

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.004

一种微小挠性零件的自动化精密装配系统*

辛明哲¹, 罗 怡^{1,2}, 陈 勇¹, 王晓东^{1,2*}

(1. 大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为解决具有挠性结构微小零件精密装配的问题,将基于机器视觉的精密测量技术、高分辨率非接触激光位移测量技术等应用到精密装配系统的研制中。设计了用于微小零件夹持的装置,实现了对微小挠性零件拾取、搬运、放置等操作;根据视觉系统测量得到的微小零件与目标位置的偏差,对微小零件水平面内的位置和姿态进行了调整;提出了装配微小零件挠性结构的接触控制方法,该方法通过激光位移传感器非接触测量挠性结构接触变形所引起的微小位移变化,实现了装配过程中垂直方向的精密接触控制;通过在作业机械臂上集成标定模板,实现了装配系统的自动标定。简要介绍了所研制的装配系统组成,并进行了微小挠性零件的装配实验。实验结果表明,微小零件装配的平行度、同轴度误差小于 $10\ \mu\text{m}$,挠性结构接触控制偏差为 $0.6\ \mu\text{m} \sim 0.8\ \mu\text{m}$,装配精度满足使用要求。

关键词: 微小挠性零件; 精密装配; 机器视觉; 接触控制; 装配系统标定

中图分类号: TH6; TH163 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)12-1462-05

Automatic precise assembly for miniature elastic parts

XIN Ming-zhe¹, LUO Yi^{1,2}, CHEN Yong¹, WANG Xiao-dong^{1,2}

(1. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to solve the problem of precise assembly of miniature parts with elastic structures, the precision measurement based on the machine vision, the high resolution non-contact laser displacement measurement and other technologies were applied to the automated precise assembly system. The fixture used for gripping the miniature parts was designed for carrying out the operations of pick up, move and placement. According to the position and orientation error measured by the vision system between the miniature part and its target location, the miniature part was adjusted in the horizontal plane. The precise contact control method in assembly of miniature parts with elastic structures was put forward. Non-contact laser displacement sensor was used to measure the micro displacement caused by the contact deformation of the flexible structures. By integration of the mask template into the manipulator arm, the automatic calibration of the assembly system was realized. The developed assembly system was briefly introduced, and the assembly experiment was done. The experiment results show that, both of the parallelism and coaxial errors of the miniature parts assembled are less than $10\ \mu\text{m}$, and the contact position control error during assembly of the flexible structures are between $0.6\ \mu\text{m} \sim 0.8\ \mu\text{m}$. The assembly accuracy can meet the requirements.

Key words: miniature elastic parts; precise assembly; machine vision; contact position control; assembly system calibration

收稿日期: 2013-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075058); 国家科技重大专项课题资助项目(2013ZX04001-091)

作者简介: 辛明哲(1987-), 男, 山东德州人, 主要从事微小型零件精密装配技术方面的研究. E-mail: xinmingzhe@mail.dlut.edu.cn

通信联系人: 王晓东, 男, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: xdwang@dlut.edu.cn

0 引言

近年来,随着精密加工技术的进步,机电产品不断向小型化、集成化方向发展。微小型机电产品以体积小、功耗少、便于集成等优点,在航空航天、生物医药、移动通讯、汽车电子等领域得到了广泛的应用^[1]。目前,涉及微型机电产品组装的装配自动化技术与微小零件加工技术相比较仍显落后,因此,如何将不同材料、不同加工工艺制造的微小零件自动、高效、精确地组装成微小型机电产品并满足应用要求,仍是制造业需要不断解决的问题。

