

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, (?:):??

Citing format

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, (?:):??

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 511442)

³(深圳市深科达智能装备股份有限公司, 深圳 518108)

摘要: 机器人是现代化工业制造与生产的重要装备之一。随着市场需求向着小批量、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, 结合视觉检测与跟踪技术, 提出一种融合了视觉、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, 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 像素以内, 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: TP242.6 **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, 510640, China)

³ (Shenzhen Sking Intelligent Equipment Co., Ltd, Shenzhen, 518108, China)

来稿日期: yyyy-mm-dd 修回日期: yyyy-mm-dd

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 (No.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, E-mail: zhan.song@siat.ac.cn; 杨青峰, 博士, 研究方向为精密制造, E-mail: 15862981706@163.com; 潘国瑞, 正高级工程师, 研究方向为计算机科学, E-mail: panguorui850219@163.com; 崔智敏, 高级工程师, 研究方向为大型复杂装备研制, E-mail: 126.1.126@126.com。

Corresponding Author: Yuan ZHANG. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, 518055, China. Email: 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 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.

Key words: robot; multi-sensor fusion algorithm; electronic component; flexible assembly; assembly strategy

Funding: This project is supported by the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No.2021A1515011802), and the Shenzhen Key Technology Project (JSGG20220831092801003).

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的应变能力^[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无法完全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的研究成为了当下的一个研究热点。

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背壳视觉定位方法，从而提高系统的装配精度。Wang 等^[5]针对微型轴孔对齐问题，采用遗传算法整定 PD 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 相融合视觉引导解决方案，通过实验验证了 1 毫米和 1 度以内的系统装配精度。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]以双臂机器人作为研究对象，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]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，通过套筒和线圈组件的实验进行了验证。面向单一感知系统带来的装配偏差问题，Song 等^[15]通过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所存在的低可靠性问题。此外，文献^[16-20]等分别从装配系统相机标定、三维视觉示教以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。

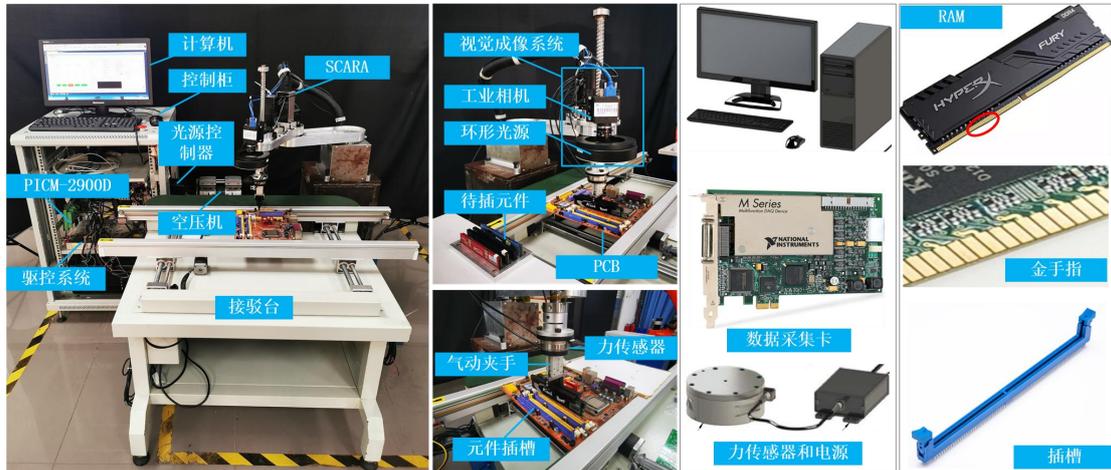
上述研究极大地丰富了精密元件装配的方法，但仍有一些问题值得进一步探究。单一传感器在感知盲区将会失去有效信息，可靠性难以保障。此外，刚性轴孔装配过程^[21]可在受力情况下反复摩擦，而精密电子元件会因此受到损伤。由于具有薄、脆、弹性变形以及

表面微型电路等特点，微小的偏差就有可能导致元件电路损坏等不良，新的需求为技术带来新的挑战。针对上述问题，本文通过系统建模和力位特性分析，提出了一种基于多信息算法融合的复合型控制方法，匹配以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。此项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。

