

# 一种面向自动钻铆的机器人自动送钉系统\*

李宇飞, 田 威, 李 波, 崔海华

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**[摘要]** 现有的自动钻铆系统中90%的故障来源于送钉系统中的卡钉。为了进一步提高自动钻铆送钉系统的精度,降低故障率,提出一种基于视觉伺服的新型机器人送钉系统。该系统通过在机器人末端安装工业相机和铆钉抓取装置,以机器视觉的方式对铆钉进行质量检测 and 定位,并引导机器人对特定种类铆钉进行抓取和投放,从而保证了送钉质量。该系统重1.1t,占地面积1.57m<sup>2</sup>,有效降低了自动钻铆装备中送钉系统的面积与重量。试验表明,机器人自动送钉系统对铆钉的检测精度达到0.1mm,在1min内抓送6枚以上铆钉,满足自动钻铆的性能要求。

**关键词:** 工业机器人; 飞机装配; 自动钻铆; 送钉系统; 机器视觉

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.10.044



李宇飞

博士研究生,主要研究方向为工业机器人动力学建模和鲁棒性控制。

随着我国大型客机和新型战斗机的研制,飞机制造在高质量、高效率、长寿命等方面有了更高的要求<sup>[1]</sup>,飞机装配占整体制造周期的

40%~50%,其中铆接占30%<sup>[2]</sup>。相关统计显示,在飞机疲劳失效事故中,70%的起因在其连接部位,其中80%的疲劳裂纹产生于连接孔处<sup>[3]</sup>。由此可见,高效率、高质量的铆接对提高飞机装配的质量和效率均有重要意义。目前,我国钻铆作业仍以手工为主,需要经过钻孔、去毛刺、铆接等多个工序,而且由于工人水平参差不齐,钻铆质量一致性较差。对于新一代战机,人工钻铆更是难以满足连接孔的位置精度和法向精度。因此,自动钻铆技术已成为当今航空制造业的必然趋势。自动送钉系统是自动钻铆系统的关键部分,在现有的自动钻铆系统中,90%的故障是由于送钉系统的卡钉造成的<sup>[4]</sup>。因此,一套可靠的自动送钉系统能够显著改善自动钻铆系统的效率。

一套完整的送钉系统需要完成多种规格铆钉的定向排列、存储、选

型、分离、投送等功能,最终将符合要求的单个铆钉输送给钻铆末端<sup>[5]</sup>。国外的自动钻铆送钉系统已经较为成熟,如意大利BC公司的自动钻铆系统配有能够自动识别和高效传送超过100种铆钉的自动筛选装置,该系统还配有专用的管理软件对不同规格的铆钉进行统一管理<sup>[6]</sup>。美国通用电气机械公司(GEMCOR)的G400和G900自动钻铆机配有可同时提供4种铆钉的送料系统,该系统通过上下移动的插板将倒梯形料斗中的铆钉筛选到特定型槽内并从料仓出口进入刚性轨道传送至另一端的送钉器处实现自动送料<sup>[7]</sup>。美国EI公司对自动送钉系统也有较为深入的研究<sup>[8-11]</sup>,该公司的E5000紧固件自动输送系统能够输送多种无头铆钉<sup>[12]</sup>,但其送钉装置使用卷管定向存储铆钉,需要配合填料站才能组成完整的送钉系统。法国AHG紧

\* 基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2018605C010);“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项(2018ZX04014001-010)。

固件公司与达索公司联合研发的送钉系统可分选出不合格铆钉,降低了送钉系统故障率<sup>[4]</sup>。国内对于送钉系统的研究相对较少,浙江大学提出一种抽屉式自动送钉装置<sup>[13]</sup>,其特点在于在抽屉内安放有贮存铆钉的软管,软管中铆钉定向排列,在需要输送铆钉时,将软管中的铆钉依次通过压缩空气吹送至自动钻铆末端的插钉装置,并由插钉装置插入连接孔进行铆接。南京航空航天大学构建了一套通过振动盘进行填料并支持近百种规格铆钉的选送钉系统<sup>[12]</sup>,这套系统包括固定料站和移动料站,能够实现钻铆过程和铆钉筛选填料的并行运作。以上文献中提出的现有送钉系统都需要多个振动盘对铆钉进行定向排列或输送,成本高、系统复杂,并且在单个铆钉分离时,由于铆钉长度误差,容易造成分离装置卡顿,必须经过人工排查才能解除故障,影响了送钉效率。因此,急需一种整合振动盘与定向储钉装置,并在送钉前对铆钉质量进行筛查的自动钻铆送钉系统。

