

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.05.010

一种基于接触力反馈的航天电连接器自动装配技术

吴非凡¹, 李玉良^{2,3}, 陈 萌⁴, 汪俊亮^{2,3}

(1. 东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620; 2. 东华大学人工智能研究院, 上海 201620; 3. 东华大学上海工业大数据与智能系统工程技术研究中心, 上海 201620; 4. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

摘要:为解决航天电连接器自动装配过程中存在的视觉受限、针孔卡阻等问题,提出了基于插座外轮廓接触力反馈的自动装配技术,用于实现圆形航天电连接器的装配作业。结合电连接器在夹持状态下的受力分析,构建了基于“位置定心-姿态调平-旋转接入”的3阶段装配方法。首先,通过识别夹板与插座的接触象限来实现插座外轮廓的中心定位。其次,基于末端夹爪轴向运动前后接触力的变化来判断初始姿态偏转,并引导机器人沿扭矩方向实现自适应姿态调整。最后,采用旋转搜索算法完成电连接器接入,并在多组初始偏转误差条件下进行了多次实验,验证了所提方法的有效性。

关键词:夹持定位;机器人;航天电连接器;轴向运动;柔顺控制;旋转搜索

中图分类号:V465;TP242.6

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2025)05-0889-11

An Automatic Assembly Technology for Aerospace Electrical Connectors Based on Contact Force Feedback

WU Feifan¹, LI Yuliang^{2,3}, CHEN Meng⁴, WANG Junliang^{2,3}

(1. College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Institute of Artificial Intelligence, Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Industrial Big Data and Intelligent System, Donghua University, Shanghai 201620, China; 4. Shanghai Aerospace System Engineering Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: To address the challenges of visual occlusion and pinhole jamming in the automatic assembly of aerospace electrical connectors, an automatic assembly technique based on contact force feedback from the socket's outer contour is proposed for circular connector applications. By analyzing the contact forces during clamping, a three-stage assembly strategy, i.e., comprising centering, posture alignment, and rotational insertion is constructed. First, the center of the socket contour is located by identifying the contact quadrant between the clamping jaws and the socket. Second, the initial posture deviation is estimated by analyzing the change in contact force before and after the end-effector's axial movement, and a torque-guided strategy is employed to achieve adaptive posture correction. Finally, a rotational search algorithm is adopted to complete the connector insertion. Extensive experiments under various initial posture deviations demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: clamping and positioning; robot; aerospace electrical connector; axial motion; compliant control; rotation search

基金项目:国家自然科学基金(52175219,51775488);上海市学术/技术研究带头人计划(23XD1403800)。

收稿日期:2025-04-01;**修订日期:**2025-06-11

通信作者:李玉良,男,教授,博士生导师,E-mail:meyuliang@dhu.edu.cn。

引用格式:吴非凡,李玉良,陈萌,等.一种基于接触力反馈的航天电连接器自动装配技术[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2025,57(5):889-899. WU Feifan, LI Yuliang, CHEN Meng, et al. An automatic assembly technology for aerospace electrical connectors based on contact force feedback[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(5):889-899.

电连接器是连接系统与设备之间传输电流或信号的关键电子部件,被广泛应用于航天、航空和船舶等领域^[1-3]。电连接器的装配质量直接影响到整个系统的可靠性和稳定性^[4]。电连接器在装配过程中,主要面临的挑战在于如何保证插座的定位精度,以确保插头与插座的精准对接。与传统的轴孔装配相比,航天电连接器装配具有以下特点^[5-6]:(1)电连接器的装配过程通过非对称插槽配合和针孔的被动对齐进行,属于异形孔装配问题;(2)电连接器种类多样,现有的装配方法不具备普适性;(3)电连接器外壳边缘较窄,接触面积有限。

目前,针对轴孔之间相对位姿的获取方法主要有:基于视觉伺服定位^[7-10]和基于力/力矩搜索定位方法^[11-14]。基于视觉定位的方法可分为基于模板的方法和基于学习^[15-17]的方法。当目标物体模型已知时,基于模板的方法可以对孔进行精准定位。Cao等^[18]采用基于卷积神经网络的模板匹配方法,实现无人机在卫星图像中的定位。然而,该方法无法定位非合作化目标物体,同时基于视觉的定位方法易受到遮挡、光照条件等非结构化环境的影响。与视觉信息相比,力信息更能反映机器人与环境的交互情况,也能刻画和描述所接触物体的空间信息。基于力的定位方法可分为将力作为停止条件的定位方法^[19-21]和力数据分析定位方法。Kang等^[22]采用螺旋搜索算法定位孔。该方法控制轴沿预先定义的螺旋路径移动,通过接触力判断是否与孔对齐。在电连接器装配中,插座外壳边缘较小,机器人在搜索过程中易失去与配合面的接触,进而导致装配失败。基于力/力矩数据分析的装配方法是通过轴孔接触过程中的力传感器数据建立目标物体模型,以精准定位目标孔的中心位置。基于力/力矩分析的定位算法能够实现日常通用电连接器的精准装配,但无法解决航天电连接器针与孔装配过程中出现的“卡阻”现象^[23-26]。

根据Gu等^[27]的研究成果,可以发现,人类对于物体几何结构的探索流程主要是包围和轮廓跟踪,经过少量的来自物体顶部以及来自物体侧面的力反馈即可完成对物体几何形状的初步判断。若想获得更加精确的形状特性,则需要对物体外表面轮廓进行更多的接触。受此启发,通过观察人类盲触摸定位电连接器插座的动作,把插座定位的过程分为两个主要阶段:在第1阶段进行位置定心,通过两指的触觉信息估计插座外轮廓的中心位置。在第2阶段进行姿态调平,依据两指与物体的接触状态,调整手指平行插座外轮廓表面。

本文从电连接器装配操作的实际需求出发,提出了一种基于夹持定位的自动装配方法,模拟人类

触摸定位插座的过程,利用接触力信息完成插座位姿识别与插头插接。装配过程分为两个阶段:在第1阶段,机器人末端夹具处于空夹状态,通过与插座外轮廓的轻微接触,基于受力情况识别接触面在力传感器坐标系中的象限位置,并规划向心力与侧向力方向的接触轨迹,实现插座的初步位置定心。随后,通过轴向运动前后接触力变化,识别机器人末端沿Y轴的姿态偏转,再结合轴向旋转将X轴偏转转换为Y轴偏转。根据获得的姿态偏转误差,设计端面接触状态下的扭矩轨迹规划,完成姿态调平。在第2阶段,机器人前往插头放置位夹取插头,并返回至识别出的插座位姿,结合柔顺控制与旋转搜索算法,实现插头与插座的柔顺接入,完成自动装配。最后,本文基于优傲机器人3(Universal-robots 3, UR3)平台验证了所提方法的有效性。

