

基于显微视觉的微球微管精密装配^①

曲吉旺^{②*} 许家忠* 张大朋** 徐 德**

(* 哈尔滨理工大学自动化学院 哈尔滨 150080)

(** 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 针对微球微管的精密装配任务,本文设计了基于显微视觉的装配系统。该系统由 4 台显微相机以及相机运动机构、微管操作手、微球调整平台、夹持器等构成。其中,2 台低倍率显微相机水平正交布置,用于零件粗定位;2 台高倍率显微相机倾斜正交布置,用于零件精确定位;微球调整平台用于调整微球姿态;微管操作手用于微管与微球的对准与装配。利用低倍率显微相机的视觉信息,实现微球的粗定位和微管姿态的测量。利用高倍率显微相机的视觉信息,测量微球姿态,控制微球调整平台运动,实现微球与微管的姿态对准;测量微管末端与微孔之间的相对位置偏差,控制微管操作手运动,实现微管与微球的位置对准与装配。利用该系统成功将末端直径 10 μm 微管安装于微球上直径 13 μm 的微孔中,实现了微管微球的精密装配。

关键词 微装配,微球定位,显微视觉,球管对准

0 引 言

在一些如生物技术、航空航天、电子等特殊领域,芯片和微机电产品 (MEMS) 的特征尺寸不断减小、结构日益复杂,对装配工艺和操作精度的要求越来越高,人工手动操作已经很难满足要求,微装配便发挥了日益重要的作用。对微型目标零件的准确定位,姿态的准确测量是进行下一步微装配的一个重要前提^[1]。目前国内外有很多关于微装配系统的文献,这些微装配系统通常需要显微视觉系统或显微视觉系统结合微力传感器来检测装配状态^[1,2]。文献[3]中介绍了一种基于多显微视觉的 3 维空间中 6 自由度长圆柱体的相对位姿估计方法,采用由粗到细的相对位姿估计方法,估计出了长圆柱形状零件的位姿。文献[4]提出了一种基于运动的微孔与微管的姿态测量方法。通过两台相机的聚焦运动,分别测量出微孔、微管的投影线,然后根据微管、

微孔投影线与显微相机光轴信息分别计算出微孔、微管在微管操作手坐标系中的姿态向量。文献[5]提出了一种微颗粒的 3 维空间跨尺度装配方法,可以在 3 维空间进行微操作,但只能对目标物进行简单的夹持与释放动作,且系统需要手动平移自由度,自动化程度有待进一步提高。文献[6]提出了跨尺度微管微球 3 维半自动装配的系统,该系统借助一组体视显微镜由人工对目标进行搜索,两路高倍率显微视觉对目标进行测量,装配过程是人工引导结合显微视觉伺服的半自动装配方式。文献[7]中的系统为宏微结合的基于显微视觉伺服 6 机械手微装配机器人,实现了薄壁筒与臂筒的装配,相对于有限的操作空间,6 只机械手进行操作,不可避免地出现光路遮挡的问题。文献[8]中的系统基于双目视觉进行微装配,一路为主视觉,另一路用于跟踪监测目标。采用正交光学对准机构,需要人机协同对微小型平板类结构进行装配,操作复杂。文献[9]中介

① 科学挑战专题 (TZ2018006-0204-02) 和国家自然科学基金 (61733004, 61673383, 61673382, 61741317) 资助项目。

② 男,1991 年生,硕士生;研究方向:微装配;联系人,E-mail: 2832894889@qq.com

(收稿日期:2018-12-11)

绍的系统基于 3 路相互正交的显微视觉光路及微力传感器,实现了薄壁环形微零件以及细长轴型零件的对准与装配。文献[10]中的系统,为多尺度微纳装配平台,具有 3 个操作手,共 19 个自由度。该平台操作空间尺寸小,但可完成纳米级精度的装配操作。然而,通常情况下微装配机器人装配对象的尺寸在十几微米至几毫米范围内。文献[11]中提出了一种带有三探针的微装配平台,左右 2 个探针夹持住微零件,中间探针固定。通过 3 个探针之间的协同配合,可以使微零件绕 2 个探针夹持点构成轴线进行旋转,能够完成 3 维微装配的过程。由于探针与微零件的接触面积小,微装配时,探针的移动步长较大时,微零件容易脱离控制。文献[12]中提出了一种基于视觉的薄金属零件微装配单元,可实现将大量微加工薄金属零件三维装配到 4 英寸硅片微加工孔中,但该微装配单元结构复杂,且没有涉及到微零件的姿态调整。文献[13]提出了一种基于视觉的微管微球装配平台,通过视觉引导,手动完成微管与微球孔的装配任务,装配效率不高。本文设计的微球微管装配系统与上述微装配系统相比,系统构成具有新颖性。该系统包括 4 路显微视觉,通过显微视觉系统的在线检测,控制操作手和调整平台运动,实现微球的高精度姿态调整及微球微管的自动对准及装配。

1 微球微管装配系统结构

1.1 装配任务

如图 1 所示,本文的目标是把直径为 10 μm 的

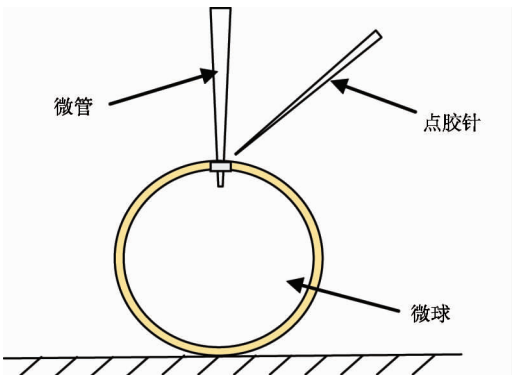


图 1 装配对象

微管快速准确地从竖直方向插入直径为 13 μm 的微孔中。为实现该目标,需要调整微球姿态,使由球心指向孔心的向量与微管中线的方向向量平行。调整微球姿态后移动微管插入微孔中完成装配。

