆钉孔,这样就可以减少摄像机的 移动而提高检测效率。

在图1中,工业级摄像机选用MER系列工业数字相机,该型相机采用全局曝光的ON MT9P031 CMOS 传感器,



Fig.1 Hardware configuration of the sensor

其传感器尺寸为1/2.5"(英寸),像元数目为2592×1944,像 元大小为2.2µm×2.2µm。为了配合摄像机的使用,选用了 Computar系列机器视觉镜头,该型镜头为百万像素定焦镜 头,焦距为8mm,工作距离为0.1m~∞,光圈范围为 F1.4~F16C。另外,十字线投射器选用HW520AC12-16GD 型激光投射器,其功率为12mW,可以发射出波长为520nm 的高稳定绿色激光,最小线宽可达0.4mm。

2 孔位测量原理

在本质上,由十字线投射器发出的十字线结构光为两 个相互垂直的光平面,投射到被测物体上后与物体表面相 交而形成具有一定宽度的、由物体表面调制的十字投影光 条,因而要实现该投影光条的精确定位,还需要提取出投影 光条的中心线,并以光条中心线作为十字线结构光的实际 投射位置^[11]。摄像机采集到叠加了此十字投影光条的飞机 蒙皮图像,并传输到上位机中进行处理,一方面要通过系统 标定解算出光条中心线的精确空间三维坐标,而后基于这 些坐标数据的拟合运算等获取十字投影光条的位置与变化 规律;另一方面还要识别和提取出摄像机视野范围内的铆 钉孔特征,并通过图像中的铆钉孔孔心与光条中心线之间 的相互位置关系,在满足精度要求的前提下进一步推断出 该铆钉孔的空间位置信息。

根据成像几何理论,本文以十字线投射器与摄像机的 坐标关系为基础建立了传感器的单目成像模型,如图2所 示,而后通过系统标定过程获得了模型中的未知量。根据 该模型可以将十字投影光条的二维图像坐标数据转换为其 实际的三维空间坐标数据。在图2中,*O*w-*X*w*Y*w*Z*w为世界 坐标系,*o*-*uv*为图像像素坐标系,*O*c为摄像机光心;*P*是三 维空间中投影光条上的某个采样点,位于光平面与被测表 面的交线(投影光条)上,而*p*为其在图像平面上的透视成 像点。设采样点*P*在*O*w-*X*w*Y*w*Z*w中的三维坐标为(*X*w,*Y*w, *Z*w)。而其成像点*p*在*o*-*uv*中的二维坐标为(*u*,*v*)。



确定模型中未知量的过程分为两个步骤,即摄像机标定 与光平面方程解算^[12]。摄像机标定就是获取摄像机内、外部 参数的过程,本文采用张正友标定法来完成摄像机标定,并应 用棋盘格标定板作为标定靶标^[13],标定过程如图3所示。虽 然通过摄像机标定可以得到采样点p的图像像素坐标(u,v)与 其世界坐标(X_w, Y_w, Z_w)之间的映射关系,但其中的约束条件 尚不充足,已知u、v无法求解出X_w、Y_w和Z_w。在这种情况下, 还需要解算出两个光平面_{π1}和_{π2}在世界坐标系中的表达式, 以此作为补充约束条件^[14]。光平面_{π1}和_{π2}的方程通过多幅有 十字线结构光叠加的标定板图像进行解算。

由于p同时位于世界坐标系内和光平面上,并被摄像 机观察到,因而可以将摄像机的标定结果与两个光平面的



图3 标定过程 Fig.3 Calibration procedure

方程联立起来,这样就可以建立起传感器的单目成像模型, 从而确立十字投影光条上的采样点的二维图像坐标与其三 维空间坐标之间的映射关系,如式(1)所示:

$$\rho \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{M}_1 \cdot \boldsymbol{M}_2 \cdot \begin{bmatrix} X_{\mathrm{W}} \\ Y_{\mathrm{W}} \\ Z_{\mathrm{W}} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(1)
$$\pi_1 : 2.250 \cdot X_{\mathrm{W}} - 2.417 \cdot Y_{\mathrm{W}} - Z_{\mathrm{W}} + 25.039 = 0$$

 $\left(\pi_{2}:1.744\cdot X_{W}+2.043\cdot Y_{W}-Z_{W}-144.939=0\right)$

式中: ρ 为比例因子; M_1 为摄像机的内部参数矩阵, M_2 为摄像机的外部参数矩阵:

