

文章编号 1004-924X(2009)04-0819-06

基于机器视觉的微装配控制策略及软件架构

徐 征¹, 王晓东², 程新宇¹, 罗 怡¹, 王立鼎¹

- (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:研究了装配控制和软件架构等微装配的重要环节,分析了微装配的具体需求、工作流程和人机交互,提出先看后动的微装配控制模式。采用由任务层、策略层和行为层组成的分层控制架构,建立了基于显微机器视觉的微装配平台。围绕可复用性要求,分析软件中核心类的结构和对象间关系,采用面向对象的聚集关系构造任务层和策略层中的主要对象,最终实现了微装配控制软件。基于本文的控制方法进行了微装配实验,所装配的微系统为微挠性摆动系统,由 6 个微小零件组成,所有零件上均无人工标。对其关键技术指标的测量和对比结果表明:自动装配与手动装配的同轴度误差平均值相近,而对称度误差平均值有所改善,自动装配的各项指标不确定度优于手动装配,装配的微系统其一致性有明显改善。本文提出的控制方法可有效地用于复杂微系统的装配,且具有较高的人机交互性、鲁棒性和可复用性。

关键词:微装配;人机交互;软件架构;机器视觉

中图分类号:TH703;TP242.6 **文献标识码:**A

Control tactics and software architectures for micro-assembly based on machine vision

XU Zheng¹, WANG Xiao-dong², CHENG Xin-yu¹, LUO Yi¹, WANG Li-ding¹

(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 the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The control tactics and the relevant software architectures for a microassembly were studied and the requirement, main process and the human-robot interaction in the microassembly were analyzed in detail. A microassembly workstation based on the machine vision was constructed and a look-then-move control pattern for the micromanipulation was proposed. Then, A three-layered control architecture consisting of a task layer, a strategy layer and a behavior layer was established. In order to improve reusability, the relation between core classes and associations was analyzed in software architectures. Finally, the classes in the task layer and strategy layer were mainly constructed with an aggregation mode to finish the software for microassembly control. The assembly experiments of the microsystem composed of six microparts without special surface markers were carried out with the mi-

收稿日期:2008-05-29; **修订日期:**2008-06-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50705012); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-06-0279); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA04Z302)

croassembly workstation. Several critical technical indexes of the assembled microsystem were measured and analyzed with a tool microscope. The experimental results show that the average values of coaxiality errors with the automatic microassembly are close to the results with the full manual microassembly, but the average values of symmetric errors are lower than that with the full manual microassembly and the uncertainty with the automatic assembly is better than that of the traditional one. The efficiency, repeatability, reliability and the reusability of microassembly have been improved with the control tactics based on the machine vision and the software based on three-layered control architectures.

Key words: microassembly; human-robot interaction; software architecture; machine vision

1 引言

由微驱动器、执行机构和传感器等构成的微系统,具有体积小、能耗低、性能可靠、应用广泛等特点。微装配是通过准确地操纵、定位、胶结等方法将多个微零件组装成复杂微系统的技术。目前,多数微装配工作仍由操作员手工完成,人为因素对装配精度的影响不可忽略,装配人员的流动也会使生产效率降低。构建自动化微装配系统,则有望降低人为因素影响,改善装配效率、稳定性以及精度。

20 世纪 90 年代,人们开始了微装配方面的研究,发展了宏微视觉反馈等多种适合于微装配的技术。我国南开大学、长春光机所、北航等单位也开展了任务序列规划、微定位控制、显微视觉反馈等微装配研究^[1-3]。由于微装配过程中存在零件遮挡、环境干扰和尺寸不一致等问题,目前显微视觉反馈等控制技术还不能满足复杂微装配的需求。近年来,人们逐渐认识到采用人机协作方式,能在降低操作者劳动强度的同时,充分发挥人机互动优势,更好地完成微小零件装配任务。例如,我国黄心汉等人针对人机交互微装配的需求,建立了三层控制体系^[4]。德国的 Michael 等研究了人机遥控操作微装配的精确定位和灵敏度等问题^[5-6]。现阶段要将自动化微装配技术由实验室推广至实际应用,主要难点在于:

(1) 装配环节繁琐,部分步骤遇到突发故障无法恢复,会导致整体装配失败。

(2) 加工工艺和材料选择的细微变动,会使微小零件尺寸和表面质量有所差异,影响装配精度。

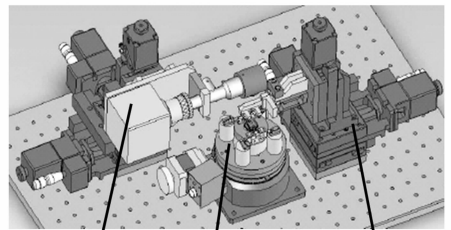
(3) 装配过程中,部分零件易损伤。例如,在微力作用下,微悬臂梁结构会发生断裂、粘附、变

形等。

本文建立了一种组合式自动微装配硬件系统,在此基础上,围绕提高定位精度、减少接触次数、控制受力状态等微装配关键问题,开展了微系统的控制策略和软件架构方面的研究,并进行了实验验证分析。

2 微装配系统硬件组成

根据常用微小零件尺寸和装配的精度要求,本文建立了基于机器视觉的微装配系统(图 1),其特点归结如下。



视觉机器人 旋转微动平台 操纵机器人

图 1 微装配系统机械部分组成

Fig. 1 Mechanical composition of micro-assembly system

(1) 采用组合结构模式。机械部分由视觉测量机器人、负责上料的旋转微动平台和负责夹持并定位的操纵机器人组成。视觉机器人和操纵机器人均具有三维定位功能,运动范围为 50 mm,精度为 2~3 μm ,分辨率为 0.1 μm 。旋转微动平台定位精度为 0.05 rad。

(2) 采用可移动的主动视觉测量方式,拓展了可观测范围,测量分辨率为 1 μm 。

(3) 采用视觉和微力反馈混合控制策略。通过视觉测量,获得装配工位的平面信息;通过力反馈判断微小零件接触受力状态,测力传感器安装

在柔顺型夹持机械臂的关节处。

(4) 采用真空发生器推拉模式控制微器件的抓取和释放,避免夹持释放中静电力的吸附。根据待装配部件尺寸,选择内径为 0.5 mm 的微型真空吸头。

3 微装配控制策略与流程

在微小零件的操纵和定位控制方面,本文建立了一种先看后动的半闭环微装配控制模式。先控制视觉机器人测量零件的基准和特征,经坐标转换获得操作空间的坐标,驱动旋转微动平台和操纵机器人执行微装配任务。采用先看后动模式的原因如下:

(1) 同类型的微小零件表面形貌和尺寸差异明显,有些零件表面没有图像识别用的标记点,只能用零件轮廓特征定位。而零件表面缺陷容易产生提取轮廓错误,导致视觉反馈失败。若采用先看一后动模式,允许操作者在测量阶段对零件或识别参数适当调整,系统鲁棒性较好。

(2) 本系统的机械定位精度为 $2\ \mu\text{m}$,光学分辨率约 $1\ \mu\text{m}$ 。在各子坐标系标定准确的前提下,采用半闭环控制能满足精度 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 微装配要求。

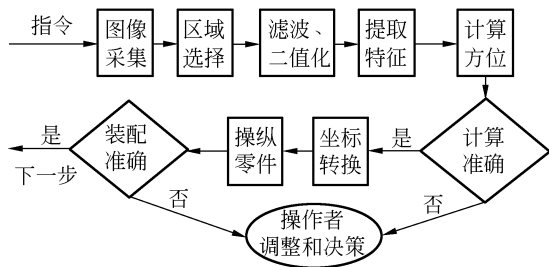


图2 先看后动控制模式

Fig. 2 Control process of look-then-move

先看后动装配控制过程见图2。首先驱动视觉机器人采集图像;然后顺序采用二值化等策略处理图像;工作人员观测处理结果,判断是否符合要求,如有问题则适当调整工件或装配参数,然后重复处理至满意为止,得到零件的图像特征点;通过坐标转换,将图像特征点转换为操纵机器人局部坐标,操纵机器人根据坐标点和装配指令执行装配动作;操作者判断装配是否准确,决定重复装