装配的困难主要有如下几点:

(1) 高倍镜下微球的搜索定位

对于两路倾斜的高倍率显微相机,其视场较小,在微球直径较大时空余背景比较小。更换微球重新装配时,需要花费较多时间移动相机才能再次搜索到微球,操作比较繁琐。

(2) 光源强度的控制

相机同轴光较强时,微球球面有光的反射和透射现象,使视场泛白,弱化了微球边缘清晰度。微球最大圆周线处聚焦时,影响焦平面的判断。相机同轴光较弱时,背景较暗,微球边缘与背景不易区分,且微球轮廓细节被掩盖,聚焦微球最大圆周线处时,无法准确聚焦。

(3) 跨尺度操作

微球与微孔尺寸相差较大。无法在同一倍率下清晰成像,需要改变镜头倍率,变倍后需要重新聚焦,且改变倍率后,目标可能会跑出视野范围,给测量由微球球心指向球孔孔心的向量带来困难。

1.2 微球微管装配系统

为了能够全方位看到微球微管及微球上小孔附近区域,该系统包含 4 路显微视觉。两路水平显微视觉光路基本上正交,用于观察微球的主视图与右视图。其镜头放大倍率较低,视野较大,用于对微球的粗定位和微管姿态测量。两路倾斜显微视觉在倾斜平面上也基本正交,有利于观察微孔。其镜头放大倍率高,但视野小,主要用于微管与微孔间的精定位及微孔向量的测量。

水平显微视觉的构成如图 2 所示,主要包括自动变倍变焦镜头、CCD 相机、3 维线性运动调整机构、同轴照明光源和固定底座。其 CCD 相机参数如表 1 所示。倾斜显微视觉的构成如图 3 所示,主要包括金相镜头、自动变倍变焦镜头、CCD 相机、3 维线性运动调整机构、聚焦运动轴、同轴照明光源。其 CCD 相机参数如表 2 所示。

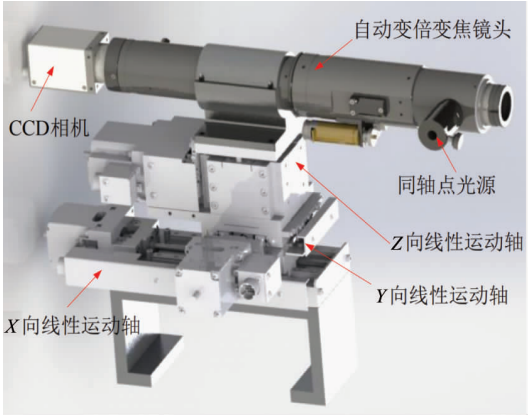


图 2 水平显微视觉结构图

表 1 水平显微视觉参数

水平显微视觉	指标	参数值
CCD 相机	分辨率	2 448 × 2 050
	相元尺寸	3.45 × 3.45 μm
	最大帧率	15 fps
自动变倍 变焦镜头	放大倍率	1.74 ~ 21X
	工作距离	50 mm
	视场范围	6.33 ~ 0.52 mm

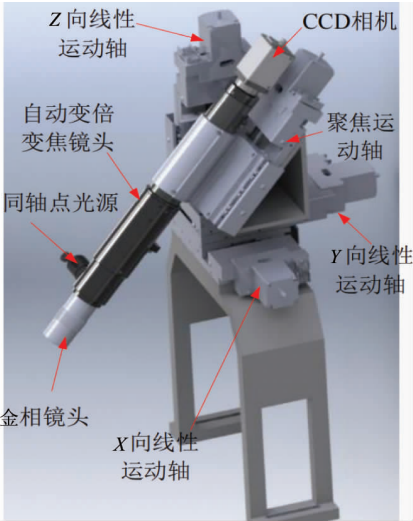


图 3 倾斜显微视觉结构图

表 2 倾斜显微视觉参数

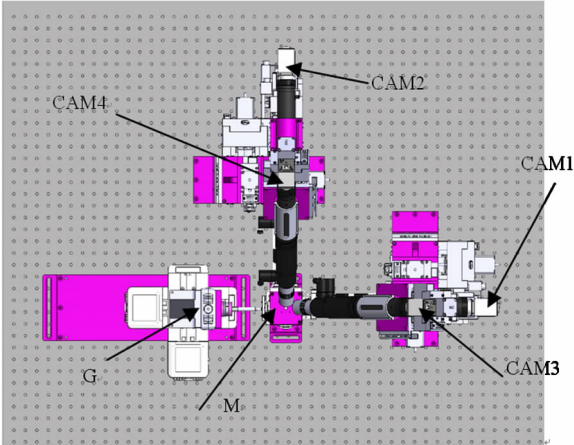
倾斜显微视觉	指标	参数值
CCD 相机	分辨率	2 448 × 2 050
	相元尺寸	3.45 × 3.45 μm
	最大帧率	15 fps
自动变倍 变焦镜头	放大倍率	5.54 ~ 66.63X
	工作距离	33 mm
	视场范围	1.99 ~ 0.17 mm

