

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2015.0035

宏微结合的多机械手微装配机器人系统

李海鹏, 邢登鹏, 张正涛, 徐 德, 张大朋

(中国科学院自动化研究所精密感知与控制研究中心, 北京 100190)

摘要: 为解决复杂组件装配中存在的并行操作、空间操作和多操作对象的难题, 研制了一套基于显微视觉伺服的多机械手微装配机器人系统. 该系统有 6 个机械手, 每个机械手都由宏动模块、微动模块和末端夹持器组成. 分别针对 5 种不同结构类型的零件, 设计了 5 种异形零件夹持器. 通过给镜头配置高精度的位移平台, 实现了在 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 的大操作空间内 $2\text{ }\mu\text{m}$ 精度的在线检测, 可实现 $\pm 9\text{ }\mu\text{m}$ 的装配精度. 通过显微视觉反馈和力觉反馈相结合的策略, 设计了过盈配合件的装配方法. 使用该微装配机器人开展了微装配实验, 实验结果表明该微装配机器人系统是可行的, 基本能够实现既定的装配要求.

关键词: 微装配机器人; 多机械手机器人; 显微视觉; 微夹持器

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2015)-01-0035-08

Micro-Assembly Robot System with Multiple Manipulators Based on Macro-Micro Motion Mechanism

LI Haipeng, XING Dengpeng, ZHANG Zhengtao, XU De, ZHANG Dapeng

(Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: There are many difficulties in assembly process of complex components, such as the parallel operating in 3D space, multiple assembly objects, etc. In order to solve these problems, a multi-manipulator micro-assembly robot system is developed based on microscopic vision servoing technology. This robot has 6 manipulators, and every manipulator consists of macro-adjustment subassembly, micro-adjustment subassembly and grippers as end-effectors. Five kinds of grippers are developed according to the abnormal shaped parts. All microscopic cameras are equipped with high precision displacement platforms, which make the robot achieve $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ large operating space and $2\text{ }\mu\text{m}$ on-line measuring precision. The robot's assembly accuracy is $\pm 9\text{ }\mu\text{m}$. A new assembly method of interference fit is developed by means of the combination of micro-vision feedback and contact force feedback. The assembly experiments are well carried out on the developed micro-assembly robot. The experimental results show that the proposed system is feasible and its performance can meet the specified assembly requirements.

Keywords: micro-assembly robot; multi-manipulator robot; microscopic vision; micro-gripper

1 引言 (Introduction)

目前国内外有关微装配机器人系统的研究文献不少, 这些微装配机器人系统有些是仅具有平面操作能力的高精度装配机器人, 有些是具有简单 3D 操作能力的微装配机器人, 有些是可自由移动的微型机器人^[1-14]. 这些微装配机器人系统能执行的微操作常常比较简单, 而对复杂操作任务的适应能力则未见说明. 而事实上有些微装配操作不但零件夹持非常困难, 而且装配过程也非常复杂, 装配过程常常不能串行. 复杂的微装配操作带来了一系列的问题, 例如多机械手与狭小操作空间的矛盾、机器

视觉光源的遮挡问题、多机械手动作的协调问题、多目标的识别问题等.

本文搭建了一个 6 机械手微装配机器人系统, 设计了机械手末端的异形零件夹持器, 采用显微视觉和微力传感器作为反馈, 针对 4 个异形微零件进行了装配实验. 本文工作对前述复杂微装配中部分难题的解决作了有益的尝试.

2 微装配机器人系统的组成 (Configuration of the micro assembly robot system)

2.1 装配任务

本文装配目标是把图 1 所示的 4 个零部件按

照微米级的装配精度组装在一起,并在连接部位点胶.装配对象是薄环、臂筒组件、薄壁筒、细长管,其中薄环要求嵌入到臂筒中筒的颈部,薄壁筒要求按设定姿态精准地插入到臂筒中的筒内,细长管要求插入到臂筒中的筒壁上的小孔内.

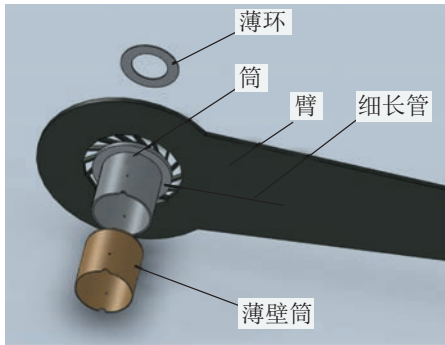


图1 装配对象

Fig.1 Assembly objects

装配的困难主要有如下几点:

1) 异形零件的夹持

薄环是轻质材料,内径与外径相差约1 mm左右,厚度约0.4 mm,受力面很窄且脆弱,易受夹持力损坏,夹持和释放过程中范德华力影响明显.薄壁筒的壁厚约30 μm ,材料硬度较低,要求装配过程中夹持器不能损坏其极高的表面光洁度.细长管的直径是亚毫米级,长十几个毫米,夹持困难.