目前,国内外同行在微小型机电产品装配技术应用领域已取得了一定的成果,研制的部分自动或者半自动微小零件精密装配系统已投入工程应用。瑞士联邦理工大学研制的“Microassembly system V2”装配系统^[2]有6个自由度,其中底座有4个自由度,包括X、Y、Z轴的移动和绕Z轴旋转,零件操作装置(夹钳)含有2个自由度,主要用于混合MEMS器件和其他微小组件的装配。美国明尼苏达大学设计了晶片级装配系统^[3],其中显微视觉可获取厚度小于100 μm金属部件的位置信息,系统驱动微夹钳完成装配,将微机械薄金属部件插入到硅晶片的刻蚀孔中,系统总装配误差水平方向上小于10 μm,垂直方向上小于20 μm。哈尔滨工业大学研制了MEMS精密装配系统,该系统基于2D视觉伺服控制^[4],采用宏微摄像头检测、控制微型机器人的移动;微小机器人作为执行机构实现最大280 μm轴孔零件的夹持和大范围的搬运、装配;机器人在全局视野下的运动精度为0.5 mm~1 mm,由微型电机和压电陶瓷驱动的微夹钳其局部定位精度可达0.5 μm。上海大学研究了基于视觉通过模板匹配获取机镜头的位置,并应用于机器人装配设备^[5]。上述精密装配系统都利用机器视觉进行检测,引导水平及竖直方向零件的装配。

在某一带有挠性结构微小零件的精密装配中,由于零件结构复杂,装配过程中存在视觉阻挡,在垂直方向上无法利用机器视觉控制零件的装配;且挠性部件与其他部件接触时,需要保证挠性结构微变形或者不变形,实现对挠性结构接触的精密控制。

本研究首先介绍具有挠性结构的微小零件的操作、测量和接触控制等装配关键技术,给出精密装配系统自标定方法,介绍研制的微小挠性零件自动装配系统,并进行装配实验。

1 微小挠性零件的装配控制

精密装配系统的作业机械手操作微小零件,通过

基于机器视觉的测量信息,采用“先看-后动”的控制模式^[6],引导机械手完成零件水平面内的位置、姿态的调整和定位;采用高分辨率激光位移传感器的微小位移测量和反馈控制,实现挠性结构垂直方向的微接触控制,实现微小挠性零件的精密装配。

1.1 微小挠性零件操作

带有挠性结构的微小零件如图1(a)所示,零件1的挠性片和线圈的特征尺寸小、强度和刚度低,夹持力过大或者不均匀都会引入应力,导致零件损坏。零件的主体结构特征尺寸较大、有一定的刚度,不易损坏。

微小零件的装配体示意图如图1(b)所示。

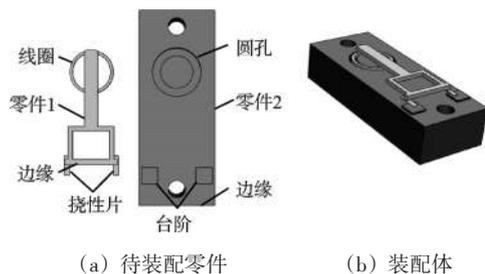


图1 待装配零件及装配体

为了确定微小零件挠性结构在装配过程中允许的变形,本研究给出合理的接触精度要求,建立了有限元模型,对挠性片接触应力进行分析,有限元模型如图2(a)所示。

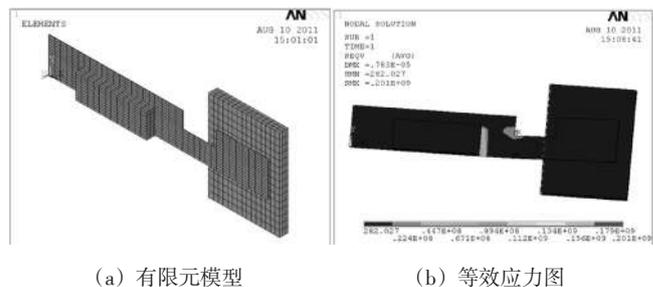


图2 挠性片模型及等效应力图

挠性片材料允许的最大等效应力为217 MPa。当挠性片接触变形为4 μm时,最大等效应力为201 MPa,接近其屈服强度,等效应力图如图2(b)所示。因此,在整个装配过程中应保证挠性片形变量小于4 μm,以避免因变形过大而损坏。