4 路显微视觉都配置了光照强度可软件控制的同轴光源,可根据外界环境的变化调整镜头视场内的明暗程度。这对高倍率显微视觉实现对微球微孔的聚焦是十分重要的。此外,2 个水平背光光源也可通过软件控制光照强度,为两路水平显微视觉提供背光照明。微球调整平台上有朝上的背光光源,可使得微球的背景更加明亮,有利于微球边缘与背景的区分。

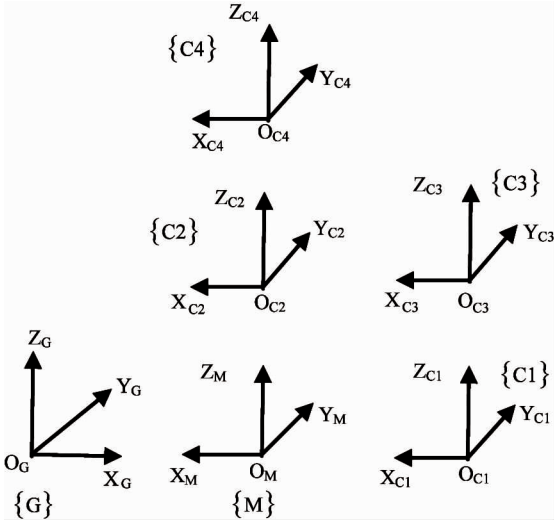
微球调整平台为具有 2 个旋转自由度的转台,其绕 X 轴旋转,有效行程为 $\pm 4^\circ$,绕 Y 轴旋转,有效行程为 $\pm 3^\circ$ 。

微管夹持器固定在具有 3 个平移自由度的操作手上,其位移精度为 1 μm。微管夹持器采用吸附方式将微管固定。

该系统俯视图如图 4(a) 所示,CAM1 和 CAM2



(a) 系统俯视图



(b) 系统坐标系

图 4 微管微球装配系统

表示水平方向的低倍率显微相机, CAM3 和 CAM4 表示倾斜高倍率显微相机, G 为微管操作手, M 为微球调整平台, 尺寸为 70 mm × 70 mm。图 4(b) 为系统坐标系图, 根据右手系规则建立微管操作手的坐标系 $\{G\}$, 其 X_G 、 Y_G 和 Z_G 分别为对应的 3 个运动轴的方向。 $\{C1\}$ 为水平低倍率显微相机 CAM1 的运动机构的坐标系, $\{C2\}$ 为水平低倍率显微相机 CAM2 的运动机构的坐标系, $\{C3\}$ 为倾斜高倍率显微相机 CAM3 的运动机构的坐标系, $\{C4\}$ 为倾斜高倍率显微相机 CAM4 的运动机构的坐标系, $\{M\}$ 为微球调整平台的坐标系。6 个坐标系的 X 轴、 Y 轴相互平行, Z 轴相互平行且同向。图 5 为该系统的实物图。图 6(a) 为微管实物图, 图 6(b) 为在调整台上微球微管对比图。



图 5 系统实物图

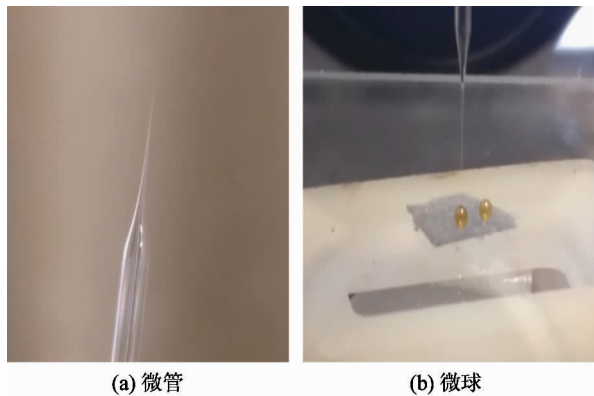


图 6 微管微球实物图

2 系统标定及控制流程

2.1 系统的标定

在微管的粗定位过程中, 需要两路水平的显微视觉进行在线检测并反馈信息。因此, 需要对两台水平方向的低倍率显微相机 CAM1 与 CAM2 进行基于主动运动的图像雅可比矩阵的标定。在微管与微孔对准时, 需要对两台倾斜高倍率显微相机 CAM3 与 CAM4 进行基于主动运动的图像雅可比矩阵的标定。4 台显微相机的标定方法相同, 下面以显微相机 CAM1 为例进行详细介绍。

移动显微相机 CAM1, 使微管进入视野并对微管进行聚焦, 以微管末端中点作为特征点。使微管末端中点保持在聚焦平面上, 使微管操作手的运动方向平行于平面 $Y_G O_G Z_G$, 并记录微管操作手的位移增量 $[\Delta y_{Gi} \ \Delta z_{Gi}]^T$ 以及微管末端中点在 CAM1 中的图像坐标的增量 $[\Delta u_{i1} \ \Delta v_{i1}]^T$ 。重复运动 n 次获得 n 组数据, 以最小二乘法求解式(1)中的 J_1 矩阵。

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{i1} & \Delta u_{i2} & \cdots & \Delta u_{in} \\ \Delta v_{i1} & \Delta v_{i2} & \cdots & \Delta v_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{111} & J_{112} \\ J_{121} & J_{122} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y_{G1} & \Delta y_{G2} & \cdots & \Delta y_{Gn} \\ \Delta z_{G1} & \Delta z_{G2} & \cdots & \Delta z_{Gn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $[\Delta y_{Gi} \ \Delta z_{Gi}]^T$ 为微管操作手第 i 次运动的位移增量; $[\Delta u_{i1} \ \Delta v_{i1}]^T$ 为微管末端中点在 CAM1 中第 i 次的图像坐标增量, J_1 为微管操作手运动到微管末端中点在 CAM1 中图像特征变化之间的图像雅可比矩阵。

