

引文格式：

张原, 宋展, 杨青峰, 等. 基于多信息算法融合的电子元件精准装配研究 [J]. 集成技术, 2023, 12(4): 4-17.

Zhang Y, Song Z, Yang QF, et al. Research on precise assembly of electronic components based on multi-information algorithm fusion [J]. Journal of Integration Technology, 2023, 12(4): 4-17.

基于多信息算法融合的电子元件精准装配研究

张 原^{1,2,3*} 宋 展¹ 杨青峰^{1,3} 潘国瑞³ 崔智敏³

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

²(华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510641)

³(深圳市深科达智能装备股份有限公司 深圳 518103)

摘要 机器人是现代化工业制造与生产的重要装备之一。随着市场需求向小批量、多品种和柔性化方向快速发展, 基于多信息融合的机器人协作系统将为高端精密制造产业赋能。该研究着眼于精密电子元件装配领域, 聚焦手眼系统的精准对位和精密插装技术, 通过建立待插元件与非均质薄板的接触状态模型, 分析其双重位移融合的力位运动特性, 并结合视觉检测与跟踪技术, 提出一种融合视觉、力觉和编码器信息的复合型控制算法。基于电子元件装配平台, 该研究进行了元件插装对比实验和信息融合算法的装配实验, 结果表明, 对齐阶段的定位精度在 0.185 pixels 以内, 装配阶段的接触状态判定和调节算法保障了元件与插槽的安全有效装配。

关键词 机器人; 信息融合算法; 电子元件; 柔性装配; 装配策略

中图分类号 TP 242.6 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20221123002

Research on Precise Assembly of Electronic Components Based on Multi-information Algorithm Fusion

ZHANG Yuan^{1,2,3*} SONG Zhan¹ YANG Qingfeng^{1,3} PAN Guorui³ CUI Zhimin³

¹(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

³(Shenzhen Sking Intelligent Equipment Co., Ltd., Shenzhen 518103, China)

*Corresponding Author: zhangyuan_2017@126.com

Abstract Robots are important equipment in modern industrial manufacturing and production. As products move towards small batch, multi-variety, and flexibility, robot collaboration systems based on multi-information fusion enable high-end precision manufacturing industries. This research focuses on the precision alignment and

收稿日期: 2022-11-23 修回日期: 2023-02-28

基金项目: 深圳市技术攻关重点项目(JSGG20220831092801003); 广东省自然科学基金面上项目(2021A1515011802)

作者简介: 张原(通讯作者), 博士, 研究方向为机器人与机器视觉, E-mail: zhangyuan_2017@126.com; 宋展, 研究员, 研究方向为 3D 机器视觉与模式识别; 杨青峰, 博士, 研究方向为精密制造; 潘国瑞, 正高级工程师, 研究方向为计算机科学; 崔智敏, 高级工程师, 研究方向为大型复杂装备研制。

insertion technology of a hand-eye cooperation system in the field of precision electronic component assembly. By establishing a contact state model between electronic components and heterogeneous plates, the motion characteristics of force and displacement are analyzed. A compound control algorithm integrating visual, force sense, and encoder information is proposed, combined with visual inspection and tracking technology. Component insertion comparison experiments and assembly experiments based on algorithm fusion are carried out on the electronic component assembly platform. The results show that the positioning accuracy in the alignment phase is within 0.185 pixels. The contact state judgment and adjustment algorithm in the assembly stage ensures the safe and effective assembly of components.

Keywords robot; information fusion algorithm; electronic component; flexible assembly; assembly strategy

Funding This work is supported by Shenzhen Key Technology Project (JSGG20220831092801003), and Natural Science Foundation of Guangdong Province (2021A1515011802)

1 引 言

融合了视觉技术的工业机器人是现代智造产业的核心关键装备之一, 其赋予了机械系统环境感知能力和灵活应变能力^[1-3]。近年来, 越来越多的灵巧操作与智能装配需求, 促使传统工业智造过程进一步转型升级。单一感知模块的控制系统已无法满足产业发展的切实需求, 多传感信息融合技术及其控制算法已成为研究热点。

聚焦元件装配的视觉引导技术, Chang^[4]基于双目手眼配置模式, 设计了先粗后精的手机外壳视觉定位方法, 提高了系统的装配精度。Wang 等^[5]针对微型轴孔对齐问题, 采用遗传算法整定比例和微分参数, 通过仿真实现了微轴孔的对齐。Chang 等^[6]分别定义了元件与插孔的特征, 采用双目视觉结合速度控制的方法实现了 USB 的插装。Kleppe 等^[7]针对异型元件装配问题, 设计了一种 2D 与 3D 相融合的视觉引导解决方案, 并通过实验证明了其系统装配精度在 $\pm 1\text{ mm}$ 和 $\pm 1^\circ$ 以内。单一视觉感知模式下的装配算法在视觉盲区将会受到较大的限制, 而力觉感知也是元件装配的重要支撑技术之一^[8-9]。Huang 等^[10-12]以双臂机器人为研究对象, 提出一种基于主从协调

的轴孔装配策略, 实现了不同形状元件的轴孔装配。Liu 等^[13]采用的实验装置为一端刚性固定、另一端元件安装在弹簧上的配置模式, 通过对弹簧各节点进行观测, 并结合力感知的方式, 实现了轴孔的柔性装配。Qin 等^[14]采用多目微视觉结合三维力传感器反馈的方式, 基于多信息融合和人的示教, 设计了装配机器人的执行动作序列, 并通过套筒和线圈组件实验进行验证。针对单一感知系统导致的装配偏差问题, Song 等^[15]基于机器人末端的力传感器, 引入阻抗控制算法克服视觉定位系统带来的误差, 一定程度上改善了单一传感器装配过程中存在的低可靠性问题。此外, 有研究^[16-20]分别从装配系统相机标定、三维视觉示教及多信息融合辅助装配等方面, 阐述了精密装配等相关技术的进展。

上述研究极大地丰富了精密元件装配的方法, 但仍存在一些问题值得进一步探究。单一传感器在感知盲区将会失去有效信息, 可靠性难以保障。此外, 在刚性轴孔装配过程中^[21], 元件因受力而被反复摩擦, 精密电子元件会因此受到损伤。由于精密电子元件具有薄、脆、弹性变形以及表面具有微型电路等特点, 微小的偏差就可能导致元件电路损坏等问题, 新的需求为技术带来

了新的挑战。针对上述问题，本文通过系统建模和力位特性分析，提出一种基于多信息算法融合的复合型控制方法，结合交互补偿策略和误匹配警报机制，实现了电子元件与柔性基板的装配。该研究成果可为同类精密元件的装配工艺过程提供理论指导和方法借鉴。

2 系统建模与分析

2.1 研究问题描述

本研究以随机存取存储器(random access memory, RAM)插入柔性基板上的插槽为研究对象。如图1(a)所示，RAM与插槽通过金手指

进行电信号的传递，RAM上分布有微型电路，各金手指之间不能有电信号的导通。电子元件在受力状态下进行位姿调节，将会导致表面摩擦和电路损伤。因此，基于传统阻抗控制的刚性轴孔装配模式难以适用。此外，印制电路板(printed circuit board, PCB)在受压时会产生柔性变形，为元件的精准装配带来不确定性的影响。因此，针对接触类精密电子元件装配工艺，探究多信息算法融合的装配方法十分重要。

如图1所示，整个实验设备包含4个模块和1台上位计算机。第1个模块为机器人驱控系统，其以团队自主研发的四自由度选择顺应性装配机器手臂(selective compliance assembly