2) 过盈装配

装配要求在常温下把薄壁筒插入到臂筒组件中的筒内,而薄壁筒的外径要比臂筒中筒的内径大几个微米.装配过程不允许臂筒组件中的筒与臂之间发生相对转动,更不能损坏臂上的微结构.

3) 微装配的并行性

各零件看似可以按照一定顺序装配,但在视觉伺服中常常需要前一个零件装配过程中的几何特征作为视觉参照,造成了装配过程的并行,要求同时操作多个零部件,这给各机械手之间的动作协调提出了较高的要求.

4) 操作空间拥挤

装配过程的并行使操作空间拥挤,给显微镜头和光源的布置带来了困难.后装配的零件,例如薄环和细长管,光源就不好布置,若没有合适的光源就不能保证视觉测量的精度.

5) 显微视觉与大操作空间的矛盾

本文中的微装配不是平面2维操作,是大操作空间内的3维装配,而显微视觉自身的视野小、景深小的特点给装配带来了困难,在并行操作情况下如何快速寻找目标、快速聚焦对准是个很大挑战.

2.2 微装配系统的总体方案

为了解决微装配中并行操作的难题,设计了一个基于显微视觉伺服控制的多机械手微装配机器人系统.该机器人系统有6个机械手,每个机械手都有大行程、粗精度的宏动位移模块和小行程、高精度的微动模块,末端有专门设计的异型零件夹持器.宏、微调整模块相结合的机械臂使机械手在完成操作后可以远离操作空间,为其他机械手的操作腾出宝贵的空间,同时又保证了操作的精度要求.多机械手为对多个零部件同时进行并行操作提供了可能,增强了机器人系统对复杂微装配的适用性.

该机器人系统有3个显微成像镜头,相互垂直布置,构成多目立体视觉系统.每个镜头都固定在一个高精度3轴直线位移平台上,通过位移平台的位置调整实现对较小的镜头视野的扩展.镜头位置可精密调整,在一定程度上克服了视觉伺服中的视野小、景深小的困难.通过结合各种视觉伺服策略和算法,为快速寻找目标和快速对焦提供了解决问题的途径.

为保证装配精度要求,微动位移平台和镜头调整平台都采用成熟商业平台,行程35 mm,定位误差在5 μm 以内,结合镜头的分辨误差,机器人系统的操作定位偏差理论最大值为12 μm .基于此,该微装配机器人系统预期设计指标如表1所示.

表1 微装配机器人系统预期设计指标

Tab.1 Desired performances of the micro-assembly robot

序号	指标项目	指标值
1	核心操作空间/mm	10×10×10
2	扩展操作空间/mm	30×30×30
3	位置装配精度/ μm	± 9
4	角装配精度/ $^\circ$	± 0.1
5	在线监测精度/ μm	± 1

6个机械手呈对称放射状布置在操作空间周围,有利于减弱各机械手进出操作空间时形成的干涉现象.机械手、镜头的布置如图2所示,图3是布置好的实物照片.该微装配机器人系统有着较强的可拓展性,通过更换各机械手末端微零件夹持器可以承担其他复杂微系统的装配工作.

薄壁筒与臂筒组件的装配是过盈装配.装配过程中如果两个零件之间的相互作用力超过了零件的屈服极限,零件就会发生不可逆的变形,损伤零件.特别是低硬度的薄壁筒,更容易受到损伤.为解决此问题,在整体方案设计上采用了视觉与力觉相结合的反馈策略.

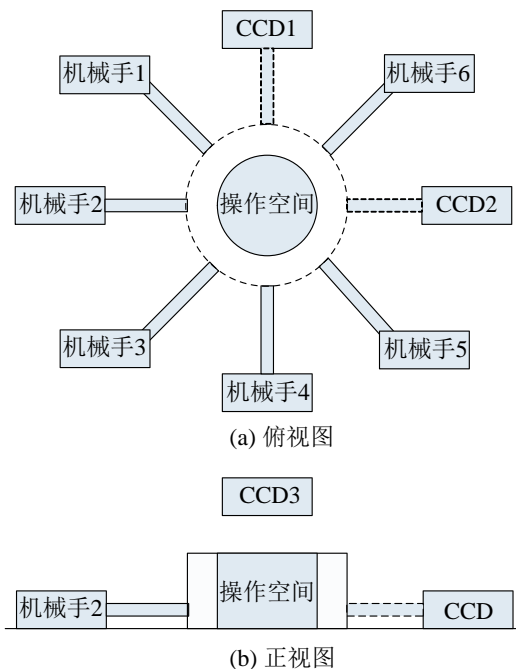


图 2 多机械手与显微摄像机布置示意
Fig.2 Distribution of the manipulators and microscopic cameras



