

磁悬浮微装配系统理论模型及实现技术

叶军君, 席文明, 姚 斌, 孙道恒

(厦门大学机电工程系, 厦门 361005)

摘 要: 针对现有微装配系统存在的问题, 给出了一种新的理论模型; 将微产品装配离散化, 便于建立标准化、模块化的实用微装配系统. 该模型为灵巧加工及 CMS 微系统打下了基础. 利用磁悬浮平台代替粗 细运动平台传送装配子单元; 同时, 也利用它作为微装配平台, 在一个运动平台实现了粗 细运动; 没有导线与运动平台相连, 实现了平台的长距离运动. 巧妙地利用平台运动实现线激光对微装配环境的扫描, 获取微装配环境的三维信息. 将全局 / 局部视觉系统分离, 增加了操作空间. 采用两种模型对磁悬浮系统进行控制, 满足了粗 细运动精度. 采用该理论模型可以简化系统的结构, 提高装配效率.

关键词: 磁悬浮; 微装配; 三维模型

中图分类号: TP24 文献标志码: A 文章编号: 1672-6030(2007)01-0044-05

Theoretical Model of Maglev Micro Assembly System and Its Realization Technology

YE Jun-jun, XI Wen-ming, YAO Bin, SUN Dao-heng

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract A theoretical model is presented which adopts maglev system to decompose complex problems in micro assembly and makes the system simple. This theoretical model is also convenient to constitute a standardized, modularized and practicable micro assembly system, and furthermore establish foundation of agile manufacture and CMS microsystem. In the theoretical model, maglev platform is used to replace coarse fine platform to transfer micro assembly subsystem and also used to assemble micropart, connect the platform without wire to realize a long distance movement. Line laser system scan micro assembly circumstance in the process of maglev platform movement and 3D data of microassembly is acquired. Global/local vision system are separated to widen operation space. In maglev system control, two types of dynamics model are used to satisfy the precision of coarse fine movement. The theoretical model can reduce assembly cost of microparts and improve assembly efficiency.

Keywords maglev, micro assembly, 3D model

早在 20 世纪 80 年代, Nelson B J^[1]等人就开始了微装配视觉伺服的研究, 通过长期工作, 建立了完善的显微视觉控制方法, 包括显微视觉雅可比矩阵的建立、视觉位置混合控制研究、全局/局部视觉系统控制研究以及视觉力反馈控制研究等. Dechev N^[2]等人利用硅体微加工技术制造出顺应微手爪, 将许多经过金属溅射的硅微器件装配在一起, 构成多个螺线管, 这些螺线管可用在光通讯设备中. Lee Seok Joo^[3]等人利用 LGA 手爪完成了微光学产品的装配, 该产品包括光

纤、光纤接头和微透镜. Mako to Tanaka^[4]和 Kussule^[5]等提出了微工厂的概念, 他们将微器件的制造和装配集成在一起, 形成桌面微工厂系统, 对微工厂的成本、效率、微加工设备和微装配技术进行了详细的研究. 国内主要以微操作系统、操作机理等^[6]为研究对象, 相应开展了微操作机器人、微机器人标定、微机器人的虚拟操作、MEMS 传感器^[7-11]以及微操作机器人视觉伺服控制^[12]等方面的研究.

收稿日期: 2006-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675184).

作者简介: 叶军君(1962-), 男, 博士, 副教授, mcyj@163.com.

1 现有微装配技术存在的问题

经过国内外研究者多年的工作,微装配技术有了很大的发展,取得了很多成果;但总体来说,微装配系统的体系结构并没有很大的变化,主要表现在以下几个方面。

(1)深度信息获取困难.无论是 Nelson B J等人采用的显微镜聚焦技术,还是虚拟技术,都需要对显微镜镜头或装配平台进行多次移动,从而获得装配环境的三维信息.这种技术增加了系统结构和控制的复杂性,降低了装配效率。

(2)全局 局部视觉系统存在缺陷.为了获得装配产品的整体信息和增加装配精度, Nelson B J等人采用了全局 局部视觉系统.由于体视显微镜的放大倍数与视场、深度场大小成反比,微装配的工作空间并不大,将全局 局部视觉系统集成在一起,使有限的工作空间变得更小,影响了器件的装配。

(3)在微装配系统中一般采用粗 细运动平台,以便寻找装配位置和进行精密装配;国内研究者采用了串并联机械手,它与粗 细运动平台的功能是一样的.采用粗 细运动平台或串并联机械手,使得系统结构和控制复杂。

