

● 装配·检测

基于3D视觉与力控的舵机柔性自动装配技术研究

蔡虎 李倩 曹英荣 刘英智 刘丁洋
(北京星航机电装备有限公司, 北京 100074)

摘要: 对于航天装备的组装、部装和总装, 采用机器人自动智能装配代替手工装配, 是提升航天装备组装效率和精度、一致性和安全性以及应对突发情况、降低人工成本的重要技术。本文针对航天装备舵机安装的实际需求, 开发了基于3D视觉与力控反馈的双机械臂协同自动装配机器人系统, 主要采用3D视觉实现舵机、基座和螺丝孔洞的识别与精准定位, 采用6维力传感器实现机械臂对于舵机的柔性抓取与放置, 最终利用智能电批完成整个舵机工件的螺丝锁付操作。实验结果表明: 采用以上技术方案, 对于舵机安装基座和螺丝孔洞的位姿识别, 精度可达到 ± 0.1 mm, 姿态角可以达到 $\pm 0.2^\circ$, 因而能实现带定位销精密工件的柔性装配以及高精度的螺丝孔识别和螺丝锁付, 且舵机的安装效率提高30%。

关键词: 机器视觉; 视觉伺服; 力控柔性装配; 双臂协作机器人; 螺丝锁付
中图分类号: TP278 **文献标识码:** A

Research on Actuator Automatic Compliant Assembly Based on 3D Vision and Force Control

Cai Hu Li Qian Cao Yingrong Liu Yingzhi Liu Dingyang
(Beijing Xinghang Mechanical-electronic Equipment Co., Ltd., Beijing 100074)

Abstract: For the assembly process of aerospace equipment, the robot automatic intelligent assembly is an excellent substitute for manual mode, depending on the advantage to improve assembly efficiency, reduce labor cost and ensure the assembly accuracy, consistency and safety. In this paper, according to the actual needs of the installation of the steering gear in aerospace equipment, a dual manipulator cooperative automatic assembly robot system based on 3D vision and force control feedback is developed. It mainly uses 3D vision to realize the identification and accurate positioning of the actuator, base and screw holes, and uses six dimensional force sensor to realize the flexible grasp and placement of the manipulator for the actuator. Finally, it uses the intelligent electric screwdriver to complete the screw locking operation of the entire actuator workpiece. The experimental results show that the visual identification of high-precision screw holes/locating pins and force-controlled assembly of steering gear with an accuracy of ± 0.1 mm, the attitude angle can reach $\pm 0.2^\circ$, thus realizing high-precision grasping, placing and screw locking installation of steering gear, and the installation efficiency of actuator can be improved by 30%.

Key words: machine vision; visual servoing; force controlled compliant assembly; double arm cooperative robot; screw lock

1 引言

近些年, 随着人工智能与机器人技术的飞速发

展, 柔性自动智能装配技术得到了快速发展, 尤其是在汽车、家电、3C 等领域的生产装配取得了明显成效。然而在航天装备的制造、装配领域, 基于机器人

系统的智能自动装配技术应用仍非常有限^[1-3]。以飞行设备的舵机装配过程为例，目前舵机的总装生产过程仍然采用手工模式装配。舵机的质量达到 8 kg，人工装配作业时，需要用双手搬动该工件，举在胸前的安装工位进行装配^[4]。舵机与基座的配合间隙很小，带销孔定位，容易卡住，并有隔热层需要往下按压，通常人工力气不够，需要额外借助设备进行按压，总装过程对操作人员技能要求较高，手工工作量大、工人劳动强度高、安装装配周期长、且经常出现返工现象，产品质量不易保证，生产效率提升困难。

使用机器人自动化智能装配的方式，代替传统人工装配，能够更好地保障产品的一致性、安全性，提升装配效率和提高产量。然而，不同于成熟的汽车装配、电子产品组装等单一工作场景，航天装备组装过程环境更为严苛，产品型号、结构更为复杂，工件价格昂贵且工艺要求严格，必须避免磕碰、损伤，对装配精度以及柔顺性提出了极高的要求。尤其需要对装配中的力、螺丝的拧紧力进行监控，这是人工装配不能实现的。此外，总装作为航天装备制造的关键环节，占全部工作量的 40% 以上，延续当前的手工装配模式，已无法满足航天装备产能大幅提升的需求^[5-6]。