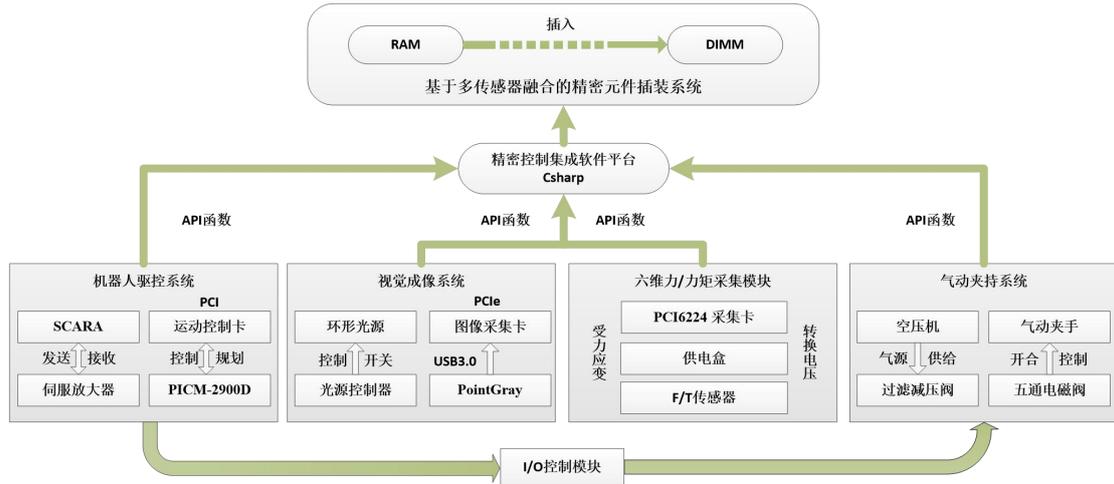
2 系统建模与分析

2.1 研究问题描述

本研究以 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，其上分布有微型电路，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。因而，基于传统阻抗控制的刚性轴孔装配模式难以适用。此外，PCB 板在受压时产生的柔性变形也为元件的精准装配带来不确定性影响。面向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。



(a) 装配试验台



(b) 数据传递框图

图 1 电子元件装配试验台

Fig. 1 Experimental setup

如图 1 (b) 所示，整个实验设备包含四个模块和一台计算机。机器人驱控系统以团队自主研发的四自由度 SCARA 机器人为载体，它具备三个互相平行的旋转关节和一个延第

三旋转关节轴线运动的平移关节。PointGray 相机和环形光源固定安装在机械臂的末端，跟随机械臂运动。其将拍摄到的图像通过图像采集卡传输至计算机，经由图像处理获取目标特征的当前位姿。通过计算期望位姿与当前位姿的差值，结合视觉控制算法生成机器人操控代码。驱控信号经由 Galil DMC-1866 运动控制卡和 SGM7J 驱动器控制机器人的四个关节电机转动，从而实现机械臂的视觉引导。机器人末端丝杆下方安装有 ATI Mini-45 型号的六维力/力矩传感器，可通过 NI-PCI6224 采集卡获取实时的力信号并反馈至计算机。气动夹手与力传感器下表面刚性连接，对元件进行夹持。基于视觉、力觉和关节编码器的感知信息，结合信息融合算法所生成代码，可控制机械臂带动元件进行位姿调节，实现精准装配。各模块硬件部分以 PCI、PCIe 以及 I/O 口相互连接，软件层面基于 MS Visual Studio 2017 搭建的集成控制平台通过 API 函数数据交互。机械臂、工业相机以及手眼系统结构参数已通过激光跟踪仪以及手眼标定算法等进行了标定^[2, 22]。前期工作和上述试验平台的搭建为电子元件与柔性基板装配研究奠定了基础。各组件的参数和型号如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

| 系统模块 | 参数名 | 参数值 | 参数名 | 参数值 |
|---------|--------------------|-----------------------|----------|----------------------------------|
| 机器人驱控系统 | 第一旋转关节 | $\pm 130^\circ$ | 第一电机额定扭矩 | 1.27 N·m |
| | 第二旋转关节 | $\pm 150^\circ$ | 第二电机额定扭矩 | 0.637 N·m |
| | 第三旋转关节 | $\pm 360^\circ$ | 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 μ s |
| | 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 \times 2048 pixels |
| | 频率 | 75 帧/秒 | 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 | 0.7Mpa |
| 力采集模块 | F_x, F_y 量程 | ± 580 N | F_z 量程 | ± 1160 N |
| | T_x, T_y, T_z 量程 | ± 20 Nm | 采样频率 | 5.4 kHz |
| 计算机 | 处理器 | Intel Core i7 2.8 GHz | 编程语言 | C# |

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。为了具有一般代表性，定义力传感器的输出信号为 $\mathbf{F}_s = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)^T$ 。

$$F_z = 2F \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_z = F \\ M_x(F) = \left(\frac{l_r}{2} - \frac{\Delta y}{2} \right) F \end{cases} \quad (2)$$

$$F_z = q_s l_r = \mu_f F_N \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_y = N_s \\ F_z = F_f \\ M_x(F_f, N_s) = \frac{l_r}{2} F_f - N_s (h_1 + h_2 - \Delta h_{ist}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \begin{cases} F_x = 2F_f \cos(\Delta\theta_y) - 2N_s \sin(\Delta\theta_y) \\ F_z = 2N_s \cos(\Delta\theta_y) = 2F_f \sin(\Delta\theta_y) \end{cases} & (i) \\ M_y(F_f, N_s) = 2(F_f \cos(\Delta\theta_y) - N_s \sin(\Delta\theta_y))(h_1 + h_2) \\ F_z = 2F_s & (ii) \\ \begin{cases} F_x = 2N_s \\ F_z = 2(F_f + F_s) \end{cases} & (iii) \\ M_y(N_s) = 2N_s(h_1 + h_2 - w_s \sin(\Delta\theta_y)) \\ \begin{cases} F_x = 2N_s \\ F_z = 2F_f = 2N_s / \tan(\Delta\theta_y) \end{cases} & (iv) \\ M_y(N_s) = 2N_s(h_1 + h_2) \\ \begin{cases} F_x = 2F_f \cos(\Delta\theta_y) - 2N_s \sin(\Delta\theta_y) \\ F_z = 2F = 2N_s \cos(\Delta\theta_y) = 2F_f \sin(\Delta\theta_y) \end{cases} & (v) \quad (5) \\ M_y(F_f, N_s) = 2(F_f \cos(\Delta\theta_y) - N_s \sin(\Delta\theta_y))(h_1 + h_2) \end{cases}$$