本文提出了一种基于工业机器人和视觉伺服技术的新型送钉系统,通过视觉对铆钉进行检测并引导机器人进行抓取。该系统对机器人进行了基于参数辨识的精度补偿,使用Zhang<sup>[14]</sup>的棋盘格法和冯春等<sup>[15]</sup>的一步法对机器人进行手眼标定,并对铆钉的视觉检测精度和抓钉效率进行了试验验证。

## 送钉系统设计

本系统设计目标:在每轮作业过程中,为自动钻铆末端提供33种,总共3360颗铆钉,其直径3~5mm,长度8~19mm,送钉节拍6颗/min。针对铆钉种类和数量多、送钉速度快的需求,本送钉系统通过立体储钉仓库配合工业机器人对铆钉进行抓取和投送。系统由1套立体储钉仓库、2套抓钉部件、1套送钉部件、1台工

业机器人以及视觉抓钉末端组成,系统整体结构如图1所示,其中左侧对称位置的抓钉部件已被隐藏。

### 1 立体储钉仓库

立体储钉仓库主要由多个储钉盒、抓钉盘、下料装置、1套取料装置和2个移送机械手组成。立体储钉仓库结构如图2所示。

在收到铆钉的型号及数量需求后,立体仓库打开对应货位下料装置中转角气缸携带的挡板,将储钉盒中的铆钉通过滑道放入抓钉盘中。之后,取料装置将抓钉盘从货位中取出,并移动至空闲工位侧的移送机械手下方。移送机械手负责将抓钉盘从取料装置上转移至抓钉工位中等待抓取。

### 2 抓钉部件

抓钉部件由接料托盘、振动装置和升降气缸组成,结构如图3所示。

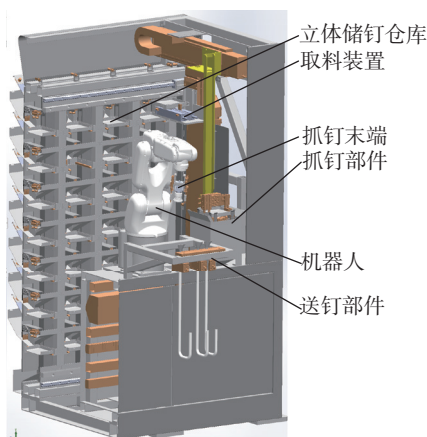


图1 送钉系统整体结构

Fig.1 Overall structure of rivet feeding system

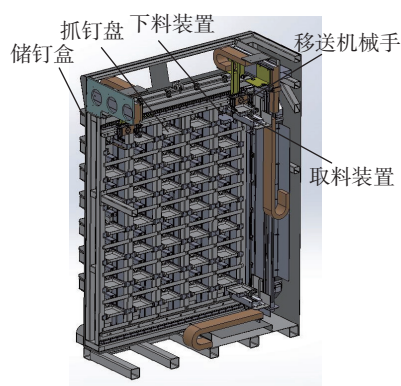


图2 立体储钉仓库结构

Fig.2 Stereoscopic rivet storage warehouse

当移送机械手携抓钉盘到达抓钉部件上方后,升降气缸会将接料托盘顶升,托住抓钉盘,并通过底部电磁铁固定。此时移送机械手的夹爪松开,并回退至立体储钉仓库中,等待下次转移。为了保证抓取效率,消除送料流程造成的抓取等待时间,共设置两套抓取部件,分别置于机器人两侧。

在铆钉从储钉盒进入抓钉盘的过程中,会有部分铆钉处于竖立姿态,造成检测和抓取困难。同时,部分金属杂物也会随铆钉一同进入抓钉盘中,影响铆钉的检测。为此,在抓钉部件中设置了振动装置,可通过金属弹片振动抓钉盘,使盘中竖立的铆钉平躺。同时,移送机械手可以通过旋转气缸翻转抓钉盘,使异物经由抓钉部件下方的漏斗排出,如图4所示。