配或执行下一步动作。

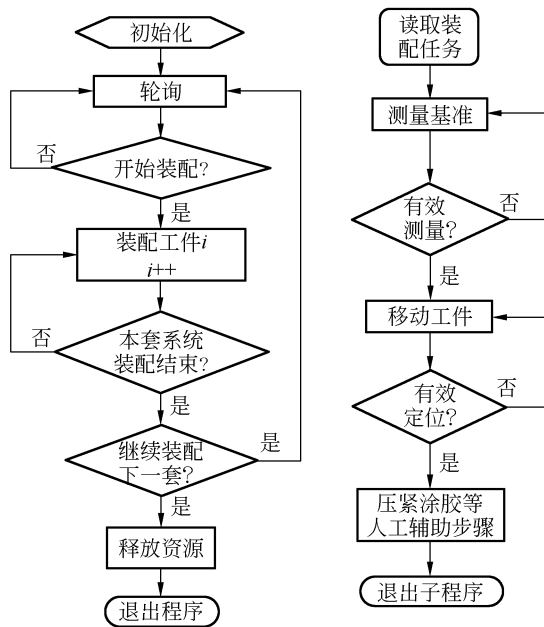
零件装配流程共包括测量、夹取、定位、安装、夹紧5步。建立自动化流程需要考虑以下问题:

(1) 装配系统需具备连续装配的能力和可接受的装配效率,以保证生产批量要求;

(2) 零件表面缺陷、环境照明、电子噪声等都可能对测量有影响,需要考虑纠错和单步撤销功能;

(3) 兼顾鲁棒性和精度,保证装配流程的稳定性。

在上述分析基础上,建立系统装配总流程图3(a)和单个零件装配流程图3(b)。在单个零件装配流程中,增加了测量纠错、操纵纠错和人工辅助压紧提示等环节。



(a) 总装配流程

(b) 零部件装配流程

(a) General assembly process (b) Part assembly process

图3 微装配流程

Fig. 3 Flow chart of micro-assembly process

4 微装配软件架构与实现

微装配涵盖领域广泛,装配任务、对象、环境等都可能变化。组合式系统可以使装配工作更加灵活,各子系统应相对独立而内聚,相互间无明显耦合,并可以在基本框架基础上,更换所需装配工具。同时要求控制软件具有一定可复用性,能够快速响应产品更新换代和品种多样化的需求。本

文参考前人研究成果^[4],设计了适用于微装配的分层软件架构,并采用面向对象编程技术加以实现。如图 4 所示,软件架构由任务层、策略层和行为层组成。

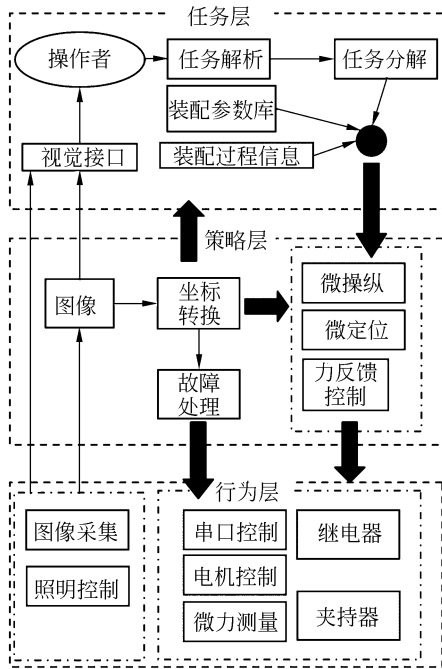


图 4 微装配控制系统的分层架构

Fig. 4 Layered software architecture for micro-assembly control system

任务层接受和解析操作者下达的命令,以装配工艺为依据分解任务。综合装配参数库和策略层反馈的装配状态,构造动作序列,并发送给策略层。

策略层接受任务层发来的动作序列信息,将其分解后,发送给行为层对应对象。策略层只与行为层接口关联,不涉及行为层动作的具体执行方法。

行为层根据策略层发来的命令,控制电机运动、电器开关、微力测量等部件行为。多数行为层模块只与策略层有关联,与任务层无关,但图像采集模块例外。由于动态图像不仅为策略层提供测量信息,同时也是操作者的观测窗口,因此行为层中图像模块与任务层和策略层都有关联。

根据分层架构设计了软件结构,采用统一建模语言描述了类组成及其相互关系。为提高复用性,主要采用聚集关系来构造任务层和策略层的对象。

(1) CObserver 类负责视觉机器人的控制,

由负责图像处理控制的 CImagePro 类、负责图像控制的 CCamPro 类、负责坐标转换的 CFrameTF 类等子类聚集而成。根据 CCommander 发来的观测任务,控制视觉机器人定位和采集处理图像等,计算并返回目标点位置和姿态。