在进行微球微管的装配过程中, 4 台显微相机的运动机构需要频繁运动, 对目标进行定位和聚焦。因此, 有必要对每台显微相机与其各自的运动机构建立基于图像雅可比矩阵的相对测量模型。目标位于显微相机视场内, 有利于将目标快速准确地定位到指定位置。4 个显微相机的标定方法相同, 下面以水平方向的低倍率显微相机 CAM1 为例进行说明。驱动显微相机 CAM1 的运动机构, 使微球位于视场中心位置并对微球最大圆周线处进行聚焦。使相机在 $Y_{C1} O_{C1} Z_{C1}$ 平面上运动, 可保持相机的运动方向与聚焦平面平行, 在 Y_{C1} 和 Z_{C1} 方向运动显微相机

CAM1 并记录下显微相机 CAM1 的位移增量 $[\Delta y_{Ci} \Delta z_{Ci}]^T$ 与微球球心在图像上的坐标增量 $[\Delta u_{cam1} \Delta v_{cam1}]^T$,经过 n 次运动获得 n 组数据,以最小二乘法求解式(2)中的矩阵 H_1 。

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{cam11} & \Delta u_{cam12} & \cdots & \Delta u_{cam1n} \\ \Delta v_{cam11} & \Delta v_{cam12} & \cdots & \Delta v_{cam1n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{111} & H_{112} \\ H_{121} & H_{122} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y_{C11} & \Delta y_{C12} & \cdots & \Delta y_{C1n} \\ \Delta z_{C11} & \Delta z_{C12} & \cdots & \Delta z_{C1n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $[\Delta y_{Ci} \Delta z_{Ci}]^T$ 为显微相机 CAM1 的第 i 次的位移增量, $[\Delta u_{cam1i} \Delta v_{cam1i}]^T$ 为图像上微球球心的第 i 次的图像坐标增量, H_1 为 CAM1 运动机构的运动与微球球心图像特征变化之间的图像雅可比矩阵。

为使高倍率显微相机能快速地对微球进行定位,还需要对低倍率显微相机运动机构与高倍率显微相机运动机构的相对位置关系进行标定。该标定是为了得到低倍率显微相机 CAM1 的运动机构与高倍率显微相机 CAM3 的运动机构之间的偏差量,以及低倍率显微相机 CAM2 的运动机构与高倍率显微相机 CAM4 的运动机构之间的偏差量。首先将 4 台显微相机的运动机构运动至物理零点,再移动显微相机 CAM1 与显微相机 CAM2 对微球进行定位,使微球球心位于显微相机 CAM1 与 CAM2 的视场中心点,并对微球最大圆周线处进行聚焦。将此时显微相机 CAM1 的运动机构在 X_{C1} 、 Y_{C1} 、 Z_{C1} 方向的位移量记为 $[x_1, y_1, z_1]^T$,将显微相机 CAM2 的运动机构在 X_{C2} 、 Y_{C2} 、 Z_{C2} 方向的位移量记为 $[x_2, y_2, z_2]^T$ 。再控制高倍率显微相机 CAM3 与显微相机 CAM4 的运动机构运动,其聚焦轴不运动。使微球球心位于显微相机 CAM3 与显微相机 CAM4 的视场中心点,并分别对微球最大圆周线处进行聚焦。将显微相机 CAM3 的运动机构在 X_{C3} 、 Y_{C3} 、 Z_{C3} 方向的位移量记为 $[x_3, y_3, z_3]^T$,将显微相机 CAM4 的运动机构在 X_{C4} 、 Y_{C4} 、 Z_{C4} 方向的位移量记为 $[x_4, y_4, z_4]^T$,由此可求出显微相机 CAM1 的运动机构与显微相机 CAM3 的运动机构的偏差量 Δ_{31} ,如式(3)所示。

$$\Delta_{31} = [x_3 - x_1 \quad y_3 - y_1 \quad z_3 - z_1]^T \quad (3)$$

显微相机 CAM2 的运动机构与显微相机 CAM4

的运动机构的偏差量 Δ_{42} 如式(4)所示。

$$\Delta_{42} = [x_4 - x_2 \quad y_4 - y_2 \quad z_4 - z_2]^T \quad (4)$$

Δ_{31} 和 Δ_{42} 这两个偏差量为固定偏差量,只需测量一次。

2.2 系统的控制策略和装配流程

微球微管装配系统采用的控制策略是:先用水平方向低倍率显微视觉对微球及微管进行粗定位,并测量微管的姿态向量,后在水平低倍率显微视觉的引导下用倾斜高倍率显微视觉对微球进行快速精确定位并测量、调整微球的姿态,快速实现微球姿态的精确调整及微管与微球的精密对准与装配。

装配流程如图 7 所示,首先将 4 台显微相机的运动机构运动至物理零点,再大步长移动两台水平的低倍率显微相机 CAM1、CAM2 搜寻到微球。当微球进入显微相机 CAM1 与 CAM2 的视场后,分别得到微球球心与显微相机视场中心点的图像偏差,根据显微相机运动机构的运动与微球球心图像特征变化之间的图像雅可比矩阵 H_1 和 H_2 的逆,得到显