(4)微装配中使用的装配机械手必须按零件最高的装配精度来设计.对于不同形状的零件,需要更换末端执行器,降低了装配效率。

(5)装配机械手的自由度必须满足所有装配动作,增加了机械手的自由度数目,机械手的精度下降。

本文针对上述问题,寻求一种新的微装配系统结构,利用结构体系的变化,解决深度信息提取困难、全局 局部视觉系统存在的缺陷、粗 细运动平台导致的系统结构和控制复杂等问题,为实用化微装配结构体系建立理论基础。

2 磁悬浮微装配系统理论模型

磁悬浮微装配的原理如图 1所示.假设整个系统装配 3个微器件,每个子系统完成 1个微器件的装配;3个装配子系统共用一个磁悬浮固定导轨,运动平台悬浮在固定导轨上;运动平台上载有微装配子单元;整个装配子系统包括线性激光系统、迈克尔逊干涉仪、全局视觉系统、局部视觉系统和装配机械手;运动平台下有悬浮磁铁。

整个微产品的装配过程从左向右进行,当运动平台进入左边的装配子系统时,增加固定导轨线圈中的

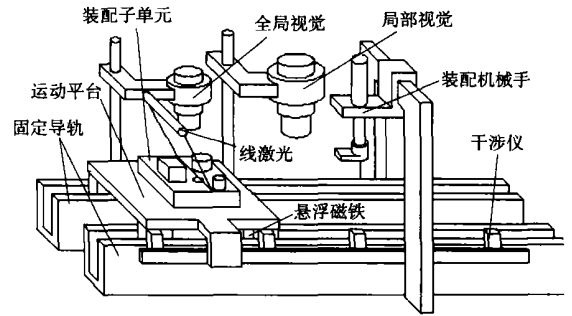


图 1 磁悬浮微装配系统原理

电流,这样磁力增加,运动平台的悬浮高度增加,迈克尔逊干涉仪的激光束照射在运动平台的固定镜上.当运动平台载着装配子单元向右运动时,固定不动的线性激光系统对装配子单元进行扫描,在全局视觉系统(低放大倍数)的帮助下,获取装配子单元的全局三维数据,并将该数据传输给局部视觉系统(高放大倍数).当运动平台运动到局部视觉系统下时,根据全局视觉系统获得的三维装配子单元数据,找到装配点,并根据装配点处的三维信息,在局部视觉系统的控制下,借助于机械手,完成该子单元的器件装配。

完成左边装配子系统的器件装配后,减小固定导轨线圈电流,磁力减小,运动平台高度下降,从而在进入中间装配子系统时,不会碰到干涉仪.当进入中间的装配子系统后,运动平台再次升高,重复左边装配子系统的动作.3个子系统具有相同的设备和结构。

迈克尔逊干涉仪的动镜连接在运动平台上,干涉仪的其他部分固定在导轨上.如果干涉仪光源采用波长很短的激光,则干涉条纹的间隔可达几个纳米.选择干涉仪作为位置传感器的好处是,它有高的位置精度,而且它是利用光的干涉原理,是非接触测量,无导线与平台相连。

3 系统实现技术

3.1 磁悬浮系统的分析及选择

磁悬浮系统一般采用 2种方式:一种是利用磁铁间的吸引力,而另一种是利用磁铁间的排斥力.采用磁铁间的吸引力特点为:在水平方向被悬浮的磁体是稳定的,而在垂直方向(即吸引力方向)被悬浮的磁体是不稳定的.在这样的系统中,一对磁铁间,不稳定的力只有一个,即吸引力,如:磁悬浮轴承和磁悬浮列车一般采用这种磁悬浮原理.采用磁铁间的排斥力特点为:在水平方向被悬浮的磁体是不稳定的,而在垂直方向(即排斥力方向)被悬浮的磁体是稳定的,在这样的系

