

doi: 10.7690/bgzd.2013.05.021

基于视觉对准的非硅 MEMS 微小型结构件微装配系统

周智, 张之敬, 张晓峰, 唐永龙

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 为满足非硅 MEMS 微小型结构件的高精度柔性装配需求, 设计一种基于正交光路分时成像视觉对准的机器人串行微装配系统。介绍目前微小型结构、非硅 MEMS 和机器人微装配系统的发展概况, 给出其总体结构组成及典型装配过程, 重点分析视觉对准系统摄像机标定方法, 对标定误差进行分析, 最后对装配系统进行非硅 MEMS 典型零件装配实验分析。结果表明: 所设计的装配系统视觉系统检测精度 $\leq 5.5 \mu\text{m}$, 能满足一般精度的非硅 MEMS 微小型结构件装配要求。

关键词: 非硅 MEMS; 微小型结构; 微装配; 摄像机标定

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Micro-Assembly System for Non-Silicon MEMS Micro Devices Based on Vision Alignment

Zhou Zhi, Zhang Zhijing, Zhang Xiaofeng, Tang Yonglong

(School of Mechanical & Vehicle, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: For meet the high precision and flexible assembly requirements of non-silicon micro devices, a serial automatic robotic micro assembly system is developed based on the orthogonal optical time-sharing imaging vision alignment detection system. The overview of current micro devices, non-silicon MEMS and robotic assembly system is introduced and the overall structure of developed assembly system and its typical assembly process is given. The calibration of vision alignment detection system's camera is mainly focused on, and the calibration error is also analyzed. Finally, assembly experiments of typical non-silicon micro components are implemented. And the result shows that the detection error of designed micro assembly vision alignment system is less than $5.5 \mu\text{m}$, and it meets the assembly requirements of general typical non-silicon micro devices.

Key words: non-silicon MEMS; micro devices; micro-assembly; camera calibration

0 引言

随着半导体微细加工技术的发展, MEMS、非硅 MEMS、MOMES 等平面类微小型结构由于其低成本、低功耗、复杂功能、微小结构等优点受到了研究人员关注。例如美国研制的 25 mm 空爆枪榴弹平板状引信安保机构^[1]、傅里叶变换微光谱计^[2]、三维微线圈^[3]等。平面类微小型结构一般由多个简单结构的半导体微细加工工艺加工的微尺度或中间尺度的微小型构件装配组成, 具有低深宽比的类平面特点。目前, 相对于快速发展的微细加工技术, 平面类微小型结构的高精度柔性快速自动装配成了制约其发展的瓶颈。机器人微装配技术能经济的实现由不同材料、不同工艺制造的简单微构件或微组件装配成高集成度复杂功能的微小型结构系统^[4], 国内外大量的研究人员研制了各种用于微装配的机器人装配系统。例如, 加拿大多伦多大学 Nikolai Dechev 等人^[3,5]研制的 6 自由度机器人微装配系统用于三维复杂 MEMS 微系统的装配; 美国劳伦斯实验室^[6-7]研制的可重配置柔性串行微装配系统用于

跨尺度微靶系统的装配。但上述装配系统结构复杂, 价格昂贵, 针对具体微小型结构装配设计, 不具有普遍适用性。非硅 MEMS 具有上述 MEMS 微小结构、低成本及复杂功能等特点, 但由于其材料和功能的多样性, 具有其独特的优越性能。在微执行器、微动力、军用微器件等应用中占据了相当大的比重。非硅 MEMS 技术包括材料、设计、微加工、微器件、微系统、微装配等众多技术。设计用于非硅 MEMS 的微装配系统对非硅 MEMS 技术的发展具有重要意义。笔者针对非硅 MEMS 微小结构、材料多样化、平面类的特点, 设计基于视觉对准用于非硅 MEMS 微小型结构的微装配系统, 分析了系统的总体结构方案及典型装配过程, 提出一种视觉系统摄像机标定方法并进行误差分析。

1 系统总体方案

1.1 系统组成

笔者研制的微装配系统主要是基于串行拾取-释放的装配方法, 主要包括上料系统、装配执行系统、视觉对准系统、控制系统和位姿调整系统。系

收稿日期: 2012-11-18; 修回日期: 2012-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51127004); 国防基础研究资助项目(0920110013)