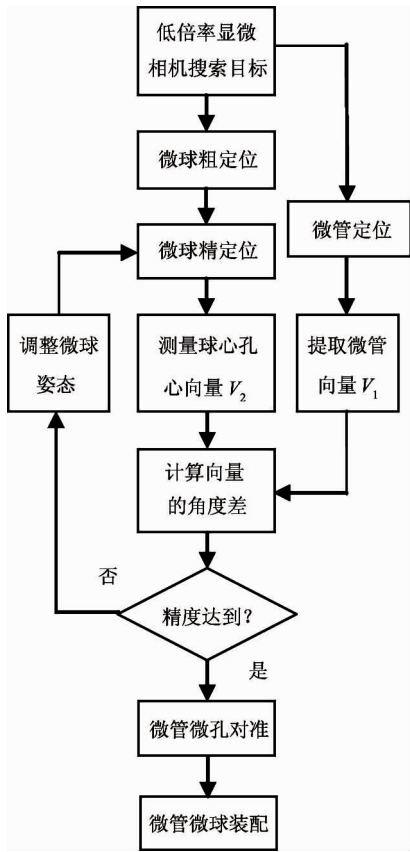


图 7 装配系统流程图

微相机 CAM1 与 CAM2 的运动机构的位移量,控制显微相机运动,使得微球球心位于显微相机 CAM1 与 CAM2 的视场中心点,控制显微相机沿聚焦轴方向运动,并在微球边缘的 ROI 区域内根据图像的清晰度评价函数计算出函数值,函数值最大处即为微球最大圆周线处,停止显微相机运动,完成对微球最大圆周线处的自动聚焦。读取显微相机 CAM1 运动机构的位移量 $[x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}]^T$ 与显微相机 CAM2 运动机构的位移量 $[x_{c2}, y_{c2}, z_{c2}]^T$,结合式(3)与式(4)可以计算出显微相机 CAM3 与显微相机 CAM4 的运动机构的位移量,如式(5)与式(6)所示。

$$\begin{bmatrix} x_{c3} \\ y_{c3} \\ z_{c3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \end{bmatrix} + \Delta_{31} = \begin{bmatrix} x_{c1} + x_3 - x_1 \\ y_{c1} + y_3 - y_1 \\ z_{c1} + z_3 - z_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_{c4} \\ y_{c4} \\ z_{c4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{c2} \\ y_{c2} \\ z_{c2} \end{bmatrix} + \Delta_{42} = \begin{bmatrix} x_{c2} + x_4 - x_2 \\ y_{c2} + y_4 - y_2 \\ z_{c2} + z_4 - z_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $[x_{c3}, y_{c3}, z_{c3}]^T$ 为显微相机 CAM3 的运动机构的位移量, $[x_{c4}, y_{c4}, z_{c4}]^T$ 为显微相机 CAM4 的运动机构的位移量。利用式(5)与式(6)的计算结果,可实现高倍率显微相机对微球的快速定位。

移动微管操作手,将微管移入水平低倍率显微相机的视场中,得到微管末端中点与微球球心的图像偏差,根据微管操作手运动到微管末端中点在 CAM1 与 CAM2 中图像特征变化之间的图像雅可比矩阵 J_{12} 的逆,得到微管操作手的位移增量,将微管末端中点移动到微球上方合适位置。 J_{12} 是 J_1 和 J_2 组合形成的图像雅可比矩阵。利用两路水平低倍率显微视觉提取微管向量时,需要对微管聚焦,并在显微相机 CAM1 与 CAM2 中提取微管边缘,得到微管中线在显微相机 CAM1 中的向量 V_{c1} 及在显微相机 CAM2 中的向量 V_{c2} ,耦合向量 V_{c1} 与 V_{c2} ,可得到微管轴线向量 V_1 。

在高倍率显微相机 CAM3 与 CAM4 视场中,分别获取微球球心与视场中心点的图像偏差,根据显微相机运动机构的运动与微球球心的图像特征变化之间的图像雅可比矩阵 H_3 和 H_4 的逆,得到显微相

机的位移量,移动显微相机使微球球心位于视场中心点,并对微球最大圆周线处聚焦,完成微球的精确定位。

通过高倍率显微相机的主动运动,对微球球心与微孔孔心进行精确定位,得到微球球心与孔心的相对位置,并计算球心孔心的向量 V_2 。其中,微孔的定位采用先粗定位后精定位的策略。由于微孔直径与微球直径相差较大,无法在同一倍率下清晰呈现微球轮廓与微孔边缘的细节特征,所以在对微孔进行精确定位时,必须增加放大倍率。具体操作方法为:移动高倍率显微相机运动,使微孔在视场中位于光轴中心点,避免放大后微孔移出视野。增加放大倍率后使显微相机沿聚焦轴方向运动,对微孔聚焦并对微孔孔心进行精确定位。

获得 V_2 向量,计算 V_1 与 V_2 的角度偏差 $\alpha = \arccos(V_1^T V_2)$,若偏差角 α 小于期望精度 (0.2°) 的误差要求,则完成微球姿态的调整,若偏差角 α 大于期望的误差,通过驱动微球调整平台绕 X_M 轴及 Y_M 轴转动,调整微球姿态。在偏差角 $\alpha < 0.2^\circ$ 时,微球姿态调整完成。

