

文章编号: 2095-0411 (2013) 04 - 0025 - 07

新型并联运动贴装机器人的研制*

尹洪波¹, 朱帅帅¹, 邓嘉鸣¹, 朱菁文², 沈惠平¹

(1. 常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213016; 2. 常州大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 针对现有贴装机价格昂贵、机构刚度低、动力学响应慢等缺陷, 提出并联运动贴装机器人的概念并进行研制。首先, 采用自主发明的二滑块驱动解耦并联机构作为贴装机器人主机机构, 并进行了运动学性能分析; 其次, 进行了详细的机械结构设计, 包括并联机构模块、贴装头模块、PCB 板定位模块、供料器模块、传动模块等, 并按贴装要求设计了气动回路以及控制系统; 最后, 研制了实物样机, 进行了调试和贴装, 表明并联运动贴装机器人运行可靠、高效、贴装精度能满足要求, 具有较好的推广应用价值。

关键词: 并联机构; 贴装; 机器人

中图分类号: TP 24 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.2095-0411.2013.04.005

Development of the New Parallel Movement Mount Robot

YIN Hong-bo¹, ZHU Shuai-shuai¹, DENG Jia-ming², ZHU Jing-wen¹, SHEN Hui-ping¹

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: For the defects of high prices, low stiffness of mechanism and slow dynamic response speed of existing mount machines, the concept of parallel movement mount robot is proposed and prototype is developed in this paper. Firstly, self-created decoupled parallel mechanism with two sliders is used as the main mechanism of mount robot and kinematics character is studied. Secondly, the mechanical construction, including parallel mechanism module, mounting head module, PCB positioning module, feeder module, and transmission module, etc. is designed in detail. Pneumatic circuit and control system are designed according to mount requirements. Finally, physical prototype is developed, debugged and mounted. The result shows that the parallel movement mount robot has the features of reliable running, high efficiency and high mounting precision, which has a broad generalized value of application.

Key words: parallel mechanisms; mount; robot

贴装机是 SMT 生产线上的最重要的设备, 它通过移动贴装头把表面贴装元件准确地放置到经过锡膏印刷或点胶的 PCB 板 (印制电路板) 上。随着电子产品的小型化、轻量化发展, 各种电子元件

的集成度不断提高, 对贴装机的速度、精度的要求越来越高^[1-5]。

综合国内外 SMT 发展状况来看^[6-9], 贴装机基本都是基于直角笛卡尔坐标系而实现 X、Y、Z

* 收稿日期: 2013 - 06 - 03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51075045, 51375062); 江苏省重大科技支撑与自主创新项目 (BE2010061)

作者简介: 尹洪波 (1988-), 男, 江苏徐州人, 硕士生; 通讯联系人: 沈惠平。

方向的移动, 为串联式多层结构。从机构学原理分析, 这类机构存在以下不足^[10]: ①为了从空间某一点移动至另一点, 需要由 3 层分离机构的叠加来实现, 降低了系统刚性, 导致移动不稳定或变形, 产生动态误差; ②每层结构的部件具有较重质量, 系统整体具有较大运动惯性, 从而影响了贴片效率的提高; ③由于采用 3 层串联机构, 贴装头的误差为 3 层导轨误差及其垂直度误差的累积, 从而限制了贴装精度的提高。

为此, 本文作者基于并联机构结构简单、刚度大、动平台运动速度高等特点, 提出研制基于并联机构的贴装机, 即: 并联运动贴装机器人。首先, 采用自主发明的二滑块驱动并联机构作为贴装机器人主机机构, 并进行了运动学性能分析; 其次, 进行了详细的机械结构设计, 包括并联机构模块、贴装头模块、PCB 板定位模块、供料器模块、传动模块等, 并按照贴装要求设计了气动回路, 同时, 对控制系统进行了简单的介绍; 最后, 研制出实物样机, 完成了初步调试和贴装。