图 3 微装配机器人系统实物图
Fig.3 The micro-assembly robot system

2.3 机械手

机械手由位置调整装置、姿态调整装置、末端夹持器组成。考虑到整个装配流程对机械手的需求及不同操作对象的几何特点,对 6 个机械手进行了区别设计。

2.3.1 机械手 1 和机械手 4

对 6 个机械手进行编号,其中机械手 1 和机械手 4 的操作对象都是臂筒组件,设计有 T_x 、 T_y 、 T_z 三自由度直线位移调整平台,同时在机械手末端还配置了 R_x 、 R_y 、 R_z 三自由度手动角位移调整模块,

这种机械手适合执行在视觉伺服引导下的直线位移定位操作。机械手 1 夹持臂筒组件时,臂筒组件中的筒在臂的下侧。这种情况下,使用与镜头同向的光源或侧向光源可以照亮臂上侧的所有特征和臂筒组件侧向的所有特征,这种姿态适合执行把薄环装配到臂筒颈部的操作和把薄壁筒插入到臂筒组件的操作。机械手 4 夹持臂筒组件时,臂筒组件中的筒在臂的上侧。这种情况下,使用与镜头同向的光源或侧向光源可以照亮臂另一侧的所有特征和臂筒组件侧向的所有特征,适合执行把细长管插入到臂筒组件的筒壁上的操作。

之所以设置两个机械手来实现对臂筒组件的夹持和操作,是因为机械手的末端受限于狭窄的空间,不能设置过于复杂的角位移调整机构。配置较简单的 3 自由度手动角位移调整模块,也仅仅是作初始姿态调整用,不是在微装配过程中使用。在执行插入操作时,薄壁筒的一部分已经插入到臂筒组件的筒内,此时薄壁筒与臂筒组件的筒之间的相对姿态和位置是无法用显微视觉测量的。所以,给机械手 1 和机械手 2 都配置了 6 维力传感器,通过对对装配件之间相互作用的力和力矩的检测来感知装配件在插入过程中的位置和姿态变化。

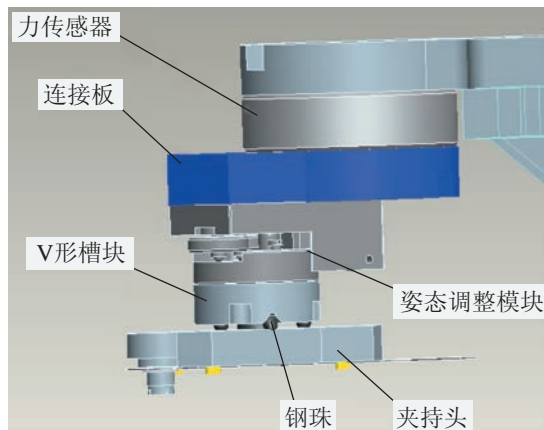


图 4 臂筒组件夹持器
Fig.4 Tube component gripper

考虑多次装配操作中取放臂筒组件的方便性和定位准确性,夹持器采用了夹持头分离式设计和三点定位的方式,如图 4 所示。夹持头通过永磁体的磁力,吸附固定在基座上,通过 3 个钢珠与基座上的 3 个 V 形槽的配合实现准确的三点定位。

2.3.2 机械手 2

机械手 2 的操作对象是薄壁筒。在执行把薄壁筒插入到臂筒组件的操作时,主要是机械手 2 和机械手 1 在相互配合。操作过程中对装配对象位置和姿态的伺服调整是必须的,为了不使单个机械手过

于复杂,对机械手 1 和机械手 2 进行了功能分配.机械手 1 主要执行位置的高精度调整和装配件间相互作用力的感知,机械手 2 主要执行姿态的高精度调整和薄壁筒的 Z 向插入.所以机械手 2 虽然只设置了一个自由度 Tz 的直线位移电动平台,却配置了 Rx、Ry、Rz 三个自由度的电动角位移调整平台,这种机械手适合执行在视觉伺服和力觉伺服引导下的姿态调整操作.

薄壁筒材质硬度较低,为克服其刚度和强度小给夹持带来的困难,设计了图 5 所示的夹持器.夹持器的末端有 2 个可以作高精度相对位移调整的半圆柱形夹持头,伸入到薄壁筒内,从内侧夹紧薄壁筒.夹持头的根部贴有高精度应变片,可检测夹持力的大小,这样既保证了夹持力不会过大以致损坏薄壁筒,还能在装配过程中提供与机械手 1 不同的力觉反馈,提高了装配过程中力觉反馈的可靠性.