M ₁ =	3801.37	0	1233.35	0]
	0	3789.34	972.83	0
	0	0	1	0
M ₂ =	-0.0009	0.9994	-0.0353	-47.7821]
	0.9999	0.0014	0.0141	-31.7057
	0.0141	-0.0353	-0.9993	251.4623
	0	0	0	1

在此基础上,对与十字投影光条中心线相对应的空间 曲线L₁和L₂进行二次多项式拟合,从而得到每条空间曲线 的参数方程,而后可以求取这两条空间曲线的交点坐标。

由于式(1)仅仅适用于位于十字投影光条上的采样点, 因而当被测铆钉孔的孔心恰好位于L₁和L₂的交点处时,就 可以根据L₁和L₂的参数方程求交点,从而计算出其孔心的 空间坐标。然而,在实际应用中,摄像机视野范围内的铆钉 孔孔心不一定都位于L₁和L₂的交点上,甚至不位于L₁或L₂ 上,此时无法直接根据式(1)进行计算。

因此,本文提出了一种由被测铆钉孔孔心的等效投影 点的空间坐标而合成出孔心空间坐标的方法。具体来说, 十字线结构光投射于飞机蒙皮上形成两个投影光条,分别 记为L₁和L₂,L₁位于光平面π₁内而L₂位于光平面π₂内,并且 被测铆钉孔的孔心H与投影光条交点O_s之间存在偏移。 该方法的具体步骤如下。

(1) 建立局部坐标系 O_s-XYZ

为了便于后续的推导与计算,首先建立局部坐标系 O_{s} -XYZ,如图4所示,其原点 O_{s} 位于 L_{1} 与 L_{2} 的交点处,Z轴 为两个光平面 π_{1} 和 π_{2} 之间的交线,X轴与光平面 π_{2} 垂直,而 Y轴与光平面 π_{1} 垂直。因此, $XO_{s}Z$ 平面即为光平面 π_{1} , $YO_{s}Z$ 平面即为光平面 $\pi_{2,0}$

(2) 确定孔心H的等效投影点H_x和H_y

在世界坐标系 O_w - $X_wY_wZ_w$ 中,两个投影光条 L_1 和 L_2 的 空间位置已知,对于铆钉孔的孔心H,过H作一平面与光平 面 π_2 平行,该平面与 L_1 相交于 H_x ,则 H_x 即为孔心H在 XO_sZ



图4 局部坐标系*O*_s−*XYZ*的建立 Fig.4 Establishment of the local coordinate system *O*_s−*XYZ*

平面上的等效投影点;再过*H*做另一平面与光平面π₁平行, 该平面与*L*₂相交于*H_y*,则*H_y*即为孔心*H*在*YO_sZ*平面上的 等效投影点。由于飞机蒙皮表面为光顺的空间连续曲面, 并且在局部小范围内可以通过一定的3D曲面方程进行解 析与重构,因而在误差允许范围内,*L*₁和*L*₂的参数方程可以 在一定程度上表征出蒙皮曲面的变化规律。

(3) 计算H_x和H_y的三维坐标

在摄像机所采集到的包含十字投影光条与铆钉孔的图像上进行类似操作,如图5所示。为了便于表达,三维空间中的投影光条分别用L₁和L₂来表示,而二者在摄像机成像平面上的像也用L₁和L₂来表示。在图4和图5中,o_s即为O_s的像点,而h为H的像点;Y轴在成像平面上映射为该图像中光条L₂在o_s处的切线q₂,X轴在成像平面上映射为光条L₁在o_s处的切线q₁。在图像中,过h作与切线q₂平行的直线,与L₁相交于点h₁,再过h作与切线q₁平行的直线,与L₂相交于点h₂。根据透视成像原理,h₁即为H_x的像点,而h₂即为H_y的像点。

因此,在图像像素坐标系 o-uv 中,通过识别和提取出 投影光条 L₁和 L₂的中心线坐标以及像点 h 的坐标,可以进 一步解算出交点 o_s的图像坐标以及切线 q₁和 q₂的方程,进 而基于这些数据计算出 h₁和 h₂的图像坐标。由于 h₁和 h₂分 别位于光条 L₁和 L₂上,因而根据式(1)可以解算得到与之对 应的 H_x和 H_y的三维坐标,分别表示为(X_{Hx}, Y_{Hx}, Z_{Hx})和(X_{Hy}, Y_{Hy}, Z_{Hy})。