1 总体方案

贴装机器人是通过移动贴装头, 将吸取的芯片准确地贴放到已经涂过锡膏的 PCB 板上, 完成芯片的贴装, 如图 1 所示。总体方案可简单地描述如

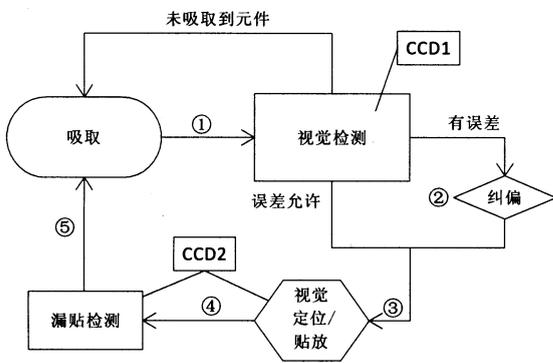


图 1 总体方案

Fig. 1 The overall project

下: ①通过电机的转动, 带动贴装头中的吸嘴移动到喂料器中的元件待吸取的上方, 此时, 真空发生器打开, 吸嘴下降, 完成元件的吸取; ②吸嘴吸取元件, 在主机构的作用下运行到摄像机 (CCD1) 上方, 摄像机对元件的底部进行图片采集, 然后进行处理, 对于不符合贴装要求的芯片进行纠偏; ③通过主机机构的移动, 以及视觉定位 (CCD2), 使吸取的元件中心运动到贴装位置; ④吸嘴下降一定高度, 关闭真空, 完成元件贴放; ⑤完成一个元件的

贴装, 吸嘴升高到初始位置, 进行下一个贴装循环。

2 机型设计及运动学性能分析

2.1 机型设计

主机机构采用二滑块驱动的 2 个自由度并联机构, 以实现末端执行器从料带中吸取元件后, 再移动到 PCB 板所要贴片的位置, 进行贴放。

PCB 板长度方向与料枪送料方向垂直放置, 与主机机构的 2 个并联导轨的布局方式可有 3 种, 分别是两平行导轨在 PCB 板的同侧、两平行导轨在 PCB 板的异侧和两导轨垂直放置, 详见图 2。

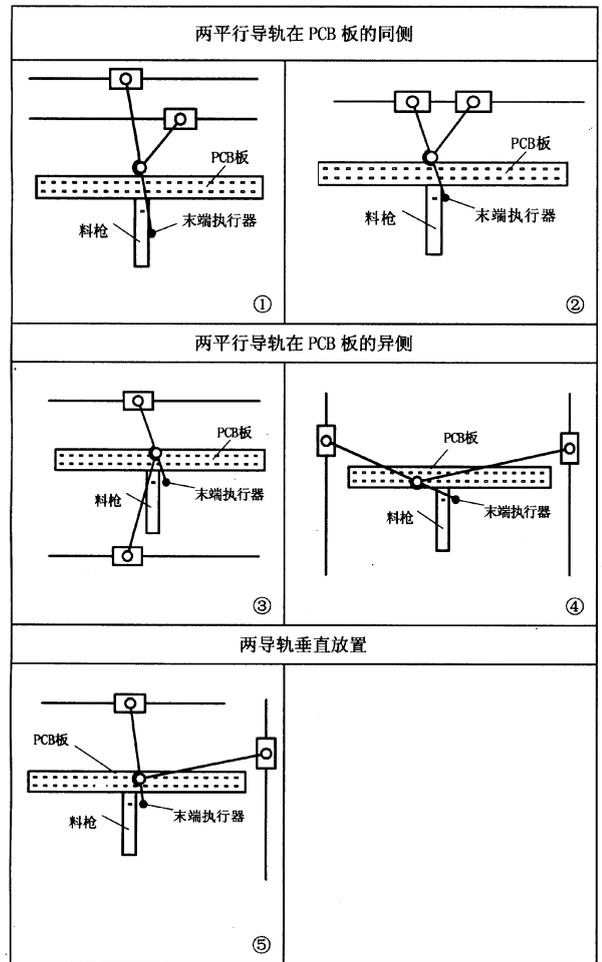


图 2 并联机构 3 种布局方式

Fig. 2 3 layouts of the parallel mechanisms

若两平行导轨在 PCB 板的异侧, 则该机构所需连杆的尺寸较长, 装置庞大; 若两导轨垂直放置, 则机构的运动空间受很大限制, 控制算法也稍复杂。经综合比较, 选用两平行导轨在 PCB 板的同侧, 若要求工作空间不变, 两导轨在水平面内平