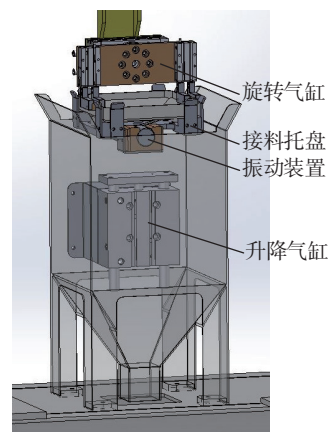


图3 抓钉部件结构

Fig.3 Rivet grasping parts

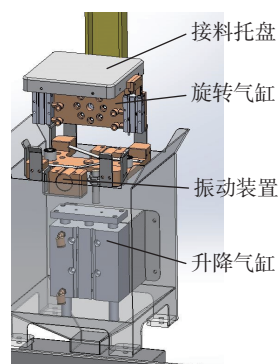


图4 抓钉部件清料动作

Fig.4 Rivet grasping parts cleaning action

### 3 送钉部件

现有的自动钻铆末端均是通过气管接收铆钉并送至插钉装置后进行安装与铆接的,对于不同直径和长度的铆钉,气管的管径也会随之变化。本套系统的送钉部件由导向漏斗、吹钉气缸和送钉管组成,如图5所示。送钉部件共有5个送钉工位,支持5种不同规格送钉管的安装,图5中仅展示了3个工位的安装情况。机器人抓钉末端将铆钉竖直放置在导向漏斗上,铆钉沿漏斗滑入吹钉气缸。气缸通过高压气体将铆钉经由送钉管吹送至自动钻铆末端,完成送钉流程。

### 4 工业机器人和视觉抓钉末端

自动送钉系统使用埃斯顿 ER6-730MINI 机器人,负载 6kg。视觉抓钉末端采用德国映美精 33GX264e, 500 万像素黑白工业相机,搭配 Kowa LM6HC 广角镜头。视觉抓钉末端结构与装配效果如图6所示。

由于铆钉型号较多且在抓钉盘中分布密集,使用支点开闭型气爪会导致气爪闭合时抓取多颗铆钉并且

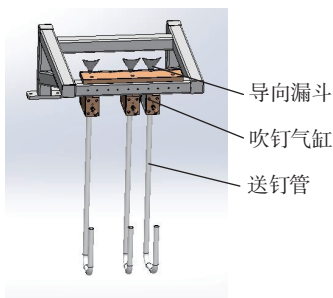


图5 送钉部件结构  
Fig.5 Rivet feeding parts

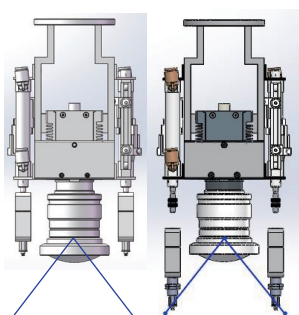


图6 视觉抓钉末端结构  
Fig.6 Visual grasping end effector

周围区域铆钉产生大幅度移动和重叠,影响第2次抓取。为保证每次只抓取一颗铆钉并且不影响盘中其他铆钉,在视觉抓钉末端使用真空吸盘。同时,为保证机器人在抓取及投放时不受姿态约束,在相机两侧各安装一个真空吸盘。但在拍照采样时,相机的视场角为 $72^\circ$ ,两侧的真空吸盘会与相机视场发生干涉,如图6所示。为此,在真空吸盘上方安装了沿Z轴方向的气缸,用于提起真空吸盘,避免干涉。

## 关键技术

### 1 机器人精度补偿

由于铆钉直径最小只有3mm,抓钉过程对机器人的绝对定位精度要求必须达到0.5mm以内,而机器人出厂时绝对定位精度大于1mm,因此需要对工业机器人进行精度补偿。本文使用文献[1]方法中的API Radian 激光跟踪仪与 Spatial Analyzer (SA) 软件对机器人进行采样和精度补偿,如图7所示。

首先,使用文献[16]中的方法在SA中建立机器人的基坐标系,并分别测出两个吸盘中心,即机器人工具中心点(Tool Center Point, TCP)在基坐标系下的坐标,并在机器人控制系统中为两个吸盘分别建立工具坐标系,留作手眼标定试验中使用。由于机器人需要在两个工位进行铆钉抓取,因此选择以机器人基坐标系Z轴为轴线,距离机器人200~500mm,与机器人工作姿态等高的 $220^\circ$ 空心柱状区域为工作空间,并在该空间内随机生成500个采样点,如图8所示。使机器人按程序依次移动至每个点位,用激光跟踪仪测量机器人TCP位置与实际点位坐标之间的误差,并由此计算出机器人的运动学参数误差,计算结果如表1所示。