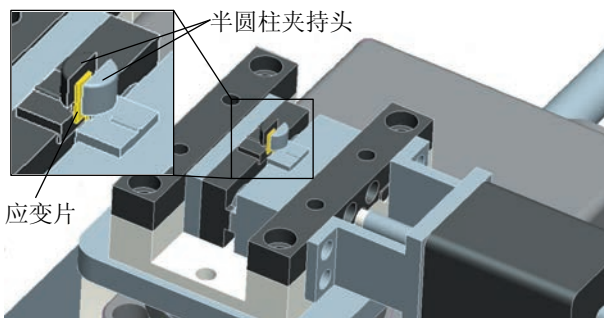


图 5 薄壁筒夹持器

Fig.5 Thin-walled tube gripper

2.3.3 机械手 3、机械手 5 和机械手 6

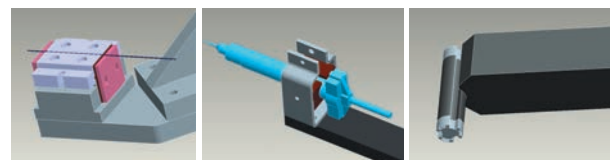
机械手 3、机械手 5 和机械手 6 的操作对象分别是细长管、点胶针和薄环.细长管的结构特征使其末端在受到力的时候可以发生弯曲,所以在执行把细长管插入到臂筒组件的筒壁上的小孔操作时,只要完成细长管末端与小孔的对准操作即可,不需要对二者的姿态作精密的调整.在点胶操作时,只需要做到点胶针头与点胶位置点的准确对准,对点胶针的姿态作精密的调整是不必要的.薄环与臂筒

组件的筒颈部的配合是间隙配合,在装配时不需要对薄环施加轴向的压力,所以只需做好薄环与臂筒组件之间的位置对准即可,姿态调整是不需要的.基于以上分析,给机械手 3、机械手 5 和机械手 6 分别配置了高精度的 Tx、Ty、Tz 三轴位移电动调整平台,以期在显微视觉的配合下完成对操作件位置的精确定位.

考虑到对细长管不同直径和长度的兼容性,设计了图 6(a) 所示的基于真空原理的夹持器.夹持器使用 V 形槽作为细长管的夹持面,两夹持面由两块零件拼接而成,这使 V 形面的尺寸可调.V 形槽底接通真空气源,两端用密封板堵住,以减少漏气量.

多机械手微装配机器人系统选用的点胶机是美国 EFD 高精点胶机,工作气压 0.6 MPa,点胶精度根据胶的理化特性有变化,最小可实现 2 nL 胶滴的点胶.点胶机末端是个注射器形的圆柱筒,圆柱筒的末端装有点胶针头,图 6(b) 所示夹持器夹持的部位即是圆柱筒部位.

薄环的夹持采用基于真空原理的夹持器,见图 6(c),在完成薄环的位置调整后,可以通过正压破坏吸附的方法克服范德华力的影响.考虑到 Z 向视觉观测的需要,把夹持头设计成 3 瓣的形式,通过 3 瓣间的凹槽观测薄片和铝筒组件,建立薄环对准时的 Z 向视觉伺服.3 瓣的中心开有气孔,与真空气源相连.



(a) 细长管夹持器 (b) 点胶针夹持器 (c) 薄环夹持器

图 6 3 种末端夹持器

Fig.6 Three kinds of terminal grippers

2.4 显微视觉系统

单从视觉的角度考虑,2 路相互正交的视觉就

表 2 机械手配置说明

Tab.2 Configuration of the manipulator

机械手	电动调整平台	手动调整模块	末端夹持器
机械手 1	宏动 Tx, 微动 Tx、Ty、Tz	Rx、Ry、Rz	臂筒组件夹持器
机械手 2	宏动 Tx, 微动 Rx、Ry、Rz、Tz	无	薄壁筒夹持器
机械手 3	宏动 Tx, 微动 Tx、Ty、Tz	无	细长管夹持器
机械手 4	宏动 Tx, 微动 Tx、Ty、Tz	Rx、Ry、Rz	臂筒组件夹持器
机械手 5	宏动 Tx, 微动 Tx、Ty、Tz	无	点胶针头夹持器
机械手 6	宏动 Tx, 微动 Tx、Ty、Tz	Rx、Ry、Rz	薄环夹持器

已经能够对操作空间里 X、Y、Z 三个维度的位置进行检测, 而事实上由于待装配零件需要 6 自由度对准, 再加上每个机械手能到达的空间有限, 故本机器人系统配置了相互正交的 3 路镜头. 考虑到操作人员的视觉适应性, 将 2 路视觉相互正交布置在作业空间的水平方向, 另一路布置在垂直方向. 每个光路由光学显微镜、高分辨率 CCD (电荷耦合元件) 以及辅助光源构成. 3 路显微图像信息由视频采集卡采集, 送入上位机中实时显示和处理.

表 3 为机器人系统使用的显微镜头参数, 光学分辨率最大为 $1.57\ \mu\text{m}$, 通过在图像处理中使用亚像素算法, 实现在线监测 $\pm 1\ \mu\text{m}$ 的检测精度.