$$F_z = 2F \quad (6)$$

公式 (1) - (6) 分别对应图 2 中 (a) - (f) 的接触状态, (g) - (i) 分别为图 (d) - (f) 的受力分解。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。 F 为接触产生的反作用力, F_N 为接触面法向压力, F_f 是与运动方向相反的摩擦力, F_s 为垂直于接触面的支撑力, N_s 为与滑动摩擦力垂直的支撑力, μ_f 为滑动摩擦系数, q_s 为等效均布载荷, M 为等效力矩。 l_r 为槽长度, w_s 为槽的宽度, h_1 和 h_2 分别为传感器到元件中心的距离和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, 因而可认定已插入深度 Δh_{ist} 远小于 $h_1 + h_2$ 。

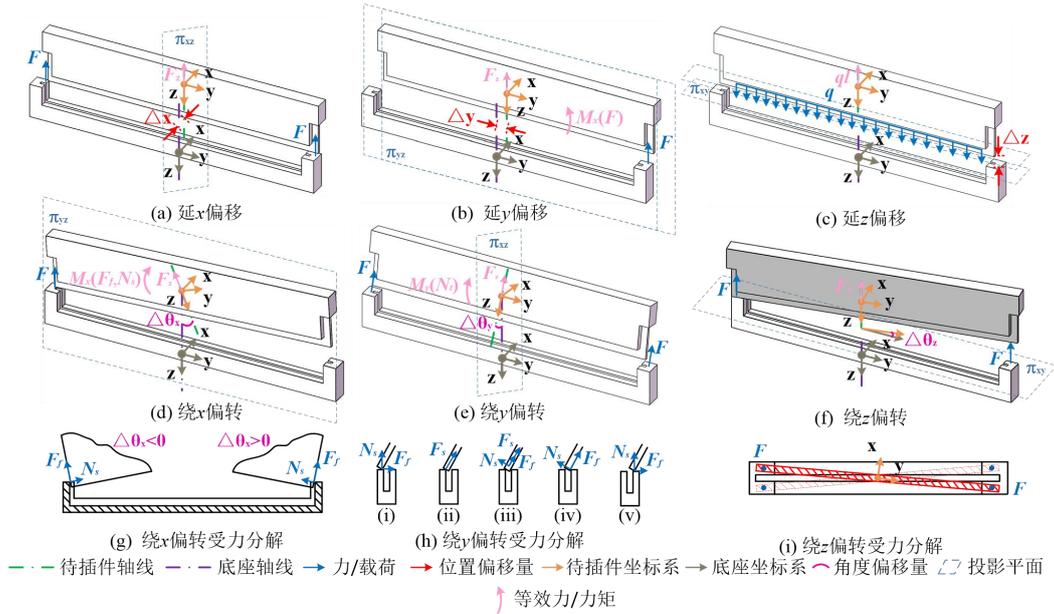


图 2 接触状态受力分析

Fig. 2 Force analysis of different contact states

2.3 非均质薄板的受力变形分析

承载元件插装的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。如图 3 所示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 S.等提出的板壳理论^[23]可获取均质薄板挠曲面方程的 Navier 解：

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

其中， k_{bend} 为板的弯曲刚度， m 和 n 表示均布载荷分解为二重三角级数的函数级数， l_g 和 w_g 分别为 PCB 版的长度和宽度， l_p 和 w_p 分别为插槽的长度和宽度， h_p 为插槽上段高度。

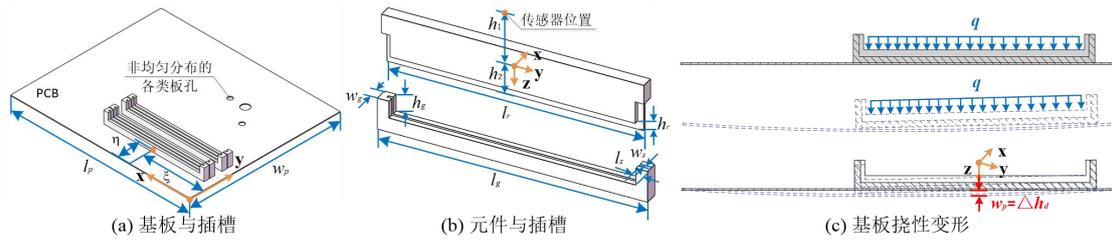


图 3 弹性变形分析

Fig. 3 Elastic deformation analysis

2.4 位移融合下的运动分析

元件插入的过程中，受到来自插槽的反向作用力，二者之间具有相对的滑移和摩擦。同时，由于基板具有柔性，插入过程元件、插槽和基板会一同下移。这种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为：

