

蛇形臂机器人在航空制造业中的应用*

Application of Snake Arm Robot for Aviation Manufacture

中航工业北京航空制造工程研究所 姚艳彬

[摘要] 对于结构复杂、布局紧凑的飞机零部件,其装配、检测以及清理的工作空间非常有限,人工操作难度大、劳动强度大、效率低。常规的工业机器人由于关节尺寸的限制无法在狭小空间内完成这类作业。蛇形臂机器人具有长径比大、自由度多,运动灵活以及环境适应能力强等优点,在航空制造领域具有广泛的应用前景。通过总结蛇形臂机器人的国内外研究现状,对蛇形臂机器人在航空制造业中的应用进行了探讨,并提炼出了相应的关键技术。

关键词: 智能机器人 蛇形臂机器人 航空制造

[ABSTRACT] For complex structure, compact layout of aircraft parts, the assembly, testing and clean-up work space is very limited, the manual operation is difficult, labor-intensive and low efficiency. Also, the conventional industrial robots can not complete the above job in such a small space due to the size limitations of joint. Snake-arm robot has many advantages, such as large aspect ratio, more freedom of movement, flexibility and strong ability to adapt to the environment. The snake-arm has broad application prospects in the field of aviation manufacturing. The current situation of research on the snake-arm robot is summarized. The snake-arm robots application in the aviation industry is discussed. Finally, the corresponding key technologies are extracted.

Keywords: Intelligent robot Snake arm robot Aviation manufacture

近年来,由于机器人技术的迅猛发展,加之其投资低、柔性程度高、可达性好、工作性能稳定等优势,在飞机制造过程中得到大量应用。以波音 787、A340、A380、F-22、F-35 等为代表的新型飞机,在其制造过程中大量采用工业机器人进行钻铆、喷漆、焊接以及飞机制造性能的检测与测试,极大提高了飞机生产效率和质量可靠性。机器人用于飞机制造加工已成为当代飞机制造自

动化领域的技术热点和前沿性领域。

对于一些结构复杂、布局紧凑的飞机零部件,其装配、检测以及清理的工作空间非常有限,人工操作难度大、劳动强度大、效率低。常规的工业机器人系统由于关节尺寸的限制无法在狭小空间内完成这类作业,因此,仿象鼻、章鱼须或蛇等多关节柔性机器人应运而生。作为一种智能机器人,蛇形臂机器人具有长径比大、自由度多,运动灵活以及环境适应能力强等优点,在航空制造领域具有广泛应用前景。

1 国内外研究现状

1.1 国外研究现状

国外许多研究机构已经对应用于安检、医疗以及航空制造等领域的蛇形机械臂机器人进行了比较深入的研究。

美国宾夕法尼亚州立大学研制的一种用于安检的蛇形臂机器人^[1]。该蛇形臂由 3 段独立的气动驱动单元串联而成,在第一段的根部还有旋转装置,可以实现蛇形臂 360° 旋转。蛇形臂的末端安装有一个 CMOS 摄像头用于周围环境检测,每个端盘上分别安装了 3 个红外测障传感器。

IWalker 等^[2]设计了一种名为 Elephant's Trunk 的用于抓取物体的蛇形臂机器人(仿象鼻机器人),如图 2 所示。该机械臂总长 83.82cm,重量为 4.0kg,由 16 个虎克铰构成,共计 32 个自由度。在两个关节中间是一个圆盘形的结构,圆盘结构之间还布置了 4 个互成 90° 的弹簧,这些弹簧使得蛇形臂的结构更加紧凑,变形更加均匀平滑。

美国波士顿大学研制了一种用于临床医疗手术的蛇形臂机器人 Concentric-tube^[3-4],该机器人有 3 个空心柔性管嵌套组成,总共 6 个自由度,通过改变每跟管子旋转的角度和伸出的距离,就可以改变整个机器人的长度和弯曲度实现机器人形状的控制,进而完成相关的医疗手术。

Yoon 等^[5]使用弹簧作为中心支柱,设计了一个 4 自由度的柔性连续体蛇形臂机器人,该机器人分为 2

* 航空基金(20121625008)资助。

段,每段有 2 个自由度。段中的每一节由作为中心支柱的弹簧和铝制圆柱体构成,使用钢丝绳拉动端部的圆柱体旋转,该机器人主要用于医疗领域。



图1 DBD关节组成的蛇形臂机器人
Fig.1 DBD joints snake arm robot

图 1 为希腊德谟克利特大学设计的一种由 DBD (Disk-Ball-Disk) 关节构成的蛇形臂机器人^[6],该机器人使用尼龙绳替代肌肉提供控制该结构弯曲所需要的