本文针对航天装备的舵机装配作业，提出了基于机器视觉与力控反馈的舵机柔性自动装配技术，研究高精度 3D 视觉识别算法，结合深度学习算法更加精准识别安装基座，并与 6 维力反馈控制方式相结合，实现航天飞行装备中舵机的抓取、定位、力控装配和螺丝锁付。

2 面向舵机装配的智能双臂机器人自动装配系统设计

2.1 硬件平台

针对航天装备舵机的智能自动装配，采用机器视觉与力控反馈结合的机器人柔性装配方案，装配平台主要由支架、双机械臂、电动夹爪、直线运动模组、螺丝料盘和电批、6 维力传感器以及 3D 视觉识别系统组成。每台机械臂均安装有 3D 视觉识别系统，用以准确识别舵机、安装基座、孔位的位置。直线运动模组用于扩展机械臂的作业范围。智能双臂机器人柔性装配系统原理如图 1 所示。双臂柔性装配机器人系统构成如图 2 所示。图 3 为双臂智能装配流程图。图 4 为舵机放置图。

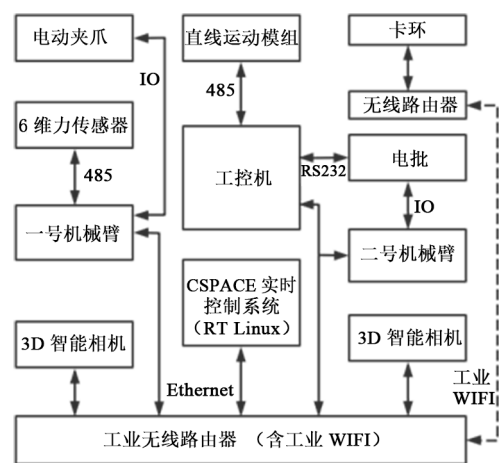


图1 双臂智能装配机器人系统硬件原理框图

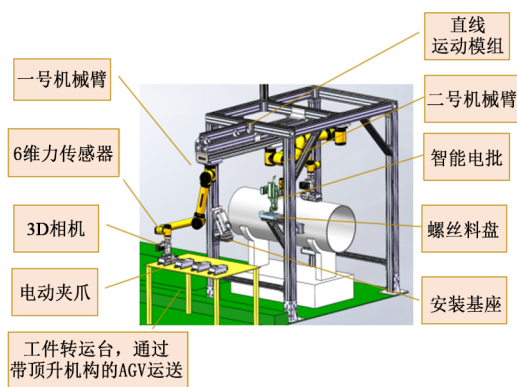


图2 双臂智能装配机器人示意图

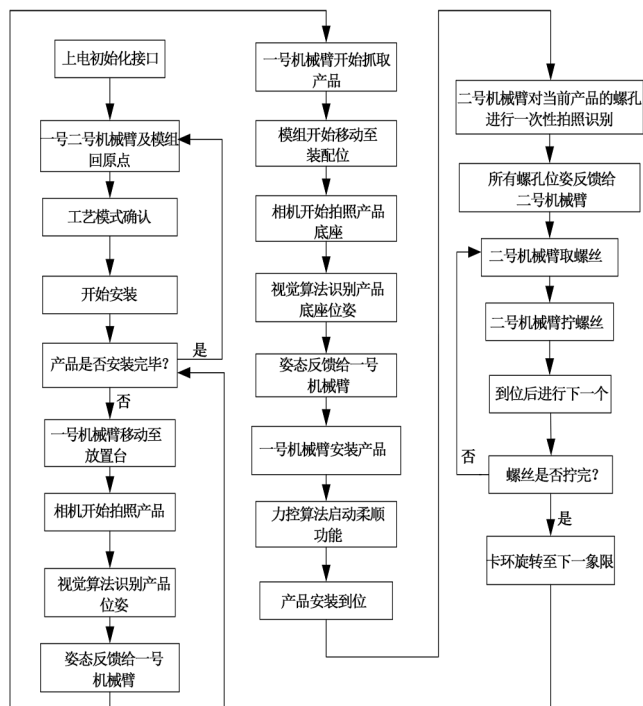


图3 双臂智能装配流程图

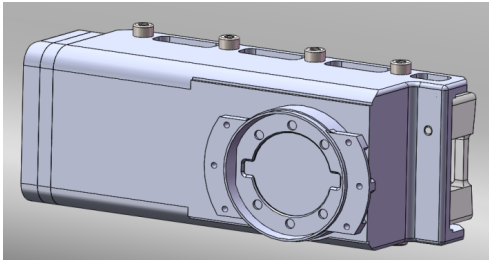


图 4 舵机放置图

2.2 软件设计

为实现图 3 所示的工作流程，软件部分主要由运行在一号机械臂和二号机械臂的控制软件、运行在工控机的总控软件 3 部分组成。

一号机械臂的控制软件运行在机械臂的控制器上，功能主要包括夹爪的控制和状态监测，触发 3D 相机进行拍照，经过工控机的视觉处理软件和总控软件处理后，返回工件的位姿，控制一号机械臂实现工件的抓取，并通过斜坡面进行二次定位，确保夹爪与工件的相对位置固定。二次定位之后，抓取工件返回到安装位姿，之后给总控软件控制指令，控制直线运动模组，带动一号机械臂运行到工件安装工位，给总控软件发送指令触发 3D 相机对安装基座进行拍照，识别安装基座的位姿，进而控制机械臂进行安装，安装过程中需要融合柔顺控制技术，才能实现工件的装配。

二号机械臂的控制软件同样运行在机械臂的控制器上，功能包括电动螺丝刀的转矩、转速、进给控制和状态监测，触发 3D 相机进行拍照，经过工控机的视觉处理软件和总控软件处理后，识别螺丝孔的位姿，返回位姿后，控制电动螺丝刀抓取对应的螺丝，进行螺丝的拧紧。然后识别另一侧的 4 个螺丝孔，进行螺丝拧紧^[9-13]。