1 问题描述

本文提出的机器人装配操作系统主要包括视觉系统、机器人、六维力/力矩传感器、自定心夹具、电连接器插头和插座,如图1所示。在该系统中,构建了机器人基座坐标系 $\{B\}$ 、力传感器坐标系 $\{S\}$ 、末端夹具坐标系 $\{T\}$ 及电连接器插座坐标系 $\{G\}$ 。为保证插头初始抓取位姿的准确性,设计了一款末端自定心夹具,该夹具末端曲率与电连接器插头一致。文中提到的位置偏移是由机器人末端相对于插座的实际位置与期望位置间的距离偏差所造成的。姿态偏转则是由机器人末端当前姿态与理想平行姿态之间的角度偏差所造成的。

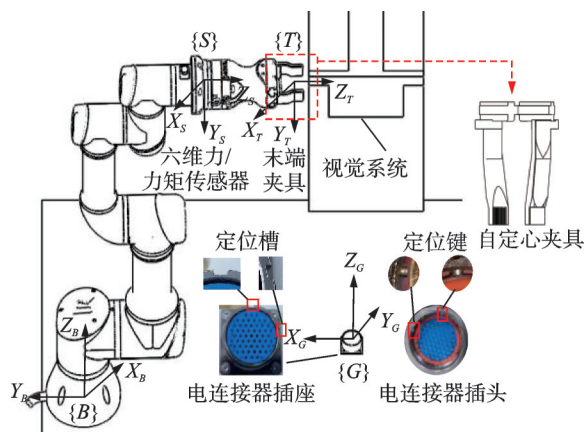


图1 机器人装配操作系统

Fig.1 Robotic assembly operating system

在实验中,电连接器插座被固定在工作台上,机器人通过视觉系统进行初步定位,获取插座的初始位姿。如图2所示,基于Kinect2视觉相机获取的插座初始位姿存在较大的偏差,其中位置偏移和姿态偏转误差分别为 $\pm 20\text{ mm}$ 和 $\pm 10^\circ$ 。

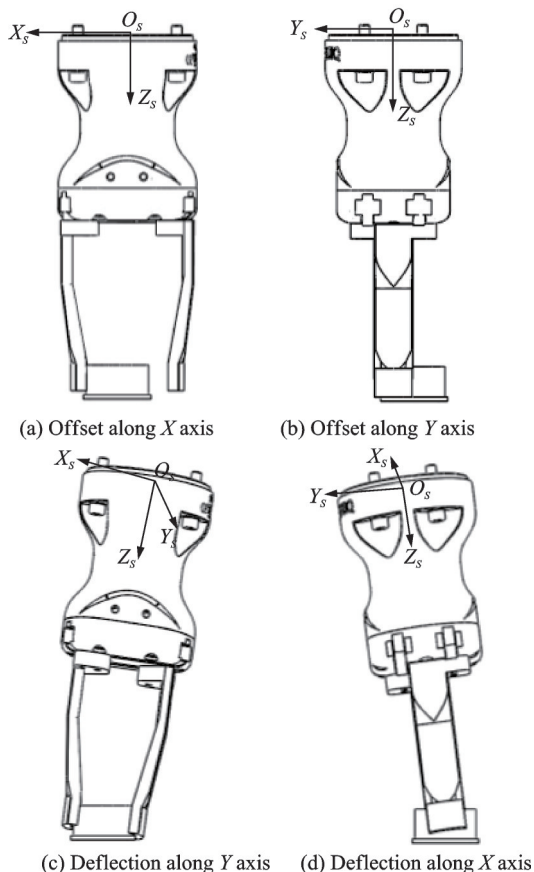


图2 机器人末端初始位姿

Fig.2 Initial pose of the robot end-effector

本文提出了一种基于力/力矩反馈的电连接器装配策略,如图3所示。该策略通过接触过程中力/力矩的反馈来识别初始接触状态下的位置误差和姿态误差;根据初始状态信息,机器人沿设定的轨迹运动,以到达相对于插座的平行中心位姿。当插座的位姿确定时,机器人引导末端夹具将电连接器插头移动至插座的中心位置,并保持轻微接触。然后,机器人采用旋转搜索策略获取插座定位槽的位置,以确保插头与插座的准确接入。在整个装配过程中,通过阻抗控制算法来调整接触力大小,以避免对电连接器造成的损伤。

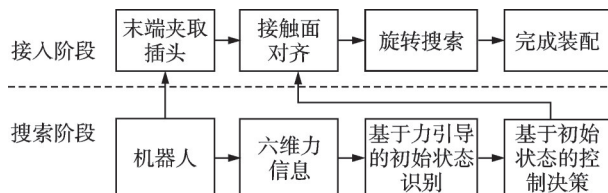


图3 基于力/力矩定位的电连接器装配策略

Fig.3 Assembly strategy for electrical connectors based on force/torque positioning

2 控制方式

电连接器装配过程采用阻抗力跟踪控制,其控

制模型框图如图4所示。

图中: X_r 为电连接器的参考轨迹; X_e 为发送给机器人的轨迹; X_m 为机器人实际到达的轨迹。参考轨迹与控制轨迹的误差 $E = X_e - X_r$ 。 F_e 、 F_d 分别为触摸过程中力传感器获得的接触力和期望的接触力,力跟踪误差 $\Delta F = F_e - F_d$ 。通过阻抗控制算法建立运动过程中位置误差与力误差间的动态关系

$$M(\ddot{X}_e - \ddot{X}_r) + B(\dot{X}_e - \dot{X}_r) = F_e - F_d \quad (1)$$

式中 M 、 B 分别为导纳控制器的惯性矩阵和阻尼矩阵。

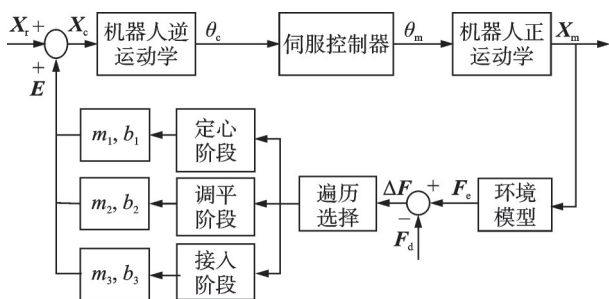


图4 阻抗力跟踪控制模型

Fig.4 Tracking control model of impedance force

为了方便地分析系统模型,假设机器人阻抗控制模型在各个方向上是解耦的。此时,只考虑一维元素的力跟踪模型,用 m 、 b 、 e 、 f_e 、 f_d 分别表示为 M 、 B 、 E 、 F_e 、 F_d 的一维元素,由式(1)可得力跟踪误差为

$$f_e(t) - f_d(t) = m\ddot{e}(t) + b\dot{e}(t) \quad (2)$$

阻抗力跟踪控制主要用于触摸过程中接触力的控制,这是为了在定位过程中使末端夹板与电连接器插座能够保持良好的接触,尤其是轴向运动前后接触状态的转换。对于3个控制阶段,需要结合静力分析,采用不同的参数 m 和 b 。在定位过程中为方便应用,把式(2)进行离散化处理^[28]

$$\begin{cases} \ddot{x}_e(t) = \ddot{x}_r(t) + \frac{1}{m} [f_e(t) - f_d(t) - b[\dot{x}_e(t-1) - \dot{x}_r(t)]] \\ \dot{x}_e(t) = \dot{x}_e(t-1) + \ddot{x}_e(t)T \\ x_e(t) = x_e(t-1) + \dot{x}_e(t)T \end{cases} \quad (3)$$