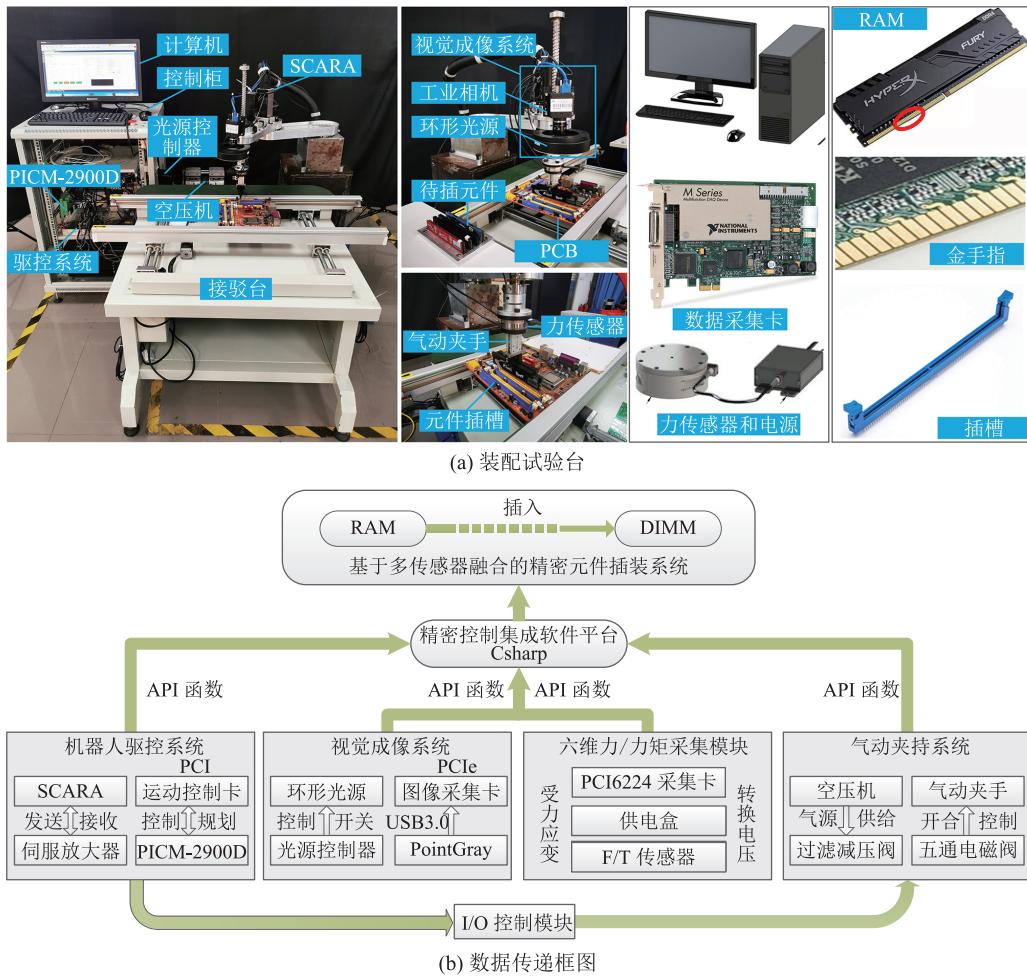


图1 电子元件装配试验台

Fig. 1 Electronic component assembly experimental platform

robot arm, SCARA)为载体。机器人具有3个互相平行的旋转关节和1个沿第三旋转关节轴线运动的平移关节。上位机发送的控制信号可经Galil DMC-1866运动控制卡和SGM7J伺服放大器转化为电流,从而控制机器人各关节的电机转动。第2个模块为视觉成像系统,其包含一台PointGray相机、图像采集卡、环形光源和光源控制器。光源控制器可进行光源的亮度调节,PointGray相机负责将拍摄到的图像通过图像采集卡传输至计算机。在结构上,相机和环形光源固定安装在机械臂的末端,可随机械臂一起运动。第3个模块为六维力/力矩采集模块,其包含一个ATI Mini-45型号的力/力矩(force/torque,F/T)传感器、供电盒和NI-PCI6224采集卡。F/T传感器安装在机器人末端丝杆下方,其感知到的信号由采集卡传输至上位机。第4个模块为气动夹持系统,其包含空压机、过滤减压阀、五通电磁阀和气动夹手。气动夹手与力传感器下表面刚性连接,可对元件进行夹持。空压机为气动系统提供动力源,通过过滤减压阀控制气体压力,再由五通电磁阀控制气动夹手的开合。

各模块硬件部分通过PCI、PCIe和I/O口与

上位机实现相互连接。系统集成控制平台基于MS Visual Studio 2017搭建,软件层面利用API函数实现数据交互。电子元件装配的实现方式可概述如下:在对齐阶段,上位机接收到相机采集的图像,经图像预处理和特征提取后获取目标特征的当前位姿,并计算期望位姿与当前位姿的差值。上位机结合视觉控制算法生成控制信号,并驱动机器人向视觉误差减小的方向移动,从而实现机械臂的视觉引导。在装配阶段,上位机基于视觉、力觉和关节编码器的感知信息,结合信息融合算法生成控制信号,控制机械臂带动元件进行位姿调节,实现精准装配。机械臂、工业相机和手眼系统的结构参数已通过激光跟踪仪和手眼标定算法等进行标定^[2,22]。本研究小组的前期工作以及上述试验平台的搭建,为电子元件与柔性基板的装配研究奠定了基础。各组件的参数和型号如表1所示。

2.2 接触状态受力分析

精密电子元件与插槽在接触阶段的受力分析是设计装配算法的重要基础。为具有般代表性,定义力传感器的输出信号为 $\mathbf{F}_s = (\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_y, \mathbf{F}_z, \mathbf{M}_x, \mathbf{M}_y, \mathbf{M}_z)^T$ 。

表1 系统参数

Table 1 System parameters

系统模块	参数名	参数/型号	参数名	参数值
机器人驱控系统	第一旋转关节	±130°	第一电机额定扭矩	1.27 N·m
	第二旋转关节	±150°	第二电机额定扭矩	0.637 N·m
	第三旋转关节	±360°	第三电机额定扭矩	0.318 N·m
	平移关节行程	240 mm	第四电机额定扭矩	0.318 N·m
	第一旋转臂长	250 mm	控制卡伺服周期	256 μs
	第二旋转臂长	250 mm	驱动器型号	SGD7S
视觉成像系统	工业相机	GS3-U3-51S5M	分辨率	2448 pixels×2048 pixels
	帧率	75 fps	镜头焦距	30 mm
气动夹持系统	五通电磁阀	SY5220-5DZD	过滤减压阀	AW30-03BG-A
	气动手爪	MHZL2-10D	空压机额定压力	0.7 MPa
力采集模块	$\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_y$ 量程	±580 N	\mathbf{F}_z 量程	±1 160 N
	$\mathbf{T}_x, \mathbf{T}_y, \mathbf{T}_z$ 量程	±20 N·m	采样频率	5.4 kHz
计算机	处理器	Intel Core i7 2.8 GHz	编程语言	C#