将运动学误差补偿到机器人控制系统内之后,重新生成500个采样点对机器人补偿后的精度进行测试,

其补偿前和补偿后误差的范围、平均值和标准差如表2所示。可以看出,机器人X、Y、Z3个方向以及综合定位误差的范围在补偿后都有了明显的缩小,虽然Z轴和综合误差的平均值依然有0.13和0.17的正偏置,但相较于精度补偿前已有了明显提高。此外,精度补偿也有效缩小了机器人定位误差的标准差,这使得3个方向的偏置可以通过额外补偿系统误差的方法再次降低。

至此,精度补偿后机器人的绝对定位误差由最大1.16mm降低到了0.5mm以下,取得了较为理想的效果,使得之后的手眼标定试验和铆钉的抓取在工业机器人精度方面有了保障。

### 2 视觉抓钉末端手眼标定

机器人的手眼标定是机器人视觉伺服系统中的重要环节,手眼标定的精度决定了机器人的TCP点能否达到相机视场中的目标位置,即在机器人自动送钉系统中,真空吸盘能否达到目标铆钉的上方进行抓取。

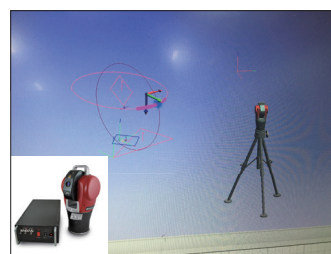


图7 API Radian激光跟踪仪与SA界面  
Fig.7 API Radian laser tracker and SA interface

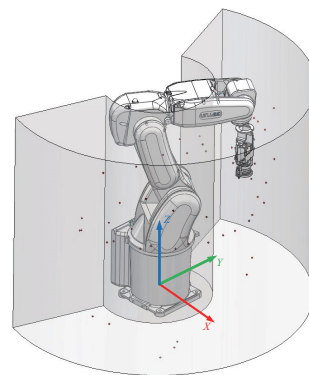


图8 机器人工作空间与采样点示意图  
Fig.8 Robot workspace and sampling point

手眼标定分为相机标定和手眼关系标定两部分。由于相机在采集图像时是依据小孔成像原理,用感光元件以像素为单位记录经镜头射入相机内的实物图像,因此需要将像素坐标转化为以 mm 为单位的物理坐标,这个过程需要通过相机标定来实现。此外,相机标定还可以测算出光线经由相机镜头后投射在感光元件上所产生的畸变。相机内坐标的转化与畸变的矫正最终通过矩阵与畸变系数的形式表述,这个矩阵称为相机的内参矩阵。此外,相机自身在世界中的位置也可以通过标定来获取,最终得到的坐标转化矩阵为相机的外部参数。

在相机标定完成后,才能进行下一步的手眼标定。手眼关系标定的主要目的是求解  $AX=XB$  这个齐次矩阵方程,其中  $A$  表示机器人末端在一次运动后相机坐标系下的相对运动, $B$  表示同一次运动中机器人末端坐标系的相对运动, $X$  就是待求解的相机坐标系到末端坐标系的转换关系。通过移动机器人多次,便可得到多组  $A$  和  $B$ ,并通过最小二乘法求解出最优的手眼关系矩阵作为手眼标定的结果。

本文使用文献 [14] 的棋盘格九点标定法,通过对标准棋盘格图像在不同角度多次采样进行相机标定,手眼关系标定采用文献 [15] 的一步法,在进行相机标定时一同进行手眼关系标定所需数据的采集。由于视觉抓钉末端上有 2 个吸盘,因此一共有 2 组手眼关系。因为在精度补偿试验中已经建立两个吸盘的工具坐标系,所以只需要进行一次采样流程即可。

首先,在机器人抓钉时的采样点对相机的焦距进行调整,使棋盘格黑白块界限清晰,并调整相机光圈使图像的明暗度适中。之后,使用示教机控制机器人,使其末端向四周随机运动,同时调整末端的姿态确保相机能

够完整地看到标定板。本次试验控制机器人从不同的高度运动至 9 个不同的点位进行测量,在相机采集图像的同时分别记录下机器人在两个工具坐标系下的坐标,用于手眼关系矩阵的计算。

由于视觉抓钉末端选用了 6mm 广角镜头,图像外围桶形畸变较为严重,需要先计算出相机的内参与畸变系数,并依据畸变系数对图像进行畸变修正,之后才能进行手眼关系的解算。最终,相机的标定结果如表 3 所