行时的杆长要长, 而两导轨在上下垂直面内平行时杆长较短; 杆长越长, 末端执行器的振幅越大, 因此高速、高精密贴片机选用两导轨在上下垂直面内平行放置(图2中②所示)。

由于, 吸嘴吸取元件的引脚位置, 应与贴放时要求贴放位置的引脚必须一致, 因此, 在元件吸取之后, 必须保证元件的引脚位置姿态不变, 为此, 可以添加一个 II 级杆组构成平行四边形 $CDQP$ (图3), 其中连杆 PQ 在运行过程中始终与 PCB 板平行, 将贴装头安装在此连杆 PQ 上, 这样就可以保证元件引脚位置在运行过程中保持不变。

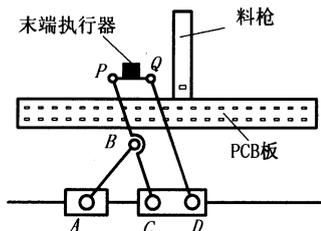


图3 平行四边形机构保证姿态角不变

Fig. 3 Parallelogram frame to ensure the same attitude angle

2.2 机构运动学性能分析

2.2.1 运动学正逆解

(1) 运动学正解

已知滑块 A 点离 O 点的距离为 S_A 、滑块 CD 中的 C 点到 O 点的距离为 S_C , $AB=L_1$, $CP=PQ=L_2$, $PN=m$, $MN=n$, 连杆 AB 与 x 轴的正方向的夹角为 θ_1 , 连杆 CP 与 x 轴的正方向的夹角为 θ_2 , 求吸嘴 M 点位置 (x_M, y_M) , 机构简图如图4所示, 易有机构运动学矢量方程。

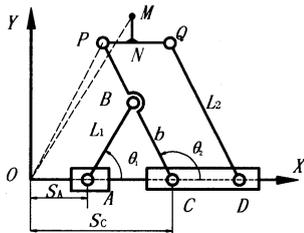


图4 运动学分析简图

Fig. 4 Kinematics analysis diagram

$$S_A + L_1 = S_C + b \quad (1)$$

$$\begin{cases} S_A + L_1 \cos \theta_1 = S_C + b \cos \theta_2 \\ L_1 \sin \theta_1 = b \sin \theta_2 \end{cases} \quad (2)$$

消去式(2)中 θ_2 , 得:

$$\theta_1 = \arccos \left(\frac{S_A^2 + S_C^2 + L_1^2 - b^2 - 2S_A - S_C}{2L_1(S_A - S_C)} \right) \quad (3)$$

同样易有,

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{S_A^2 + S_C^2 + b^2 - L_1^2 - 2S_A - S_C}{2b(S_A - S_C)} \right) \quad (4)$$

$$\text{进一步有, } \mathbf{OP} = \mathbf{S}_C + \mathbf{L}_2 \quad (5)$$

于是, 末端执行器操作点 P 的位置正解方程为:

$$\begin{cases} x_P = S_C + L_2 \cos \theta_2 \\ y_P = L_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (6)$$

由 $\mathbf{OM} = \mathbf{OP} + \mathbf{NP} + \mathbf{NM}$, 可得 M 点的坐标:

$$\begin{cases} x_M = S_C + L_2 \cos \theta_2 + m \\ y_M = L_2 \sin \theta_2 + n \end{cases} \quad (7)$$