公式(1)~(6)分别对应图2中(a)~(f)的接触状态, 图2中(g)~(i)分别为(d)~(f)的受力分解。

$$\mathbf{F}_z = 2\mathbf{F} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_z = \mathbf{F} \\ \mathbf{M}_x(\mathbf{F}) = \left(\frac{l_r}{2} - \frac{\Delta y}{2}\right)\mathbf{F} \end{cases} \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_z = \mathbf{q}_s l_r = \mu_f \mathbf{F}_N \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_y = \mathbf{N}_s \\ \mathbf{F}_z = \mathbf{F}_f \\ \mathbf{M}_x(\mathbf{F}_f, \mathbf{N}_s) = \frac{l_r}{2}\mathbf{F}_f - \mathbf{N}_s(h_1 + h_2 - \Delta h_{ist}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_x = 2\mathbf{F}_f \cos(\Delta\theta_y) - 2\mathbf{N}_s \sin(\Delta\theta_y) \\ \mathbf{F}_z = 2\mathbf{N}_s \cos(\Delta\theta_y) = 2\mathbf{F}_f \sin(\Delta\theta_y) \\ \mathbf{M}_y(\mathbf{F}_f, \mathbf{N}_s) = 2(\mathbf{F}_f \cos(\Delta\theta_y) - \mathbf{N}_s \sin(\Delta\theta_y))(h_1 + h_2) \end{cases} \quad (i)$$

$$\mathbf{F}_z = 2\mathbf{F}_s \quad (ii)$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_x = 2\mathbf{N}_s \\ \mathbf{F}_z = 2(\mathbf{F}_f + \mathbf{F}_s) \end{cases} \quad (iii)$$

$$\begin{cases} \mathbf{M}_y(\mathbf{N}_s) = 2\mathbf{N}_s(h_1 + h_2 - w_s \sin(\Delta\theta_y)) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_x = 2\mathbf{N}_s \\ \mathbf{F}_z = 2\mathbf{F}_f = 2\mathbf{N}_s / \tan(\Delta\theta_y) \\ \mathbf{M}_y(\mathbf{N}_s) = 2\mathbf{N}_s(h_1 + h_2) \end{cases} \quad (iv)$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_x = 2\mathbf{F}_f \cos(\Delta\theta_y) - 2\mathbf{N}_s \sin(\Delta\theta_y) \\ \mathbf{F}_z = 2\mathbf{F}_f = 2\mathbf{N}_s \cos(\Delta\theta_y) = 2\mathbf{F}_f \sin(\Delta\theta_y) \\ \mathbf{M}_y(\mathbf{F}_f, \mathbf{N}_s) = 2(\mathbf{F}_f \cos(\Delta\theta_y) - \mathbf{N}_s \sin(\Delta\theta_y))(h_1 + h_2) \end{cases} \quad (v)$$

$$\mathbf{F}_z = 2\mathbf{F} \quad (6)$$

其中, Δx 、 Δy 和 Δz 分别为延各坐标轴的偏移量; $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 和 $\Delta\theta_z$ 分别为绕各坐标轴的偏转角; \mathbf{F} 为接触产生的反作用力; \mathbf{F}_N 为接触面法向压力; \mathbf{F}_f 为与运动方向相反的摩擦力; \mathbf{F}_s 为垂直于接触面的支撑力; \mathbf{N}_s 为与滑动摩擦力垂直的支撑力; μ_f 为滑动摩擦系数; \mathbf{q}_s 为等效均布载荷; \mathbf{M} 为等效力矩; l_r 为槽长度; w_s 为槽的宽度; h_1 为传感器到元件中心的距离; h_2 为元件中心到元件底面的距离; Δh_{ist} 为已插入深度。过盈配合保障了元件侧面微电路的电路导通, 初始角度偏差较小, 因此,

可认定已插入深度 Δh_{ist} 远小于 $h_1 + h_2$ 。

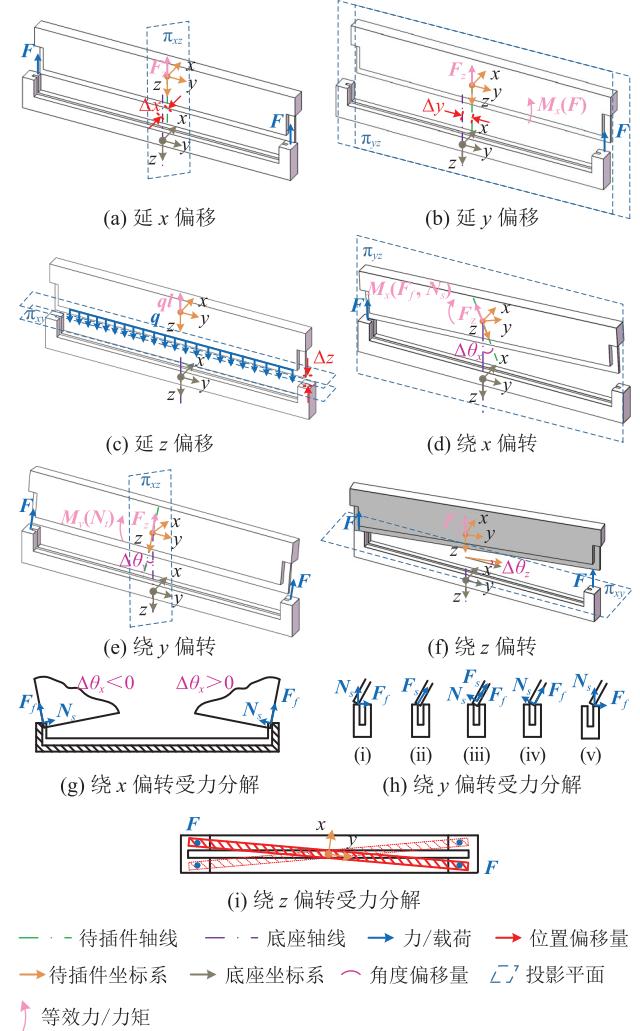


图2 接触状态受力分析

Fig. 2 Force analysis of different contact states

2.3 非均质薄板的受力变形分析

承载元件为一块开设有各类板孔的PCB板, 其上预装有不同电子元件, 因而具有非均质特性。图3为非均质薄板受力状态图, 基板两端由接驳台的传动皮带导轨支撑, 呈现简支梁形式。根据Timoshenko等^[23]提出的板壳理论, 可获取均质薄板挠曲面方程的Navier解, 如公式(7)所示。

$$\tilde{w}_c =$$

$$\frac{1}{\pi^4 k_{\text{bend}}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16q_e}{\pi^2 m n l_g w_g} \sin \frac{\pi m \xi}{l_p} \sin \frac{\pi m \eta}{w_p} \sin \frac{\pi m l_g}{2l_p} \sin \frac{\pi m w_g}{2w_p} \sin \frac{\pi m x}{l_p} \sin \frac{\pi m y}{w_p} \quad (7)$$

$$\left(\frac{m^2}{l_p^2} + \frac{n^2}{w_p^2} \right)^2$$

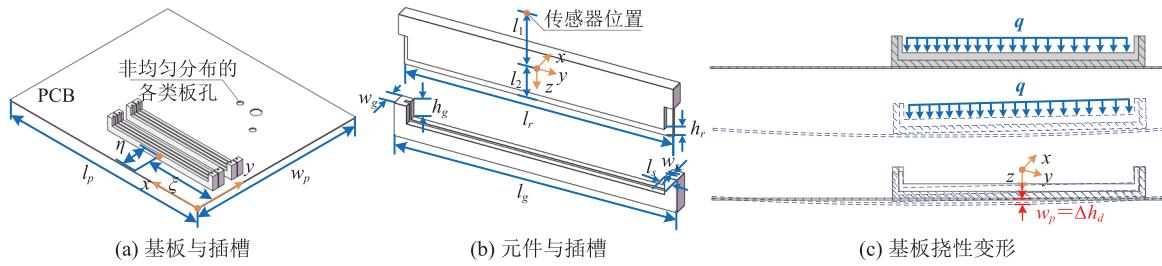


图 3 弹性变形分析

Fig. 3 Elastic deformation analysis

其中, k_{bend} 为板的弯曲刚度; m 为基板长度方向上均布载荷分解为二重三角级数的函数级数; n 为基板宽度方向上均布载荷分解为二重三角级数的函数级数; l_g 为插槽整体长度; w_g 为插槽整体宽度; l_p 为 PCB 的长度; w_p 为 PCB 的宽度; h_g 为插槽上段高度; \tilde{w}_e 为薄板受载荷力所产生的变形量。