统中,一对磁铁间,不稳定的力也只有一个,即排斥力,但被悬浮的磁体产生翻转力矩。

采用吸引力的磁悬浮导轨系统,一般均将平台放在导轨的下方,悬浮控制系统放在平台的上方,同时,为了限制水平方向的自由度,除导轨外,要设计另外的结构。另一个问题是:这种结构一般刚度较低,不利于控制系统的稳定。采用排斥力的磁悬浮导轨系统,一般将平台放在导轨的上方,悬浮控制系统放在平台的下方,这样就可以利用导轨限制悬浮系统的水平自由度,并不需要另外的结构。同时,利用稳定力控制平台的水平运动,可以使平台有较高的刚度,便于系统的稳定控制。这种平台的另一个好处是平台上装载的物体上下料方便,对于微装配系统,这种结构也方便器件的装配以及传感器的配置。所以本系统采用排斥力磁悬浮系统。

为了便于排斥力和悬浮高度的调整,两个排斥体分别采用永磁铁和电磁铁,排斥力悬浮系统如图 2 所示。

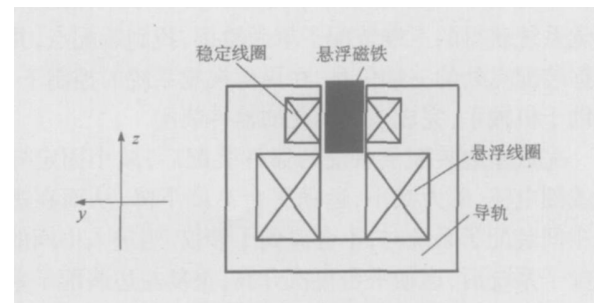


图 2 排斥力磁悬浮系统

3.2 深度信息获取的方法

要进行复杂的装配,装配环境的三维信息是必须的。采用立体视觉技术或显微镜聚焦技术并不是一个好的选择;前者需要操作者去控制,深度信息不能集成到伺服控制中去,后者需要在显微镜上增加驱动机构,同时,在提取深度信息时,需要多次移动显微镜成像系统,这需要很长的时间和复杂的计算。本文采用几何光测量的方法,测量原理如图 3 所示。一束倾斜的线性激光照射在被测量物体上,光线上的一点 A 在有物体时变为 A' ,这样 A 和 A' 将产生一个位置差;该位置差 s 通过摄像机成像原理可以被计算,再通过线性激光的倾斜度数,可以求出 A' 点的高度。假设激光器的倾角为 θ 则

$$h = s \cdot \cot \theta \quad (1)$$

采用该方法,计算量小、测量速度快、受环境光强度变化的影响小;更大的好处是与磁悬浮平台的运动相结合,该测量在装配单元的传送过程中由全局视觉系统完成,并不占用另外的时间。

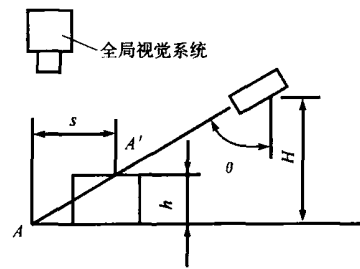


图 3 几何测量物体的三维信息

3.3 虚拟环境建立及虚实场景映射

无论是简单任务还是复杂任务,操作者对装配过程的干预是必要的,这种干预可以避免错误的产生以及微器件的破坏。由于视觉系统的转换,以及局部视觉系统的限制(小视场、小景深),采用虚拟场景监视装配过程是很好的方法。

虚拟环境根据全局视觉系统获得的三维信息,在器件 CAD 数据的帮助下建立,利用器件 CAD 数据可以简化虚拟环境的建立。

根据全局视觉系统和局部视觉系统的位置关系,可以建立虚拟环境和实际环境的映射。其中,全局视觉系统获得的三维场景是虚拟场景(实体模型),局部视觉系统显示实际场景,实际场景在虚拟场景中被特别显示;当实际场景的视点变化时,虚拟场景中的特别显示区域产生变化,从而形成虚实场景的精确映射。这样做的好处是:其一,方便操作者监视装配过程;其二,不会丢失装配点。

3.4 磁悬浮系统的控制

由于篇幅的限制,这里并不推导磁悬浮系统的复杂动力学模型,只是对磁悬浮系统所受的力进行分析,便于在以后的研究中建立合理的控制模型。

磁悬浮系统由 4 个导轨、4 个悬浮磁铁和 1 个运动平台组成,每个悬浮磁铁将受到 3 个力的作用,分别为悬浮力(悬浮线圈产生)、侧向失稳力(悬浮磁铁产生)和稳定力(稳定线圈产生),运动平台还受到 3 个力矩的影响。