(2) 运动学反解

即已知 M 点位置 (x_M, y_M) , 求 S_A 、 S_C

由式(6)得

$$\theta_2 = \pi - \arcsin \left(\frac{y_M - n}{L_2} \right) \quad (8)$$

由(2)式得,

$$\theta_1 = \arcsin \left(\frac{b(y_M - n)}{L_1 L_2} \right) \quad (9)$$

由式(6)的第一式得

$$S_C = x_M - m - L_2 \cos \theta_2 \quad (10)$$

由式(2)的第一式得

$$S_A = S_C + b \cos \theta_2 - L_1 \cos \theta_1 \quad (11)$$

于是, 末端执行器操作点 M 的位置反解方程为:

$$\begin{cases} S_C = x_M - m - L_2 \cos \theta_2 \\ S_A = S_C + b \cos \theta_2 - L_1 \cos \theta_1 \end{cases} \quad (12)$$

2.2.2 工作空间

机器人的工作空间是指机器人末端执行器的工作区域, 是机器人性能的重要参考指标, 工作空间的求解很大程度依赖于机构位置^[11], 机器人的工作空间可分为3类: ①可达工作空间 (reachable workspace), 机构在运动过程中末端执行器可以达到所有点的集合; ②灵巧工作空间 (dextrous workspace), 给定机构任意位姿时, 末端执行器可以到达位置点的集合; ③全工作空间 (global workspace), 给定所有位姿时末端执行器可以到达位置点的集合。

以下讨论工作空间(大小、形状)是指全工作空间, 主要依赖于两导轨的长度 L 和连杆的长度 L_2 、 n 。

由 M 点极限位置组成的封闭空间点的集合, 如图5阴影所示, 其工作空间为 $M_1 M_2 M_3 M_4 M_5$ 围成的图形, 滑块 CD 位于最右端的极限位置时, 以 CD 的中点为原点, 建立直角坐标系, 此时 M 点可以从 M_2 点移动到 M_1 点, 其轨迹为 I, 设 $OD=L_3$, N 点为 PQ 点的中点 (此时有 $L_3=m$),

$PN=m, NM=n, CD=2L_3$ 。

其中, Q 点轨迹是以 L_2 为半径, D 为圆心的 $1/4$ 圆, 其方程为:

$$(x-L_3)^2+y^2=L_2^2 \quad (13)$$

则 M 点轨迹方程为:

$$(x+m-L_3)^2+(y-n)^2=L_2^2 \quad (14)$$

弧 M_2M_1 是以点 $(0, n)$ 为圆心, 以 L_2 为半径的 $1/4$ 圆弧。因此, M 点的工作空间为:

$$S=L\theta(L_2+n)+\frac{1}{2}\pi L_2^2 \quad (15)$$

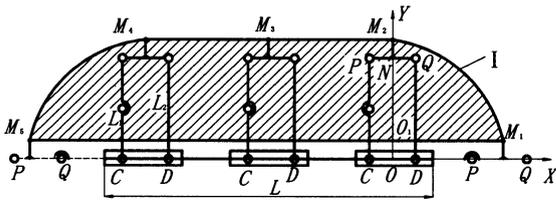


图 5 工作空间分析简图

Fig. 5 Analysis diagram of workspace

2.2.3 奇异位置分析

并联机构在奇异位置时, 运动不受控制, 应避免奇异位置。机构位于奇异位置时, 其雅可比矩阵成为奇异阵, 行列式的值为零, 据此可以得出机构尺寸直接的相互关系^[12]。