(4) 合成孔心H的三维坐标

在局部坐标系 O_s -XYZ中,经过合理近似,可以将 H_x 和 H_y 分别视为H在XO_sZ平面和YO_sZ平面上的等效投影点, 因而由 H_x 的坐标(X_{HX}, Y_{HX}, Z_{HX})和 H_y 的坐标(X_{HY}, Y_{HY}, Z_{HY})可 以合成出铆钉孔孔心H的三维坐标(X_{HY}, Y_{HY}, Z_{H})为:

$$X_{H} = X_{HX}$$

$$Y_{H} = Y_{HY}$$

$$Z_{H} = \frac{Z_{HX} + Z_{HY}}{2}$$
(2)

最后,将(X_H, Y_H, Z_H)转化到O_w-X_wY_wZ_w中,即可得到最 终的铆钉孔孔位检测结果。然而,该方法在十字投影光条 附近具有较高的检测精度,而随着被测铆钉孔远离十字投 影光条,其定位误差会逐渐增大。当检测误差无法满足插 钉的精度要求时,可以根据检测结果移动末端执行器后再 次进行检测,通过这种"边检边动"的方式就可以实现每个 铆钉孔的准确定位。

3 试验过程与结果

为了验证所搭建的十字线结构光视觉传感器在铆钉孔 定位方面的可行性和有效性,本文选取一个具有一定表面 曲率的飞机蒙皮模拟样件作为被测物,应用该系统对分布 于其外表面上多个铆钉孔开展孔位参数的检测试验,试验 现场如图6所示。



Fig.6 Experimental scene

在试验过程中,由摄像机采集到的同时包含十字投影 光条和铆钉孔的图像如图7所示,通过图像处理分割出其 中的十字投影光条和铆钉孔特征,如图8所示,并进一步识 别并提取出光条中心线L₁、L₂与每个铆钉孔的孔心,分别如 图 9 和图 10 所示。







图 8 十字投影光条和铆钉孔的图像分割结果 Fig.8 Image segmentation result of cross projection strips and rivet holes



图 9 光条中心线的识别和提取 Fig.9 Identification and extraction of the center lines of projection strips



图 10 铆钉孔孔心的识别和提取

Fig.10 Identification and extraction of the hole centers of rivet holes

首先,根据单目成像模型、参数标定结果和本文所提出 的方法,对模拟样件上的1号铆钉孔的孔心三维坐标连续 进行了10次重复性测量,以验证系统的重复性检测精度, 试验结果见表1。

	表1	1号铆钉孔的试验结果
Table 1	Exp	erimental results of the 1 st hole

计心应旦	孔心三维坐标				
瓜验厅亏	$X_{\rm W}/{ m mm}$	$Y_{\rm W}/{ m mm}$	$Z_{\rm W}/{ m mm}$		
1	-12.722	55.512	4.989		
2	-12.725	55.526	4.971		
3	-12.743	55.496	4.956		
4	-12.757	55.504	4.961		
5	-12.748	55.555	4.952		
6	-12.765	55.523	4.983		
7	-12.759	55.538	4.946		
8	-12.717	55.547	4.935		
9	-12.739	55.532	4.964		
10	-12.754	55.518	4.956		

从表1中可以看出,对于该铆钉孔来说,X_w、Y_w和Z_w的 测量结果的平均值分别为-12.743mm、55.525mm和 4.961mm,标准差分别为0.017mm、0.019mm和0.017mm,则 单次测量的极限误差(置信系数取3)分别为±0.051mm、 ±0.057mm和±0.051mm。根据机器人自动铆接系统对于插 钉姿态调整的需求,该系统在检测铆钉孔的位置方面所能 达到的重复性精度水平可以满足使用要求。

然后,对摄像机视野范围内的13个铆钉孔的孔心三维 坐标逐一进行检测,结果见表2。

从表2中可以看出,本文所设计和搭建的十字线结构光 视觉传感器,能够很好地适应铆钉孔的外形特征(浅圆柱通

表2 13个铆钉孔的试验结果 Table 2 Experimental results of thirteen holes

御灯了皮里	孔心三维坐标			
铆钉化疗亏	X _w /mm	Y _w /mm	Z _w /mm	
1	-12.749	55.523	4.973	
2	-13.470	7.294	5.903	
3	-14.451	102.357	-3.376	
4	12.452	31.433	8.523	
5	12.029	80.004	3.840	
6	37.164	6.485	8.765	
7	36.567	104.475	-0.134	
8	37.688	56.197	7.733	
9	62.036	81.183	3.909	
10	62.400	31.107	8.332	
11	85.358	106.059	-2.331	
12	86.062	5.279	5.987	
13	86.197	56.331	4.865	