总控软件功能包括用户界面、采用 Ethernet 接口与一号机械臂和二号机械臂的交互控制、采用 Ethernet 接口与 2 台 3D 相机的通讯控制、采用 RS232 接口读取电动螺丝刀的拧紧参数和采用 Ethernet 接口对装配效果照片进行采集，对每个部件进行监测和控制，便于调试和维护。其中，用户界面功能包括 4 个象限共 32 颗螺丝拧紧任务的设定、螺丝抓取序号的设置、机械臂的控制和监测以及 6 维力传感器的监测、相机和机械臂的连接参数设置^[14-15]。

3 高精度视觉匹配处理算法与双臂协调控制策略

3.1 3D 点云匹配工件位姿识别

舵机工件位姿的识别和抓取点的识别建立以及螺丝孔位识别与定位控制，均采用高精度的 3D 视觉相机进行识别，并通过高精度 3D 点云匹配算法对图像进行处理^[16-18]。

首先通过手眼标定，获取相机坐标系 C 与机器人坐标系 W 的实时转换关系：

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， R 是 3×3 正交旋转矩阵， t 是 3D 平移向量， $\begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$ 为外部参数矩阵。

对于舵机识别、抓取以及螺丝孔识别过程，视觉处理过程如下：

a. 首先通过相机获取待抓取舵机和螺丝孔上的 3D 点云特征图，将舵机和螺丝孔上对应的特征模板图像作为识别定位依据；

b. 设置抓取点。让工件处于夹爪抓取的状态，此时记录机械臂的法兰末端位姿坐标，然后退出夹爪，让机械臂回到拍照点，记录此时机械臂法兰末端位姿坐标，进行拍照，获得相机返回的位姿，通过这 3 种位姿关系，建立法兰末端、相机识别的位姿、拍照点的位姿的对应关系，设置好抓取点，抓取点设置好一次就可以，后续拍照直接调用该函数关系即可，不需每次拍照都设置；

c. 识别拍照。通过获取的 3D 点云图与特征图进行匹配，得到工件抓取点的位姿。3D 视觉处理软件处理的过程还包括获取实例分割、点云预处理、点云滤波，得到较精确的工件 3D 点云图，进而与模板匹配^[19-20]；

d. 3D 视觉引导机械臂定位控制。总控软件通过 3D 相机获取目标工件的位姿，控制机械臂进行定位控制。

3.2 融合深度学习算法和边缘匹配的安装基座识别

因安装基座含有隔热层，隔热层的施工与布置对基座的视觉识别定位会产生影响。为提高精度，基于深度学习的安装基座识别模型构建过程中，需采集大

量包含差异化隔热层特征的图像样本作为训练集。通过将这些标注数据输入深度神经网络进行训练，系统可自主提取图像中的关键特征并优化模型参数^[21-22]，从而获得高精度的卷积神经网络（CNN）识别模型。为提升模型泛化能力，训练集需覆盖多类隔热层形态及工况场景，其目标识别流程如图5所示。