在两路水平低倍率显微视觉的引导下,将微管末端中点移入两台高倍率显微相机视场中。在两台高倍率显微相机中,测量微管末端中点与微孔中心的图像坐标偏差,根据微管操作手运动与微管末端中点图像特征变化之间的图像雅可比矩阵 J_{34} 的逆,得到微管操作手的位移增量,移动微管操作手,完成微管与微球的对准与装配。 J_{34} 是 J_3 和 J_4 组合形成的图像雅可比矩阵。

3 系统操作界面及硬件集成

微球微管装配系统的操作界面由两大部分组成,如图 8 所示,上面部分是 4 台显微相机的图像显示区域及相机参数设置区域,下面是操作区域和系统状态显示区域。操作区又分为 3 个标签页,包括操作手及光源控制、相机运动控制和装配流程控制。其中操作手及光源控制标签页包含微管操作手运动控制、微球调整平台旋转控制和光源光照强度控制;相机运动控制标签页包含 4 台显微相机的运动机构

的控制;装配流程控制标签页包含系统初始化功能键、微球聚焦功能键、微管微球对准等功能键。



图 8 系统操作界面

微球微管装配系统硬件集成如图 9 所示,位移控制器可以控制显微相机的运动机构、微管操作手、微球调整平台的运动,光源控制器可以控制显微相机的同轴光源及背光光源的光强变化,变倍变焦控制器可以控制显微相机的变倍变焦,显微相机将采集到的图像数据通过图像采集卡传送到工控机中。工控机与光源控制器、变倍变焦控制器、位移控制器之间通过串口进行通信。

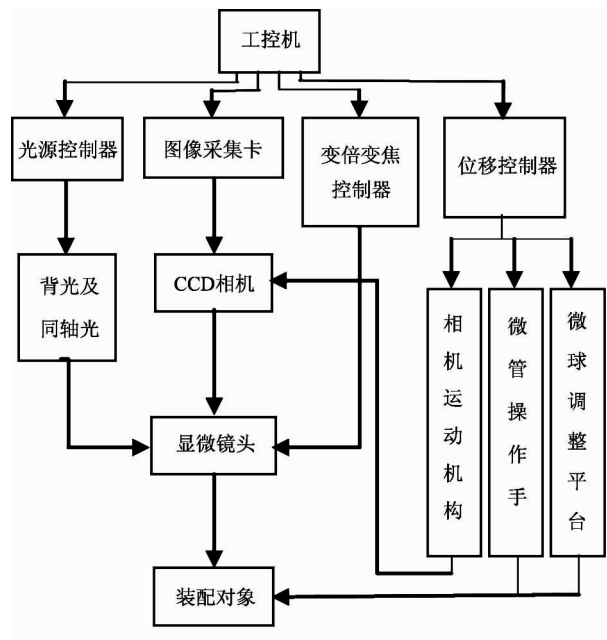


图 9 系统硬件集成图

4 实验结果

使微管末端中点在显微相机 CAM1 和 CAM2 的聚焦平面上,移动微管操作手分别在平面 $Y_cO_cZ_c$ 和平面 $X_cO_cZ_c$ 上运动 10 次,得到微管操作手运动量与微管末端中点在显微相机中图像特征变化的实验数据如下。

利用表 3 数据,用最小二乘法求得微管操作手运动与微管末端中点在 CAM1 中图像特征变化之间的图像雅可比矩阵 J_1 。

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0.1989 & -0.0149 \\ -0.0033 & -0.2000 \end{bmatrix}$$

表 3 微管操作手运动量与 CAM1 中特征点图像特征变化量

编号	1	2	3	4	5
$\Delta y_c(\mu m)$	100	150	200	250	300
$\Delta z_c(\mu m)$	0	0	0	0	0
$\Delta u_{rl}(\text{像素})$	21	31	41	46	61
$\Delta v_{rl}(\text{像素})$	-3	0	-3	-3	3
编号	6	7	8	9	10
$\Delta y_c(\mu m)$	0	0	0	0	0
$\Delta z_c(\mu m)$	100	150	200	250	300
$\Delta u_{rl}(\text{像素})$	-1	-3	-3	-4	-4
$\Delta v_{rl}(\text{像素})$	-21	-30	-42	-48	-60

类似的,可以求得微管操作手运动到微管末端中点与 CAM2 中图像特征变化之间的图像雅可比矩阵 J_2 。

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0.1918 & -0.0024 \\ 0.0000 & -0.2093 \end{bmatrix}$$

矩阵 J_{12} 为 J_1 和 J_2 组合形成的图像雅可比矩阵。 J_{12} 为

$$J_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1989 & -0.0149 \\ 0 & -0.0033 & -0.2000 \\ 0.1918 & 0 & -0.0024 \\ 0.0000 & 0 & -0.2093 \end{bmatrix}$$

使微管末端中点在显微相机 CAM3 和 CAM4 的聚焦平面上,由于显微相机 CAM3 和 CAM4 的聚焦平面为倾斜面,为使微管末端中点保持在聚焦平面,

微管操作手只可在一个自由度方向上运动,即在 CAM3 视场中,微管操作手在 Y_G 方向运动,在 CAM4 视场中,微管操作手在 X_G 方向运动。移动微管操作手分别在两台相机的聚焦平面上运动 10 次,得到微管操作手运动量与微管末端中点在显微相机中图像特征变化的实验数据如下。

利用表 4 数据,用最小二乘法求得微管操作手运动与微管末端中点在 CAM3 中图像特征变化之间的图像雅可比矩阵 J_3 。

$$J_3 = \begin{bmatrix} -0.7463 & 2.1201 & 0.8672 \\ 0.1046 & 0.0890 & -3.2431 \end{bmatrix}$$