(2) CManipulator 类负责控制操纵机器人,根据 CCommander 发来指令,执行抓取等动作。

(3) CLoader 类负责上料的旋转微动平台控制,负责将待安装的零件运送到夹持位置。

(4) CBoard 类管理用于显示的装配数据及图像。其图像信息引用 CObserver 图像,避免数据复制。

(5) CMotorMuster 类负责管理各电机运动。

(6) CCommander 是管理核心,由 CObserver、CManipulator、CLoader、CIOButton 和 Cboard 等聚集而成,负责响应操作者指令、分解并执行装配任务、提供数据输出接口。

具体编程的实现采用面向对象的 C++ 语言,软件中应用了 STL 标准数据类型、高质量的开源图像处理库和数据驱动模式等降低软件出错率,提高系统鲁棒性和可复用性。

5 装配实验及结果分析

采用本文的微装配控制系统装配了复杂的微挠性摆动系统。该系统由 6 个零件组成,如图 5 所示。最小平面特征尺寸为 $120\ \mu\text{m}$,最小深度特征尺寸为 $100\ \mu\text{m}$,零件 4 包含易破坏微悬臂挠性结构,最大外形尺寸为 $15\ \text{mm}$,各零件尺寸、材料、表面纹理均不同,都具有半圆弧或方孔等轮廓特征。

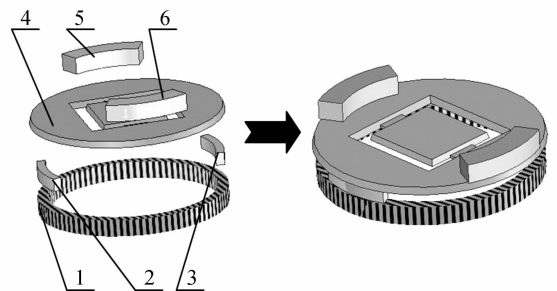


图 5 多组件微系统装配过程示意与系统结构

Fig. 5 Assembly process and configuration of micro-system with multi-components

系统装配精度要求共5项,主要包括同轴度、对称度和尺寸精度等,最大极限装配公差为100 μm ,最小极限装配公差为20 μm ,主装配基准为零件1的轴心,装配顺序自下而上(图5)。分析可知全部装配过程共包括24道工序,其中人工介入工序6步,人工介入工序无配合公差要求,装配精度依赖于自动装配环节。平均装配速度20 min/套,经多次检测未发现明显损伤,装配精度满足需求方提出的要求。与原手工装配方式相比,生产效率提高约1倍,装配过程易掌握,装配策略易调整,具有一定技能的人员培训3天左右就可独立操作。

表1 微装配实验的测量结果(单位:mm)

Tab.1 Experimental results of micro-assembly(unit:mm)

	装配平均 误差(自动)	不确定度 (自动)	装配平均 误差(手工)	不确定度 (手工)
同轴度	0.040	0.026	0.042	0.040
左右对称度	0.035	0.045	0.080	0.060
上下对称度	0.042	0.015	0.050	0.080

选装配工人用同一批次零件自动装配和手工装配微系统各10套,采用OGP SmartScope测量显微镜(精度 $\pm 2 \mu\text{m}$,分辨率 $0.5 \mu\text{m}$)测量装配结果,其中3项关键指标的平均测量结果见表1,可得出如下结论。

(1) 自动装配的同轴度绝对精度与手动装配结果相近,而对称度优于手动装配结果。这是因为装配工人对同轴度视觉线索较为敏感,而对对称度视觉线索不敏感。另外手工装配的夹具上有

辅助轴心可供观测对准,但没有对称度参考基准。而对自动微装配系统并不存在类似差异,所以自动装配的各项精度相近。

(2) 自动装配的不确定度优于手动装配,装配重复精度得到改善,提高了系统互换性。

(3) 操作工人劳动强度明显降低,装配过程中可以从事清洗、匀胶等辅助工作。

6 结 论

在对微装配需求分析基础上,建立了基于机器视觉的自动微装配系统;提出并实现了先看后动的微装配控制模式,结合人的决策能力和机器高精度测量并执行动作的能力的各自优势,实现了灵活的微装配控制;在微装配基本流程分析基础上,建立了包含任务层、策略层和行为层的微装配控制软件分层架构,对各层的组成和功能进行了分析,采用本文建立的分层结构有助于改进控制软件的可复用性和鲁棒性;分析了软件核心对象和对象间关系,采用聚集关系构造任务层和策略层的对象,采用面向对象的方法编写了微装配自动控制软件的程序;对由6个微小零件组成的微挠性摆动系统进行了装配实验,实验结果表明,自动装配与手动装配的同轴度误差平均值相近,都在0.040 mm左右,而左右对称度误差平均值由手工装配的0.080 mm提高到0.035 mm,上下对称度误差平均值由手工装配的0.050 mm提高到0.042 mm,各项测量的指标不确定度均优于手动装配结果,提高了系统互换性和一致性。