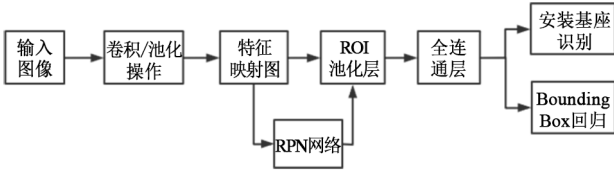


图5 目标检测方法结构示意图

在神经网络训练前，需对原始图像数据进行预处理以提升样本质量。关键预处理操作包括：空间标准化、目标标注、分辨率增强及冗余样本剔除。其中，卷积层通过滤波器实现特征提取，池化层则执行特征降维以减少参数量^[23-24]。该卷积神经网络（CNN）的架构设计如图6所示。

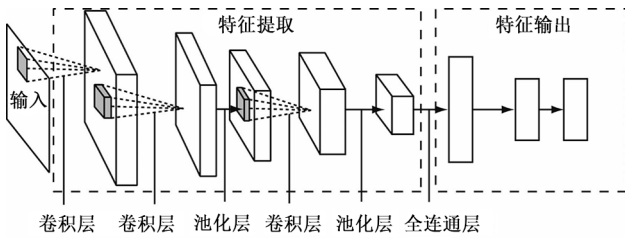


图6 CNN架构拓扑图

安装基座平面为矩形，假设输入图像尺寸为步幅 S ，图像深度为 C ，Padding使用 P ，则卷积后输出图像大小：

$$W_{out} = \frac{W_{in} - F + 2P}{S} + 1, H_{out} = \frac{H_{in} - F + 2P}{S} \quad (2)$$

池化后输出图像大小：

$$W_{out} = \frac{W_{in} - F}{S} + 1, H_{out} = \frac{H_{in} - F}{S} + 1 \quad (3)$$

基于卷积层与池化层的协同特征提取机制，系统自动生成安装基座的特征映射图。该特征图经网络处理形成共享特征表达后，由区域候选网络（Region Proposal Network, RPN）定位安装基座的潜在区域，最终输出目标在图像空间中的位姿参数。

3.3 机械臂的控制

针对工件安装情况的复杂多变，采用基于双目视

觉的双臂协调运动控制方法，实现双臂的协调控制。工件装配过程中，采用立体视觉感知系统驱动双臂协同作业，基于双成像单元的空间坐标解算实现三维环境重构，同步完成目标定位与深度估计。该视觉引导机制为机械臂协调控制提供实时环境感知数据支撑，实现运动轨迹的闭环优化。通过双目视觉伺服提取标记点位置，根据其观测值和期望值之间的差异，在不进行姿态估计的情况下，利用图像的雅可比矩阵来控制双臂协调操作^[25]，实时调整机械臂运动到期望的位姿，使操作对象和机械臂达到所要求的运动性能^[26-28]。具体研究方案如图7所示。

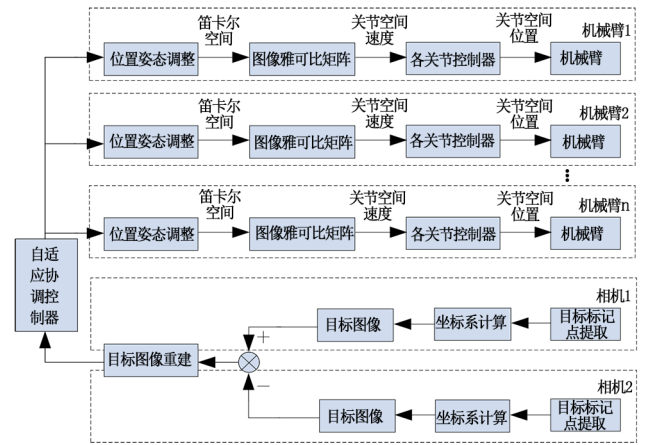


图7 基于视觉伺服的双臂协调控制方案

图像雅可比矩阵（Image Jacobian Matrix）建立了图像特征空间导数与机器人末端运动速度间的微分映射关系，其数学表征如下：

$$\dot{f} = J_r(r) \cdot \dot{r} \quad (4)$$

图像雅可比矩阵为：

$$J_r(r) = \left[\frac{\partial y}{\partial r} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial r_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial r_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial r_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial r_n} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (5)$$