作者简介: 周智(1989—), 男, 江西人, 硕士, 从事微装配结构设计及检测研究。

统原理及具体组成如图 1 所示。

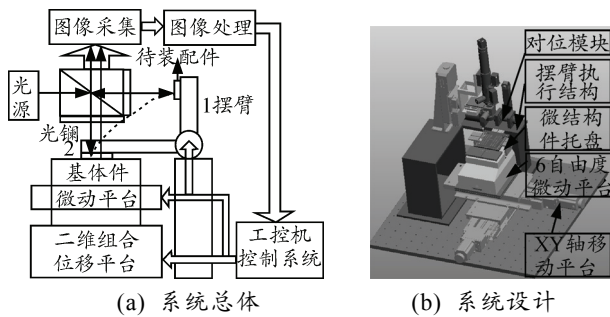


图 1 系统整体方案

1) 上料系统: 包括两自由度运动平台和微结构件托盘; 零件托盘用于确定微结构件之间位置关系, 运动平台用于微结构件快速定位, 实现大范围内微结构件快速定位。

2) 装配执行系统: 包括摆臂执行结构和微结构件吸附装置; 针对平面类微小型结构件设计的摆臂装配执行结构, 具有运动自由度少, 工作位置固定, 运动精度高等优点。与真空吸附夹持器配合使用, 可实现微小型结构件的无损操纵。

3) 视觉对准系统: 主要包括分光棱镜、显微视觉和分光棱镜调整机构; 采用正交光学共面分时成像对位检测方法, 用于装配过程中待装配件和基体件之间的相对位姿误差检测。对位原理图如图 1(a)。

4) 位姿调整系统: 主要包括 6 自由度微动平台, 实现装配过程中相对位姿偏差的补偿; 直线最小步进距离 0.1 μm; 转角最小步进距离 2 μrad。

1.2 系统装配过程

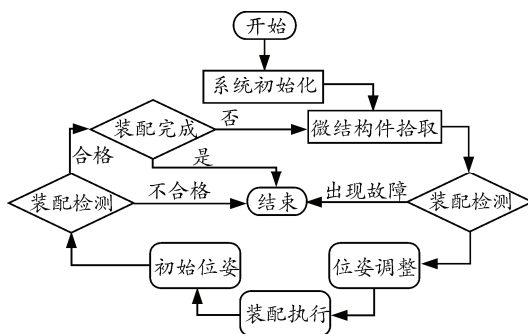


图 2 典型微小型结构件装配过程

笔者研制的机器人微装配系统采用拾取和释放的串行装配方法, 其典型微小型结构件装配流程如图 2 所示, 具体如下:

1) 系统初始化校准: 包括显微镜标定、对位系统标定; 2) 微构件拾取: 定位系统移动到待装配零件位置, 摆臂旋转到水平位置拾取微小型构件; 3) 装配对位: 摆臂旋转到垂直位置, 定位系统移动到对位位置, 显微视觉分时共面成像, 控制系统计算装配对位偏差; 4) 位姿调整: 6 自由度微动平台根

据上一步中计算出来的对位位姿偏差, 补偿偏差, 调整位姿; 5) 装配执行: 摆臂机构旋转到水平位置, 实现装配过程; 6) 初始位姿: 摆臂旋转到垂直, 6 自由度微动平台回到初始位置; 7) 装配检测: 显微视觉检测装配结果是否满足装配要求; 8) 装配完成: 装配过程结束, 系统回到初始位置。

2 视觉对准系统摄像机标定

文中视觉对准系统主要包括分光棱镜、工业镜头及 CCD。装配过程开始之前, 要对其摄像机进行标定, 一般包括内部参数和外部参数的标定^[8-9]。微装配系统中, 显微视觉用于检测待装配件之间匹配特征的相对位姿偏差, 反馈到控制系统计算出实际位姿偏差, 并控制微动平台调整基体件位姿, 实现对位装配, 摆臂机构旋转实现装配过程。笔者针对装配显微视觉的实际运用, 提出了一种简单的摄像机标定方法, 主要包括摄像机光轴垂直度标定及像素比例系数的标定。