式中 T 为采样周期。

3 基于接触力反馈的插座定位策略

3.1 位置偏移识别与定心轨迹规划

针对位置偏移问题,需分析其接触点位置和接触力方向,从而规划合理的定心轨迹。图5给出了发生位置偏移时,夹具左夹板与插座的接触受力分析图。在力传感器坐标系 $\{S\}$ 中,接触面位于 X 、 Y

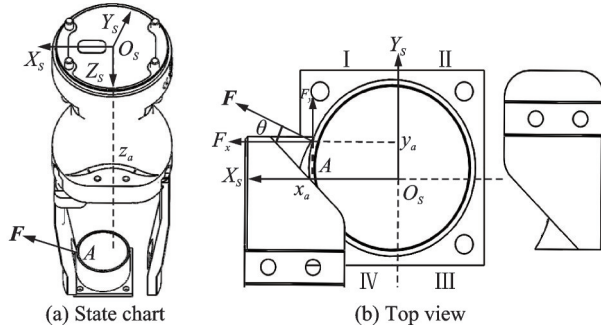


图 5 单夹板接触静力分析

Fig.5 Static analysis of left clamping plate contact

轴的正方向,接触点 A 的坐标为 (x_a, y_a, z_a) ,夹板受到的接触力为 F 。通过对接触力进行分析,可以得到

$$\begin{cases} F_x = |F| \cdot \cos \theta \\ F_y = |F| \cdot \sin \theta \\ F_z = 0 \\ M_x = -F_y \cdot z_a \\ M_y = F_x \cdot z_a \\ M_z = F_y \cdot x_a - F_x \cdot y_a \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ 为 F 在坐标系 $\{S\}$ 中 $O_s X_s Y_s$ 平面的投影与 X_s 轴的夹角; F_x, F_y, F_z 分别是接触力 F 在坐标系 $\{S\}$ 中沿 X_s, Y_s, Z_s 轴的分力; M_x, M_y, M_z 分别为由接触力 F 产生的绕 X_s, Y_s, Z_s 轴的扭矩。

通过对夹板与插座的接触面进行受力分析,可以得到其接触面在力传感器坐标系下各象限的受力情况(图 5)

$$\begin{cases} F_x > 0, F_y > 0 & \text{I 象限} \\ F_x < 0, F_y > 0 & \text{II 象限} \\ F_x < 0, F_y < 0 & \text{III 象限} \\ F_x > 0, F_y < 0 & \text{IV 象限} \end{cases} \quad (5)$$

对于位置误差,在 XY 平面内进行位置轨迹规划。实际运动轨迹随接触力的变化而进行调整,结合阻抗控制方程可得实际的运动轨迹

$$f_{xe} - f_{xd} = m_x (\ddot{x}_c - \ddot{x}_r) + b_x (\dot{x}_c - \dot{x}_r) \quad (6)$$

$$f_{ye} - f_{yd} = m_y (\ddot{y}_c - \ddot{y}_r) + b_y (\dot{y}_c - \dot{y}_r) \quad (7)$$

式中: $f_{xe}, f_{ye}, f_{xd}, f_{yd}$ 分别为位置定心时沿 x 轴和 y 轴方向上的实际接触力和期望接触力; m_x, b_x, m_y, b_y 分别为 x 轴和 y 轴方向上的惯性参数和阻尼参数。

当 X, Y 方向上不存在位置误差时,期望接触力 f_{xd}, f_{yd} 为零,参考轨迹加速度 $\ddot{x}_r, \ddot{y}_r$ 和速度 $\dot{x}_r, \dot{y}_r$ 也均为零。由离散阻抗控制方程式(3)可求出移动轨迹 x_c 和 y_c 为

$$\begin{aligned} x_c(t) = & \left(2 - \frac{bT}{m}\right) x_c(t-1) + \frac{T^2}{m} f_{xe}(t) + \\ & \left(\frac{bT}{m} - 1\right) x_c(t-2) \end{aligned} \quad (8)$$

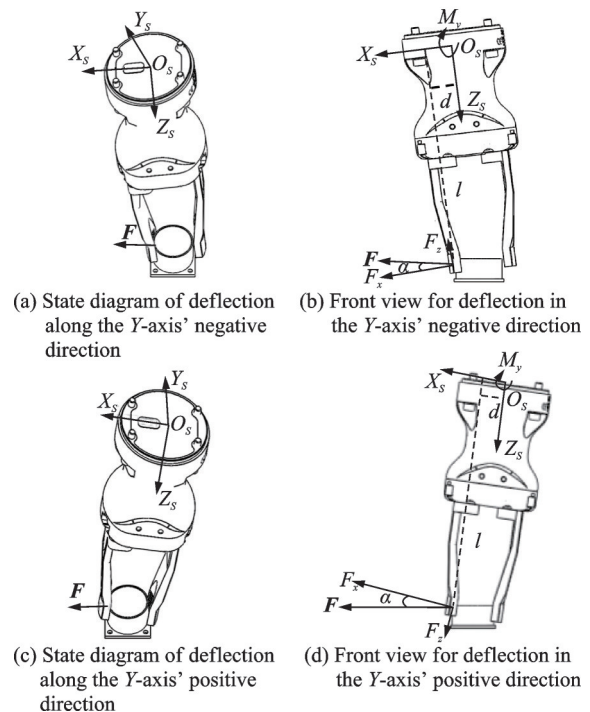
$$\begin{aligned} y_c(t) = & \left(2 - \frac{bT}{m}\right) y_c(t-1) + \frac{T^2}{m} f_{ye}(t) + \\ & \left(\frac{bT}{m} - 1\right) y_c(t-2) \end{aligned} \quad (9)$$

以接触力位于第 I 象限时为例,假设系统稳定时,沿 X, Y 方向的接触力 f_{xe} 和 f_{ye} 均大于 0,通过离散阻抗方程计算得到每次迭代后的控制轨迹 x_c, y_c 也大于 0。此时,将控制轨迹传输给机器人,指令其朝接触力方向(即位置误差减小方向)移动。当移动至力传感器的读数 F_x 和 F_y 为零时,闭合末端夹爪。接着,观察 F_x 和 F_y 数值的变化情况:若数值不变,则表面系统由单夹板接触变为双夹板接触;若数值增大,则继续结合式(8,9)计算出新的控制轨迹,指导机器人进一步移动。该过程将持续进行,直至力传感器的数值不再变化为止。这个过程称之为定心过程。

3.2 Y 向偏转识别与调平轨迹规划

机器人实现定心之后,其末端在沿 Y 轴方向上发生姿态偏转时的静力分析如图 6 所示。图 6 中给出了机器人末端沿 Y 轴正、负向偏转接触状态下,左夹板的受力分析图。接触力 F 在 $\{S\}$ 坐标系上的受力分析为

$$\begin{cases} F_x = |F| \cdot \cos \alpha > 0 \\ F_y = 0 \\ F_z = -|F| \cdot \sin \alpha < 0 \\ M_y = -F_x \cdot l + F_z \cdot d \end{cases} \quad (10)$$