磁悬浮系统采用 2 种控制模型,对于平台在 2 个装配子系统间的运动,只要产生合适的悬浮即可,控制稳定力的大小,可以达到这一要求,从而使控制模型简单。采用图 2 的结构,稳定力的大小是线性的,它与稳定线圈导线组中的电流大小成正比,所以该控制是线性控制,采用经典控制理论即可。在器件装配时,要求达到高的精度,必须建立精确的控制模型,对所有的力和力矩进行控制。由于制造的误差以及力学模型线性化的近似,得到系统的精确模型是困难的,所以不能采用传统的控制模型;自适应控制和模糊控制是一个好

的选择。

4 实验分析

由于系统刚开始搭建, 缺乏必要的实验条件, 这里, 只针对物体的三维参数提取进行实验. 实验系统如图 4所示, 由下列设备组成: 微生物操作机械手 (MP-285 三自由度, 美国 Sutter公司, 40 mm 精度), 纳米运动平台 (M-112 1DG, 三自由度, 德国 PI公司, 20 mm 精度), 显微镜 (体视 K-700Z 中国麦克奥迪公司), CCD (UG-930CL, 美国 Uniq 公司), 图像捕捉卡 (METORII加拿大 Matrox公司), 线性激光系统 (包括激光器、柱面镜和光栅).

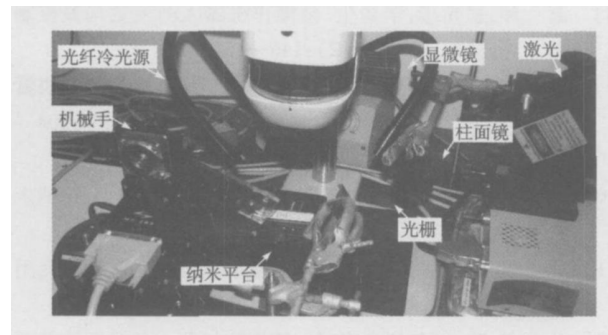


图 4 物体三维信息提取

在该系统上将完成一个已知尺寸的微小长方体形状测量. 在物体测量前首先对系统进行标定. 在测量时, 激光器的倾角是不变的, 式 (1)中的 h 与 s 成线性关系, s 为激光条纹偏移量, 它在图像空间的值为 s' , 因为 CCD是线性成像, 所以 s 与 s' 也成线性关系, 从而 h 与 s' 成线性关系. 令

$$K = h / s' \quad (2)$$

式 (2)为物体高度与线激光在图像空间的偏移量比值. 该高度由纳米平台在垂直方向的移动获得. 获得 K 值后, 只要得到线激光在图像空间的偏移量, 就可以计算物体的高度.

同样可以得到 2个水平方向的标定参数, 分别用 K_s 和 K_v 表示. 实验中得到 $K = 8\ 215\ \mu\text{m} / \text{pixel}$, $K_s = 17\ 213\ \mu\text{m} / \text{pixel}$, $K_v = 12\ 911\ \mu\text{m} / \text{pixel}$.

图 5为物体的测量过程, 图中共有 3条激光线, 实验时选取一组清晰的激光条纹计算偏移量. 从图中可以看出, 线激光产生明显的偏移, 偏移量的测量精度决定了物体高度测量的准确度, 而影响偏移量测量精度的是激光线边界选取的准确度, 在这里采用图像数据的图形化显示, 可以得到好的精度. 在测量过程中, 平台向右移动, 获得 3个测量点.