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

$$q_z l_r = q_e l_r + \mu_f F_N \quad (9)$$

其中, h_r 为元件完全插入时相对插槽的滑动位移, q_e 为薄板表面的分布载荷, 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, 同时也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过程。对齐阶段通过 3.1 节所述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 3.2 节设计的力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不易保障。基于上述视觉和力觉控制算法, 3.3 节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, 因而可采用夹手的位姿作为视觉观测目标, 体现为 P1 和 P2 两点。两点之间的中垂线 L2 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, 体现为 P3 和 P4 两点, 二者的中垂线 L1 为元件期望姿态角提供依据。基于图像特征提取算法, 可获取目标特征在相机归一化坐标系下的坐标。元件定位需要将夹手带动元件与对应插槽对齐。根据基板分布的先验知识, 插槽相对于点 P3 和 P4 的位姿是固定的, 因而可获取期望状态下 P1 和 P2 点的位置。

$$p_{di} = \underbrace{\begin{bmatrix} R_{i,i+2} & t_{i,i+2} \end{bmatrix}}_{T_{i,i+2}} p_{d(i+2)}, \quad i=1,2 \quad (10)$$

其中, p_d 代表了相机归一化坐标系下的坐标, $T_{i,i+2}$ 为 P1 和 P2 点期望位姿与 P3 和 P4 点位姿之间的变换矩阵。图中 L1、L2 和 L3 的方向角定义为 ϕ_{l1} , ϕ_{l2} 和 ϕ_{l3} , 其中 L3 为插槽方向。由于 L3 对比度较低, 易受到扰动影响, 可预先测得 L1 和 L3 之间的夹角 $\Delta\phi = \phi_{l1} - \phi_{l3}$ 。根据上述定义, 元件位姿视觉跟踪误差可定义为:

$$\begin{cases} e_i = p_i - p_{di} \\ e_\phi = \Delta\phi + \phi_{l3} - \phi_{l2} \end{cases} \quad (11)$$

其中, p_i 为夹手观测点在相机归一化坐标系下的坐标。

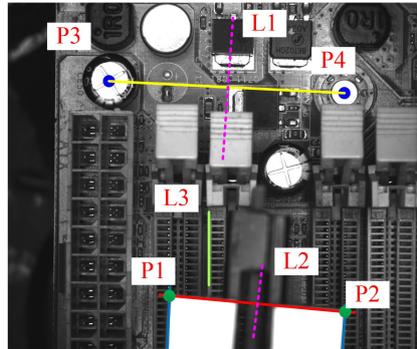


图 4 视觉观测特征

Fig. 4 Visual observation target

3.2 力觉控制策略

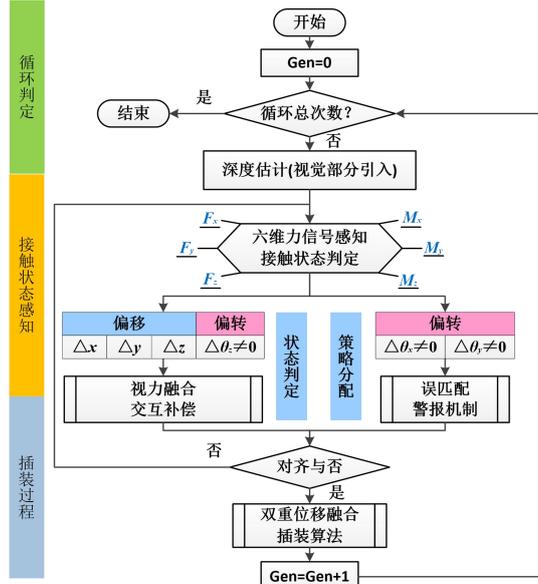


图 5 装配算法流程图

Fig. 5 Assembly algorithm flow chart

为了避免元件偏移导致插入过程受到损坏，这里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判定、视力融合补偿以及完整装配三个循环，迭代次数分为 Gen , k 和 m 。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。接驳台的四个支点可调节丝杆与基板的垂直度，可避免图 2 中 (d) 和 (e) 所示的偏差状态。若力传感器感知到了上述非期望偏转，则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。