示,表中数据物理含义见文献 [14]。

得到畸变系数后,对采样图片进行畸变修正,并计算出 2 组手眼关系矩阵,计算结果如表 4 所示。

### 3 铆钉检测与定位

本文图像处理和机器人控制程序都是在 Visual Studio 2015 平台上使用 C++ 语言编写的,并调用了 Open CV 3.4.1 的有关函数对图像进行处理。由于铆钉的材质为金属,在相机采样时,通过调节光圈,可让铆钉与下方的吸光绒布呈现较为明显

表1 运动学参数误差

Table 1 Kinematics parameter error

序号	关节转角误差 $\Delta\theta/(\circ)$	关节偏置误差 $\Delta d/\text{mm}$	连杆长度误差 $\Delta a/\text{mm}$	连杆扭角误差 $\Delta\alpha/(\circ)$	关节偏角误差 $\Delta\beta/(\circ)$
1	-0.00039	-0.5139	1.15378	-0.00036	0.00035
2	0.000571	0.642598	0.288417	0.000316	0
3	0.000991	0.642598	0.148256	0.001442	0
4	0.000618	0.647962	-0.32731	-0.00127	0
5	0.000191	-0.37014	0.874866	-0.00023	0
6	-0.00655	2.208221	1.491083	-0.00055	0

表2 精度补偿试验结果

Table 2 Experimental result of precision compensation

mm

方向	补偿前			补偿后		
	范围	平均值	标准差	范围	平均值	标准差
X轴	[-0.7836, 0.218]	-0.3519	0.2185	[-0.2668, 0.1307]	-0.0584	0.0511
Y轴	[-0.6406, 0.2329]	-0.2000	0.1743	[-0.1563, 0.2327]	0.0293	0.0630
Z轴	[-0.3014, 0.9971]	0.2746	0.2497	[-0.1162, 0.3913]	0.1323	0.0715
总误差	[0.0911, 1.1634]	0.5663	0.2402	[0.0387, 0.4104]	0.1728	0.0600

表3 相机标定结果

Table 3 Camera calibration results

相机内参矩阵		畸变系数	
$\begin{pmatrix} 2669.68 & 0 & 649.68 \\ 0 & 2672.23 & 499.38 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		径向	$k_1=-0.04177$ $k_2=0.46163$ $k_3=0.00412$
		切向	$p_1=0.00198$ $p_2=0$

表4 手眼关系矩阵

Table 4 Hand-eye matrix

左吸盘				右吸盘			
$\begin{pmatrix} 0.983 & 0.075 & -0.064 & -42.693 \\ -0.07 & 0.994 & 0.081 & -13.165 \\ 0.07 & -0.076 & 0.995 & 41.815 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$				$\begin{pmatrix} 0.982 & 0.173 & 0.079 & -79.715 \\ -0.16 & 0.977 & -0.138 & -49.22 \\ -0.1 & -0.123 & 0.987 & 42.53 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$			

的边界,如图9所示。

首先,需要通过滤波将图像中的噪点去除,并对图像进行二值化,再依照轮廓的面积、长宽比对所有轮廓进行筛选,仅保留单个铆钉的轮廓。接着对这些铆钉轮廓进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA),得到铆钉轮廓的中心点和主方向,则轮廓的中心点即为视觉抓钉末端吸盘的抓取点。由于所有铆钉的长度均大于其直径,因此,PCA得到的主方向一定为铆钉的长度方向,副方向一定为铆钉的直径方向。在检测铆钉长度时,只需要在所有轮廓点中寻找连线经过铆钉轮廓中心点,且与主方向平行的两点,计算该两点之间的距离,即可得到铆钉的长度;在检测铆钉直径时,寻找连线经过中心点,且与副方向平行的两点即可。此外,铆钉在投放过程中要求沉头向上,因此,还需要将主方向的转角作为抓取时视觉抓钉末端需要旋转的角度。最终,铆钉的检测结果如图10所示。检测出的铆钉实际尺寸为 $5\text{mm} \times 15\text{mm}$ ,可见,视觉对直径