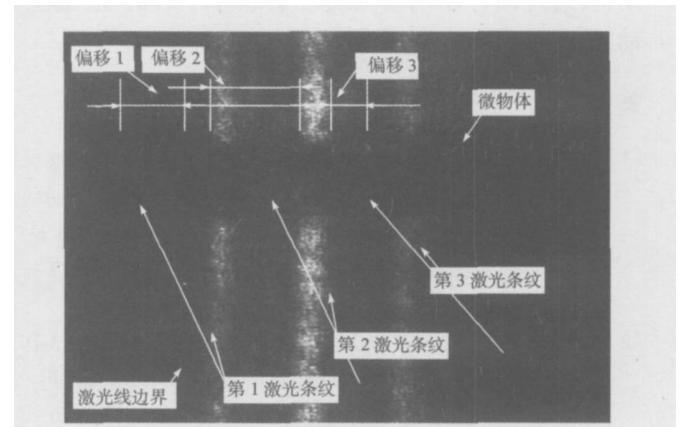


图 5 微物体三维数据测量

表 1是物体实际参数与线激光测量的数据比较和误差分析. 从测量过程来看, 物体的宽度测量误差较大, 这是因为选取的物体上表面存在小的倒角, 使得测量时存在较大误差. 由于理想的微物体很难在短时间内获得, 使得物体测量时存在系统误差, 在后续工作中, 将寻找理想微体进行实验. 误差产生的另一个因素是程序对条纹边界的识别误差, 由于边界的灰度是渐变的而不是跃变, 这样确定边界的位置就会产生误差. 剔除物体选取不理想产生的误差 (在物体的长度方向上也存在端面截取不规则存在的误差), 从高度测量的精度来看, 笔者认为这种测量方法是可行的.

表 1 实际参数与线激光测量的数据比较和误差分析

扫描位置	长方体参数	实际测量值 μm	线激光测量值 μm	绝对误差 μm	平均相对误差 ρ_d
1	高	345. 030	像素 $\times K = 349\ 2$	4 170	1. 2
	宽	645. 550	像素 $\times K_s = 701$	55 450	8. 6
	长	5 930. 490	像素 $\times K_v = 5\ 802$	128 490	2. 2
2	高	353. 245	像素 $\times K = 353\ 6$	0 355	0. 1
	宽	632. 639	像素 $\times K_s = 700\ 6$	67 961	10. 7
	长	5 886. 846	像素 $\times K_v = 5\ 803$	83 846	1. 4
3	高	361. 460	像素 $\times K = 357\ 4$	4 060	1. 1
	宽	619. 728	像素 $\times K_s = 700\ 8$	81 072	13. 1
	长	5 895. 450	像素 $\times K_v = 5\ 801$	94 450	1. 6

5 结 论

(1) 通过将微产品的装配离散化, 建立流水线微装配系统模型, 从而将复杂问题分解, 有利于问题的解决。

(2) 利用激光扫描的形式提取装配环境的三维信息, 将平台运动和激光扫描结合在一起, 简化了结构, 提高了效率。将全局-局部视觉系统分离, 增加了系统的操作空间, 便于系统的扩展。

(3) 利用磁悬浮平台代替传统的粗-细运动平台结构, 通过两种控制模型实现磁悬浮平台的粗-细运动, 简化了系统结构, 降低了系统成本。

参考文献:

- [1] Ralis S J, V kram aditya B, Nelson B J. Micropositioning of a weakly calibrated microassembly system using coarse to fine visual servoing strategies[J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2000, 23(2): 123—131
- [2] Dechev N, Cleghom W L, Mills J K. Microassembly of 3D microstructures using a compliant passive microgripper[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2004, 13: 176—189
- [3] Lee Seok Jo, Kim Kyunghwan, Kim Deok Heo, et al. Multiple magnification images based micropositioning for 3D micro assembly[C]. // *Seventh International Conference on Control Automation Robotics and Vision (ICARCV02)*. Singapore, 2002: 914—919.
- [4] Makoto Tanaka. Development of desktop machining microfactory[J]. *Riken Review*, 2001, 34: 46—49.
- [5] Kussul E, Baidyk T, Ruiz L, et al. Development of low-cost microequipment[C]. // *2002 International Symposium on Micromechanics and Human Science*. Nagoya, Japan, 2002: 125—134.
- [6] Whitehouse D J. 小物体接触运动的动力运动学研究[J]. *纳米技术与精密工程*, 2005, 3(2): 81—84.
- [7] 李 敏, 赵 新, 卢桂章, 等. 微操作机器人系统拟实环境的实现[J]. *机器人*, 2001, 23(4): 305—310.
- [8] 赵 玮, 宗光华, 毕树生. 微操作机器人的视觉伺服控制[J]. *机器人*, 2001, 23(2): 146—151.
- [9] 周红秀, 高峰, 张振宇. 新型可重组模块化并联微动机器人研究[J]. *纳米技术与精密工程*, 2005, 3(3): 204—208.
- [10] 张文栋, 石云波. 新型复合硅微传感器的设计[J]. *纳米技术与精密工程*, 2004, 2(1): 24—28.
- [11] 林忠华, 胡国清, 刘文艳, 等. 微机电系统的发展及其应用[J]. *纳米技术与精密工程*, 2004, 2(2): 117—121.
- [12] 孙立宁, 陈立国, 刘品宽, 等. 微操作机器人显微系统若干问题[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2): 171—175.