图 6 沿 Y 轴姿态偏转静力分析Fig.6 Static analysis of Y -axis attitude deflection

$$\begin{cases} F_x = |F| \cdot \cos \alpha > 0 \\ F_y = 0 \\ F_z = |F| \cdot \sin \alpha > 0 \\ M_y = -F_x \cdot l - F_z \cdot d \end{cases} \quad (11)$$

式中: F_x 、 F_y 、 F_z 为接触力 F 在 $\{S\}$ 坐标系上的受力分解; α 为坐标系 $\{S\}$ 下, 力 F 与 X_s 轴夹角即机器人末端沿 Y 方向上的偏移角; l 、 d 分别为接触点与 X_s 轴和 Y_s 轴的垂直距离。

结合机器人沿 Z 轴方向运动前、后左夹板接触情况, 针对沿 Y 轴的偏转方向, 提出了基于单夹板接触的轴向运动识别方法。如图 7(a~d) 所示, 轴向运动前左夹板与插座的接触力为 F_b , 其在 X 、 Y 向的分力为 F_{bx} 和 F_{by} ; 轴向运动后左夹板与插座的接触力为 F_a , 其在 X 、 Y 向的分力为 F_{ax} 和 F_{ay} 。红色区域表示左夹板与插座的受力面积。以机器人末端沿 Y 轴负方向偏转为例, 左夹板与电连接器插座接触并到达指定接触力 F_b , 如图 7(a) 所示。如图 7(b) 所示, 机器人沿 Z 轴反方向移动指定的距离, 导致左夹板与插座之间的受力面积减小。经过这一轴向运动后, 机器人与插座的接触力从 F_b 减小至 F_a 。由受力分析可得, 小角度偏转情况下, 接触力 F 主要由横向接触力 F_x 组成。因此, 经过轴向运动后, 横向接触力 F_x 由 F_{bx} 突变至 F_{ax} 。通过对比图 7(c, d) 可知, 当机器人末端沿 Y 轴正向偏转时, 经过轴向运动后的横向接触力没有发生明显变化。根据上述对比可知, 不同偏转方向下, 轴向运动前后横向接触力的变化相异。因此, 可以依据机器人轴向运动前后的横向接触力 F_x 是否发生突变, 判断末端沿 Y 轴偏转的方向。

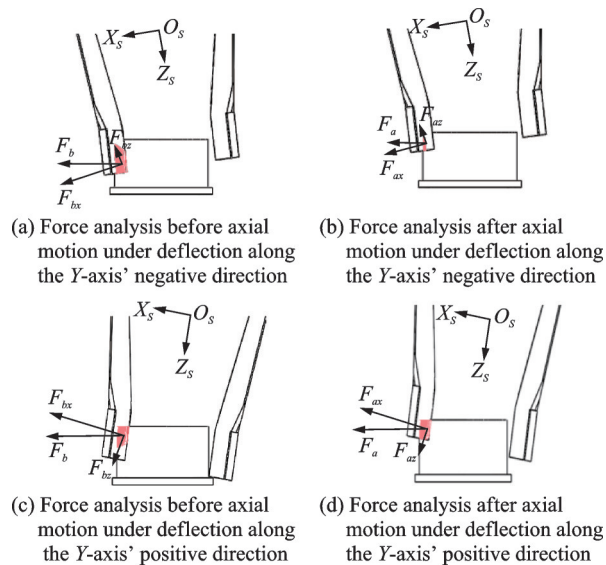


图7 轴向运动前后夹板的受力分析

Fig.7 Force analysis of the splint before and after axial movement

在确定偏转方向后, 控制机器人末端轴向运动, 使其从位置定心的双夹板接触状态移动至偏转方向夹板接触的单夹板接触状态。在该接触状态下, 对其进行扭矩方向的轨迹控制。以机器人沿 Y 轴负向偏转为例, 对其进行调平轨迹规划。如图 8 所示, 在获得沿 Y 轴的姿态偏转后, 控制机器人移动至如图 8(a) 所示的左夹板单接触状态; 此时, 由静力分析可知, 接触点与 $O_s Y_s$ 轴的垂直距离为 l , F_s 作用于 $O_s Y_s$ 轴的扭矩 M_y 为

$$M_y = F_s \cdot l \quad (12)$$

为消除姿态误差, 建立阻抗控制算法控制机器人沿扭矩方向旋转, 其控制方程为

$$M_y - M_d = m_\theta (\ddot{\theta}_c - \ddot{\theta}_r) + b_\theta (\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_r) \quad (13)$$

式中 m_θ 、 b_θ 分别为绕 $O_s Y_s$ 方向上的惯性参数和阻尼参数。

同样结合离散阻抗控制方程式(3)得到旋转轨迹 θ_c 为

$$\begin{aligned} \theta_c(t) = & \left(2 - \frac{bT}{m}\right) \theta_c(t-1) + \frac{T^2}{m} M_{ye}(t) + \\ & \left(\frac{bT}{m} - 1\right) \theta_c(t-2) \end{aligned} \quad (14)$$

假设系统处于稳定状态, 结合定心过程中沿 X 方向的阻抗方程式(6), 引导机器人末端左夹板与电连接器插座保持稳定接触, 即接触力 $F_s > 0$, 并且扭矩 $M_y > 0$ 。通过式(14)计算得到的旋转轨迹 θ_c 也大于 0, 进而引导机器人沿 $O_s Y_s$ 方向逆时针运动, 即偏转角误差 θ 减小的方向上移动。在旋转过程中, 夹爪与插座的接触宽度通过阻抗算法进行实时调整, 确保左夹板与插座保持稳定的接触。直至扭矩 M_y 降至 0, 机器人停止运动, 如图 8(b) 所示。该过程被称为 Y 向调平过程。

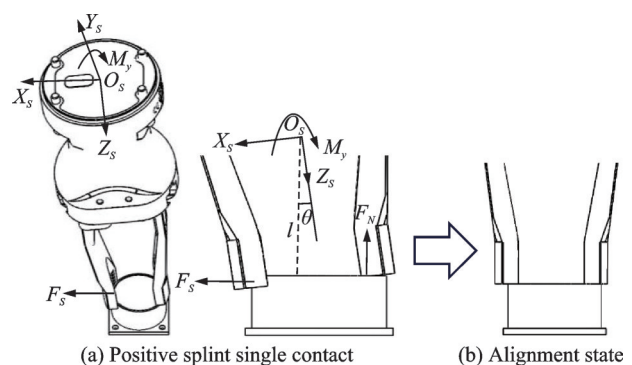


图8 Y向姿态调平

Fig.8 Posture leveling of Y-axis

3.3 X向偏转识别与接入轨迹规划

如图 9(a) 所示, 在沿 Y 轴方向偏转调平后, 机器人末端仍存在沿 X 轴方向的偏转角 β 。针对机器人末端沿 X 轴的偏转误差, 采用基于 Z 轴旋转的

姿态识别方法。如图 9(a,b)所示,机器人在维持末端沿 X 轴的偏转角度不变的同时,控制其末端沿 Z 轴旋转 90°。此时,末端沿 X 轴的偏转角 β 就转换为沿 Y 轴的偏转角,沿 X 轴的调平过程就可以通过沿 Y 轴的调平方法来实现。