其中， $f = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ ， $\dot{f} \in R^m$ 为表征图像特征坐标的瞬时变化率， $r = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T$ ， $\dot{r} \in R^n$ 表示机器人末端在关节空间的位姿导数。

机器人运动学雅可比矩阵的数学定义为：

$$\dot{r} = J_q(q) \dot{q} \quad (6)$$

其中， $\dot{q} \in R^n$ 表示机器人关节速度矢量， J_q 的具体形式如下：

$$J_r(r) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial r_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial r_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial r_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial r_n} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (7)$$

双臂机器人左右臂各有 6 个关节，则式 (5)、(7) 中的 m 、 n 都为 6。

结合式 (4)、(6) 可得：

$$\dot{q} = J_q^{-1}(q) J_r^{-1}(r) \dot{f} \quad (8)$$

为实现机器人向下一目标位置的移动，需计算各关节的目标角度：此角度通过积分当前关节速度获得，并最终作为指令发送给控制器执行。

4 6 维力/位信息协调与恒力柔顺对接策略

本研究针对双臂协作系统，提出了一种以被操作对象为核心的位置/力协同机制。其控制框架采用内外环阻抗设计：内环阻抗控制器由双臂与被操作对象共同构成，外环控制器则处理被操作对象与环境之间的交互关系。该位置力协调策略的整体架构如图 8 所示。

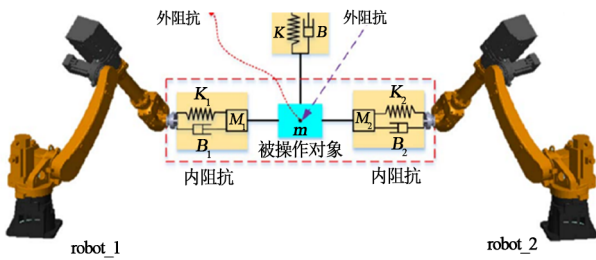


图 8 双臂协作系统中的位置力协调策略示意图

机器人末端执行器位置与接触力之间的变阻抗关系模型为：

$$M\ddot{x}_e + B\dot{x}_e + Kx_e = -F \quad (9)$$

基于位置的阻抗关系表达式为：

$$M\ddot{x}_e + B\dot{x}_e + Kx_e = F_e - F_d \quad (10)$$

其中， F 表示机械臂在空间 3 维方向受到的力向量， F_e 为机器人末端的实测力， F_d 为期望力； $x_e = x - x_d$ 为工件或基坐标系下描述的实际位姿 x 与期望位姿 x_d 之差； $\dot{x}_e = \dot{x} - \dot{x}_d$ 和 $\ddot{x}_e = \ddot{x} - \ddot{x}_d$ 为 x_e 的一阶导数和二阶导数； K 为刚度系数对角矩阵； B 为阻尼系数对焦矩阵； M 为惯性系数对角矩阵。

式 (9) 在频域中可以表示为：

$$x_e(s) = \frac{F_d(s) - F_e(s)}{Ms^2 + Bs + K} \quad (11)$$

得到机器人的期望轨迹 x_d ：

$$x_d = x_e + x \quad (12)$$

内环阻抗控制旨在维持双臂作用于被操作对象的期望协作力（内力），将其约束在预定范围内。当检测到实际内力与期望值存在偏差时，系统依据此力差调整双臂末端执行器的运动轨迹^[29]。外环阻抗控制则负责跟踪期望的外部交互力（外力），确保被操作对象遵循预设轨迹运动。若环境干扰导致外力偏离期望值，系统基于该外力偏差修正被操作对象的运动，进而调整各机器人末端的轨迹。

销孔接触过程中，定位销与孔之间会产生一定的接触力和力矩，通过末端 6 维力传感器检测接触力和力矩，并通过力控算法进行补偿，使销正确插入孔中^[30-31]。

当销孔处于一点接触阶段时，在笛卡尔空间的 X 、 Y 、 Z 均采用导纳控制，则有：

$$X = \begin{bmatrix} K(F_x) \\ K(F_y) \\ K(F_r - F_z) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中， F_r 为 Z 方向期望外力， $K(F)$ 表示导纳控制， F 为输入导纳控制器的外力。