2.4 位移融合下的运动分析

元件在插入过程中, 受到来自插槽的反向作用力, 二者之间具有相对滑移和摩擦。此外, 由于基板具有柔性, 因此, 在插入过程中, 元件、插槽和基板会一同下移, 基板变形与相对滑移是同步进行的。定义薄板在元件插入时的等效受力点为 (ξ, η) , 则综合的运动位移和力传感器受力模型如公式(8)~(9)所示。

$$h_c = \tilde{w}_e \Big|_{x=\xi, y=\eta} - h_r \quad (8)$$

$$\mathbf{q}_z l_r = \mathbf{q}_e l_r + \mu_f F_N \quad (9)$$

其中, h_r 为元件完全插入时相对插槽的滑动距离; \mathbf{q}_e 为薄板表面的分布载荷; \mathbf{q}_z 为操作臂末端下落时产生的驱动力载荷。

3 多信息融合的装配算法设计

电子元件的插装工艺不仅需要非接触阶段的环境认知交互能力, 还需要接触阶段的物理交互能力。元件装配包含对齐和插入两个阶段: 对齐阶段通过第 3.1 小节所述的视觉引导算法, 使元件

与插槽在 xy 平面位姿保持一致, 而后元件垂直下落执行插装动作, 并由第 3.2 小节设计的力觉控制策略判定元件与插槽的接触状态。由于环境噪声和扰动等因素的影响, 单一视觉引导定位的可靠性难以保证。基于上述视觉和力觉控制算法, 第 3.3 小节将进一步结合编码器信息, 分别提出对齐阶段和装配阶段的信息融合算法。多传感器融合控制算法的设计将为装配系统有效赋能。

3.1 非接触阶段视觉引导

非接触阶段基于视觉感知的引导算法发挥主要功能。如图 4 所示, 元件相对于夹手的位姿可通过视觉标定获取, 因此, 可将夹手的位姿作为视觉观测目标, 即 P_1 和 P_2 两点, 两点连线的中垂线 L_2 用于获取元件的姿态角。基板上的通孔和预装元件可作为跟踪目标, 即 P_3 和 P_4 两点, 两点连线的中垂线 L_1 可为元件期望姿态角提供依据。采用相机归一化坐标系下的坐标 p_{di} 表示各

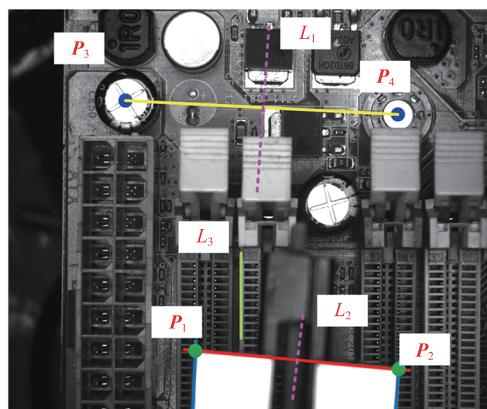


图 4 视觉观测特征

Fig. 4 Visual observation features

特征点的期望位置坐标。根据基板分布的先验知识, 对齐状态下, 点 \mathbf{P}_1 和 \mathbf{P}_2 相对于点 \mathbf{P}_3 和 \mathbf{P}_4 的位姿是固定的。因此, 可通过点 \mathbf{P}_3 和 \mathbf{P}_4 的坐标计算得到点 \mathbf{P}_1 和 \mathbf{P}_2 的期望坐标, 如公式(10)所示。

$$\mathbf{p}_{di} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{i,i+2} & \mathbf{t}_{i,i+2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{T}_{i,i+2}} \mathbf{p}_{d(i+2)}, i=1,2 \quad (10)$$

其中, $\mathbf{T}_{i,i+2}$ 为点 \mathbf{P}_1 和 \mathbf{P}_2 期望位姿与 \mathbf{P}_3 和 \mathbf{P}_4 点位姿之间的变换矩阵。定义图 4 中 L_1 、 L_2 和 L_3 的方向角为 ϕ_1 、 ϕ_2 和 ϕ_3 , 其中, L_3 为插槽方向。由于 L_3 对比度较低, 易受到扰动影响, 可预先测得 L_1 和 L_3 之间的夹角 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_3$ 。根据上述定义, 元件位姿视觉跟踪误差可定义如公式(11)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{e}_i = \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{di} \\ \mathbf{e}_\phi = \Delta\phi + \phi_3 - \phi_2 \end{cases} \quad (11)$$

其中, \mathbf{p}_i 为夹手观测点在相机归一化坐标系下的坐标。

3.2 力觉控制策略

为避免元件偏移导致插入过程受损, 本文提出一种基于接触力状态感知的回退调节策略。如图 5 所示, 装配流程包含接触状态感知判定、位姿调节和插装过程 3 个循环, 迭代次数分为 m 、 k 和 Gen。其中, 接触状态感知判定循环如算法 1 所述。夹持器与元件的上表面和侧面紧密贴合, 限制了两个旋转自由度。接驳台的 4 个支点可调节丝杆与基板的垂直度, 避免图 2 中(d)~(e)所示的偏差状态。若力传感器感知到非期望偏转, 那么会触发误匹配警报机制, 停机手动调节机械结构, 以保证合理的装配条件。

如算法 1 所示, h_p 为接触点预设深度; h_c 为

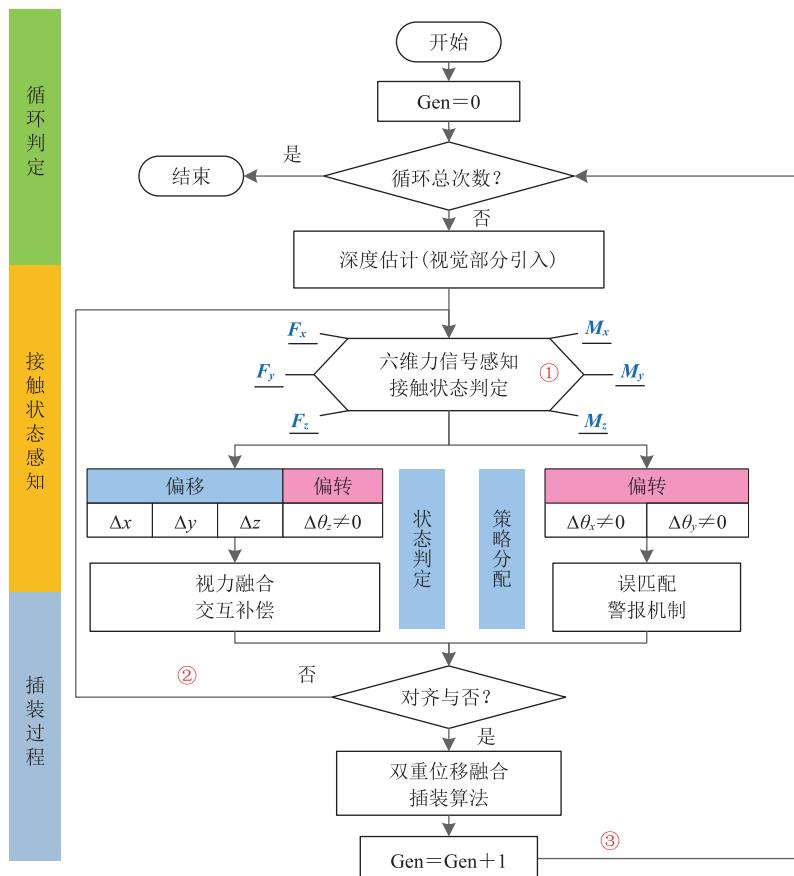


图 5 装配算法流程图

Fig. 5 Assembly algorithm flow chart

 算法 1 接触状态判定

Input: $\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_y, \mathbf{F}_z, \mathbf{M}_x, \mathbf{M}_y, \mathbf{M}_z, h_{ac}, h_p, h_1, h_2, h_g, w_s, \text{Gen}, \delta h, z_e, l_r, \epsilon_{Mu}, \epsilon_{Fu}, k, \lambda$

Output: 接触状态(a)~(f)