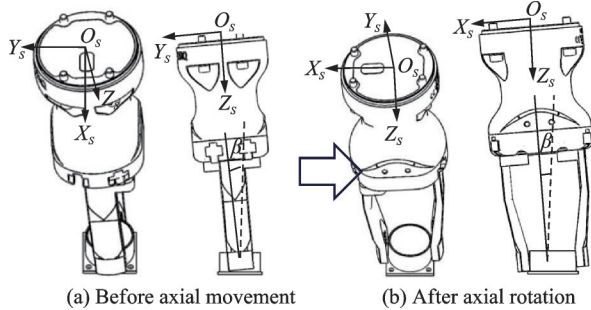


图 9 基于轴向旋转的姿态转换

Fig.9 Posture transformation based on axial rotation

基于位置定心和姿态调平方法,插座中心位姿的定位流程如图 10 所示。首先,机器人通过接触点的位置进行位置定心。其次,基于轴向运动辨别出其末端沿 Y 轴的偏转方向。然后,结合夹板受力分析与偏转方向来控制机器人末端在扭矩方向上的旋转,从而完成沿 Y 轴的姿态调平;最后,通过轴向旋转和沿 Y 轴的姿态调平方法,完成沿 X 轴的姿态调平。

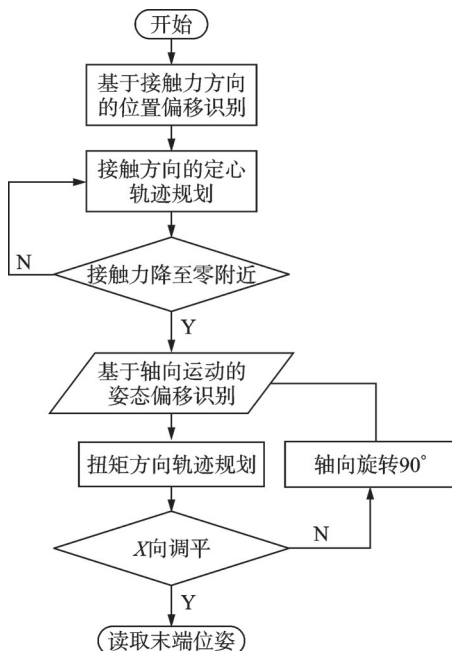


图 10 插座中心位姿定位流程图

Fig.10 Flow chart of socket center pose localization

获得插座中心的精准位姿后,机器人需夹取电连接器插头完成接入流程,主要为定位键、槽的定位。如图 11 所示,为了保证接入过程中定位键、槽的准确啮合,使用阻抗控制算法保持电连接器插头

与插座恒定的接触力 F_N ;同时,控制机器人沿末端 Z 轴顺时针旋转,当接触力突变至零,定位键与定位槽完成啮合。接触过程中接触力 F_N 的阻抗控制方程如下

$$F_e - F_d = m_z(\ddot{z}_c - \ddot{z}_d) + b_z(\dot{z}_c - \dot{z}_d) \quad (15)$$

式中 m_z 、 b_z 分别为 z 轴方向上的惯性参数和阻尼参数。

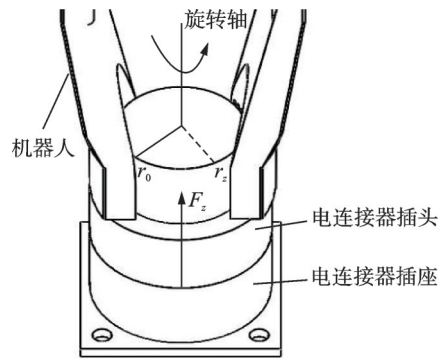


图 11 旋转搜索

Fig.11 Rotation search

在控制过程为了获得稳定的控制轨迹,即阻抗控制方程保持稳定状态^[29],必须有

$$\frac{m}{T} < b < \frac{2m}{T} \quad (16)$$

式中各参数需依据机器人末端与电连接器插座在接触过程中的动态交互特性进行合理选取。其中 m 反映系统的惯性特性,需与控制器动态响应特性和系统结构参数匹配,过大或过小均可能引起响应延迟或系统振荡;阻尼系数 b 直接影响系统的稳定性与响应速度,是关键调节参数;采样周期 T 决定系统的整体响应速率。为适应接触过程中的不同阶段,本文分别设定不同的 m 和 T 值以优化系统动态性能。在满足阻抗控制等式约束的前提下,通过系统地调节 b 的取值范围,并结合实验评估其对装配稳定性与快速性的影响,从而确定最优参数组合。

4 实验验证

电连接器装配实验平台如图 12 所示。实验中使用到的主要设备有:六自由度的 UR3 机器人, FT 300-S 六维力传感器, Robotiq Hand-E 平行夹爪, 3D 打印的铝合金自定心夹板。

在装配实验中,为确保航天电连接器在不同环境下的装配精度,选用了 Robotiq 的 FT-300S 力传感器,该传感器具备 IP65 防护等级,并可在 15~35 °C 的温度范围内稳定工作。装配过程中,机器人运动通常保持平稳,且运动加速度的影响可忽略不计。为了消除力传感器系统误差及装配零件自

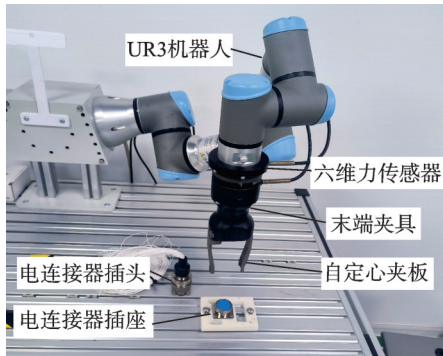


图 12 电连接器装配实验平台

Fig.12 Experimental platform of electrical connector assembly

重对传感器测量的潜在影响,本实验采用静态标定方法进行校准。通过在至少 3 个不同姿态下采集传感器数据,并运用最小二乘法一次性求解传感器零点、负载重力和负载重心坐标等参数,旨在消除零点漂移和负载效应,从而准确获取机器人末端所受的力和力矩^[30]。