假设 M_x 、 M_y 是工件重力 X 、 Y 方向的力矩分量，当销孔处于两点接触阶段时，6 维力传感器测量到正向力矩时，姿态需要调整，可表示为：

$$X = \begin{bmatrix} K(F_x) \\ K(F_y) \\ K(F_r - F_z) \\ -K(M_x) \\ -K(M_y) \end{bmatrix} \quad (14)$$

5 应用验证与分析

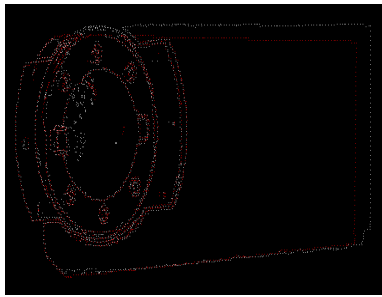
为解决舵机装配的实际生产问题，结合上述原理的自动化装配系统实际搭建并交付应用，并对总体方案进行验证。

5.1 高精度视觉匹配处理算法应用效果

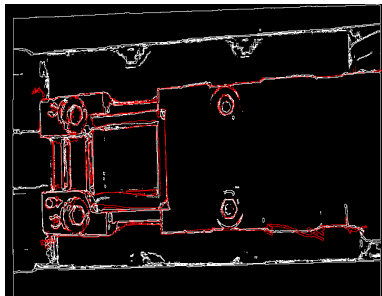
在整个项目过程中，2 个相机需要建立 4 个视觉工程，分别对舵机、底座、前面螺丝孔、后面螺丝孔位置进行识别并点云处理，给出对应的位姿信息。

准确输出舵机 4 个孔位中心作为抓取点；对末端装置的 TCP 进行补正。此工程选取和舵机放置一样

的边缘匹配的模式，使用拖拽法将抓取点设置为4个圆孔垂直朝上。经过实际验证，对于螺孔偏差在 $\pm 0.05\text{ mm}$ 以内的识别能够准确定位并放置进去。