Initialization:

$$\Delta x_f \leftarrow 0, \Delta y_f \leftarrow 0, \Delta \theta_{xf} \leftarrow 0, \Delta \theta_{yf} \leftarrow 0, \Delta \theta_{zf} \leftarrow 0$$

$$\alpha \leftarrow 1, \beta \leftarrow 0.4, m \leftarrow 0$$

while $z_e \in (h_p - h_g, h_p + \delta h)$ do

丝杆向下运动: $z_d = \alpha \cdot \delta h$

if $\mathbf{M}_x(\mathbf{F}) \notin (0 - \epsilon_{Mu}, 0 + \epsilon_{Mu})$ and $\mathbf{F}_z(h_{ac})/\mathbf{F}_s(\tilde{w}_e \leftarrow h_{ac}) \in (1 - \lambda, 1 + \lambda)$ then

Output: 接触状态(b), 丝杆运动至: $h_p + \delta h, m \leftarrow 0$, break;

$\Delta y_f \leftarrow l_r - 2\mathbf{M}_x/\mathbf{F}_z$

else if $\mathbf{M}_x(\mathbf{F}) \notin (0 - \epsilon_{Mu}, 0 + \epsilon_{Mu})$ then

Output: 接触状态(d), 丝杆运动至: $h_p + \delta h, m \leftarrow 0$, break;

$\Delta \theta_{xf} \leftarrow \arccos \mathbf{F}_s(\tilde{w}_e)/\mathbf{F}_z(h_{ac})$

else if $\mathbf{M}_y(\mathbf{F}) \notin (0 - \epsilon_{Mu}, 0 + \epsilon_{Mu})$ then

Output: 接触状态(e), 丝杆运动至: $h_p + \delta h, m \leftarrow 0$, break;

$\Delta \theta_{yf} \leftarrow \arcsin((h_1 + h_2 - \mathbf{M}_y/\mathbf{F}_x)/w_s)$ or $\Delta \theta_{yf} \leftarrow \frac{\arctan(2\mathbf{F}_z/\mathbf{F}_x)}{2}$

else if $\mathbf{F}_z(z_e) \notin (0 - \epsilon_{Fu}, 0 + \epsilon_{Fu})$ then

Output: 接触状态(a)或(f), 丝杆运动至: $h_p + \delta h, m \leftarrow 0$, break;

else if $z_e \geq h_p - h_g$ and $\mathbf{F}_z(z_e) \in (0 - \epsilon_{Fu}, 0 + \epsilon_{Fu})$ then

Update: $m \leftarrow m + 1$

Output: 接触状态(c)

else

Output: break;

end if

Update

$$\alpha = \begin{cases} \alpha\beta, 0 \leq m \leq 2 \\ (h_p + \delta h - h_g)/\delta h - \alpha(1 - \beta^m)/(1 - \beta), m \geq 3 \end{cases}$$

end while

Update

$$k \leftarrow k + 1$$

$$\delta h(\text{Gen}) \leftarrow h_c(\text{Gen}) - h_c(\text{Gen}-1) + \delta h(\text{Gen}-1)$$

视觉估计的深度值; z_e 为编码器反馈的机械臂末端位置; ϵ_{Fu} 为力的扰动上限值; ϵ_{Mu} 为力矩的扰动上限值; λ 为比例因子; δh 为预设缓冲距离, 初值为 1 mm; h_{ac} 为元件接触插槽后的下行距离。基于算法 1, 系统可辨识出元件的接触状态以及偏移量。若初始状态为图 2(c) 所示状态, 那么根据更新率的设计, 在 $m \geq 3$ 时元件插入插槽, 其他状态则会触发元件回退判定, 返回至安全高度 $h_p + \delta h$ 进行元件位姿调节。随后初始化

接触状态参数, 再次进入插入接触状态判定, 直至元件对齐插入。

3.3 视力融合补偿算法

视觉感知与力觉感知所获取的信息, 在不同维度上的表征能力不同。因此, 融合多数据信息流, 设计面向不同装配阶段的信息融合交互补偿算法十分重要。

3.3.1 对齐阶段

定义源于力觉反馈误差为 $e_f(k) =$

$(\Delta x_f(k), \Delta y_f(k), \Delta z_f(k), \Delta \theta_{zf}(k))^T$, 视觉反馈的误差为 $e_c(k) = (\Delta x_c(k), \Delta y_c(k), \Delta z_c(k), \Delta \theta_{zc}(k))^T$ 。融合后的综合误差定义如公式(12)所示。

$$\begin{aligned} e_a(k) = & \\ & \left(\Delta x_c(k), \underbrace{\varpi \Delta y_c(k) + (1-\varpi) \Delta y_f(k)}_{\Delta y_a(k)}, \Delta z_a(m, k), \Delta \theta_{zc}(k) \right)^T \quad (12) \end{aligned}$$

其中, ϖ 为视觉误差权重, $\varpi \in (0, 1)$; z_c 为元件装配深度, 可通过实验预先测定; Δz_a 为信息融合后的深度误差, 其计算公式如公式(13)所示, h_{ab} 为元件接触插槽时编码器读取到的位置值。图 6 为对齐阶段的控制框图。

$$\begin{aligned} \Delta z_a(m, k, \text{Gen}) = & \\ & \begin{cases} -h_p - h_c(\text{Gen}) + h_c(\text{Gen}-1) - \delta h(\text{Gen}-1), z_e \geq h_p + \delta h(\text{Gen}) \\ h_p - h_g - z_e, h_{ab} \leq z_e < h_p + \delta h(\text{Gen}) \\ h_p - h_g + \delta h(\text{Gen})(1 - \alpha(1 - \beta^m)/(1 - \beta)), h_p - h_g \leq z_e < h_{ab} \\ h_p - h_g - z_e, z_e < h_p - h_g \end{cases} \quad (13) \end{aligned}$$

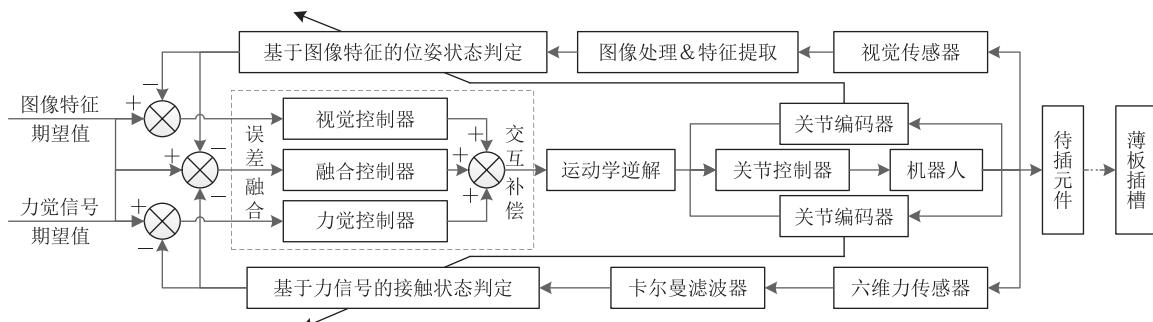


图 6 多信息融合控制算法

Fig. 6 Multi-information fusion control algorithm

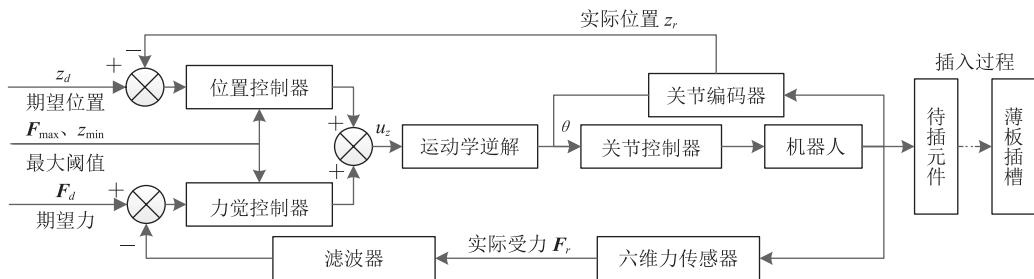


图 7 力/位混合控制框图

Fig. 7 Force/position hybrid control block diagram

3.3.2 装配阶段

装配阶段为单一方向的插入动作, 元件与插槽为过盈配合, 其控制框图如图 7 所示。

基于安全性考量, 设定最大插入力为 F_{\max} 。位置控制中, 插入过程的每一个节点可视为一个准静态过程, 其受力状态可表征为公式(14)所示。

$$F_z =$$

$$\begin{cases} 0, h_p - h_g \leq z_e \\ \mu_f F_N + F(\tilde{w}_e), h_{ab} - h_r - \tilde{w}_e(F_z) \leq z_e < h_p - h_g \\ F(\tilde{w}_e), h_{ab} - h_r - \varepsilon_{dep} - \tilde{w}_e(F_{\max}) \leq z_e < h_{ab} - h_r - \tilde{w}_e(F_z) \end{cases} \quad (14)$$