本研究设计了微小零件夹持装置,待装配的两个零件分别安装在夹持装置上、下底板上,如图3所示。夹持带挠性结构微小零件时,只需将零件按照如图3(a)所示放置,通过3个锁紧螺钉使两个机械夹钳闭合而夹紧零件。作业机械手通过真空吸附夹钳拾取上底板,即实现对微小零件的拾取。装配过程中对两个待装配零件的相对位置和姿态进行调整,装配调整完成后,利用下底板上的平行度调整销,夹持装置下底板如

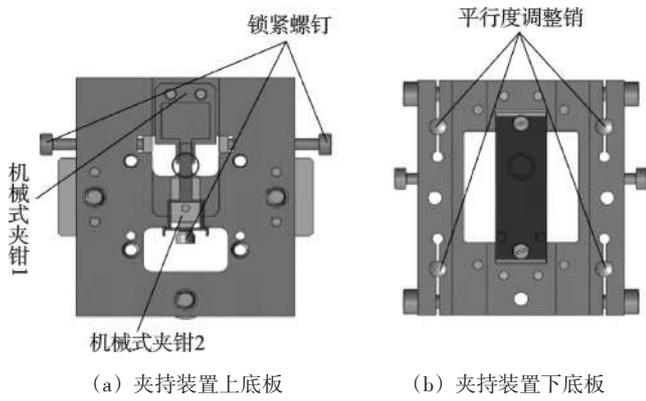


图3 微小零件夹持装置

图3(b)所示,使夹持装置的上、下底板固定。然后进行涂胶,胶粘剂固化后,将零件从夹持装置上取下,完成零件的装配。

1.2 挠性零件水平位姿的测量与定位

零件的识别与定位分为:图像预处理、图像分析、图像理解3个阶段。以零件1线圈图像处理为例,机械手拾取零件,移动到机器视觉装置下方采集图像,线圈原始图像如图4(a)所示。计算机对采集的原始图像进行图像增强、去噪等预处理;然后进行图像的分割,将图像中感兴趣的部分提取出来。采用Canny算子提取边缘,利用高斯滤波平滑图像后一阶偏导数

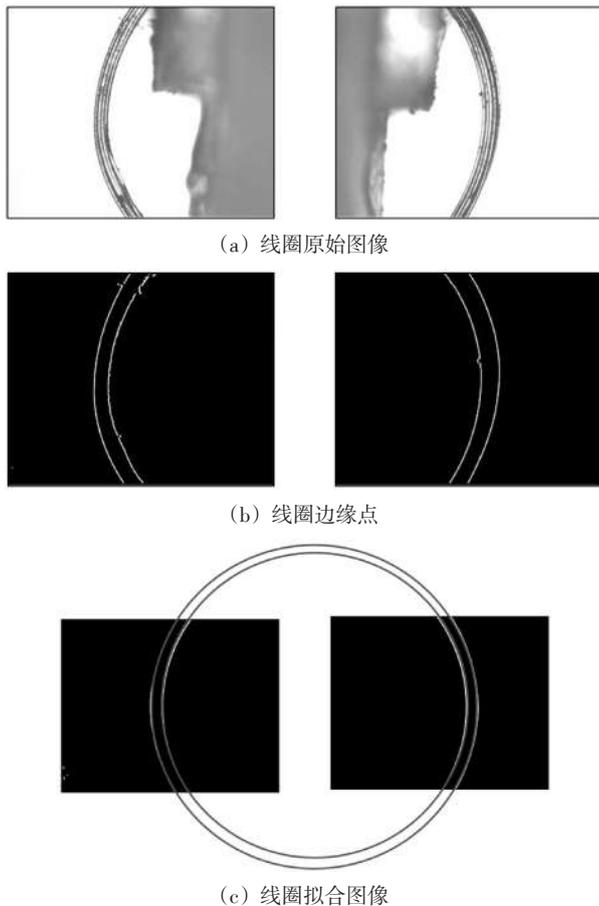


图4 线圈原始图像及处理拟合图像

求解梯度的方向和幅值,通过大阈值标识真实边缘,小阈值跟踪边缘的双阈值方法检测和连接图像边缘点^[7]。采用基于轮廓特征、零件尺寸的局部边缘提取和全局、局部扫描取点组合方式获取零件的局部边缘点信息,线圈边缘点如图4(b)所示。将两幅图像中提取的零件边缘点转换到世界坐标系,在世界坐标系内进行最小二乘法拟合,线圈拟合图像如图4(c)所示,以拟合的规则圆确定实际线圈圆心在世界坐标系中的位置坐标。