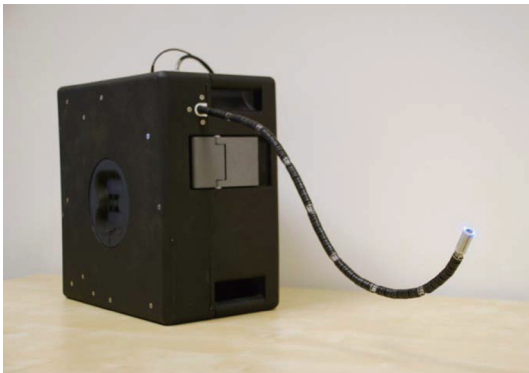


图2 OCRobotics研发的蛇形臂机器人
Fig.2 OCRobotics snake arm robot

拉力。

英国 OC Robotics 公司^[7]是目前国内外对蛇形臂机器人研究最为深入、工程化较为成功的机构,面向安检、航空制造、核设施检测等领域研发了一系列的蛇形臂机器人,如图 2 所示。该公司为空客英国公司开发了一类蛇形臂机器人,能够钻入机翼内部进行检测、紧固和密封,但其相关核心技术仍处于技术封锁状态。

1.2 国内研究现状

国内开展蛇形臂机器人的研究起步较晚,因此取得的相关研究成果较少。赵铁石等^[7]设计了一种基于空间连杆结构的蛇形机器人,机器人各段间通过球铰连接,每段安装两个伺服驱动电机。该机器人能实现蜿蜒爬行、转向、抬头等多种运动方式。Haiyan Hu 等^[8]研制了一种新型的结肠镜蛇形臂机器人,如图 3 所示。该机

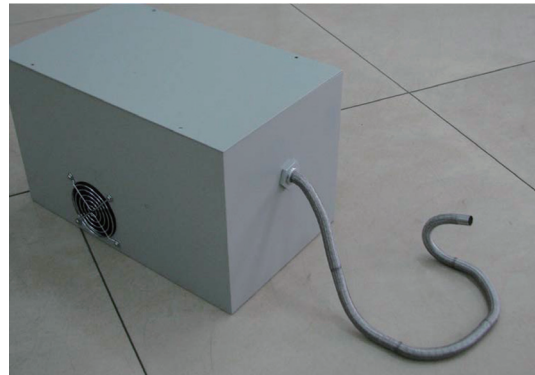


图3 结肠镜蛇形臂机器人
Fig.3 Colonoscopy snake arm robot



图4 8自由度蛇形臂机器人
Fig.4 8 DOFs snake arm robot

器人总长 600mm, 直径为 12mm, 共分 5 段, 每段具有 2 个自由度, 机器人每段均是通过钢丝绳由在远处的直流电机驱动。

何俊虎^[9]设计的一种球关节配合绳缆拉动的蛇形臂机器人, 总长 150mm, 直径为 16mm, 共分 3 段弯曲关节, 每段弯曲关节具有 2 个自由度, 可以单独在任意方向弯曲 100°。在航空基金项目“飞机装配用蛇形臂结构研究”的支持下, 北京航空制造工程研究所研制了一套具有 8 个自由度的蛇形臂机器人原理样机如图 4 所示。

总之, 国内关于蛇形臂机器人的研究已取得了一定的成果, 但与国外相比, 无论在理论研究还是工程化应用方面都存在很大差距。目前对蛇形臂机器人的关键技术尚未突破, 且已研制出的蛇形臂机器人主要是针对医疗检测和抓取物体等任务设计的, 面向安检和航空制造的蛇形臂机器人尚未见诸报道。另外, 已报道的蛇形臂机器人还存在自由度少、长度较短、转动角度有限且容错功能差等缺点, 且不具备非结构环境视觉辅助定位功能, 这些缺点极大制约了蛇形臂机器人的广泛推广与实际应用。