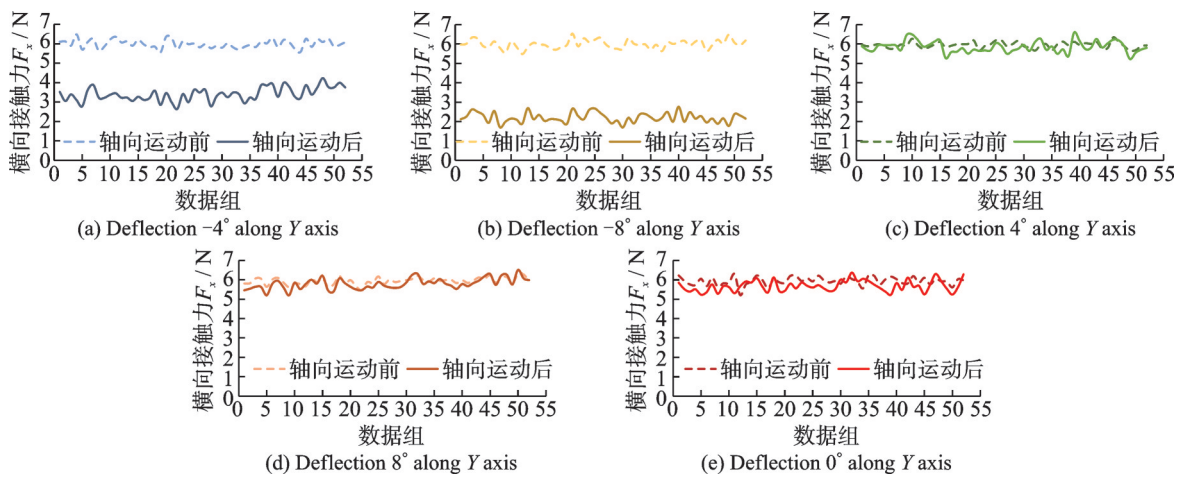


图 13 不同角度轴向运动前后力曲线

Fig.13 Force curves before and after axial movement at different deflection angles

4.2 插座定位实验

在插座定位实验中,基于视觉系统定位的机器人姿态分布如图 14 所示。图 14 中, $O_G T$ 为姿态对

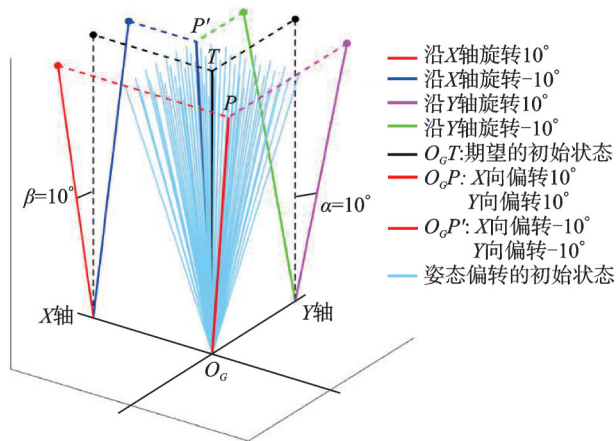


图 14 末端初始姿态

Fig.14 Initial end-effector pose

4.1 基于轴向运动的 Y 向姿态识别

为了验证轴向运动识别末端沿 Y 向姿态偏转的有效性,选取末端夹具 5 个沿 Y 轴正/负向偏转的初始角,控制机器人左夹板与插座保持 6 N 接触力后,末端夹具沿 Z 轴方向运动 1.5 mm。通过观察机器人轴向运动前后的接触力变化趋势,判断其末端沿 Y 轴的正、负偏转方向。5 组实验中末端左夹板与插座的初始接触力均控制在 6 N 左右,沿 Z 轴方向运动距离为 1.5 mm。图 13 给出了机器人在不同偏转角下,其末端在轴向运动 1.5 mm 前、后的 52 组接触力数据曲线。通过对图 13(c~e)分析可知,当沿 Y 轴无偏转或正向偏转时,机器人轴向运动前后的接触力变化不明显。而沿 Y 轴负向偏转时,机器人在轴向运动 1.5 mm 后,其接触力的突变范围为 2~4 N,如图 13(a,b)所示。因此,可根据轴向运动前、后接触力是否发生大于 1 N 的突变,将沿 Y 轴正、负向的偏转区分开。

齐时的机器人末端分布; $O_G P$ 为存在视觉定位误差时的机器人末端分布。其中, O_G 为中心原点, X 、 Y 轴为旋转轴;机器人末端姿态分布 $O_G P$ 和 $O_G P'$ 为 $O_G T$ 先沿 Y 轴旋转 α 角度,再沿 X 轴旋转 β 角度而成。

选取 6 组不同 α 、 β 偏转角代表 6 种姿态误差,同时 6 组在 X、Y 方向上位置误差均为 10 mm。进行了多次插座定位实验,实验结果如表 1 所示。通过对表 1 进行分析可知:6 组不同偏转角下,初始偏转角误差越小,所使用的平均定位时间越短。通过接入实验发现,当机器人末端与插座的实际位置误差小于 ± 0.5 mm,姿态偏转角误差小于 $\pm 0.5^\circ$ 时,电连接器即可完成装配。由表 1 可知,在 6 组 80 次定位实验后的最大位置误差和平均误差均小于 ± 0.5 mm,同时最大姿态误差和平均误差也均小于 $\pm 0.5^\circ$,因此机器人的定位成功率达到了 100%。

表 1 不同初始状态下的定位实验
Table 1 Positioning experiments at different initial states

组号	沿 Y 轴 偏转角 $\alpha/(^{\circ})$	沿 X 轴 偏转角 $\beta/(^{\circ})$	实验 次数	成功率/ %	平均定位 时间/s	平均位置 误差/mm	最大位置 误差/mm	平均姿态 误差/ $(^{\circ})$	最大姿态 误差/ $(^{\circ})$
1	-10	-10	80	100	412.50	0.10	0.30	0.17	0.37
2	-8	-8	80	100	311.55	0.11	0.20	0.20	0.45
3	-4	-4	80	100	230.90	0.06	0.27	0.09	0.23
4	4	4	80	100	242.58	0.07	0.23	0.10	0.21
5	8	8	80	100	338.42	0.08	0.16	0.25	0.43
6	10	10	80	100	435.94	0.11	0.27	0.18	0.40

本文所提出的方法在 6 组实验中,平均定位时间在 230.90~435.94 s。虽然定位时间相对较长,但该方法完全基于接触力信息,无需依赖视觉系统,在姿态偏差和接触不确定性条件下仍能稳定完成高精度定位任务。考虑到航天电连接器装配对可靠性和安全性的极高要求,该定位效率在此类应用场景下是合理且具有工程可行性的。

表 2 为电连接器定位实验下不同搜索阶段下的惯性参数、阻尼参数和采样周期参数。

通过分析上述 6 组不同偏转角下的插座定位流程发现,各偏转角下的定位过程均相同。这里,

表 2 不同搜索阶段下的阻抗控制参数
Table 2 Impedance control parameters at different search stages

搜索阶段	惯性参数 m	阻尼参数 b	采样周期 T/s
位置定心	$1\text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{mm}$	$350\text{ N}\cdot\text{s}/\text{mm}$	0.005
姿态调平	$0.05\text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$	$8\text{ N}\cdot\text{s}/\text{rad}$	0.008
接入阶段	$1\text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{mm}$	$600\text{ N}\cdot\text{s}/\text{mm}$	0.003