表 3 显微镜头参数

Tab.3 Performance of cameras

序号	项目	参数值
1	视场直径/mm	10.48 ~ 1.63
2	放大倍率	1.05 ~ 6.75
3	分辨率/ μm	4.90 ~ 1.57
4	工作距离/mm	51
5	景深/mm	0.43 ~ 0.04
6	CCD 像素	2448×2048

成像的质量对显微视觉伺服至关重要, 其中背景光源在提取零件轮廓的应用中使用最多. 图 7 是机械手 1、机械手 2 和机械手 6 夹持着零件进行装配时的状况, 在薄环装配中臂筒组件夹持器遮挡了远处投过来的背景光源, 使一路水平镜头里的成像严重退化, 影响了视觉伺服的建立. 为解决该问题, 对臂筒组件夹持器的夹持头作了改动, 去除圆头支撑部分, 并在截断面上增加了一小块反射面. 由于该反射面距离被观测对象很近, 通过反射环形光源的光形成了一个漫反射光源, 解决了背景光源被遮挡的问题.

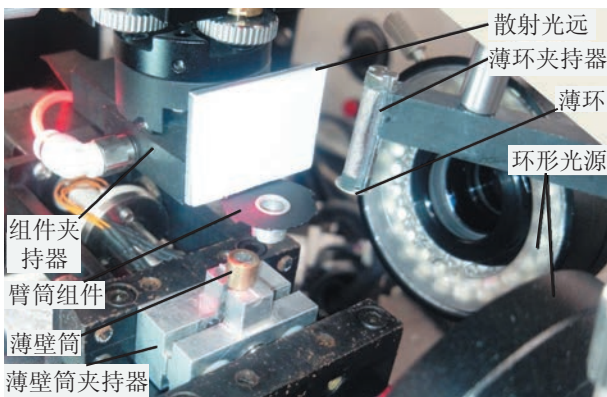


图 7 装配过程中的场景
Fig.7 Photo of assembling

3 控制系统及操作界面 (Control system and operating interface)

3.1 硬件系统的集成

多机械手微装配机器人系统如图 8 所示, 34 路控制器控制着 34 个步进电机, 步进电机驱动着 34 个自由度的位移平台, 这些位移平台构成了 6 个机械手的 25 个调整自由度和镜头位置的 9 个调整自由度. 真空系统的 PLC (可编辑逻辑控制器) 与运动控制器一样通过串口与工控机通信, 根据工控机发出的指令控制真空系统各气路的断开、接通及操作延迟, 操控末端夹持器的动作. 宏微结合的机械手和真空系统构成了多机械手微装配机器人系统的执行部分.

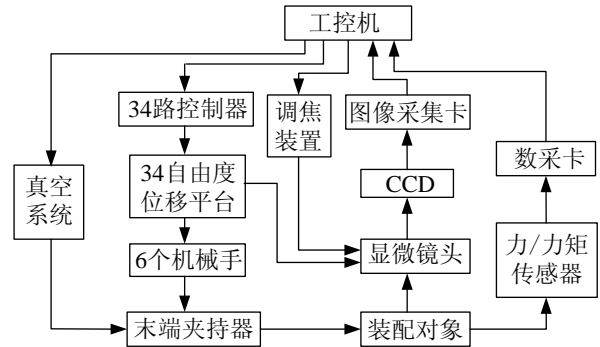


图 8 微装配机器人系统整体结构
Fig.8 Block diagram of the micro-assembly robot system

3 路显微镜和 CCD 相机通过图像采集卡把装配对象的图像数据传递给工控机, 工控机中控制程序通过各种图像处理算法提取出装配对象的位置和姿态信息作为反馈, 根据设定的控制策略控制微装配机器人系统的执行部分, 构成视觉伺服. 力/力矩传感器通过数据采集卡把装配对象之间的作用力和力矩传递给工控机, 控制程序根据这些信号再综合装配对象的位姿信息, 向微装配机器人系统的执行部分发出运动指令. 显微视觉和力/力矩传感器构成了多机械手微装配机器人系统的反馈部分.

3.2 控制策略和流程

考虑到装配对象中有的需要力觉反馈, 有的不需要力觉反馈, 故采用了力觉伺服和视觉伺服相对较独立的联合控制策略, 例如在装配薄环的过程中仅使用视觉伺服控制, 而对薄壁筒的装配过程则需要力、视觉联合反馈控制.

控制流程如图 9 所示, 对于只采用视觉伺服控制的装配, 从图像采集开始, 在对图像中零件的当前特征与期望特征之间的偏差进行计算后, 进行装配状态判断, 如果特征偏差达到了装配的要求, 则装配完成; 如果特征偏差较大, 则利用图像雅可比

矩阵将特征偏差转换为位姿偏差,由控制器生成机械手运动指令,调整装配对象的位置和姿态.在薄壁筒装配过程中,当图像中零件的当前特征与期望特征的偏差已满足对准要求时,则进入力觉伺服控制;否则,按照前述视觉伺服控制流程调整装配对象的位置和姿态,进行对准.进入力觉伺服控制后,对微力反馈与期望值进行偏差计算,然后对力偏差进行阈值判断,如果Z向力偏差超过阈值,则薄壁筒装配完成;如果X、Y向力偏差超过阈值,则PI控制器根据力偏差向机械手发出指令,调整装配件的位姿;如果X、Y向力偏差小于阈值,且Z向力偏差也小于阈值,则PI控制器根据力偏差向机械手发出指令,执行薄壁筒插入操作.