对平面机构而言, 雅可比矩阵可以从机构的位置方程及速度方程中得到, M 点与 P 点在机械结构上属于硬性连接, 分析机构的奇异位置主要是考虑连杆 AB 与连杆 PC 之间的数量关系, 设 P 坐标为 (x, y) , 则 B 点坐标为 $(\frac{b}{L_2}x + \frac{L_2-b}{L_2}S_C, \frac{b}{L_2}y)$ 。如图 6 所示, 在直角三角形 ABS 与直角三角形 PRC 中, 根据三角关系可得杆长关系方程:

$$\begin{cases} (\frac{b}{L_2}x + \frac{L_2-b}{L_2}S_C - S_A)^2 + (\frac{b}{L_2}y)^2 = L_1^2 \\ (x - S_C)^2 + y^2 = L_2^2 \end{cases} \quad (16)$$

对式 (16) 求导, 整理可得如下形式:

$$\mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \cdot \begin{bmatrix} \dot{S}_A \\ \dot{S}_C \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, 矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 为机构的正雅可比矩阵, 可表示为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{b}{L_2} & \frac{b}{L_2}(\frac{b}{L_2}x + \frac{L_2-b}{L_2}S_C - S_A) & \frac{b^2}{L_2^2}y \\ x - S_C & y & \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{b}{L_2}x + \frac{L_2-b}{L_2}S_C - S_A & -\frac{L_2-b}{L_2} + \frac{b}{L_2}x + \frac{L_2-b}{L_2}S_C - S_A \\ 0 & x - S_C \end{bmatrix} \quad (19)$$

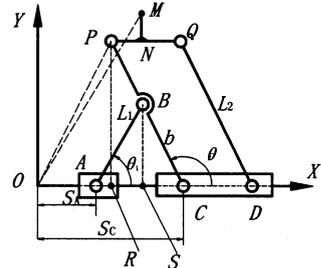


图 6 奇异位置分析简图

Fig. 6 Analysis diagram of the singular position

并联机构中, 当矩阵 \mathbf{A} 的行列式为零, 机构出现奇异位置, 即 $\det(\mathbf{A})=0$ 时, 则有

$$\frac{b}{L_2}(\frac{b}{L_2}x + \frac{L_2-b}{L_2}S_C - S_A) \cdot y - (x - S_C) \cdot \frac{b^2}{L_2^2}y = 0$$

该机构的奇异位置如图 7 所示, 此时 $\theta_1 = \theta_2$, 即滑块上的 C 点与另一个滑块上的 A 点在垂直方向重合 (连杆 AB 与 CB 重合)。此时, 机构运动出现不确定性, 即 AB 杆 (CB 杆) 分别可与导轨成锐角、直角、钝角 3 种情况。

此时, 机构位于奇异位置, 存在多余自由度, 运动设计过程中为避免机构出现奇异位置, 设计时取 $L_{AB} \neq L_{CB}$ 。

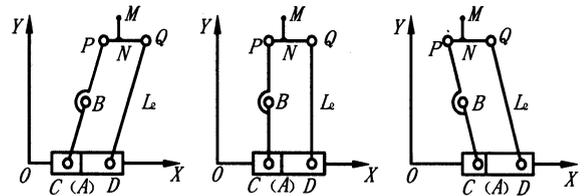


图 7 奇异位置

Fig. 7 The singular position

3 结构及气动系统设计

3.1 结构设计

机械结构设计的功能是在功能原理方案设计与总体设计的基础上, 将机型设计方案具体化, 最终确定机械装置的具体结构和参数。

并联运动贴装机器人由并联机构模块、贴装头模块、PCB 板定位模块、供料器模块、传动模块

等组成, 其整体设计在 slidworks 中进行, 三维模型如图 8 所示。

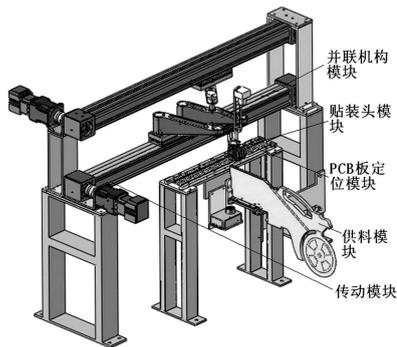


图 8 机构装配图

Fig. 8 Assembly diagram of machine

3.1.1 并联机构模块

贴片机的重点和核心是二自由度并联机构的设计, 1.2 中已详细介绍了运动学正逆解、工作空间、奇异位置。

3.1.2 贴装头模块 (二自由度辅机构)