以 α, β 角度均为 10° 为例进行了细致的分析。图 15 给出了 α, β 角度均为 10° 时,插座定位实验过程中,力传感器数据随时间的变化趋势。图 15 中, A_1 ($0\sim t_1$) 为位置定心阶段;在定心过程中,机器人通过接触力 F_x, F_y 来识别位置方向的偏移,并朝轴向力减小的方向移动。在 A_2 阶段,机器人根据轴向运动前后,接触力的变化情况来判断末端是否发生偏转;若 F_x 基本没有发生突变,则判定机器人沿 Y 轴正方向偏转。在 A_3 阶段,机器人通过轴向运动来到达负夹板侧接触、正夹板底接触状态; A_4 为姿态调平阶段,机器人根据接触力 F_x 来调节末端沿 Y 方向的姿态,当接触力 F_x 和 F_z 减小至零值附近时,末端完成沿 Y 向的姿态调平;在 Y 向对齐后,机器人末端在 A_5 阶段绕 Z 轴旋转 90° ,将其沿 X 方向的偏转变为沿 Y 向的姿态偏转; $t_5\sim t_9$ 时刻,机器人重复 Y 向的姿态调平流程。 $t_9\sim t_{10}$ 时刻为机器人末端进行姿态调平后的位置定心,以实现对接座的定位流程。

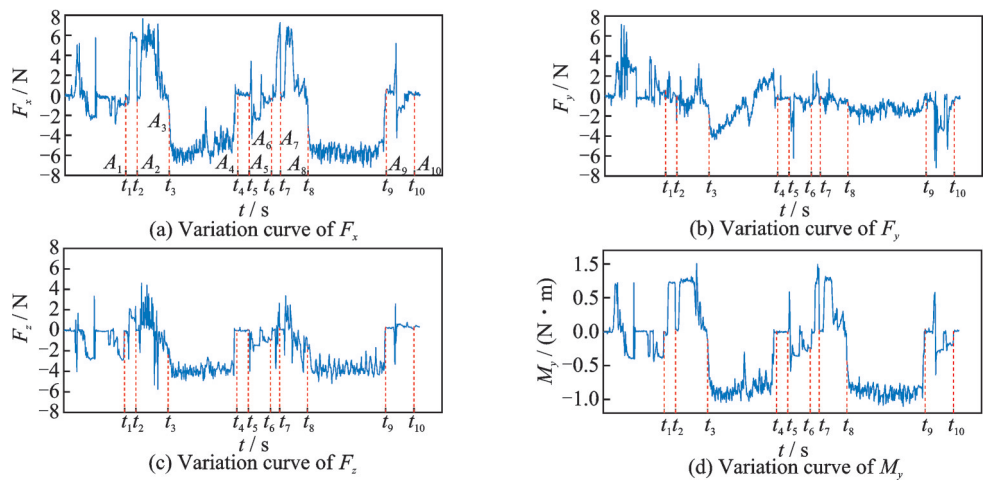


图 15 定位过程力变化曲线
Fig.15 Force change curves of positioning process

图 16 为电连接器插座定位实验,图 16(a~f)分别对应了定位时各阶段末端夹板与插座的状态。

当 α, β 角度均为 10° 时,电连接器定位键、槽旋转搜索并接入过程的接触力变化曲线如图 17 所

示。其中阶段(1),机器人夹取插头靠近插座,直至两者接触;阶段(2),机器人夹取插头与插座保持 $\sim 5\text{ N}$ 接触力的同时,进行旋转搜索;直至 t_2 时刻, F_z 发生突变,定位键、槽成功装配;阶段(3),机器人

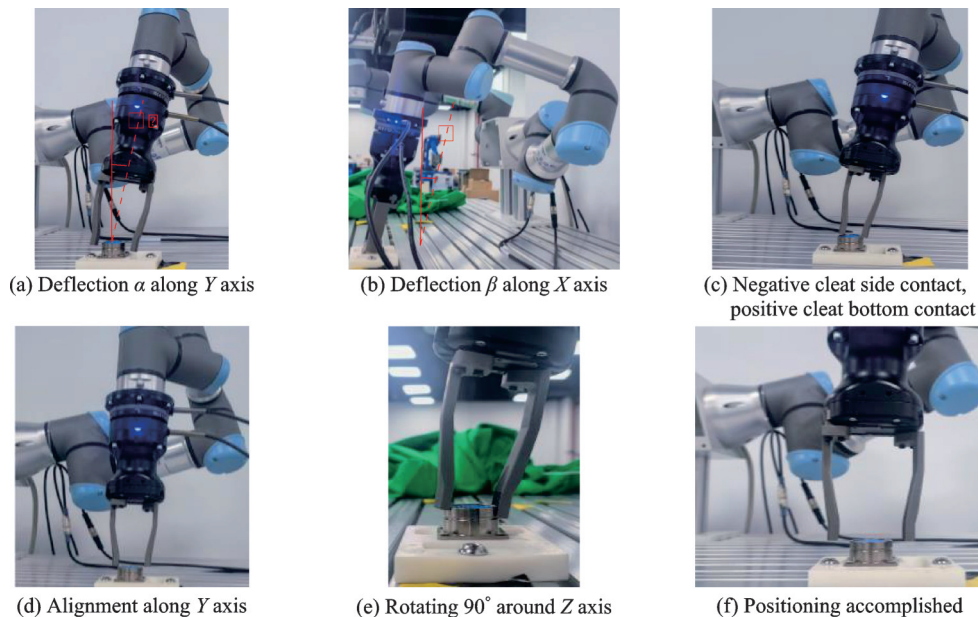
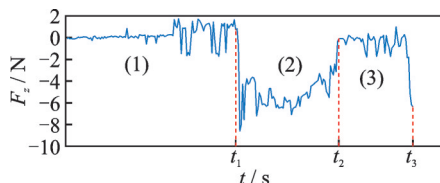


图 16 插座定位实验图

Fig.16 Socket positioning experiment diagrams

图 17 搜索过程的 F_z 变化曲线Fig.17 F_z variation curve of the search process

夹取插头插入插座,当力达到 6 N 判定其完成接入。

图 18 为机械臂夹取插头接入的实验过程示意图。图 18 表示每个阶段的机械臂末端状态,其中图 18(a)为 t_1 时刻状态,图 18(b)到(c)对应阶段 b, (c)到(d)对应阶段 c。

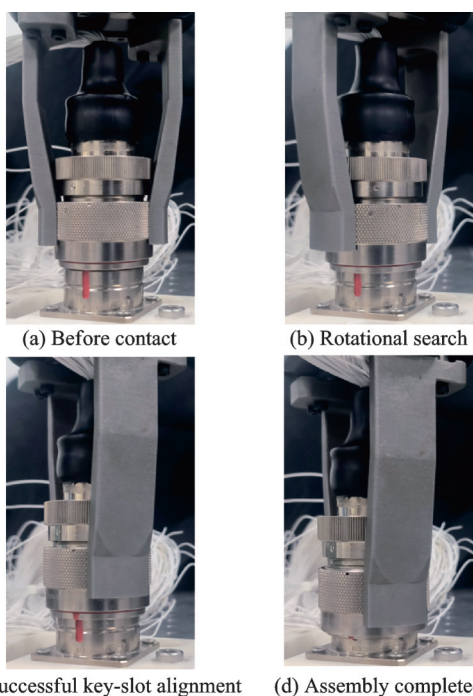


图 18 电连接器接入实验过程

Fig.18 Experimental procedure of electrical connector access

5 结 论

本文提出了一种适用于遮挡、光照不足等复杂场景下的电连接器自动装配定位方法。通过对末端夹爪的接触力分析,实现了机器人末端初始位置误差的在线识别。结合接触力的方向信息,采用柔顺控制方法完成插座的位置定心。针对姿态偏转问题,提出了基于轴向运动接触力响应的偏转方向识别方法,并通过扭矩反馈来实现姿态调平控制。该方法综合了 X/Y 轴姿态控制策略,显著增强了机械臂在复杂插座结构下的定位能力。在此基础上,结合旋转引导策略完成电连接器的最终接入。实验结果表明,所提方法在不同初始位姿偏差下均能稳定实现电连接器插座的定位与自动装配。当前实验所使用的对象为柔性插头线缆,而工程实践所使用的电连接器插头可能是多股刚性线缆,可能会对接触力的反馈检测产生较大的影响。未来的工作会考虑在末端工具中增加柔性缓冲材料、优化夹持结构等方法来削弱刚性线缆带来的干扰误差,以保证电连接器的接入稳定性。