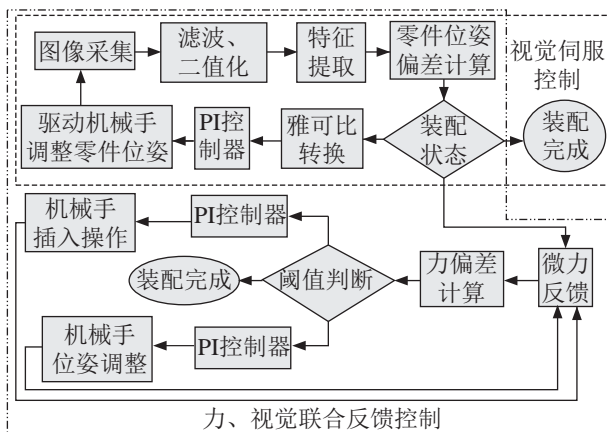


图9 控制系统流程图

Fig.9 Flow diagram of the control system

3.3 微装配机器人系统操作界面

微装配机器人系统的操作界面由两大部分组成,如图10所示,上面部分是显微图像的显示区域,下面是操作区域.



图10 微装配机器人系统操作界面

Fig.10 Operating interface of the micro-assembly robot system

操作区域又分成4个功能不同的子操作区,第1个子操作区是相机参数设置操作区,可以手动设定3路相机的各种参数,如光圈大小、曝光度、增

益等.第2个子操作区是机械手控制操作区,通过它可以人为地干预6个机械手的宏动和微动电机,操作3路相机的位置调整电机.第3个子操作区是相机的标定操作区,通过在本操作区的操作建立图像、实际装配件与电机控制命令之间的对应关系.第4个子操作区是装配操作区,针对本文微装配任务,设定参数实现各零件装配过程的自动化和智能化.

4 装配实验 (Assembling experiment)

4.1 微装配的操作流程

经过对该微装配任务的分析,制定了如下装配操作流程:

1) 多机械手微装配机器人系统的启动和初始化.启动各机械手的驱动电机,把位移平台所处的位置和状态反馈给上层控制系统.把待装配的微零件放到对应的夹持器上.

2) 在显微视觉的配合下,调整各机械手末端的手调平台,使各待装配件的姿态达到装配要求,完成各机械手位姿调整的示教学习.各夹持器对被夹持件的定位是准确的,所以对手调平台调整后的姿态有保持能力,这样在后续的批量装配中就不必再次调整手调平台.

3) 套装薄壁筒.控制系统根据机械手的示教学习,机械手1和机械手2分别把臂筒组件和薄壁筒移动到视觉观察区域内,在视觉伺服下完成薄壁筒与臂筒的对准,并开始插入.在薄壁筒插入臂筒组件中的筒的过程中,控制系统根据力/力矩传感器的反馈建立力觉伺服,在薄壁筒位姿的不断调整中完成套装任务,并把机械手2撤出操作空间.

4) 装配薄环.机械手6把薄环移入操作空间,在视觉伺服下完成薄环与臂筒的对准和装配,然后机械手5移入操作空间,在视觉伺服下完成点胶针的对准和点胶,接着紫外光照射固化.

5) 倒置臂筒组件夹持器.将臂筒组件夹持器倒置,并安装到机械手4的末端.此过程中夹持器仍然保持着对已经装配好的零件的真空吸附.

6) 细长管的装配.机械手3将细长管移入操作空间,在视觉伺服下完成细长管的对准和插入.点胶针再次进入操作空间,在细长管与铝筒的结合处点胶,最后紫外光照射固化,完成微装配任务.

在整个装配过程中,除了中间第5)步外都已经实现了自动装配.

4.2 装配实验结果

在开展微装配之前,使用激光干涉仪(测量分

分辨率 $\pm 1 \text{ nm}$) 对该机器人系统进行了校验. 机器人驱动机械臂作了多次移动操作, 指令移动距离与激光干涉仪的测量值偏差最大不超过 $5 \mu\text{m}$, 保证了装配精度 $\pm 9 \mu\text{m}$ 的设计要求.