最大插入深度对应的 z 轴坐标值可定义如公式(15)所示。

$$z_{\min} = h_{ab} - h_r - \varepsilon_{dep} - \tilde{w}_e(F_{\max}) \quad (15)$$

其中, ε_{dep} 为深度容差。当力传感器或编码器感知下落位置或插入力超过最大限值时, 停止下落并控制气动夹手释压, 驱动执行器上行至安全高度。定义系统的比例增益为 k_f , 受机器人关节静

摩擦影响最小驱动速率为 $u_{z \min}$, 力位融合后的速度控制律如公式(16)所示。

$$u_z = \begin{cases} -u_{z \min}, & 0 < \text{abs}(u_z') \leq u_{z \min} \\ u_z', & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

$$u_z' = \begin{cases} k_f \cdot \max\{\tilde{w}_e(F_{\max}) - \tilde{w}_e(F_r), z_{\min} - z_e\}, & z_e > z_{\min} \text{ and } F_z < F_{\max} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

4 实验研究

本实验研究聚焦柔性基板挠度分析和信息融合算法应用于精密元件插装过程的有效性验证。

4.1 元件插装对比实验

本实验设计了3类基板状态进行对比分析, 采用人工驱动的方式, 获取元件插装过程的力位特性, 并与板壳理论^[23]的挠度分析结果进行对比。

如图8所示, 分别采用长方体物块、常规元件和铝合金底板支撑3种配置模式进行试验。其中, 长方体物块不产生插入动作, 可模拟基板受力下的弹性变形过程; 通过铝合金底板支撑弹性基板, 可模拟基板不随受力变形的装配状态。实验过程中, 设定丝杆匀速下落, 同步记录元件的位置和受力情况。公式(7)所需的系统结构参数如表2所示, 其中, $S_c = l_g \times w_g$ 为插槽与PCB的有效接触面积。

图9(a)所示为长方体物块匀速下落时, 力传

表2 结构参数

Table 2 Structural parameters

参数	参数值	参数	参数值
l_p	245 mm	η	28 mm
l_g	141 mm	ξ	85 mm
w_p	210 mm	S_c	3 282.5 mm ²
w_g	7 mm	k_{bend}	0.95 N/mm ²

感器采集到的10组信号曲线。 z_b 代表机器人关节编码器反馈得到的末端执行器 z 向位移值。元件在接触插槽后, 下落了约 4.5 mm 的距离, 整个力变化曲线较为平稳, 表明非插入状态下只有基板的弹性变形产生作用。受力曲线呈现一定的非线性特性, 这表明基板的刚度并非恒定值。将表2中的参数代入公式(7), 取 m 和 n 的最大值为3, 可得到图9(b)所示的 Navier-0.95 力位特征曲线, 该曲线与真实力位曲线未完全重合, 表明挠度分析理论^[23]在实际应用中具有局限性, 依赖于实验数据分析方式更贴合实际。

图10(a)为待插元件匀速下落插入插槽的力信号曲线。由图10(a)可知, 元件刚接触插槽时, 力变化较为平缓, 而在插入临界点处具有明显的波动, 这表明元件与插槽的相对滑移和基板的弹性变形同时发生, 二者呈现了叠加混合的特性。元件完全插入插槽后, 相对滑移作用消失, 因而和图9(a)所示的力信号曲线趋势一致。图9(b)也反映了力位信号的非线性映射关系。此