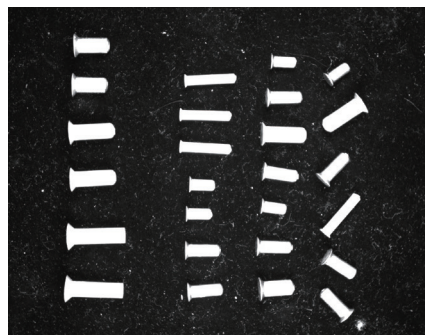


图9 铆钉原始采样图  
Fig.9 Rivet sample

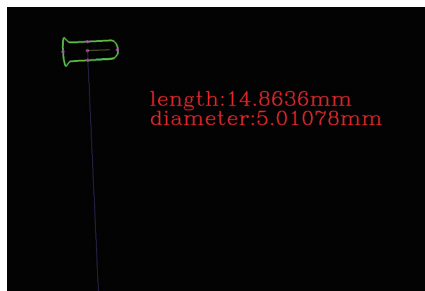


图10 铆钉处理结果图  
Fig.10 Result of rivet processing

检测的精度达到了 $0.01\text{mm}$ ,对长度检测的精度为 $0.13\text{mm}$ ,满足送钉系统的精度要求。

### 试验结果

送钉系统流程如图11所示。在实际自动送钉过程中,自动钻铆系统的上位机发送给自动送钉系统需要输送的铆钉型号以及数量。由于本套送钉系统没有连接自动钻铆系统,因此,试验时需要手动添加送钉任务。本次试验中共测试了 $3\text{mm} \times 16\text{mm}$ 、 $3.5\text{mm} \times 8\text{mm}$ 、 $4\text{mm} \times 10\text{mm}$ 、 $5\text{mm} \times 18\text{mm}$ 4种规格的铆钉,其中 $3\text{mm} \times 16\text{mm}$ 和 $5\text{mm} \times 18\text{mm}$ 的铆钉为系统设计目标中尺寸差异最大的两种,因此下文中着重展示对这两种规格铆钉的抓取与投送。

系统初始状况如图12所示,机

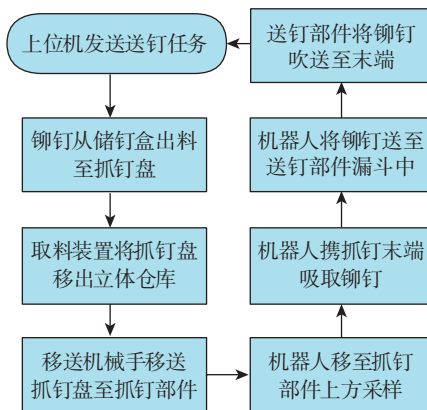
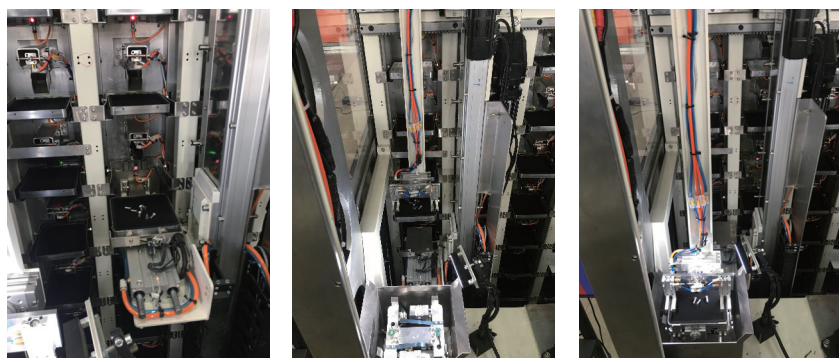


图11 送钉系统流程图  
Fig.11 Flow chart of rivet feeding system

器人在系统启动时位于初始点,在得到 $5\text{mm} \times 18\text{mm}$ 的铆钉输送命令后,装载 $5\text{mm} \times 18\text{mm}$ 铆钉的抓钉盘被取料装置从立体仓库中取出,如图13(a)所示,并通过移送机械手转移至A工位中,如图13(b)、(c)所示。之后,机器人移动至A工位的上方拍照采样,并成功抓取抓钉盘中的一颗铆钉,如图14(a)所示。最后,机器人将铆钉成功投入送料漏斗中完成送钉,如图14(b)所示。在机器人抓取 $5\text{mm} \times 18\text{mm}$ 铆钉的同时,立体仓库将空的抓钉盘从B抓钉工位取走并放回到 $5\text{mm} \times 18\text{mm}$ 铆钉的货位中,又将盛有 $3\text{mm} \times 16\text{mm}$ 铆钉的抓钉盘从立体仓库移送至B抓钉工位中。当A工位中 $5\text{mm} \times 18\text{mm}$ 的铆钉被全部抓送后,机器人移动至B抓钉工位采样点拍照,并成功抓取一颗 $3\text{mm} \times 16\text{mm}$ 铆钉投入送钉管中,