LED 灯具有低能耗、长寿命、色彩丰富、安全环保等特性, 市场前景广阔^[13]。因此, 样机设计主要面向 LED 贴装作业, 但通过更改吸嘴, 可以用于贴装其它元器件。

贴装头结构见图 9, 当贴装头移动到 LED 供料器工位时, 吸嘴由气缸推出, 同时, 真空系统工作, 吸嘴处于真空状态, 吸取 LED 元件。气缸回收吸嘴, 贴装头开始移动, 同时, 视觉系统工作完成对 LED 元件的纠偏, 并继续移至 PCB 板相应的贴放位置, 气缸推出吸嘴, 真空系统关闭, 完成 LED 贴放。此外, 为了提高贴片机工作效率, 贴装头可安装两个吸嘴, 交替工作。

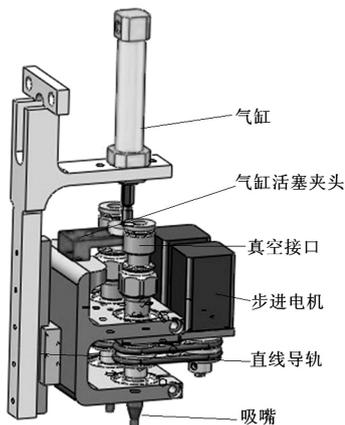


图 9 贴装头模块

Fig. 9 Module of placement head

对于步进电机, 选用常州运控电子有限公司生产的 20H28H-0204A, 主要参数为: 扭矩 160g ·

cm, 电机内部轴承的负载 450g, 步距角精度 ± 5%, 电压 4.8V, 电流 0.2A, 机身長 28mm, 质量 0.05g。

对于气动元件, 选用 smc (日本气动元件供应商) 气缸, 其型号为: CDJ2KB10-15-B, 缸径 10mm, 行程为 15mm, 可满足贴装要求。

3.1.3 PCB 板定位模块

考虑成本和实用性等多方面因素, PCB 板采用人工安放、机械定位夹紧的方式, 如图 10 所示。

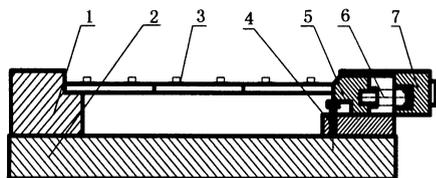


图 10 PCB 板定位模块

Fig. 10 PCB board clamping module

3.1.4 LED 供料器模块

供料模块主要由喂料器 (三星 SM421)、喂料器基座、机架、料盘等组成, 其主要作用是以一定的时间间隔, 使料盘中的 LED 元件准确有效地到吸取位置。

3.1.5 传动模块

传动模块工作原理为: 在两个伺服电机驱动下, 运动和动力由同步带传动机构传给滑块, 滑块以不同的速度运动, 实现贴装头由吸料工位移动到贴放工位。

由工作空间计算公式, 以及 PCB 板的尺寸规格、导轨长度, 选用德国产定位系统 QLZ80, 其导轨有效行程为 1 200mm, 同步带轮直径 $D = 56\text{mm}$, 最大扭矩为 $40\text{N} \cdot \text{m}$, 可以满足贴片的要求。

设定机械结构参数: 滑块的直线速度 $V = 1.5\text{m/s}$, 同步带与连杆的总质量为 $m = 20\text{kg}$, 机械效率 $\eta = 0.95$, 加速度时间为 $t = 0.125\text{s}$, 加速度值为 $a = 14.7\text{m/s}^2$ 。综合考虑选择德 MOTEC 伺服电机 SEM80B08303HN 及减速机 APX90, 技术参数分别见表 1, 表 2。