孔)和尺度大小(*ϕ*2~10mm),可以同时实现多个铆钉孔的定 位检测,这样就能够减少机器人的移动而提高检测效率。

因此,该检测系统是对飞机蒙皮铆钉孔的方位检测难 题而开展的一次积极探索,可以为实现蒙皮铆接过程中的 在线、实时伺服插钉提供一项检测技术支撑。该项技术采 用非接触式的检测手段获取工业相机视野范围内的全部铆 钉孔的孔心坐标,而且传感器具有体积小、重量轻和成本低 等优点,适于作为前端传感器集成于自动铆接系统的末端 执行器上,在铆钉插入前将铆钉孔的空间位置信息反馈给 控制系统,从而为蒙皮类零件、大型骨架、壁板和机身结构 件等在自动铆接过程中的插钉入孔环节提供"参考"。

4 结论

为了实现蒙皮上铆钉孔特征的空间位置检测,本文基 于结构光三维视觉原理,搭建出了一套十字线结构光视觉 传感器,可以将十字投影光条上的采样点的二维图像坐标 转化为相应的三维空间坐标。在应用过程中,对于摄像机 视野范围内的多个铆钉孔特征,提出了应用孔心的两个等 效投影点的空间坐标而合成出其空间坐标的方法,从而完 成被测铆钉孔的定位任务。应用该传感器对飞机蒙皮模拟 样件上的铆钉孔坐标(X_w,Y_w,Z_w)进行测量试验,并分析系 统的重复性测量精度,各个坐标分量的单次测量极限误差 均<±0.06mm,而且能够很好地适应铆钉孔的外形特征和尺 度大小,可以同时实现多个铆钉孔的定位检测,从而验证了 该传感器的可行性及有效性。

参考文献

 [1] 董一巍,李晓林,赵奇.大型飞机研制中的若干数字化智能装 配技术[J]. 航空制造技术,2016(1/2):58-63.

Dong Yiwei, Li Xiaolin, Zhao Qi. Approach to the intelligent digital assembly process for large aircraft and its related key technologies [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016 (1/2): 58-63. (in Chinese)

- [2] 高明辉,张杨,张少擎,等.工业机器人自动钻铆集成控制技术[J]. 航空制造技术,2013(20):74-76.
 Gao Minghui, Zhang Yang, Zhang Shaoqing, et al. Integrated control technology of automated fastening with industry robot [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(20): 74-76. (in Chinese)
- [3] 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. (in Chinese)

- [4] 苏同标. 基于孔位检测的自动钻铆系统插钉技术的研究[D]. 沈阳:东北大学,2014.
 Su Tongbiao. Automatic drilling and riveting system sprigging technology research based on hole location detection [D].
 Shenyang: Northeastern University, 2014. (in Chinese)
- [5] 谢松乐,谌永祥,游秋香. 铆接机自动送料装置视觉定位系统 设计[J]. 机械设计与制造,2018(11):131-134.
 Xie Songle, Chen Yongxiang, You Qiuxiang. Design of visual positioning system for automatic feeding device of riveting machine [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(11): 131-134. (in Chinese)
- [6] 勾江洋,陈雪梅,叶楠,等.飞机零部件连接孔在机视觉检测 系统开发[J]. 航空制造技术,2018,61(5):37-43.
 Gou Jiangyang, Chen Xuemei, Ye Nan, et al. Development of on-machine vision inspection system for connection holes on aircraft parts [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(5): 37-43. (in Chinese)
- [7] Tian Wei, Zhou Weixue, Zhou Wei, et al. Auto-normalization algorithm for robotic precision drilling system in aircraft component assembly[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(2): 495-500.
- [8] 李鹏,薛应举.连接板厚度对沉头铆钉连接强度的影响分析
 [J]. 航空科学技术,2019,30(8):35-40.
 Li Peng, Xue Yingju. Analysis of the influence of connecting plate

thickness on joint strength of countersunk rivet [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(8): 35-40. (in Chinese)