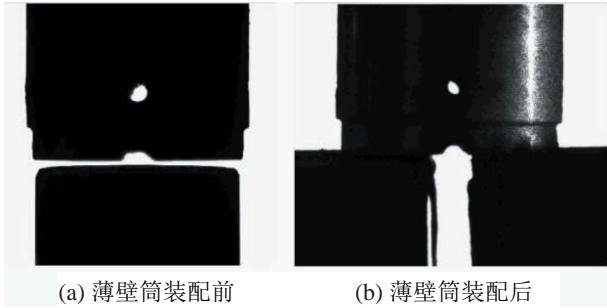


图 11 薄壁筒装配前后对比

Fig.11 Comparison before and after thin-wall tube being fixed

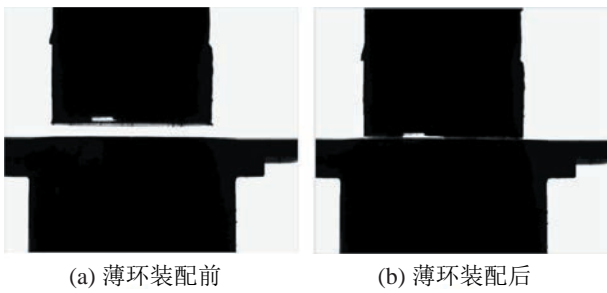


图 12 薄环装配前后对比

Fig.12 Comparison before and after thin ring being fixed

微装配机器人按前述装配流程, 在 14 min 内顺利完成了装配任务. 图 11(a) 显示了薄壁筒与铝筒对准后的照片, 图 11(b) 显示了薄壁筒插入到铝筒后的照片; 图 12(a) 显示了薄环对准铝筒后的照片, 图 12(b) 显示了薄环被放进铝筒后的照片; 图 13(a) 和图 13(b) 分别是细长管对准筒壁上的小孔时

的侧视照片和俯视照片, 图 13(c) 和图 13(d) 分别是细长管插入小孔内并点胶的侧视照片和俯视照片. 图 14 是装配薄壁筒过程中沿 3 个正交轴的力和力矩的变化情况, 纵坐标是力 (单位 N) 和力矩 (单位 $\text{N}\cdot\text{mm}$) 值, 横坐标是装配过程中力的采样次数. 对于采集到的力和力矩, 利用低通滤波器进行了滤波, 然后用于控制.

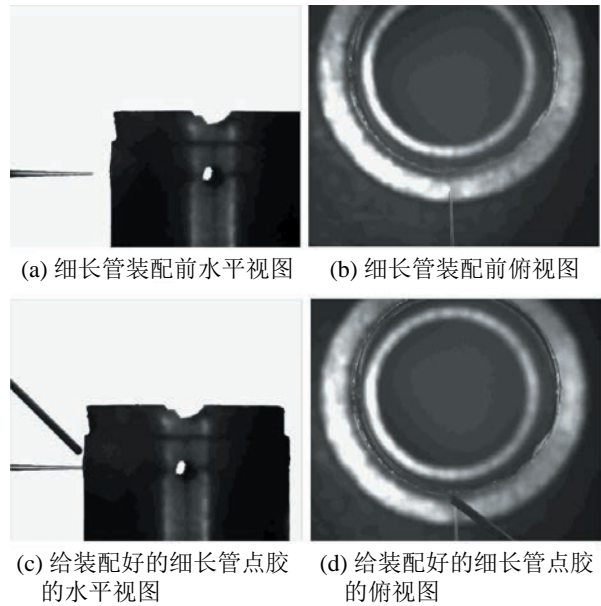


图 13 细长管的装配和点胶

Fig.13 Fixing and gluing of a slimline

由图 14 薄壁筒装配过程中的力反馈数据, 装配过程中水平方向的作用力 f_x 较小, 说明在这一方向姿态对准得较好. f_y 逐渐变大并最终停止在 0.5 N 处, 这说明 Y 方向的姿态对准不如 X 方向好, 但经过伺服调整稳定在了某一水平上. f_z 在接近

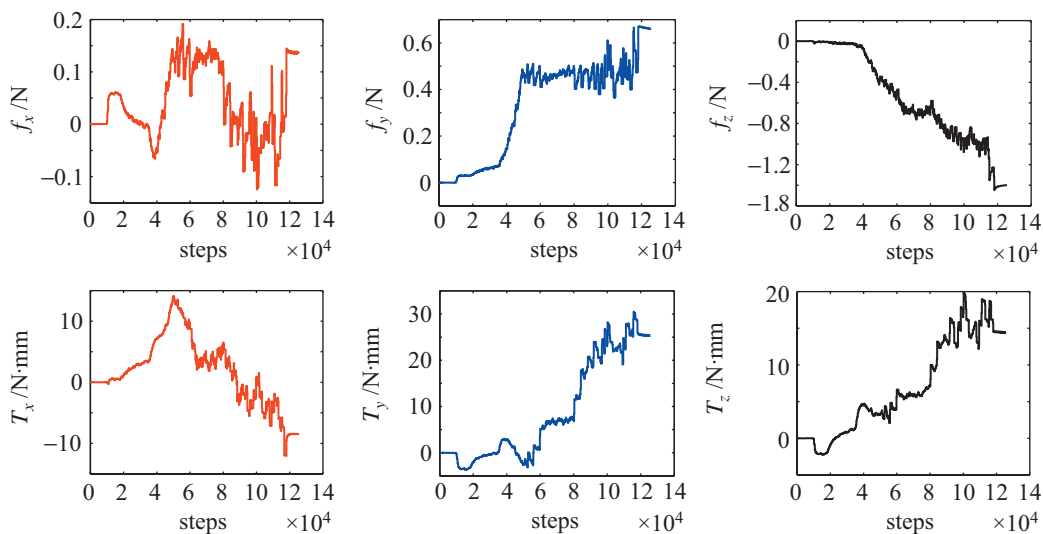


图 14 薄壁筒装配过程中的力反馈

Fig.14 Forces feedback when assembling thin-walled tube

装配结束时迅速增大,超过了 1 N,这说明薄壁筒插入到臂筒组件里,且薄壁筒的顶部接触到了臂筒组件的颈部,这也是判定薄壁筒装配结束的重要标志. 扭矩的变化说明实验件有加工误差,综合力和力矩的变化可进一步分析加工误差在装配件上的分布.