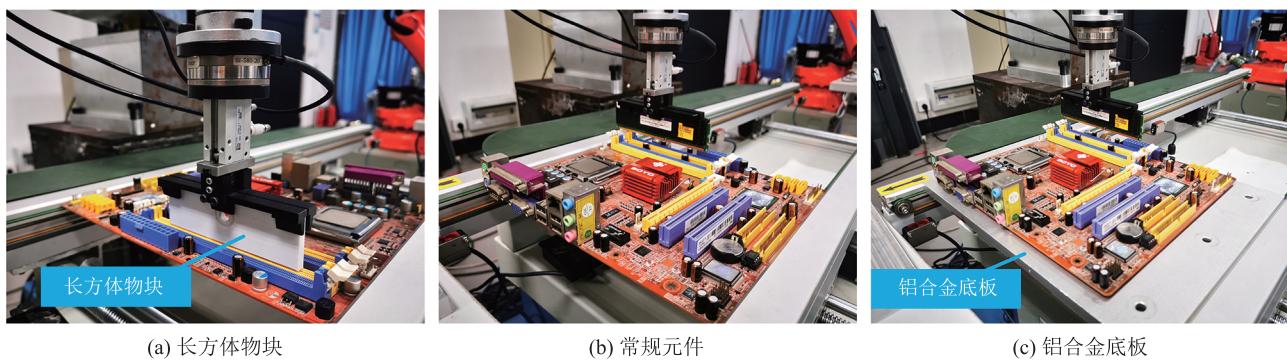


图8 元件插装配置模式

Fig. 8 Configuration of component assembly

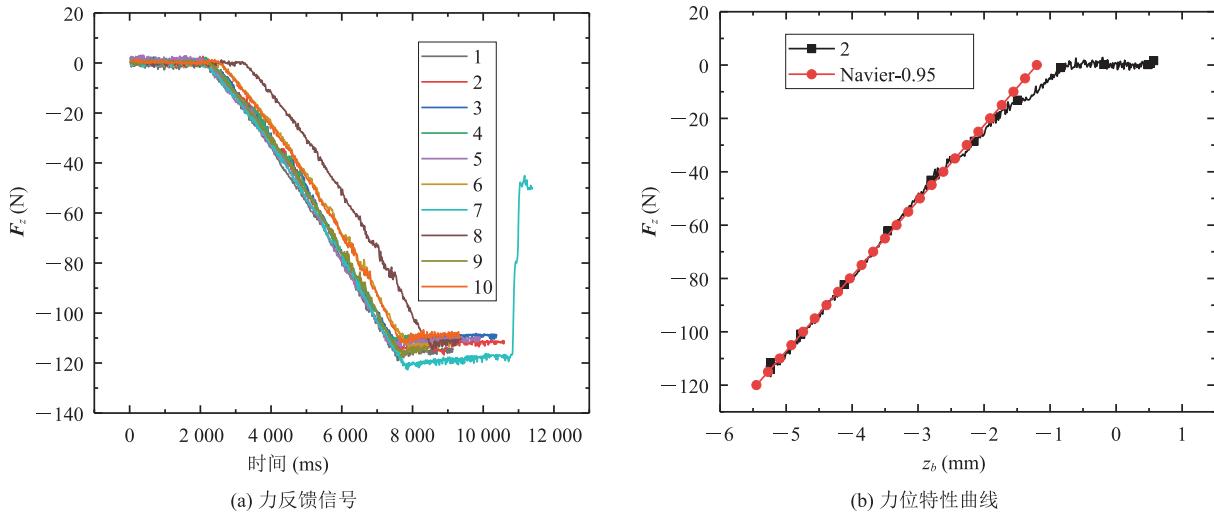


图 9 基板纯弹性变形力位特性

Fig. 9 Mechanical properties corresponding to elastic deformation of substrate

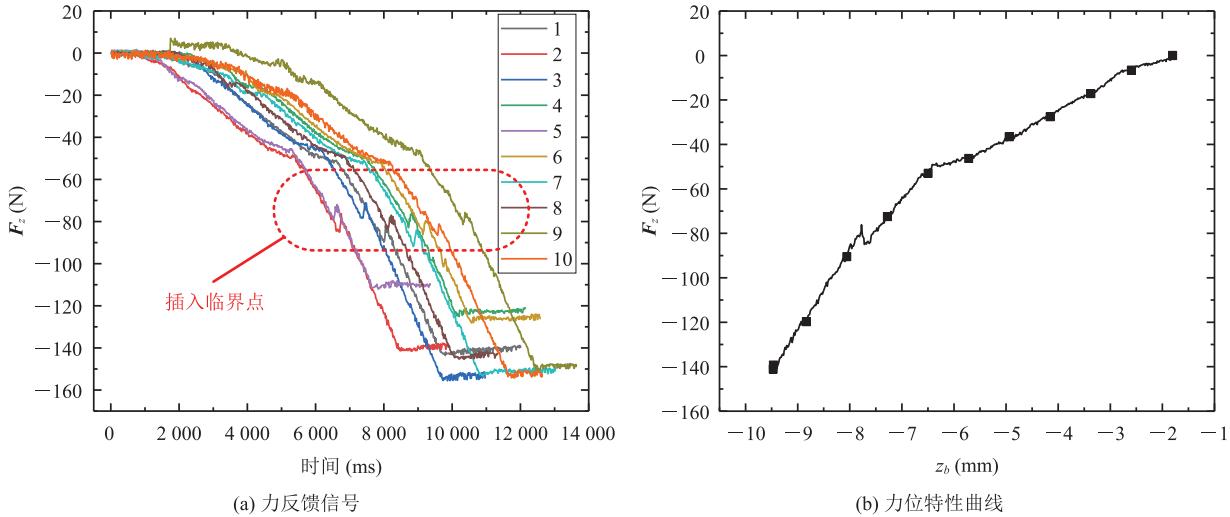


图 10 常规元件插装力位特性

Fig. 10 Mechanical properties corresponding to component insertion

外，元件插入插槽对应的最大力不超过 -100 N ，最大下落位移在 -6.174 mm 附近波动，这为自动装配过程的最大安全阈值设定提供了依据。

图 11 为基板不产生弹性变形时的系统力位特性。如图 11 所示，曲线呈现明显的非线性特性，且在插入临界点呈现恒力波动，在此期间，元件保持匀速下落，表明元件克服其与插槽的最大静摩擦力，进入滑动摩擦的运动过程。从细节来看，在恒力波动阶段之前，有一个压力增大再

减小的过程。因此，在设定最大插入力时，应附加一个容差力，以避免压力波动导致的插装停止。元件完全插入插槽后，反馈力呈现线性特性并急剧增大，这表明铝合金支撑下的基板具有较大的刚度，装配已进入底板弹性变形阶段。