参考文献:

[1] 李庆祥,李玉和. 微装配与微操作技术[M]. 北京:清华大学出版社.
LI Q X, LI Y H. *Basic Technology on Microassembly and micromanipulation* [M]. Beijing: Tsinghua University Press. (in Chinese)

[2] 王会香,陈立国,孙立宁,等. 生物显微切割微操作仪的设计与研制[J]. 光学精密工程,2006,14(3):416-421.
WANG H X, CHEN L G, SUN L N, *et al.*. Design of micromanipulation instrument for bio-micro dissection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 416-421. (in Chinese)

[3] 段瑞玲,段惠波,李庆祥,等. 基于图像处理的微装配自动调焦系统[J]. 光学精密工程,2006,14(3):468-472.
DUAN R L, DUAN H B, LI Q X, *et al.*. Micro-assembly auto-focusing system based on image processing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 468-472. (in Chinese)

[4] LV X D, HUANG X H. Three-layered control architecture for microassembly with human-robot task plan[C]. 2004 *IEEE Conference on Robotics and Biomimetics*, Shenyang, 2004: 22-26.

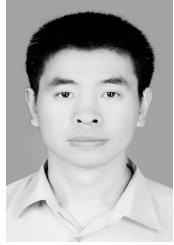
[5] MICHAEL F. ZAEH, ANDREA REITER. Precise positioning in a telepresent microassembly system [C]. *IEEE Workshop on Haptic Audio Visual En-*

vironments and their Applications. Canada, 2006: 44-47.

- [6] HELENA PONGRAC, ANDREA REITER, BERTHOLD FAERBER, MICHAEL F. Zaeh. E-

valuation of joystick sensitivity in telemanipulative microassembly[C]. *IEEE Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications, Canada, 2007:71-75.*

作者简介:



徐 征(1973—),男,河南郑州人,副教授,1997 年于吉林工业大学获学士学位,2004 年于大连理工大学获博士学位,主要从事微装配、微操作、微流体等方面的研究。E-mail: xuzheng@dlut.edu.cn



罗 怡(1973—),女,安徽合肥人,副研究员,1994 年于大连理工大学获学士学位,2001 年于上海大学获博士学位,主要从事微装配和微纳加工技术的研究。E-mail: luoyi@dlut.edu.cn



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授、博士生导师,1989 年于南京航空学院获得学士学位,1992 年于哈尔滨船舶工程学院获硕士学位,1995 年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事微装配技术与系统、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn



王立鼎(1934—),男,辽宁辽阳人,教授,中国科学院院士,1960 年于吉林工业大学获学士学位,主要从事精密机械和微机电系统的研究。E-mail: wangld@dlut.edu.cn



程新宇(1977—),男,河北沧州人,硕士生,主要从事微装配技术与系统的研究。E-mail: xyc79323@yahoo.cn

● 下期预告

脉冲激光测距中高精度时间间隔的测量方法

宋建辉,袁 峰,丁振良

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系,黑龙江 哈尔滨 150001)

高精度时间间隔测量对脉冲激光测距系统具有重要意义,为此提出了一种新的高精度时间间隔测量方法。该方法在 FPGA 中实现了脉冲计数法、多相采样法和延迟链法的结合。采用脉冲计数法对被测时间间隔进行“粗值”测量,保证大的动态测量范围。利用 FPGA 内部锁相环产生 N 路同频率,相位均匀分布的时钟信号作为计数时钟,基于等精度测频原理,将被测时间间隔的测时分辨率提高到 T_{clk}/N 。利用 FlipFlop 锁存器形成延时链,对被测信号与相邻计数时钟的时间间隔进一步量化。该方法解决了传统多相采样技术中倍频次数高则相移分辨率降低的问题,在不增加计数时钟和有限延迟链数量的前提下,得到较高测时分辨率。测试结果表明,该时间间隔测量模块动态测量范围为 $163.8 \mu s$,测时过程相对较短,当进行多次重复测量时,测量的标准误差在 71 ps 以内,基本满足实际应用的高精度要求。