5 结论 (Conclusion)

1) 设计了宏微运动相结合的多机械手微装配机器人系统,为解决基于显微视觉的多机械手微装配机器人设计中存在的空间拥挤、视觉遮挡等问题进行了有益的探索. 在装配实验中,该微装配机器人完成了装配流程,实现了装配目标.

2) 分别针对薄壁筒形零件、薄壁环形零件、毛细管类零件和点胶针设计了 5 种异形零件夹持器,为微装配中各种异形零件的夹持提供了有益参考.

3) 实验结果表明,在多机械手(本文 6 个)的微装配机器人系统上使用显微视觉作为反馈是可行的,虽然会出现光路遮挡的问题,但是该问题可以通过布局优化等手段在一定程度上化解.

该微装配机器人系统还有如下问题需要进一步的完善:

1) 薄壁筒的装配是装配过程中最难的部分,从传感器反馈的数值来看,力比较大,超过了 1 N. 需要进一步优化控制算法,降低装配过程中装配件之间的相互作用力,提高装配质量.

2) 进一步优化各机械手的配置,去除装配过程中的人工干预,真正实现微装配的自动化和智能化,大大提高装配效率.

参考文献 (References)

- [1] Sato T, Koyano K, Nakao M, et al. Novel manipulator for micro object handling as interface between micro and human world[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 1993: 1674-1681.
- [2] Codourey A, Zesch W, Buchi R, et al. A robot system for automated handling in micro-world[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 1995: 185-190.
- [3] Nelson B J, Zhou Y, Vikramaditya B. Sensor-based microassembly of hybrid MEMS devices[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1998, 18(6): 35-45.
- [4] 陈国良, 黄心汉, 周祖德. 微装配机器人系统[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 288-293.
Chen G L, Huang X H, Zhou Z D. Micro-assembly robot system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 288-293.
- [5] 李江昊, 李振波, 陈佳品. 毫米级全方位移动微型装配机器人设计、运动学分析与控制[J]. 机器人, 2008, 30(1): 63-69.
Li J H, Li Z B, Chen J P. Design, kinematic analysis and control of millimeter-scale omnidirectional mobile microrobot for microassembly[J]. Robot, 2008, 30(1): 63-69.
- [6] 张蕊华, 陈海初. 用于精密微装配的全方位微小机器人[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(8): 1233-1237.
Zhang R H, Chen H C. Omni-directional miniature robotics applied for precise micro assembly[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(8): 1233-1237.
- [7] 谢晖, 孙立宁, 荣伟彬, 等. 一种 MEMS 自动微装配机器人[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1013-1016.
Xie H, Sun L N, Rong W B, et al. Automatic microassembly robot for MEMS[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(7): 1013-1016.
- [8] 王强, 张之敬, 叶鑫. 宏微结合的 12 自由度微装配系统精度分析[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(1): 15-18.
Wang Q, Zhang Z J, Yie X. Accuracy analysis of 12-DOF macro-micro micro-assembly system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(1): 15-18.
- [9] 陈国良, 黄心汉, 王敏. 面向微装配的显微视觉伺服[J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 82-86.
Chen G L, Huang X H, Wang M. Micro-visual servoing for micro-assembly[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 82-86.
- [10] Rabenoroosa K, Clevy C, Lutz P, et al. A micro-assembly station used for 3D reconfigurable hybrid MOEMS assembly[C]//IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 95-100.
- [11] Das A N, Murthy R, Popa D O, et al. A multiscale assembly and packaging system for manufacturing of complex micro-nano devices[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2012, 9(1): 160-170.
- [12] Wu W R, Yu D H, Du K, et al. A precision robotic system for 3-D micro-assembly[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 1518-1522.
- [13] Xu D, Li F D, Zhang Z T, et al. Characteristic of monocular microscope vision and its application on assembly of micro-pipe and micro-sphere[C]//The 32nd Chinese Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 5758-5763.
- [14] Kagerer M, Eiler K L, Lueth T C. Development and application of a low-cost manual micro assembly system with integrated heater[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 2963-2968.

作者简介:

- 李海鹏 (1977-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 微装配, 精密机械设计, 系统优化.
- 邢登鹏 (1971-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 机器人, 最优控制.
- 张正涛 (1981-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 微装配, 精密视觉检测.