3.2 气动系统设计

混联运动贴片机的气动系统应满足工况要求: 当贴装头运动到 LED 供料器吸取位置时, 气缸向下运动, 真空发生器产生的真空输入到吸嘴, 将元件吸取, 气缸回收; 当贴装头运动到贴放位置时, 气缸向下运动, 关闭真空, 将元件贴放至 PCB 板。

所设计的气动回路如图 11 所示。

表 1 伺服电机技术参数

Table 1 Technical parameters of servo motor

电机型号	80B0830
额定输出功率/W	750
驱动器外形分类	B
额定转矩/Nm	2.4
最大转矩/Nm	7.16
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	3 000
电机惯量/($10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1.03

表 2 减速机技术参数

Table 2 Technical parameters of gear reducer

减速机型号	APX90
减速比	5
额定输出扭矩	105
故障停止扭矩	210

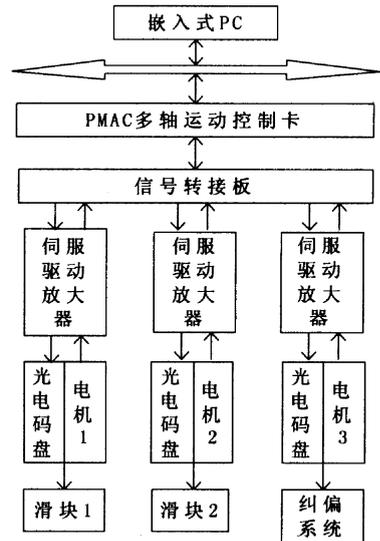


图 12 控制系统整体结构

Fig. 12 The whole structure of control system

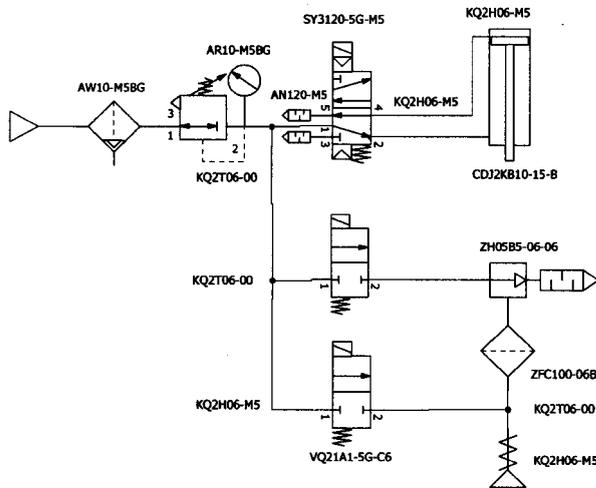


图 11 气动回路图

Fig. 11 Pneumatic loop graph

4 控制系统设计

4.1 运动控制系统设计

采用二级计算机系统，上位机采用工业 PC，下位机采用 PMAC 可编程多轴运动控制卡，通过控制伺服电机，带动同步带，完成主机机构的运动；同时，通过控制步进电机，完成 LED 元件纠偏的运动。该系统能够实现 LED 贴片机的半闭环控制，保证贴片精度和效率。控制系统整体结构如图 12 所示。

4.2 机器视觉系统设计

视觉系统包含 3 大功能模块：视觉纠偏、视觉定位和视觉检漏。纠偏的实现：首先，CCD1 获取图像，然后对图像进行预处理，通过对图像进行分割、轮廓处理、直线拟合等操作，来识别贴片中心位置和位姿（由此决定纠偏的角度）。视觉定位的实现：在 PCB 板上事先做 mark 点，然后通过上方相机寻找该点，并通过该点建立贴片机系统坐标和 PCB、贴片元件坐标之间的转换关系，计算得出贴片机三维运动的精确坐标，同时，在贴放之前，由上方相机进行轮廓检测和中心定位，实现二次定位，进一步提高贴装精度。漏贴检测的实现：通过对原始图像进行预处理，灰度变换、图像分割，并与特征图像库进行对比，得出漏贴点的位置，图像处理效果如图 13 所示。