针对微小挠性零件装配过程中其他结构的位置和姿态信息,如零件1边缘直线、零件2的圆孔、零件2边缘直线等,本研究同样采用上述方法进行图像处理,然后以拟合的规则圆或直线的信息,确定零件在世界坐标系中的位置和姿态。

装配过程采用“先看-后动”的控制模式,零件特征信息提取后,获得零件的位姿信息,并分别将其位姿信息转换到同一世界坐标系下,计算零件1边缘直线和零件2的边缘直线的夹角,将夹角差值经坐标转换后换算成精密转台的转动值,完成两零件平行度调整;然后测量零件1线圈中心和零件2圆孔中心的坐标,并计算偏差值,将该偏差值经坐标变换后转换成作业机械手的移动量,使两零件在水平面内圆心重合。

1.3 挠性结构的接触控制

装配作业过程中待装配零件之间沿垂直方向的接触需要精确控制。接触控制方式一般可通过接触力检测来进行控制^[8],在没有视觉遮挡的情况下也可以采用显微机器视觉。根据1.1节的分析,挠性片仅允许有很小地变形,由于变形力太小,无法通过微力检测进行控制,同时由于遮挡等原因,视觉检测的方法也不可行。本研究通过测量挠性结构与待组装零件接触后所引起微小位移变化进行反馈控制,实现挠性结构装配过程中沿垂直方向的精密接触控制,微小位移变化通过高分辨率激光位移传感器进行非接触测量。

激光位移传感器检测零件1挠性片和零件2台阶面间的接触状态如图5所示。由于安装激光位移传感器的位移平台Z轴与夹持零件1的装配作业模块Z轴同

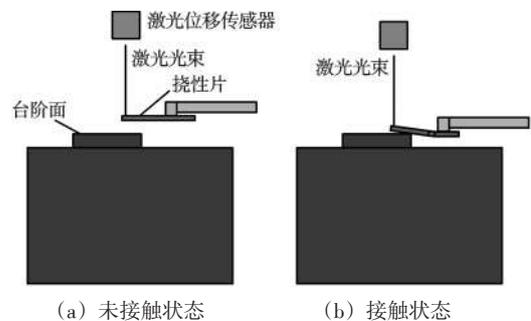


图5 激光检测挠性片位置示意图

存在安装夹角,两者移动的投影距离随移动量的增加而出现较大的偏差,本研究通过两轴同步下降一小段距离后进行清零的方式,消除两个 Z 向位移平台之间夹角影响,由于激光位移传感器能够稳定检测出 $0.6\ \mu\text{m}$ 的位移变化,因此接触控制精度能够优于 $1\ \mu\text{m}$ 。满足1.1节中理论分析要求控制最大形变量小于 $4\ \mu\text{m}$ 的要求。