a 抓取舵机匹配图



b 放置舵机匹配图

图9 抓取舵机与放置舵机的模板匹配图



a 前面螺丝孔位匹配图

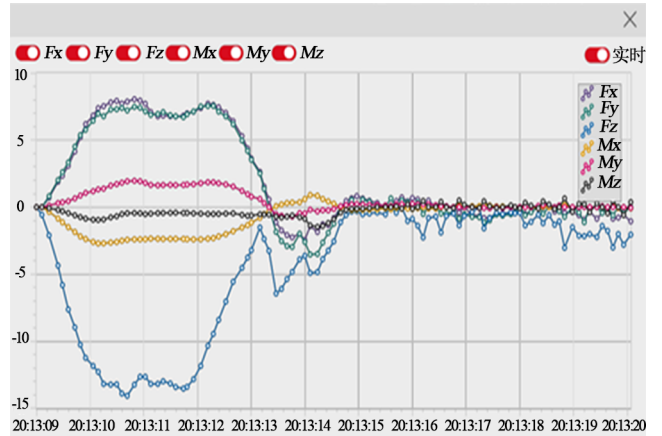


b 后面螺丝孔位匹配图

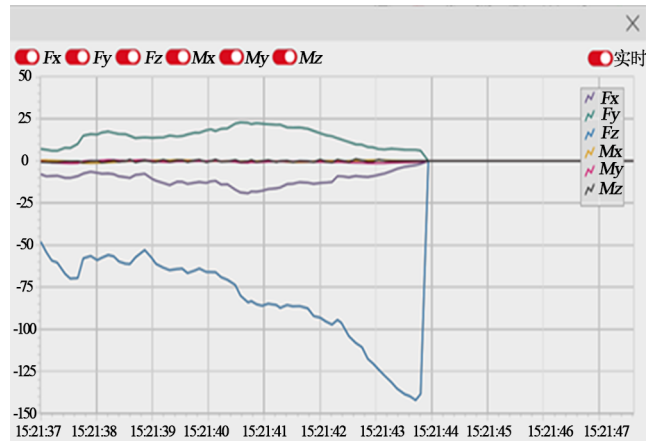
图10 多输出的视觉模板匹配图

图9是抓取舵机与放置舵机的模板匹配图。图10为多输出的视觉模板匹配图，白色为模板，一次拍照，单次输出多个抓取点位姿，红色为每次拍照后的点云处理图。

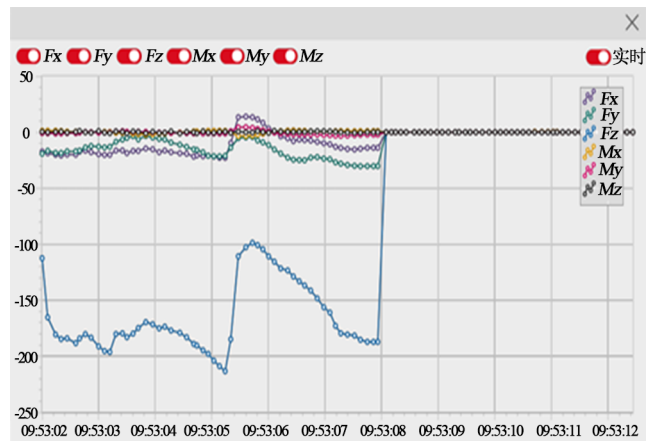
5.2 6维力/位信息协调与恒力柔顺应用效果



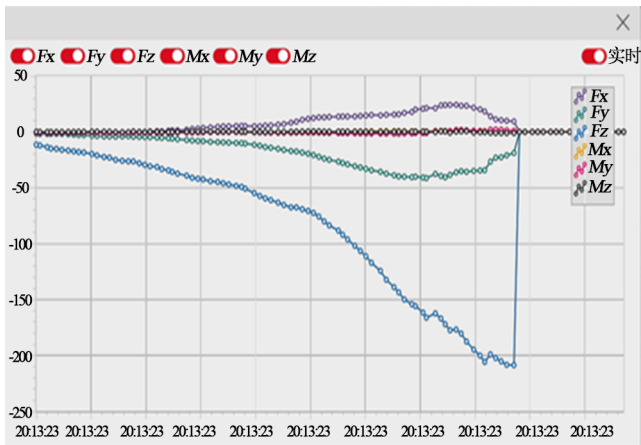
a 第一象限放置舵机过程中的6维力的波形



b 第二象限放置舵机过程中的6维力的波形



c 第三象限放置舵机过程中的6维力的波形



d 第四象限放置舵机过程中的6维力的波形

图 11 放置舵机过程中的6维力的波形

在舵机放置过程中，在接近底座正上方 100 mm 的时候才开启力控调节，且力控调节过程中为保证力控数据及调节精确需要降低运行速度，舵机放置过程中 6 维力调节波形图如图 11 所示，不仅有定位销的力控调节作用，在底座两侧的边沿公差很小的地方也同时起到调节作用，且不同象限的底座与不同象限的舵机装配力控调节波形不同。

在整个装配过程中，可以对 6 维力传感器的数值进行实时监测，并将数据进行波形显示，经实际验证，对公差较小甚至是负公差的装配工况，力控调节效果明显，且不影响装配精度。

6 结束语

本文针对航天装备的舵机装配作业，采用双机械臂协同作业，开发了基于 3D 视觉与力控反馈的舵机柔性自动装配技术。利用斜坡定位和 3D 视觉识别，使得整个系统的定位精度达到了 ± 0.1 mm，姿态角达到了 $\pm 0.2^\circ$ ，并通过 6 维力传感器和机械臂的柔性装配工艺，实现了带定位销精密工件的柔性装配以及高精度的螺丝孔识别和螺丝锁付。通过本文技术研究，实现了舵机装配过程的机械化、自动化，最大化提高生产效率以及装配质量，也有利于进一步推动高精尖武器的生产工艺向智能化装备制造的转型。

参考文献

[1] 陈涛. 基于刚柔混合广义并联机构的轴孔柔顺装配技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
 [2] Park D I, Kim H J, Park C W. Automatic assembly method with the

passive compliant device[C]. Gold Coast: IEEE, 2017.