表 2 接触状态判定算法伪码

Table 2 Pseudo code for contact state determination algorithm

| 算法 1: 接触状态判定 |
|---|
| Input: $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z, h_{ac}, h_p, h_1, h_2, h_g, h_{ab}, w_s, Gen, \delta h, z_e, l_r, \varepsilon_{Mu}, \varepsilon_{Fu}, k$ |
| Output: 接触状态(a)-(f) |
| Initialization: |
| $\Delta x_f \leftarrow 0, \Delta y_f \leftarrow 0, \Delta z_f \leftarrow 0, \Delta \theta_{yf} \leftarrow 0, \Delta \theta_{xf} \leftarrow 0, \Delta \theta_{zf} \leftarrow 0$ |
| $\alpha \leftarrow 1, \beta \leftarrow 0.4, m \leftarrow 0$ |
| 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 $M_x(F) \notin (0 - \varepsilon_{Mu}, 0 + \varepsilon_{Mu})$ and $F_z(h_{ac})/F_z(\tilde{w}_e \leftarrow h_{ac}) \in (1 - \tilde{\lambda}, 1 + \tilde{\lambda})$ then |
| Output: 接触状态(b), 丝杆运动至: $h_p + \delta h, m \leftarrow 0, \mathbf{break};$ |
| $\Delta y_f \leftarrow l_r - 2M_x/F_z$ |
| else if $M_x(F) \notin (0 - \varepsilon_{Mu}, 0 + \varepsilon_{Mu})$ then |
| Output: 接触状态(d), 丝杆运动至: $h_p + \delta h, m \leftarrow 0, \mathbf{break};$ |
| $\Delta \theta_{yf} \leftarrow \arccos F_x(\tilde{w}_e)/F_z(h_{ac})$ |
| else if $M_y(F) \notin (0 - \varepsilon_{Mu}, 0 + \varepsilon_{Mu})$ then |
| Output: 接触状态(e), 丝杆运动至: $h_p + \delta h, m \leftarrow 0, \mathbf{break};$ |
| $\Delta \theta_{yf} \leftarrow \arcsin((h_1 + h_2 - M_y/F_x)/w_s)$ or $\Delta \theta_{yf} \leftarrow \frac{\arctan(2F_z/F_x)}{2}$ |
| else if $F_z(z_e) \notin (0 - \varepsilon_{Fu}, 0 + \varepsilon_{Fu})$ 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** $F_z(z_e) \in (0 - \varepsilon_{Fu}, 0 + \varepsilon_{Fu})$ **then**

Update: $m \leftarrow m + 1$

Output: 接触状态(c)

else

Output: **break**;

end if

Update

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

end while

Update

$k \leftarrow k + 1$

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

如表 2 所示, h_p 为接触点预设深度, h_c 为视觉估计的深度值, z_e 为编码器反馈的机械臂末端位置, ε_{Fu} 和 ε_{Mu} 为力和力矩扰动上限值, δh 为预设缓冲距离, 初值为 1 mm, 元件接触插槽时的编码器位置为 h_{ab} , 接触后的下行距离为 h_{ac} 。根据算法 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, 则根据更新率的设计在 $m \geq 3$ 时元件插入插槽, 而其他状态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表征能力不同。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。

■ 对齐阶段

定义源于力觉反馈误差为 $\mathbf{e}_f(k) = (\Delta x_f(k), \Delta y_f(k), \Delta z_f(k), \Delta \theta_{z_f}(k))^T$, 视觉反馈的误差为 $\mathbf{e}_c(k) = (\Delta x_c(k), \Delta y_c(k), \Delta z_c(k), \Delta \theta_{z_c}(k))^T$ 。融合后的综合误差定义为:

$$\mathbf{e}_a(k) = (\Delta x_c(k), \underbrace{\varpi \Delta y_c(k) + (1 - \varpi) \Delta y_f(k)}_{\Delta y_a(k)}, \Delta z_a(m, k), \Delta \theta_{z_c}(k))^T \quad (12)$$

其中, $\varpi \in (0, 1)$ 为视觉误差权重, 元件装配深度 z_c 可通过实验预先测定, Δz_a 为信息融合后的深度误差。图 6 为对齐阶段的控制框图。

$$\Delta z_a(m, k, \text{Gen}) = \begin{cases} -h_p - \underbrace{h_c(\text{Gen}) + h_c(\text{Gen} - 1) - \delta h(\text{Gen} - 1)}_{\delta h(\text{Gen})}, z_e > h_p + \delta h(\text{Gen}) \\ h_p - h_g - z_e, h_p - h_g \leq h_{ab} \leq z_e \leq h_p + \delta h(\text{Gen}) \\ h_p - h_g + \delta h(\text{Gen}) \left(1 - \alpha(1 - \beta^m) / (1 - \beta) \right), h_p - h_g \leq z_e \leq h_{ab} \\ h_p - h_g - z_e, z_e \leq h_p - h_g \end{cases} \quad (13)$$