- [9] 薛其伟,田威,石章虎,等.基于激光跟踪仪的自动钻铆系统 坐标系建立技术[J]. 航空精密制造技术,2019,55(1):10-14. Xue Qiwei, Tian Wei, Shi Zhanghu, et al. Establishment method of coordinate system based on laser tracker for automatic drilling and riveting system [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2019, 55(1): 10-14. (in Chinese)
- [10] Zhang Liguo, Sun Jianguo, Yin Guisheng, et al. A cross structured light sensor and stripe segmentation method for visual tracking of a wall climbing robot[J]. Sensors, 2015,

15: 13725-13751. robot automatic drilling and riveting system [J]. Chinese Journal [11] 周京博,李玥华,秦志英,等.基于参考靶标的线结构光传感 of Scientific Instruments, 2020, 41(6): 66-75. (in Chinese) (责任编辑 余培红) 器标定[J]. 光学学报, 2019, 39(4):0412005. Zhou Jingbo, Li Yuehua, Qin Zhiying, et al. Calibration of line structured light sensor based on reference target [J]. Acta 作者简介 Optica Sinica, 2019, 39(4): 0412005. (in Chinese) 毕超(1987-)男,硕士,高级工程师。主要研究方向:精密 [12] 毕超,郝雪.基于结构光视觉的钻孔点位法矢检测技术研究 测试技术及仪器。 [J]. 航天制造技术,2020,26(18):2456-2465. Tel: 18519777805 Bi Chao, Hao Xue. Study on normal vector inspection at drilling E-mail: 773721278@gg.com position based on structured light vision [J]. Aerospace 郝雪(1991-)女,硕士,工程师。主要研究方向:精密测量 Manufacturing Technology, 2020, 26(18): 2456-2465. (in Chinese) 技术、机器视觉测量与算法。 [13] 冯志刚,李泷杲,熊天辰,等.工业机器人视觉定位系统的实 E-mail: 1548525747@qq.com 现[J]. 航空科学技术, 2018, 29(6): 48-53. 周鹏(1996-)男,硕士研究生。主要研究方向:机器视觉测 量与算法。 Feng Zhigang, Li Shuanggao, Xiong Tianchen, et al. Implementation of visual location system for industrial robot [J]. Aeronautical E-mail: 1142285223@qq.com Science & Technology, 2018, 29(6): 48-53. (in Chinese) 杨辉(1967-)男,博士,研究员。主要研究方向:超精密加 工机理、超精密加工工艺、超精密加工设备基础元部件及其 [14] 韦溟,张丽艳. 机器人自动钻铆系统的现场快速自定位方法 [J]. 仪器仪表学报,2020,41(6):66-75. 集成技术。 Wei Ming, Zhang Liyan. Fast on-site self-positioning method for E-mail: yanghui303@gmail.com

Study on Position Inspection Technology for Rivet Holes Based on Cross Structured Light

Bi Chao*, Hao Xue, Zhou Peng, Yang Hui

Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Precision Manufacturing Technology, Beijing Precision Engineering Institute for Aircraft Industry, Beijing 100076, China

Abstract: Deal with the position inspection difficulties of rivet holes in the procedure of automatic drilling and riveting, a vision sensor based on cross structured light was built up by industrial CCD, lens, cross semiconductor laser and fixture, etc.. The mapping relationship between the 2D image coordinates and the 3D spatial coordinates of the sample points on the cross projection strips were determined by establishment of the monocular imaging model of the sensor and calibration of its internal and external parameters. During the application, for the rivet holes within the field of view of the industrial CCD, a 3D coordinates composition method of their centers by the 3D coordinates of their equivalent projection points was proposed in the paper, which could be used to realize the position inspection assignment of the measured rivet hole. As the experiment results showes, the limit errors of single measurement of spatial coordinates of the rivet holes, i.e. X_w , Y_w and Z_w , are all smaller than ±0.06mm. Therefore, the repeatability accuracy in position inspection for rivet holes of the sensor can meet the applying requirements.

Key Words: position inspection; rivet holes; automatic drilling and riveting; structured light vision

Received: 2020-10-26; Revised: 2021-02-26; Accepted: 2021-03-03 Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2018ZE43006) *Corresponding author.Tel. :18519777805 E-mail: 773721278@qq.com