2 蛇形臂机器人在航空制造业中的应用

蛇形臂机器人可用于完成飞机部件内腔的检测、密封以及飞机表面喷涂等任务。它是一种非破坏性的操作技术, 维修人员省下了拆卸和重新装配飞机零件进行操作的麻烦。

另外, 通过安装不同的末端执行器, 蛇形臂机器人还可以完成标准件紧固、制孔、去毛刺、异物(铆钉)清除、清理金属屑或废液、飞机部件内腔的穿线等复杂操作任务。

实际应用中, 蛇形臂机器人系统具有两种控制方式, 一种是由操纵杆进行控制; 另外一种是在末端安装智能导航系统(如工业相机), 实现自主运动。根据操作任务的不同, 可以选择不同的控制方式。

最近, 英国 OCRobotics 公司与美国空军签署了联合开发面向飞机非结构化内腔检测的蛇形臂机器人系统的协议, 为蛇形臂机器人在航空制造领域的工程化应用前进了一大步。

3 面向航空制造的蛇形臂机器人关键技术

面向航空制造的蛇形臂机器人技术涉及了机器人、视觉、航空制造等多个领域, 蛇形臂机器人在航空制造中能够得到应用, 需要重点突破以下关键技术。

(1) 蛇形臂机器人小型化及轻量化结构设计。

安检蛇形臂机器人需要重量轻、柔性高且具有一定

的负载能力, 因此需要重点分析蛇、章鱼以及象鼻等柔体的运动机理, 研究如何利用仿生学原理完成蛇形臂机器人的结构设计。

(2) 蛇形臂机器人运动分析及狭小空间轨迹规划方法。

蛇形臂机器人属于超冗余度机器人的范畴, 逆运动学问题的求解非常困难。需要研究如何利用超冗余度机器人分析理论, 结合蛇形臂机器人的结构特点, 建立正运动学和逆运动学模型, 并完成蛇形臂机器人在狭小空间中的轨迹规划。

(3) 蛇形臂机器人运动控制技术。

重点研究蛇形臂机器人的正运动学和逆运动学模型的程序实现, 根据应用需求完成蛇形臂机器人运动控制器的硬件、软件及上位机控制界面程序的设计。

(4) 非结构化环境特征提取、建模方法及环境特征匹配方法。

视觉导航系统工作过程中, 需要对三维空间场景进行识别, 必须研究如何提取非结构化环境中的图像特征点的信息来恢复空间三维信息, 进而计算机器人移动的位置及姿态。对于建模方法, 需要研究如何从非结构环境图像中提取合适的特征(如点或点簇等)以描述机器人当前所在环境的典型局部特征, 最终实现机器人的全局定位与环境地图创建。特征匹配时进行精确空间定位的前提, 需要研究非结构环境下如何实现精确、快速的环境特征匹配方法。

(5) 障碍物检测与识别方法。

在移动机器人导航的研究过程中, 实时快速的障碍物检测是其中不可缺少的一部分。重点研究如何对机器人在非结构环境中采集的图像进行基于区域彩色的图像分割, 进而实现障碍物的快速检测与识别。

(6) 末端执行器开发技术。

面向不同操作任务, 如检测、涂胶、制孔、标准件紧固, 开发体积小、重量轻的末端执行器。

4 结束语

蛇形臂机器人用于航空制造业为当代飞机制造自动化领域以及机器人领域的技术热点和前沿性领域。目前, 面向航空复杂、狭窄结构部件装配、检测的蛇形臂机器人技术, 虽然在航空制造发达国家已处于技术验证和初期运用阶段, 但其相关核心技术仍处于技术封锁状态。国内外用于航空制造的蛇形臂机器人技术刚刚起步, 我国以突破关键技术为核心, 掌握自助研发能力和知识产权, 在航空制造和机器人领域占据技术主导地位。

(下转第 158 页)

2.2.2 定位器读数修正

对定位器的运动数据补偿后,定位器运动的位置与实际的数据相符,但是光栅尺反馈的数据与实际位置不一致。因此,需要修正光栅尺的反馈读数,设 x_1 和 x_2 是光栅尺反馈的坐标值, Δx_1 和 Δx_2 是激光干涉仪测量的该点补偿值,那么 x_1 和 x_2 之间的 x_i 的实际位置是 $x_i - \Delta x_i$,其中 Δx_i 按照式(5)进行计算。

2.3 随动轴补偿方法

由于随动轴没有驱动模块,当部件由于某些原因产生内部应力,随动轴运动到偏离随动轴原点的位置,以释放部分的内部应力。需要对随动轴的轴向和定位精度进行标定。随动轴的轴向和定位精度的标定和补偿方法与主动轴是一致的^[5-6]。若随动轴标定的坐标系,将随动轴的补偿加入后,式(4)变成如下形式:

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{pmatrix} = T_i T_s \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} + T_s \begin{pmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.4 补偿效果

采用以上算法,对误差进行补偿。图2所示的是补偿前后的定位精度。从图中可以看出,补偿前的精度范围是 $\pm 0.15\text{mm}$ 范围内,补偿后的精度达 $\pm 0.05\text{mm}$,将部件的定位精度提高了 66% 左右,可以满足部件对接装配的精度要求。该补偿方法已经成功应用于某型号飞机的对接装配。

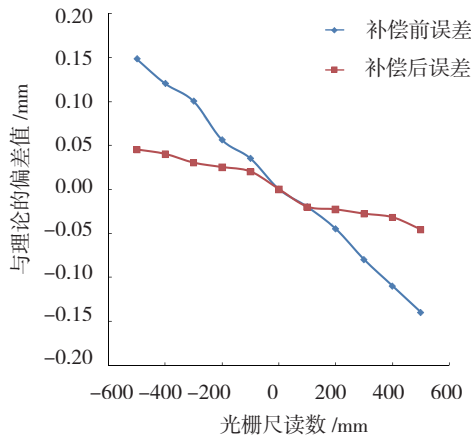


图2 补偿前后定位精度

Fig.2 Positioning accuracy before and after compensation

3 小结

(1)通过对部件的运动规划,实现了4台定位器的协同运动,保证部件在运动过程中的平稳性和协调性,避免部件在运动过程中因受力发生变形甚至破坏。(2)分析了定位误差产生的原因,定位误差包括:定位器安装误差、定位器的定位误差、随动轴误差;(3)针对产生

定位误差的不同原因,制定了相应的补偿方法。并且对补偿前后的定位精度进行比较,结果显示,补偿后的精度大幅提高,可以满足部件对接的精度要求。且该补偿方法已成功用于某型号飞机的对接装配。

参考文献

[1] 侯志霞,蒋倩,梁雪梅,等. 大部件自动对接误差控制及对合位姿规划技术 // 李志强,刘华东. 第四届数字化柔性装配技术论坛论文集—装配数字化与自动化技术. 北京: 国防工业出版社,2013:246-252.

[2] 杜兆才,邹方. 多机器人协调操作系统实现飞机大型部件对接的轨迹规划. 航空制造技术,2009(24):88-91.

[3] 曹甜东,唐小琦. 数控机床几何误差的补偿实现. 机械制造与研究,2000,35(4):88-92.

[4] 张立新,黄美玉,乔雁龙. 并联轴直线运动直线度的检测与误差补偿. 机械工程学报,2008,44(9):220-221.

[5] 张扬,高明辉. Simotion在数字化对接系统中的多轴同步控制应用. 航空制造技术,2010(32):114-116.

[6] 荆道艳,许国康,王恒,等. 大部件对接的数控定位器技术研究. 航空制造技术,2010(23):117-120.

(责编 小城)

(上接第155页)

参考文献

[1] Trivedi D, Rahn C D. Shape sensing for soft robotic manipulators // Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. San Diego: ASME,2009.

[2] Haman M W, Walker I D. Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum Style Robots. Journal of Robotic Systems, 2003, 20(2): 45-63.

[3] Dupont P E, Lock J. Design and control of concentric-tube robots. IEEE Transactions on Robotics, 2010,26(2):209-225.

[4] Lock J, Laing G. Quasi static modeling of concentric tube robots with external Loads // The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei:IEEE, 2010:2325-2332.

[5] Yoon H S, Yi B J. A 4-DOF flexible continuum robot using a spring backbone // Proceedings of The IEEE International Conference on Mechatronics and Automation 2009:1249-1254.

[6] Georgilas IP, V D. Tourassis. ERMIS- a novel biologically inspired flexible robotic mechanism for industrial applications // 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Singapore:IEEE, 2009:1504-1509.

[7] 赵铁石,林永光,缪磊,等. 一种基于空间连杆机构的蛇形机器人. 机器人, 2006, 28(6):629-635.

[9] Hu H Y, Wang PF, Zhao B, et al. Design of a novel snake-like robotic colonoscope // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Guilin:IEEE 2009:1957-1961.

[9] 何俊虎. 一种基于空间连杆机构的蛇形机器人 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.

(责编 深蓝)