类似地,可以求得微管操作手运动到微管末端中点与 CAM4 中图像特征变化之间的图像雅可比矩阵 J_4 。

$$J_4 = \begin{bmatrix} 2.0388 & -0.0065 & 0.0446 \\ -0.2091 & 1.6901 & -1.2338 \end{bmatrix}$$

表 4 微管操作手运动量与 CAM3 中特征点图像特征变化量

编号	1	2	3	4	5
$\Delta x_G(\mu\text{m})$	-30	35	-52	62	-73
$\Delta y_G(\mu\text{m})$	20	30	40	50	60
$\Delta z_G(\mu\text{m})$	-20	30	-40	50	-60
$\Delta u_G(\text{像素})$	46	67	91	101	129
$\Delta v_G(\text{像素})$	67	-93	122	-150	195

利用表 5 数据,用最小二乘法求得 CAM1 运动机构的运动与微球球心图像特征变化之间的图像雅可比矩阵 H_1 。

$$H_1 = \begin{bmatrix} -0.2011 & 0.0033 \\ -0.0173 & 0.2007 \end{bmatrix}$$

类似地,可以求得显微相机 CAM2、CAM3、CAM4 的运动机构的运动与微球球心图像特征变化之间的图像雅可比矩阵 H_2 、 H_3 、 H_4 。

$$H_2 = \begin{bmatrix} -0.2040 & 0.0033 \\ -0.0073 & 0.2007 \end{bmatrix}$$

$$H_3 = \begin{bmatrix} -0.4204 & -0.0138 \\ 0.0147 & 0.2484 \end{bmatrix}$$

$$H_4 = \begin{bmatrix} 0.4220 & -0.0084 \\ -0.0084 & 0.2569 \end{bmatrix}$$

表 5 CAM1 的运动量与微球球心图像特征变化量

编号	1	2	3	4	5
$\Delta y_{Cl}(\mu\text{m})$	100	150	200	250	300
$\Delta z_{Cl}(\mu\text{m})$	0	0	0	0	0
$\Delta u_{cam1}(\text{像素})$	-20	-30	-40	-51	-60
$\Delta v_{cam1}(\text{像素})$	-3	-3	-3	-3	-6
编号	6	7	8	9	10
$\Delta y_{Cl}(\mu\text{m})$	0	0	0	0	0
$\Delta z_{Cl}(\mu\text{m})$	100	150	200	250	300
$\Delta u_{cam1}(\text{像素})$	0	0	1	1	1
$\Delta v_{cam1}(\text{像素})$	21	30	39	51	60

4 台显微相机对微球进行定位聚焦,读取其物理位置,数据如表 6。

表 6 初始化后 4 台显微相机运动机构的位置

编号	CAM1	CAM2	CAM3	CAM4
$X(\mu\text{m})$	9 810	2 860	7 885	2 402
$Y(\mu\text{m})$	590	8 600	-860	-5 590
$Z(\mu\text{m})$	2 744	2 950	-7 509	-5 310

由表 6 求得:

$$\Delta_{31} = \begin{bmatrix} -1\ 925 & -1\ 450 & -10\ 253 \end{bmatrix}^T,$$

$$\Delta_{42} = \begin{bmatrix} -458 & -14\ 190 & -8\ 260 \end{bmatrix}^T。$$

微管末端中点与微孔自动对准误差如表 7 所示。表中 Δx 、 Δy 、 Δz 表示微管末端中点移入显微相

表 7 微管微孔初始相对位置与对准误差

编号	1	2	3	4	5
$\Delta x(\mu\text{m})$	46.20	63.05	42.08	45.59	55.29
$\Delta y(\mu\text{m})$	44.50	59.56	45.24	58.43	59.93
$\Delta z(\mu\text{m})$	64.20	71.23	58.54	56.33	57.54
$e_x(\mu\text{m})$	0.00	0.95	0.00	0.52	0.95
$e_y(\mu\text{m})$	-0.56	-0.56	0.56	-0.56	-0.56
$e_z(\mu\text{m})$	0.00	0.13	0.43	0.00	0.00
编号	6	7	8	9	10
$\Delta x(\mu\text{m})$	48.50	88.27	82.45	74.69	69.84
$\Delta y(\mu\text{m})$	40.37	-68.98	-62.85	-64.89	-71.03
$\Delta z(\mu\text{m})$	63.57	48.80	58.35	62.61	60.50
$e_x(\mu\text{m})$	0.95	0.00	0.42	0.25	0.25
$e_y(\mu\text{m})$	-0.56	0.56	-0.52	-0.52	-0.56
$e_z(\mu\text{m})$	0.51	0.00	0.00	0.23	0.23

机视场后,测得的微管末端中点距微孔孔心的初始距离; e_x 、 e_y 、 e_z 为自动对准后,测得的微管末端中点与孔心的误差,其中 e_x 、 e_z 由显微相机 CAM4 测得 e_y 由显微相机 CAM3 测得。图 10 为微管微孔对准误差示意图,如图所示,自动对准过程实现了微管末端中点与微孔孔心高精度地对准,其对准误差小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。