挠性结构装配时精密接触控制的策略如图6所示。

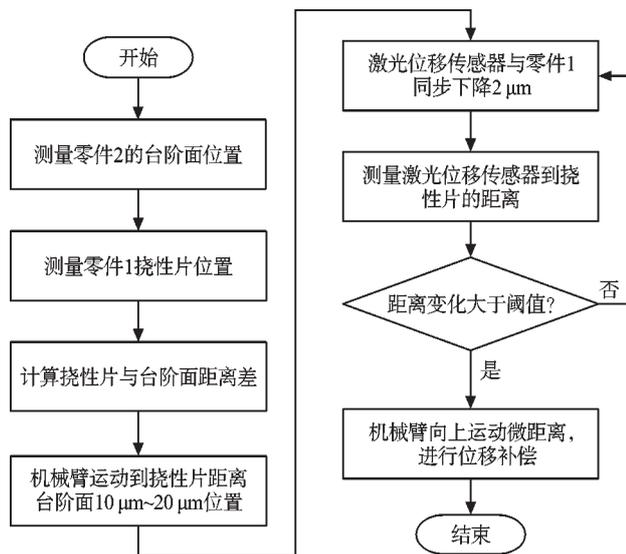


图6 零件 Z 向装配流程图

待装配零件在水平面上的平行度调整和圆心对准完成后,利用激光位移传感器分别测量挠性片和台阶面在 Z 方向上的坐标,并根据挠性片与台阶面间的距离差,控制机械臂沿 Z 向运动,直到挠性片与台阶面相距 $10\ \mu\text{m}\sim 20\ \mu\text{m}$ 时,导轨停止运动;工控机控制精密测量模块 Z 向导轨与装配作业模块的 Z 向导轨每次同步下降 $2\ \mu\text{m}$,同时工控机不断的读取集激光位移传感器的输出信号。两 Z 向导轨每同步下降 $2\ \mu\text{m}$,工控机会将激光位移传感器的输出信号清零并且将相邻两次的输出信号进行比较,此时处于如图5(a)所示的接触前阶段。当相邻两次的输出信号的差值达到或者超出阈值时为已接触状态,如图5(b)所示,此时导轨停止运动。然后,装配进入微调整位移补偿阶段,机械臂 Z 向导轨上升 $1\ \mu\text{m}$,从而实现对挠性片与小平台接触状态的精密控制。

2 精密装配系统的自动标定

装配系统标定是指通过精密测量的方法确定系统中精密测量模块、装配作业模块等之间安装的相对位置偏差,并基于该偏差值在装配过程中进行补偿,以保证装配精度。此外,精密装配系统在工作一段时间后,也需要重新对装配系统的参数进行标定,以保

证装配系统的精度。因此,实现精密装配系统定期自动标定,对于提高工作效率和装配精度意义重大。

基于显微视觉,吉林大学于保军等人^[9]对运动平台的定位精度进行了标定。本研究则基于机器视觉实现装配系统中运动平台之间安装的位置偏差进行自动标定。将标定摄像机及系统参数的标定板安装在夹持模块机械臂上,安装位置如图7所示。标定板安装具有一定的随意性,标定板固定在反光性能较好的光洁安装板上,以便摄像机可以获取清晰的标定板样条图像,避免复杂背景因素的干扰。标定板安装后,如果标定板图形面高度不一致,可以通过螺钉调整使标定板图形面水平。标定板在水平方向的夹角不用进行调整,由于标定板在安装过程中对标定板高度进行调节,使标定板平面和摄像机成像面平行,这样获取的各图样边缘渐变率一致,提高了标定的精度。



图7 标定板安装示意图

标定方案完成摄像机参数及装配系统模块间坐标系的标定,通过实验得到:摄像机参数重复标定误差小于 $0.002\ \mu\text{m}/\text{pixel}$,装配系统模块间坐标系夹角重复标定误差小于 0.014° ;标定精度能够满足装配精度需要,并且标定方法具有一定的通用性。

3 精密装配系统组成及装配实验

本研究研制的自动精密微装配系统如图8所示。

系统由精密测量模块、装配作业模块、上料作业模块和人机交互控制模块做成。

精密测量模块中机器视觉装置和激光位移传感器分别用于平面位置姿态的测量和垂直方向的接触控制。装配作业模块主要用于待装配零件的拾取、搬运与放置。上料作业模块主要完成零件1、零件2的上料操作和装配前零件2水平姿态调整。人机交互控制模块用于操作者通过控制软件操作整个装配过程,以及对测量装配过程进行有效干预。