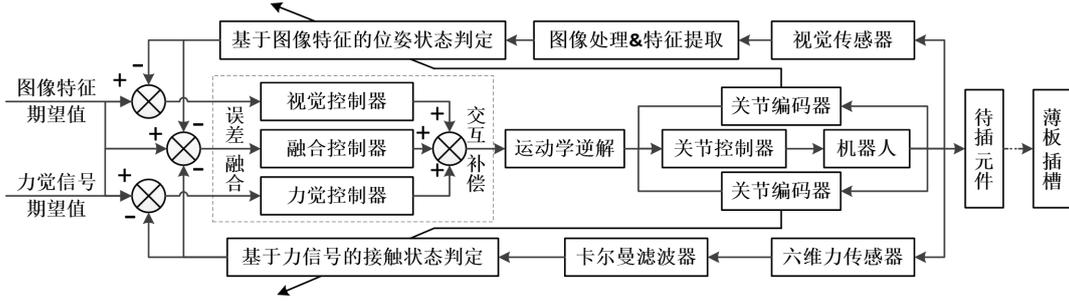


图 6 多信息融合控制算法

Fig. 6 Multi-information fusion control algorithm

■ 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。

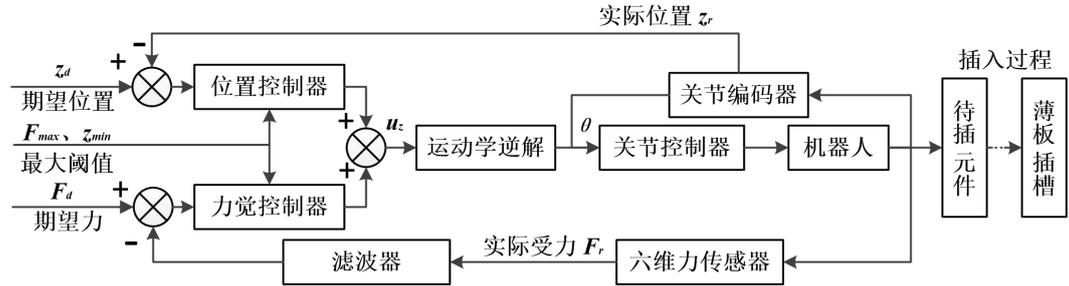


图 7 力/位混合控制框图

Fig. 7 Force/position hybrid control block diagram

基于安全性考量，设定最大插入力位 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：

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

最大插入深度定义为

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

其中， ε_{dep} 为深度容差。当力传感器或编码器感知到下落位置或插入力超过最大限值时，停止下落并使气动夹手释压，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度为 u_{zmin} ，力位融合后的速度控制律可设计为：

$$u_z = \begin{cases} -u_{zmin}, 0 < abs(u'_z) \leq u_{zmin} \\ u'_z, else \end{cases} \quad (16)$$

其中：

$$u'_z = \begin{cases} k_f \cdot \max \{ \tilde{w}_e(F_{max}) - \tilde{w}_e(F_r), z_{min} - z_e \}, z_e \geq z_{min} \text{ and } F_z \leq F_{max} \\ 0, z_e \leq z_{min} \text{ or } F_z \geq F_{max} \end{cases} \quad (17)$$

4 实验研究

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

这里设计了三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。

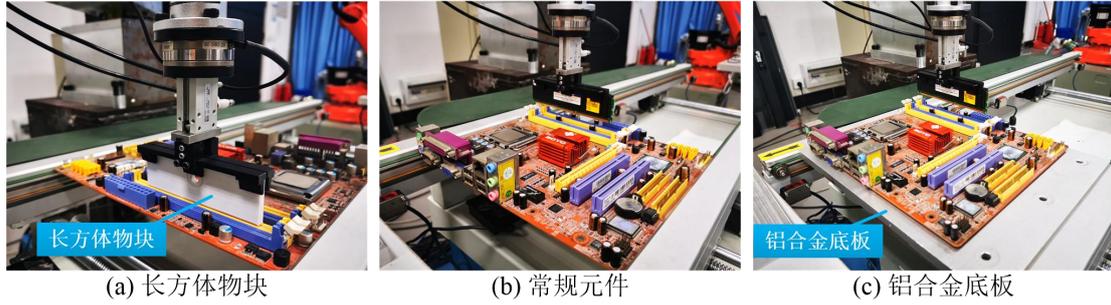


图 8 元件插装配置模式

Fig. 8 Configuration of component assembly

如图 8 所示，分别采用长方体物块、待插元件和铝合金底板支撑三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。设定丝杆匀速下落，同步记录元件的位置和受力情况。结构参数如表 3 所示。

表 3 结构参数

Table 3 Structural parameters

| 参数 | 参数值 | 参数 | 参数值 |
|-------|--------|------------|------------------------|
| l_p | 245 mm | η | 28 mm |
| l_g | 141 mm | ζ | 85 mm |
| w_p | 210 mm | S_c | 3282.5 mm |
| w_g | 7 mm | k_{bend} | 0.95 N/mm ² |

图 9 (a) 所示为长方体物块匀速下落时，力传感器的十组信号曲线。元件在接触插槽后，下落了接近 4.5mm 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。受力曲线呈现出一定的非线性特性，这表明基板的刚度并非恒定值。将表 3 中的参数代入等式 (7)，取 m 和 n 的最大值为 3，可得到图 9 (b) 所示的 Navier-0.95 解。其与真实力位曲线未完全重合，表明了挠度分析理论^[23]在实际应用中的局限性，依赖于实验数据分析方式更贴合实际。