4.2 信息融合装配算法验证

为验证视力融合算法的有效性，为待插元件设定初始位置和角度偏差。非接触阶段采用视觉伺服算法进行精密定位，当元件对齐后，则执

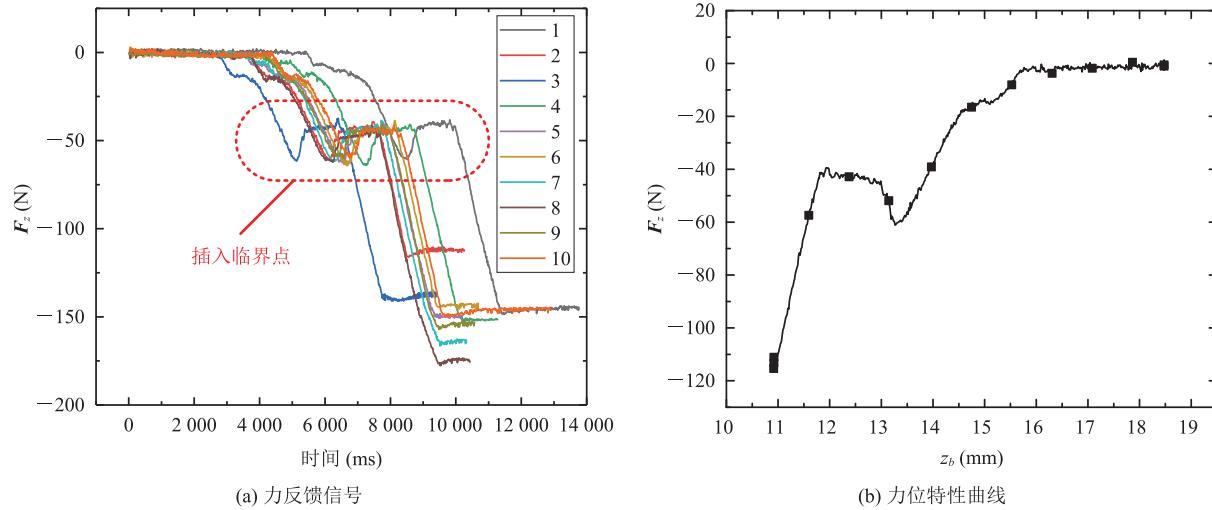


图 11 底部支撑插装力位特性

Fig. 11 Mechanical properties corresponding to the bottom is supported

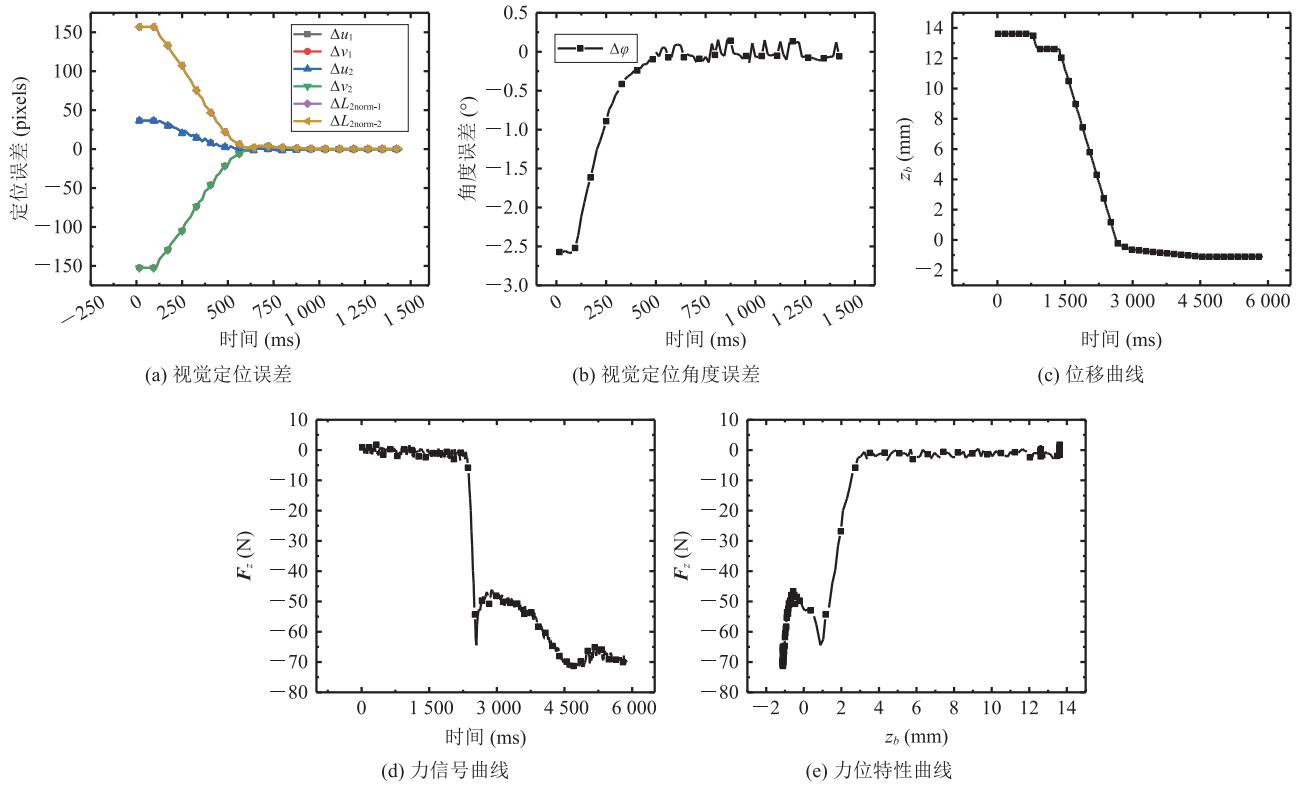


图 12 多信息融合元件装配图

Fig. 12 Multi-information fusion component assembly

行接触状态算法判定, 完成元件的顺利装配。如图 12(a)~(b) 所示, 视觉引导可在 650 ms 内实现像素误差的快速收敛和元件的精准对位, 最终

两个点的定位误差为 0.185 pixels 和 0.182 pixels, 角度误差为 -0.029° 。定位完成后, 停止闭环视觉伺服, 执行垂直插装。结合表 2 设计的接触力判定

方法可知, 图 12(c)在 750 ms~1.5 s 之间有两段明显的下落过程, 且由图 12(d)~(e)可知, 力反馈信号并未超出设定范围, 表明系统处于图 2(c)所示的接触状态, 可执行元件下落插装。待元件与插槽接触后, 进入位移融合的插入阶段, 元件的受力信号曲线与第 4.1 小节常规元件插入柔性基板时受到的力信号曲线变化趋势一致。当最大位移量和最大力阈值触发后, 元件的精准装配完成。

5 讨论与分析

本研究聚焦于精密电子元件装配技术领域, 针对多信息融合的插装控制算法进行研究。与单模式视觉定位装配算法^[4-7]相比, 本文算法引入了力觉反馈调节, 可避免视觉定位失准时可能导致的元件装配损坏等问题。与刚性轴孔的力觉装配方案^[13-15]相比, 本文算法为电子元件提供了一种有效安全的回退调节策略, 避免了微电路的损坏。此外, 本研究还分析了具有薄、脆特点的柔性基板受力特性, 并与 Timoshenko 等^[23]提出的经典板壳理论进行对比, 得出基于实际数据的力学特性更适用于非均质薄板的受力分析的结论。如第 2.1 小节建立的元件与插槽接触状态受力分析模型, 对于此类元件装配的原理分析与状态判定有一般代表性, 对实际的装配工艺具有一定的指导意义。本文算法有效融合了视觉、力觉以及编码器的反馈信息, 为表面具有微型电路等不适宜摩擦的电子元件与柔性基板的装配提供了一条较为完整的定位与装配方案。本文工作面向广泛应用于工业智造过程中的平面定位与插装过程, 后续将围绕更多自由度及更多类型感知模块应用于精准插装算法开展研究。

6 结 论

基于多信息融合技术, 本文提出一种面向精

密电子元件装配的复合型装配方法。实验结果表明, 在对齐阶段, 元件可实现 650 ms 内的像素误差快速收敛, 且定位误差在 0.185 pixels 以内。装配阶段的视觉、力觉和编码器多信息反馈调节策略, 保障了元件与插槽的最大接触力在预定范围以内, 实现了电子元件与柔性基板上插槽的安全有效装配。

参 考 文 献

- [1] 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Zhang GJ. Machine vision [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] Zhang Y, Qiu ZC, Zhang XM. A simultaneous optimization method of calibration and measurement for a typical hand-eye positioning system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [3] Shirmohammadi S, Ferrero A. Camera as the instrument: the rising trend of vision based measurement [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2014, 17(3): 41-47.
- [4] Chang WC. Robotic assembly of smartphone back shells with eye-in-hand visual servoing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 50: 102-113.
- [5] Wang JP, Cho H. Micropeg and hole alignment using image moments based visual servoing method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1286-1294.
- [6] Chang WC, Wu CH. Automated USB peg-in-hole assembly employing visual servoing [C] // Proceedings of the 2017 3rd International Conference On Control, Automation and Robotics, 2017: 352-355.
- [7] Kleppe AL, Bjørkedal A, Larsen K, et al. Automated assembly using 3D and 2D cameras [J]. Robotics, 2017, 6(3): 14.
- [8] 徐建明, 杨冰冰. 基于 Baxter 多臂机器人的轴孔装配轨迹规划研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(6): 599-608.
Xu JM, Yang BB. Research on trajectory planning

- strategy of shaft hole assembly based on Baxter redundant dual-arm robot [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50(6): 599-608.
- [9] 王竣禾, 姜勇. 基于深度强化学习的动态装配算法 [J]. 智能系统学报, 2023, 18(1): 2-11.
Wang JH, Jiang Y. Dynamic assembly algorithm based on deep reinforcement learning [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2023, 18(1): 2-11.
- [10] Huang YJ, Zheng YL, Wang NF, et al. Peg-in-hole assembly based on master-slave coordination for a compliant dual-arm robot [J]. Assembly Automation, 2020, 40(2): 189-198.
- [11] Huang YJ, Zhang XM, Chen XM, et al. Vision-guided peg-in-hole assembly by Baxter robot [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(12): 1-9.
- [12] Zhang XM, Zheng YL, Ota J, et al. Peg-in-hole assembly based on two-phase scheme and F/T sensor for dual-arm robot [J]. Sensors, 2017, 17(9): 2014.
- [13] Liu S, Xing DP, Li YF, et al. Robust insertion control for precision assembly with passive compliance combining vision and force information [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(5): 1974-1985.
- [14] Qin FB, Xu D, Zhang DP, et al. Robotic skill learning for precision assembly with microscopic vision and force feedback [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 1117-1128.
- [15] Song HC, Kmi YL, Lee DH, et al. Electric connector assembly based on vision and impedance control using cable connector-feeding system [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(12): 5997-6003.
- [16] Pitchandi N, Subramanian SP. GA-based camera calibration for vision-assisted robotic assembly system [J]. IET Computer Vision, 2017, 11(1): 50-59.
- [17] Ruggeri S, Fontana G, Basile V, et al. Micro-robotic handling solutions for PCB (re-) manufacturing [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 441-448.
- [18] Wan WW, Lu F, Wu ZP, et al. Teaching robots to do object assembly using multi-modal 3D vision [J]. Neurocomputing, 2017, 259(SI): 85-93.
- [19] Gerbers R, Mücke M, Dietrich F, et al. Simplifying robot tools by taking advantage of sensor integration in human collaboration robots [C] // Proceedings of the 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, 2021: 287-292.
- [20] Qin ZK, Wang P, Sun J, et al. Precise robotic assembly for large-scale objects based on automatic guidance and alignment [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(6): 1398-1411.
- [21] 徐德, 秦方博. 机器人自动轴孔装配研究进展 [J]. 智能科学与技术学报, 2022, 4(2): 200-211.
Xu D, Qin FB. Research development on automated robotic peg-in-hole assembly [J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2022, 4(2): 200-211.
- [22] Zhang Y, Qiu ZC, Zhang XM. Calibration method for hand-eye system with rotation and translation couplings [J]. Applied Optics, 2019, 58(20): 5375-5387.
- [23] Timoshenko S, Woinowsky-krieger S. Theory of plates and shells [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959.