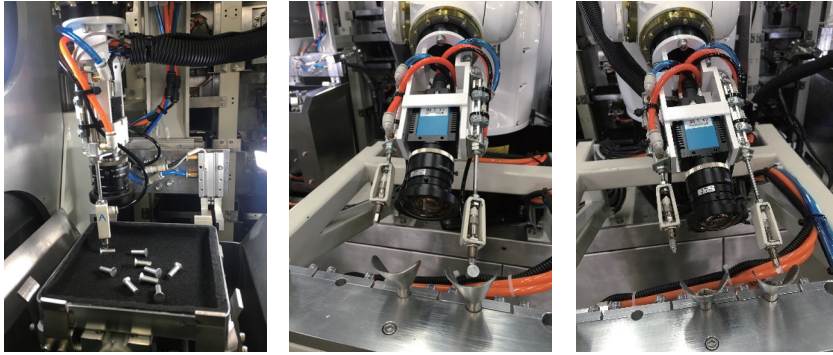


图12 送钉系统初始姿态  
Fig.12 System initial pose of rivet feeding system



(a) 抓钉盘被取出 (b) 移送机械手夹紧抓钉盘 (c) 抓钉盘从移送机械臂到A工位

图13 铆钉出料过程  
Fig.13 Rivet delivery process



(a) 末端抓取 5mm × 18mm 铆钉 (b) 投放 5mm × 18mm 铆钉 (c) 投放 3mm × 16mm 铆钉

图14 送钉流程试验结果

Fig.14 Results of rivet feeding test

如图 14 (c) 所示。在整个送钉流程中时,机器人的绝对运动速度设定为 300mm/s,点动速度设置为  $V/50$ 。系统连续抓送 7 颗 5mm × 18mm 铆钉和 10 颗 3mm × 16mm 铆钉的总用时为 160s,平均送钉时间为 9.4s/颗,满足自动钻铆系统 6 颗/min 的送钉性能要求。此外,系统对 3.5mm × 8mm、4mm × 10mm 两种规格的铆钉也均抓送成功。

## 结论

(1) 本文提出一种将工业机器人和视觉伺服技术相结合的新型自动钻铆送钉系统,由立体储钉仓库、抓钉部件、送钉部件、工业机器人和视觉抓钉末端组成。在对机器人进行精度补偿,并对视觉抓钉末端进行手眼标定后,通过试验验证了该系统的性能。

(2) 该系统将铆钉直接由散乱状态经机器人抓取投入送钉管中,并在投送前对铆钉进行质量检测,优化了 EI、宝捷等公司现有送钉系统依赖于振动盘的铆钉排列方法,也解决了由于长度误差导致的分离卡板卡顿的问题,降低了送钉系统的故障率和返工率,提高了自动钻铆效率。

(3) 由于自动钻铆系统的末端在加工过程中存在振动,还需要对该送钉系统在实际使用中进行进一步验证。此外,送钉系统还需要将铆钉

数据融入自动钻铆系统的数据库中,以方便自动钻铆系统对资源的统一规划管理。

## 参考文献

[1] 曾远帆. 基于空间相似性的工业机器人定位精度补偿技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

ZENG Yuanfan. Positional error compensation technology for industrial robot based on spatial similarity[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[2] 费军. 自动钻铆技术发展现状与应用分析[J]. 航空制造技术, 2005, 48(6): 42-44.

FEI Jun. Development status and application analysis of automatic drilling and riveting technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(6): 42-44.

[3] 许国康. 大型飞机自动化装配技术[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 734-740.

XU Guokang. Automated assembly technology for large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 734-740.

[4] 航空制造工程编写组. 自动钻铆机的新型供钉系统[J]. 航空制造工程, 1996(3): 27.

Aviation Manufacturing Engineering Writing Group. New nail supply system for automatic riveting machine[J]. Aviation Manufacturing & Engineering, 1996(3): 27.

[5] TIAN W, ZHOU Z, LIAO W. Analysis and investigation of a rivet feeding tube in an aircraft automatic drilling and riveting system[J]. International Journal of Advanced

Manufacturing Technology, 2016, 82(5-8): 973-983.

[6] 刘宇平, 杨宏毅. 打造航空工业自动钻铆设备先锋[J]. 航空制造技术, 2006, 49(12): 60-61.

LIU Yuping, YANG Hongyi. Pioneer of aviation industry automatic riveting equipment[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(12): 60-61.

[7] 李菡. 基于双机器人协同的自动钻铆终端器及其自动供钉装置的设计与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

LI Han. Design and research of automatic riveting terminal and its automatic nail feeding device based on the cooperation of two robots[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

[8] STANCIK B, BOAD C. Flexibility in fastener feeding[R]. Society of Automotive Engineers, Inc. 1999-01-3450, 1999.