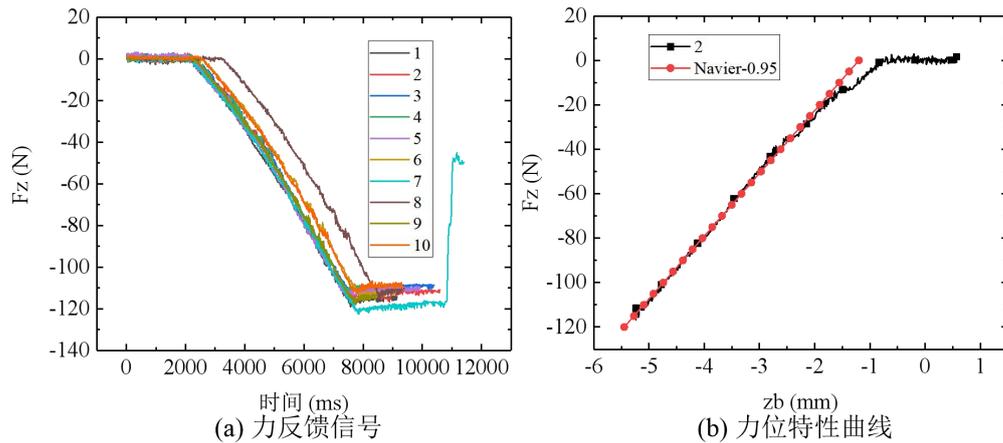


图 9 基板纯弹性变形力位特性

Fig. 9 Mechanical properties corresponding to elastic deformation of substrate

图 10 (a) 所示为待插元件匀速下落插入插槽的力信号曲线。从图中可以看出，元件刚接触到插槽时，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是同时发生的，二者呈现了叠加混合的特性。元件完全插入插槽后，相对滑移的作用消失，因而和图 9 (a) 所示的力信号曲线趋势一致。图 9 (b) 也反映出

了力位信号的非线性映射关系。此外，元件插入插槽对应的最大力不超过-100 N，最大下落实移在-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。

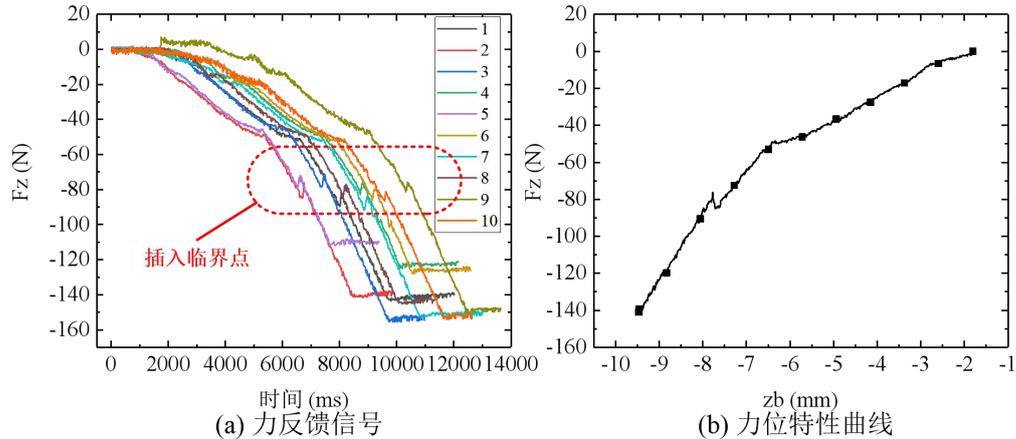


图 10 正常元件插装力位特性

Fig. 10 Mechanical properties corresponding to component insertion

图 11 所示为基板不产生弹性变形时的系统力位特性。曲线呈现出明显的非线性特性，且在插入临界点出现了一段恒力波动。在此期间，元件保持着匀速下落，表明了元件克服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，在恒力阶段之前，有一个压力增大再减小的过程。因而，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。在元件完全插入插槽内后，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。