装配系统通过机器视觉获取零件的图像,然后由



图8 精密装配系统实物

工控计算机进行图像处理,对零件边缘进行识别定位,得到微小零件的水平位置和姿态信息,并反馈给运动控制器,从而调整零件在水平面内的姿态。在进行Z向装配时,本研究使用竖直安装的高精度激光位移传感器实时检测装配零件间的接触状态,实现零件Z向的装配接触控制。

本研究使用研制的精密装配系统,随机抽取多套零件进行装配,并利用影像测量仪器对装配精度进行检测,实验数据如表1所示。得到平行度及同轴度测量均小于 $10\ \mu\text{m}$,满足装配精度要求,其中同轴度反映了圆心的定位误差。接触控制精度是通过测量未接触到已接触状态作业机械臂的微小位移,该微小位移用电感测微仪进行测量,实验中的测量结果在 $0.6\ \mu\text{m}\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 之间。

表1 装配试验测量结果

测量次数	平行度检测结果/ μm	同轴度检测结果 $\varphi/\mu\text{m}$
1	4.1	3.2
2	6.6	7.0
3	4.9	5.3
4	4.3	3.9
5	4.7	2.3
6	1.7	4.1

4 结束语

针对具有挠性结构微小零件的精密自动装配,笔

者研究了微小零件的操作、定位与装配作业控制等关键问题,研制出精密装配系统,并进行了装配实验。

本研究设计了用于微小零件夹持的装置,实现对微小挠性零件拾取等操作。装配过程中零件的精密定位和控制采用机器视觉和高分辨率激光位移传感器实现。根据视觉系统测量得到的微小零件与目标位置的偏差,实现了对微小零件水平面内的位置和姿态进行调整;通过激光位移传感器非接触测量挠性结构接触变形所引起的微小位移变化,实现了沿垂直方向的精密接触控制。通过在作业机械臂上集成标定模板,实现了装配系统的自动标定。

本研究使用所研制的装配系统进行了装配实验。实验结果表明,微小零件装配的平行度、同轴度误差小于 $10\ \mu\text{m}$,挠性结构接触控制偏差为 $0.6\ \mu\text{m}\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 。总体装配精度满足使用要求。

参考文献(References):

- [1] BURISCH A, RAATZ A, HESSELBACH J. Challenges of precision assembly with a miniaturized robot[J]. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2010, 315(5): 227-234.
- [2] ROBERT B. Assembly of 3D micro-components: a review of recent research [J]. *Assembly Automation*, 2011, 31(4): 309-314.
- [3] YANG G, GAINES J A, NELSON B J. A supervisory wafer-level 3D micro assembly system for hybrid MEMS fabrication [J]. *Journal of Intelligent and Robotic System*, 2003, 37(1): 43-68.
- [4] SONG Y, LI M T, SUN L N, et al. Global Visual Servo of Miniature Mobile Robot Inside a Micro-assembly Station [C]// IEEE International Conference. Canada: Mechatronics and Automation, 2005: 1586-1591.
- [5] 张建中,何永义,李 军. 机器人装配视觉定位应用研究[J]. *机电工程*, 2011, 28(8): 934-937.
- [6] 刘景泰,吴水华,孙 雷,等. 基于视觉的遥操作机器人精密装配系统[J]. *机器人*, 2005, 27(2): 178-182.
- [7] 卫保国. 一种改进的自适应中值滤波方法[J]. *计算机应用*, 2008, 28(7): 1732-1734.
- [8] 王晓东,张习文,罗 怡,等. 微小型零件自动装配中的精密测量与控制[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(8): 285-288.
- [9] 于保军,张 玮,王红东,等. 基于显微视觉的宏/微双重驱动微动台的自动标定[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2008, 38(6): 1326-1331.

[编辑:张 翔]

本文引用格式:

辛明哲,罗 怡,陈 勇,等. 一种微小挠性零件的自动化精密装配系统[J]. *机电工程*, 2013, 30(12): 1462-1466.

XIN Ming-zhe, LUO Yi, CHEN Yong, et al. Automatic precise assembly for miniature elastic parts[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(12): 1462-1466.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>