- [3] Zeng Fa, Xiao Jizhuang, Liu Hongyi. Force/torque sensorless compliant control strategy for assembly tasks using a 6-DOF collaborative robot[J]. IEEE Access, 2019, 7: 108795-108805.
 [4] Fang Qiang, Chen Weidong, Zhao Anan, et al. Control system designing for correcting wing-fuselage assembly deformation of a large aircraft[J]. Assembly Automation, 2017, 37(1): 22-23.
 [5] Zhang Kuangen, Shi Minghua, Xu Jing, et al. Force control for a rigid dual peg-in-hole assembly[J]. Assembly Automation, 2017, 37(2): 200-207.
 [6] Zhang Kuangen, Xu Jing, Chen Jun, et al. Jamming analysis and force control for flexible dual peg-in-hole assembly[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(3): 1930-1939.
 [7] Lee M A, Zhu Yuke, Srinivasan K, et al. Making sense of vision and touch: self-supervised learning of multimodal representations for contact-rich tasks[C]. Montreal: IEEE, 2019.
 [8] Xu Jian, Hou Zengguang, Wang Weiqun, et al. Feedback deep deterministic policy gradient with fuzzy reward for robotic multiple peg-in-hole assembly tasks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(3): 1658-1667.
 [9] 张苗. 基于视觉的工业机器人螺丝锁付系统设计[D]. 西安: 电子科技大学, 2020.
 [10] 王德会. 基于机器视觉的自动螺丝锁付装备及定位方法的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
 [11] 王德会, 王喜顺, 方海涛, 等. 自动螺丝锁付机器人控制系统研究及路径优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(3): 107-110.
 [12] 石小仕, 姚妮川, 董林鹭, 等. 改进型双工位螺丝锁付机器人设计[J]. 机电工程, 2020, 37(2): 196-200.
 [13] 童震. 基于机器视觉的螺丝锁付 SCARA 机器人关键技术研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018.
 [14] 曹瑾. 面向细长轴孔装配的机械臂感知与控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
 [15] Bakšys B, Kilikevičius S, Chadarovičius A. Experimental investigation of vibratory assembly with passive compliance[J]. Mechanika, 2011, 17(6): 608-614.
 [16] 李毅. 基于 3D 视觉的机械臂无序抓取系统研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2021.
 [17] 尹瑞多, 郭刚祥, 陈元杰. 基于 3D 视觉的螺栓定位算法[J]. 中国计量大学学报, 2021, 32(3): 304-309.
 [18] 张兰. 3D 视觉检测让智造大开眼界[J]. 今日制造与升级, 2022(3): 16-17.
 [19] 李乐平. 基于 2D 和 3D 视觉的工业机器人识别与抓取系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

- [20] 魏弦, 张敬东, 吴明卿. 基于 3D 视觉识别的工件姿态研究[J]. 煤矿机械, 2013, 34(8): 72-73.
- [21] Zhang Xuebo, Wang Runhua, Fang Yongchun, et al. Acceleration-level pseudo-dynamic visual servoing of mobile robots with backstepping and dynamic surface control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(10): 2071-2081.
- [22] Gao Huijun, Anwar A, Lin Weiyang, et al. Quality inspection of remote radio units using depth-free image-based visual servo with acceleration command[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(10): 8214-8223.
- [23] 郭思琦. 基于神经网络和 3D 视觉的果园苹果识别与定位的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [24] 卢文雄. 基于 3D 视觉的语义算法的研究与应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [25] Ghasemi A, Li Pengcheng, Xie Wenfang. Enhanced switch image-based visual servoing dealing with features loss[J]. Electronics, 2019, 8(8): 903.
- [26] Han Yu, Chu Zhongyi, Zhao Kai. Target positioning method in binocular vision manipulator control based on improved canny operator[J]. Multimed Tools and Applications, 2020, 79(13): 9599-9614.
- [27] Xu De, Lu Jinyan, Wang Peng. Partially decoupled image-based visual servoing using different sensitive features[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(8): 2233-2243.
- [28] Yang Jiachen, Xie Zexiao, Chen Lei, et al. An acceleration level visual servoing scheme for robot manipulator with iot and sensors using recurrent neural network[J]. Measurement, 2020, 166: 108137.
- [29] Fan Yongxiang, Luo Jieliang, Tomizuka M. A learning framework for high precision industrial assembly[C]. Montreal: IEEE, 2019.
- [30] 吴曼华, 邹观华, 李金恩, 等. 面向柔性制造的新型自动锁螺丝机设计[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2021, 35(3): 60-66.
- [31] 孙品. 基于机器视觉的全自动锁螺丝系统研制[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.