参考文献:

- [1] ZHAO Y, LI J, ZHANG Q, et al. Simultaneous detection of defects in electrical connectors based on improved convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-10.
 - [2] 王明明, 罗建军, 袁建平, 等. 空间在轨装配技术综述[J]. 航空学报, 2021, 42(1): 523913.
- WANG Mingming, LUO Jianjun, YUAN Jianping, et al. In-orbit assembly technology: Review[J]. Acta

- Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(1): 523913.
- [3] JI L, HUANG C. Improved YOLOv5 network for aviation plug defect detection[J]. Aerospace, 2024, 11(6): 488.
- [4] 董云龙, 李祥飞, 刘行, 等. 航空航天领域机器人化智能装配技术综述[J]. 人工智能, 2022(3): 6-20.
DONG Yunlong, LI Xiangfei, LIU Xing, et al. Robotic and intelligent assembly technologies in aerospace: A review[J]. AI-View, 2022(3): 6-20.
- [5] YUMBLA F, YI J S, ABAYEBAS M, et al. Analysis of the mating process of plug-in cable connectors for the cable harness assembly task[C]//Proceedings of 2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Jeju, South Korea: IEEE, 2019: 1074-1079.
- [6] 李万琴, 景海涛, 方发明, 等. 基于任务性的航天电连接器抓取方法[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(4): 58-66.
LI Wanqin, JING Haitao, FANG Faming, et al. A task-based grasping method for aerospace electrical connectors[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2024, 41(4): 58-66.
- [7] LI C, CHEN P, XU X, et al. A coarse-to-fine method for estimating the axis pose based on 3D Point clouds in robotic cylindrical shaft-in-hole assembly[J]. Sensors, 2021, 21(12): 4064.
- [8] FEI H, WANG Z, TEDESCHI S, et al. Boosting visual servoing performance through RGB-based methods[J]. Robotic Intelligence and Automation, 2023, 43(4): 468-475.
- [9] MA Y, LIU X, ZHANG J, et al. Robotic grasping and alignment for small size components assembly based on visual servoing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106: 4827-4843.
- [10] 李宗刚, 李彦博, 焦建军, 等. 一种基于AEKF的铆接件视觉伺服精确装配方法[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(1): 107-118.
LI Zonggang, LI Yanbo, JIAO Jianjun, et al. A visual servo precision assembly method for riveting parts based on adaptive extended Kalman filtering[J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(1): 107-118.
- [11] PARK H, PARK J, LEE D, et al. Compliant peg-in-hole assembly using partial spiral force trajectory with tilted peg posture[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4447-4454.
- [12] HEBECKER M, LAMBRECHT J, SCHMITZ M. Towards real-world force-sensitive robotic assembly through deep reinforcement learning in simulations [C]//Proceedings of 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Delft, Netherlands: IEEE, 2021: 1045-1051.
- [13] TANG T, LIN H, ZHAO Y, et al. Autonomous alignment of peg and hole by force/torque measurement for robotic assembly[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Fort Worth, USA: IEEE, 2016: 162-167.
- [14] ABDULLAH M, ROTH H, WEYRICH M, et al. An approach for peg-in-hole assembling using intuitive search algorithm based on human behavior and carried by sensors guided industrial robot[J]. IFAC-Papers OnLine, 2015, 48: 1476-1481.
- [15] TRIYONOPUTRO J, WAN W, HARADA K. Quickly inserting pegs into uncertain holes using multi-view images and deep network trained on synthetic data[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Macau, China: IEEE, 2019: 5792-5799.
- [16] NIGRO M, SILEO M, PIERRI F, et al. Peg-in-hole using 3D workpiece reconstruction and CNN-based hole detection[C]//Proceedings of 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Las Vegas, USA: IEEE, 2020: 4235-4240.
- [17] HAUGAARD R, LANGAA J, SLOTH C, et al. Fast robust peg-in-hole insertion with continuous visual servoing[C]//Proceedings of the 4th Conference on Robot Learning (CoRL 2020). Cambridge, USA: IEEE, 2020: 10.
- [18] CAO Y, REN K, CHEN Q. Template matching based on convolution neural network for UAV visual localization[J]. Optik, 2023, 283: 170920.
- [19] CHANG W. Robotic assembly of smartphone back shells with eye-in-hand visual servoing[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2018, 50: 102-113.
- [20] LIAN W, KELCH T, HOLZ D, et al. Benchmarking off-the-shelf solutions to robotic assembly tasks [C]//Proceedings of 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Prague, Czech Republic: IEEE, 2021: 1046-1053.
- [21] MARVEL A J, BOSTELMAN R, FALCO J. Multi-robot assembly strategies and metrics[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2018, 51(1): 32.
- [22] KANG H, ZANG Y, WANG X, et al. Uncertainty-driven spiral trajectory for robotic peg-in-hole assembly [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(3): 1.

- [23] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17). Red Hook, USA: Curran Associates Inc, 2017: 6000-6010.
- [24] LUO J, SOLOWJOW E, WEN C, et al. Reinforcement learning on variable impedance controller for high-precision robotic assembly[C]//Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, Canada: IEEE, 2019: 3080-3087.
- [25] DOSOVITSKIY A, BEYER L, KOLESNIKOV A, et al. An image is worth 16×16 words: Transformers for image recognition at scale[C]//Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). Appleton :[s.n.], 2021: 7.
- [26] LEE S, YU Y, BACK S, et al. SleepPyCo: Automatic sleep scoring with feature pyramid and contrastive learning[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 240: 122551.
- [27] GU H, FAN S, ZONG H, et al. Haptic perception of unknown object by robot: Exploration strategy and recognition approach[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2016, 13(3): 1-29.
- [28] DUAN J, GAN Y, CHEN M, et al. Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 102: 54-65.
- [29] 戴娜, 戈海龙, 成巍, 等. 基于多方向导纳力控制的机器人柔顺装配系统[J]. 制造技术与机床, 2024(2): 75-79.
- DAI Na, GE Hailong, CHENG Wei, et al. Robotic compliance assembly system based on multidimensional admittance control[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2024(2): 75-79.
- [30] YAN C, WU J, ZHU Q. Learning-based contact status recognition for peg-in-hole assembly[C]//Proceedings of 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Prague: Czech Republic, 2021: 6003-6009.

(编辑:陈珺)