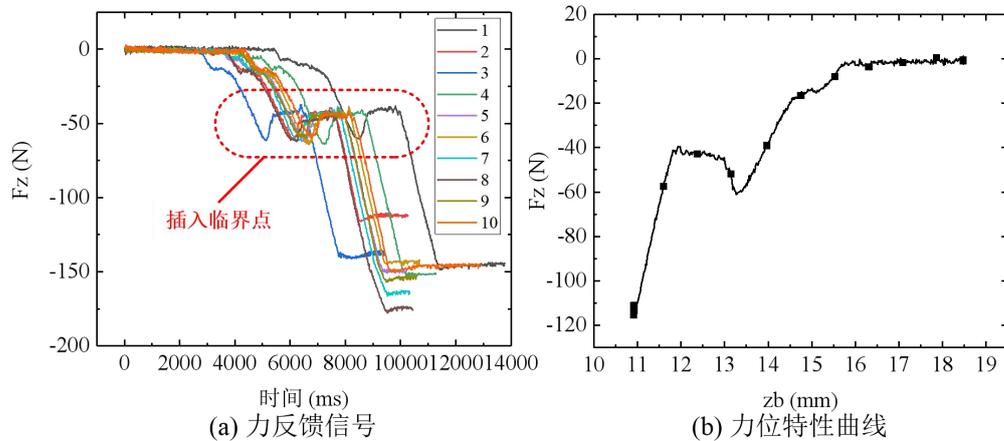


图 11 底部支撑插装力位特性

Fig. 11 Mechanical properties corresponding to the bottom is supported

4.2 信息融合装配算法验证

为了验证视力融合算法的有效性，对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，当元件对齐后则执行接触状态算法判定，完成元件的顺利装配。如图 12 (a) 和 (b)所示，视觉引导可在 650 ms 以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 deg。定位完成后停止闭环视觉伺服，并执行垂直插装。结合表 2 设计的接触力判定方法，可看出图 12 (c) 在 750 ms 到 1.5 s 之间具有明显的两段下落过程，同时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，其力信号曲线变化规律与基板挠度分析结果一致。当最大位移量和最大力阈值触发后，完成元件的精准装配。

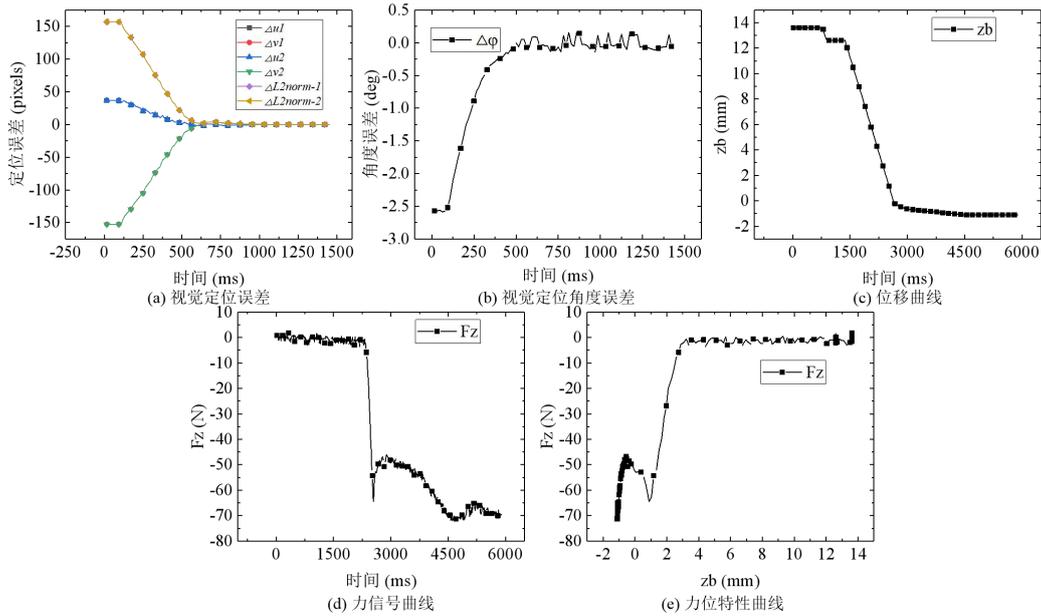


图 12 多信息融合元件装配图
Fig. 12 Multi-information fusion component assembly

5 讨论与分析

本研究聚焦于精密电子元件装配技术领域，特别涉及一种多信息融合的插装控制算法。相较于单模式视觉定位装配算法^[4-7]，所提算法引入了力觉反馈调节来避免视觉定位失准时可能出现的元件装配损坏等问题。相较于刚性轴孔的力觉装配方案^[13-15]，本算法为电子元件提供一种有效安全的回退调节策略，避免了微电路的损坏。同时，该研究还分析了具有薄、脆特点的柔性基板受力特性，对比了 Timoshenko S. 等提出的经典板壳理论^[23]，得出基于实际数据的力位特性更加适用于非均质薄板的受力分析。所提六类初始位姿偏差下的受力分析基本模型，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。所提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。该项工作面向于广泛应用于工业智造过程中的平面定位与插装过程，后续工作将围绕更多自由度以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

该研究基于多信息融合技术，提出了一种面向于精密电子元件装配的复合型装配方法。实验结果表明元件在对齐阶段可实现 650ms 以内的像素误差快速收敛，且定位误差在 0.185 像素以内。装配阶段的视觉、力觉和编码器多信息反馈调节策略，保障了元件与插槽最大接触力在预设范围以内，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 W. Robotic assembly of smartphone back shells with eye-in-hand visual servoing [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 50 (Supplement C): 102-113.
- [5] Wang J, 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 W, Wu C. Automated USB peg-in-hole assembly employing visual servoing [C] // 2017 3rd International Conference On Control, Automation and Robotics (ICCAR), Nagoya, Japan, 2017: 352-355.
- [7] Kleppe AL, Bjoslshrkedal 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 冗余双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(06): 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(06): 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(01): 2-11.
Wang J, Jiang Y. Dynamic assembly algorithm based on deep reinforcement learning [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2023,18(01): 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): 1-19.
- [13] Liu S, Xing D, Li Y, 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 F, Xu D, Zhang D, 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(Supplement C): 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] // 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS), 2016, 44(Supplement C): 287-292.
- [20] Qin Z, 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]. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1959.