[9] KREJCI C. Automatic feeding of temporary fasteners in confined spaces[R]. SAE Technical Paper, 2010-01-1879, 2010.

[10] REMLEY D, REDIGER J, HAWORTH P, et al. Slug rivet machine installs 16 rivets per minute drill-rivet-shave[R]. SAE Technical Paper 2009-01-3155, 2009.

[11] KREJCI C. Rivet and bolt injector with bomb bay ejection doors[J]. SAE International Journal Aerospace, 2013, 6(2): 431-440.

[12] 周振锋, 田威, 廖文和. 面向飞机部件装配生产线的自动送钉系统研究[J]. 航空精密制造技术, 2014, 50(1): 34-37.

ZHOU Zhenfeng, TIAN Wei, LIAO Wenhe. Research on automatic nail feeding system for aircraft component assembly line[J]. Aeronautical Precision Manufacturing Technology, 2014, 50(1): 34-37.

[13] 蒋君侠, 柯映林, 黄奇伟, 等. 一种飞机壁板自动钻铆机的有头铆钉自动供钉系统: CN201610962617.0[P]. 2017-03-29.

JIANG Junxia, KE Yinglin, HUANG Qiwei, et al. An automatic head rivet supply system for aircraft panel automatic riveting machine: CN201610962617.0[P]. 2017-03-29.

[14] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[15] 冯春, 周文. 手眼系统中摄像机标定和手眼标定的同步算法 [J]. 机械设计与制造, 2015(12): 58-61.

FENG Chun, ZHOU Wen. Synchronization algorithms for camera calibration and hand-eye

calibration in hand-eye system[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2015(12): 58-61.

[16] 李大伟. 基于关节转角反馈的工业机器人精度补偿技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

LI Dawei. Research on precision compensation technology of industrial robots

based on joint angular feedback[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

通讯作者: 田威, 教授, 博士生导师, 研究方向为飞机自动化柔性装配技术, E-mail: tw\_nj@nuaa.edu.cn。

## A Robot Rivet Feeding System for Automatic Drilling and Riveting

LI Yufei, TIAN Wei, LI Bo, CUI Haihua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** In the existing automatic drilling and riveting system, 90% of the faults are caused by the stuck in the rivet feeding system. In order to improve the efficiency of automatic rivet feeding system and reduce failure, a new rivet feeding system based on industrial robot and visual servo was proposed. By installing industrial camera and grasping device at the end of the robot, the quality and location of rivets were detected via machine vision. Then, the robot was guided to grasp and transfer rivets of specific types. Thus, quality of rivets is ensured before delivering and the process of delivery is optimized. The system weighs 1.1t and covers an area of 1.57m<sup>2</sup>, which effectively saves the area and load of the rivet feeding system in the automatic drilling and riveting system. Experimental results illustrate that the system can detect rivets with a precision of 0.1mm and the feeding efficiency reaches six rivets per minute, which meets the performance requirements of automatic riveting and drilling system.

**Keywords:** Industrial robot; Aircraft assembly; Automatic drilling and riveting; Rivet feeding system; Machine vision

(责编 李丹)

(上接第 43 页)

## Research on Robotic Automatic Grinding for Zirconia Coating

TIAN Fengjie<sup>1</sup>, AN Hongwei<sup>1</sup>, LI Xiaolong<sup>1</sup>, LI Lun<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**[ABSTRACT]** Based on the robot automatic grinding platform, the experimental study on the grinding process of zirconia coating was carried out in order to control the coating thickness and surface roughness properly and improve coating surface quality. Based on Preston removal equation, the material removal model was established. The effect of main parameters on the removal depth was studied by single factor experiments. The optimum process parameters and process steps were determined by orthogonal experiment and utilized on the zirconia coating of throat seal of aero-engine. The experimental results show that the removal depth of the material increases with the increasing of grinding force and speed of grinding tool, and decreases with the increasing of feed speed in a certain range. The grinding force has the more influence and the grinding angle has less influence on the removal depth. The force control method is adopted to achieve the quantitative and uniform removal, the coating thickness and surface quality are consistent, the processing efficiency is improved significantly, which verifies the practicability and advantages of the robot automatic grinding system.

**Keywords:** Robotic automation grinding; Zirconium oxide coating; Orthogonal test; Parameter optimization

(责编 大漠)