2.1 摄像机光轴垂直度标定

当摄像机光轴与被测台面不垂直时, 会产生透视畸变^[10], 为了保证平面类微结构件配合特征相对位姿偏差检测准确, 降低视觉系统标定及控制的复杂程度, 必须进行摄像机光轴垂直度标定^[11]。笔者采用基于自动分块聚焦技术标定和调整摄像机光轴垂直度, 标定的精度最高可以达到 0.153°。

2.2 摄像机像素比例系数的标定

像素比例系数的标定主要是指在摄像机光轴垂直度标定调整好的基础上, 忽略成像畸变, 在一定放大倍数下, 单位像素所代表的实际物理距离的标定。摄像机像素比例系数一般采用线纹尺标定, 线纹尺宽度为 a μm, 在图像上线纹尺两端的坐标位置差为 n Pixel, 则像素比例系数

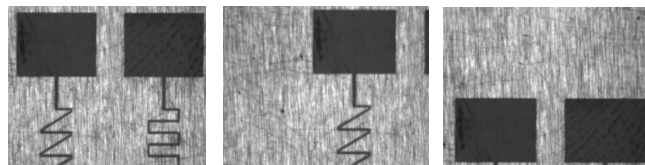
$$K_p = \frac{a}{n} \mu\text{m} / \text{pixel} \quad (1)$$

在 XY 方向分别标定其比例系数。但是在标定的过程中线纹尺必须和要标定的方向绝对平行放置, 实际过程难以保证。笔者综合运用光学标定模块的边缘光学特性好以及微动平台高精度的运动特性, 提出了一种简单的高精度标定方法, 实现像素比例系数的快速标定。具体标定过程如下, 控制微动平台分别在 XY 方向移动一定距离 L μm, 图像中测量出对应点或直线之间的像素差值 M pixel, 像素标定的比例系数

$$K_p = L / M (\mu\text{m} / \text{pixel}) \quad (2)$$

笔者采用的镜头的放大倍数未知, 实际标定时调整至最小放大倍数, 分别控制微动平台在 XY 方向移动 4 mm, 如图 3 所示, 实验次数为 5 次, 每

次测量 10 个数据求平均值, 标定出的像素比例系数为 6.25 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 。



(a) 初始位置 (b) Y 轴方向移动 4 mm (c) X 轴方向移动 4 mm

图 3 像素比例系数标定过程

2.3 摄像机标定误差分析

摄像机像素比例系数的标定误差主要取决于微

动平台的运动精度以及标定过程中图像处理的精度, 所以必须对显微视觉的标定进行误差分析。笔者采用的 6 自由度微动平台运动分辨率为 0.1 μm , 用激光干涉仪测得单向运动精度 $\leq 0.5 \mu\text{m}$ 。图像处理算法采用基于限定视窗局部熵的有向性亚像素边缘检测方法^[12], 能实现较高的检测精度。误差分析过程采用标定好的显微视觉系统去测量标定用光学模板, 光学模板的尺寸为 4 mm, 不确定度为 1 μm , 测量取 12 个相邻间隔进行测量, 获得测量结果如表 1 所示, 可知系统的测量精度小于 5.5 μm 。