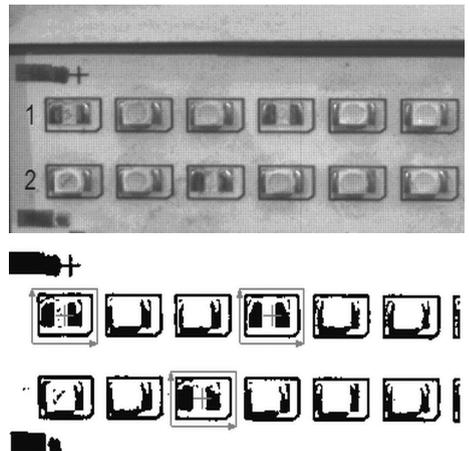


图 13 图像处理效果

Fig. 13 The effect of image processing

4.3 人机交互系统设计

由于贴装工艺过程复杂、数据量大,对机器需要设定的参数很多,因而需要建立一个完善的人机交互系统,从而能简单方便的完成人和机器的数据交互。整个人机交互系统由系统操作、故障报警、手动操作、示教操作、视觉操作和 PMAC 动态库操作等功能组成。

5 实物样机

并联运动贴装机器人结构设计完成后,对需要加工的零部件绘制二维图纸,零件加工完成后再进行零件装配,对不合格的零件需修配,然后对零件进行发黑处理,最后总装配。同时,根据气动回路图连接气动元件,根据电路控制系统原理连接各电器控制元件,并安装回零开关,最后,进行系统的调试,研制的实物样机如图 14 所示。



图 14 研制的实物样机

Fig. 14 Developed physical prototype

6 结论

(1) 首次将并联机构用于贴装作业并研制并联运动贴装机器人,并对机构进行了位置正逆解、工作空间、奇异性分析。

(2) 进行了详细的并联运动贴装机器人机械结构设计,包括并联机构模块、贴装头模块、PCB 板定位模块、供料器模块、传动模块等,按照贴片要求设计了气动回路;同时,对控制系统进行了简单的介绍。

(3) 研制出并联运动贴装机器人实物样机,完成了初步调试,为并联运动贴装机器人的工程设计与应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 龙绪明. 现代实用电子 SMT 设计制造技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [2] 谢青松, 赵立博. SMT 表面贴装技术工艺应用与探讨 [J]. 船电技术, 2009, 29 (10): 36 - 38.
- [3] 贾赛. 表面贴装技术的特点及工艺流程 [J]. 商品与质量: 学术观察, 2012 (3): 65 - 69.
- [4] 鲜飞. 贴片机现状及发展趋势 [J]. 中国集成电路, 2007 (12): 71 - 76.
- [5] 梁引花, 陈裕锦, 江声堂, 等. 论贴片机研制及产业化生产的关键技术 [J]. 电子工业专用设备, 2009, 38 (10): 38 - 40.
- [6] 李炜. 经济视觉型贴片机研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [7] 罗磊, 王石刚, 蔡建国. 表面贴装关键技术综述 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2003 (2): 70 - 72.
- [8] 鲜飞. 贴片工艺概述 [J]. 电子测试, 2009 (4): 42 - 47.
- [9] 李强. 贴片机协调控制层软件的研制与应 [D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [10] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [11] 朱小蓉, 沈惠平, 刘传飞, 等. 二自由度并联操作手的工作空间与奇异性 [J]. 机械设计与研究, 2010, 26 (5): 31 - 35.
- [12] 张彦斌, 刘宏昭, 吴鑫, 等. 2T1R 弱耦合并联机构的运动学和奇异性分析 [J]. 农业机械学报, 2008, 39 (4): 132 - 136.
- [13] 姜国刚, 袁锋, 蔡瑞林. 江苏省绿色照明产业发展对策研究 [J]. 常州大学学报: 社会科学版, 2011, 12 (3): 51 - 54.