表 1 像素比例系数标定精度分析

| 像素坐标起始点 | | 像素坐标终点 | | 测量值 | 偏差 |
|------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-----------|
| (444.676 4 | 3 062.630 0) | (4 434.238 0 | 3 087.683 0) | 3 995.640 0 | -4.360 0 |
| (438.413 4 | 2 937.370 0) | (4 434.238 0 | 2 962.422 0) | 3 995.903 0 | -4.097 0 |
| (444.676 4 | 2 649.269 0) | (4 440.501 0 | 2 674.321 0) | 3 995.903 0 | -4.097 0 |
| (444.676 4 | 2 348.643 0) | (4 440.501 0 | 2 367.432 0) | 3 995.869 0 | -4.131 0 |
| (438.413 4 | 2 091.858 0) | (4 440.501 0 | 2 116.910 0) | 4 002.166 0 | 2.166 0 |
| (444.676 4 | 1 922.756 0) | (4 440.501 0 | 1 947.808 0) | 3 995.903 0 | -4.097 0 |
| (438.413 4 | 1 709.812 0) | (4 440.501 0 | 1 734.864 0) | 4 005.429 0 | 5.429 0 |
| (457.202 5 | 1 415.449 0) | (4 440.501 0 | 1 434.238 0) | 3 989.606 0 | -4.394 0 |
| (450.939 5 | 1 240.084 0) | (4 440.501 0 | 1 265.136 0) | 3 995.903 0 | -4.097 0 |
| (450.939 5 | 1 045.929 0) | (4 440.501 0 | 1 070.981 0) | 3 995.903 0 | -4.097 0 |
| (450.939 5 | 801.670 1) | (4 453.027 0 | 820.459 3) | 4 002.132 0 | 2.132 0 |
| (444.676 4 | 620.041 8) | (4 453.027 0 | 645.093 9) | 4 005.429 0 | 5.429 0 |
| 平均值 | | | | 3 998.482 | -1.517 83 |

3 装配实验及分析

3.1 待装配非硅 MEMS 微结构介绍

试验所针对的装配对象非硅 MEMS 系统, 如图 4 所示, 要装配的 MEMS 微型结构件包括前后盖板、基体板及中间的 2 个滑块, 所有微小结构件由准 Liga 法加工而成, 具有明显的特征边缘, 零件的主要特征尺寸最大为十几厘米, 配合公差主要为间隙配合, 主要装配实验是以上述非硅 MEMS 构件的典型装配对象滑块与基体的间隙配合, 配合公差为 25 μm , 如图 4 所示。

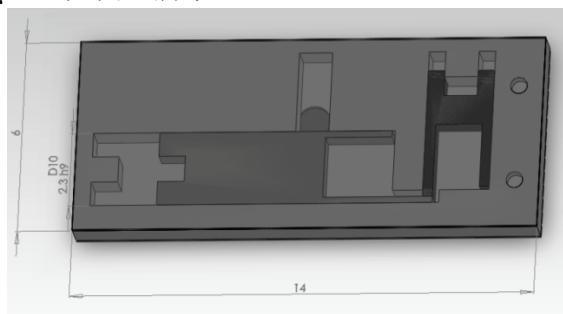
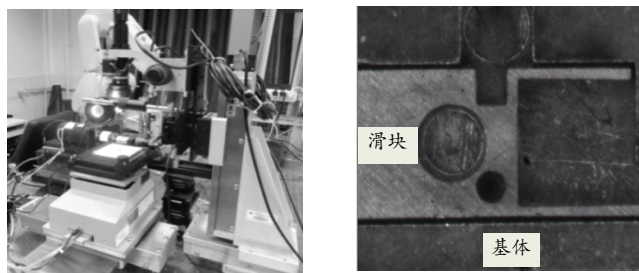


图 4 待装配非硅 MEMS 微小结构件

3.2 装配试验

笔者对待装配件的典型基体和中间大的滑块的对位装配实验。在滑块成功拾取的基础上, 使其与基体件对位、位姿调整及装配。试验中, 对大的滑块与基体的装配进行了 50 组装配实验, 实际装配图

如图 5 所示, 实验成功率为 100%。



(a) 实际装配系统

(b) 实际装配零件

图 5 装配实验及分析

4 结束语

分析结果表明: 笔者设计的机器人微装配系统检测误差小于 5.5 μm , 且经过装配实验验证, 能满足一般平面类非硅 MEMS 微型结构件装配精度要求。该系统为平面类微小结构件单件小批量的高精度装配提供了一种新的思路。由于在实际实验过程中考虑到大装配工件实验, 选用了小放大倍数, 使标定出来的像素比例系数偏大, 从而导致系统的检测及装配误差偏低。如果待装配零件尺寸较小, 可以考虑选用大的放大倍数, 能获得更高的检测精度。下一步将做的工作有: 1) 完善装配系统, 对其装配精度进行标定; 2) 分析可能影响装配精度的因素, 提出改进方案, 提高系统的装配精度, 以满足更高精度的装配要求。