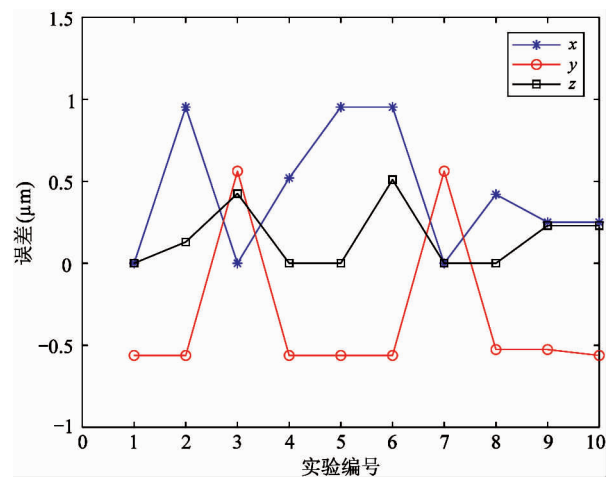


图 10 微管微球对准误差图

实验中所用微球的球心孔心向量 V_2 与微管轴线向量 V_1 的初始偏差角在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 范围内。经过微球姿态调整后,微管轴线向量 V_1 与球心孔心向量 V_2 的偏差角 $\alpha < 0.2^\circ$,符合误差要求。

实验过程中采集的图像如图 11 ~ 14 所示。图 11 为在两路水平显微视觉中对微管中线的提取,图中微管边缘完整清晰,准确地实现了对微管边缘及中线的提取。图 12 所示为在两路倾斜显微视觉中对微球轮廓的特征提取,通过图像的降噪处理,采用阈值法和梯度向量法,实现了对微球轮廓的准确探测,由最小二乘法拟合的微球边缘与微球轮廓完全吻合。图 13 为在两路倾斜显微视觉中微管末端中点与微孔孔心的定位,对微孔聚焦后,能够准确地探测到微孔边缘特征并能够准确标出微孔孔心,微管末端进入聚焦平面后,也能够准确地对微管末端进行定位。图 14 所示为完成装配后微管微球在 4 台显微相机中的图像。如图 14(c) 与图 14(d) 所示,微管精准地插入微孔且位于微孔中心位置。

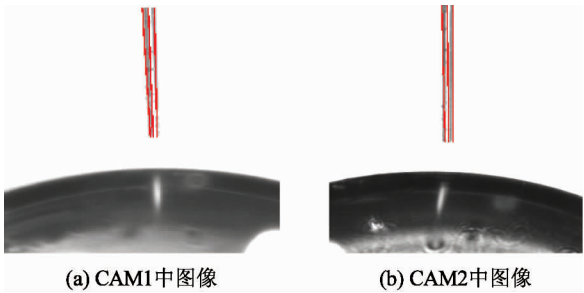


图 11 微管中线向量的提取

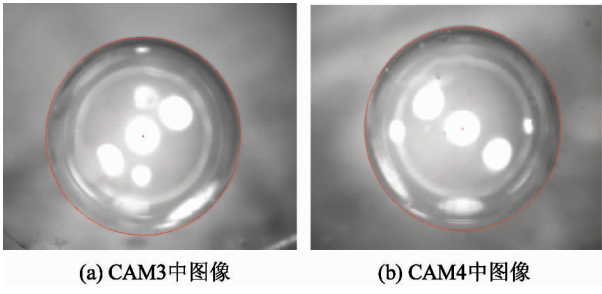


图 12 微球轮廓的特征提取

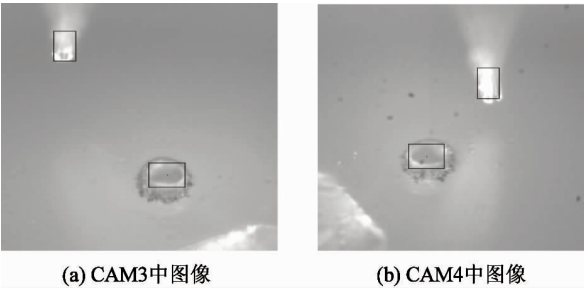


图 13 微管末端中点与微孔孔心的定位

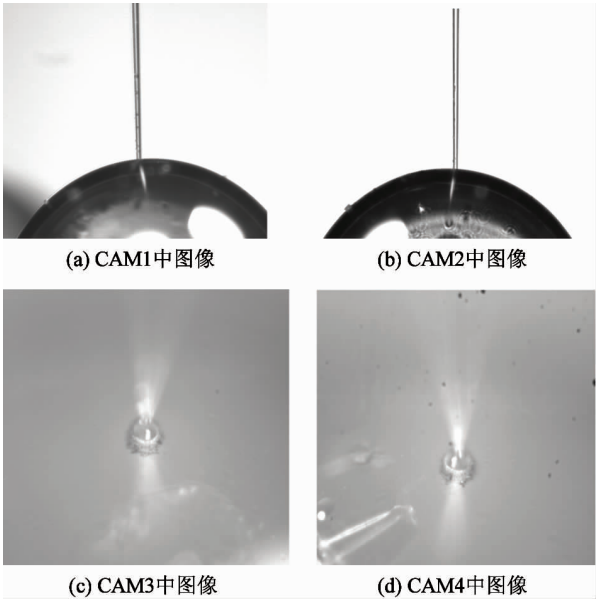


图 14 装配完成后的图像

实验表明,本文的微球微管装配系统,可快速精准地完成微球微管的精密装配。

5 结 论

在装配实验中,利用本文微球微管装配系统,基于4路显微视觉的在线检测,实现了微管与微球的精确对准与精密装配。实验结果表明,采用水平低倍率显微视觉与倾斜高倍率显微视觉相结合,对微球先粗定位再精定位,主动运动高倍率显微相机测量球心孔心向量的方法,能够顺利实现直径为900 μm 的微球的姿态测量及调整。利用高倍率显微相机的视觉信息,能够实现直径10 μm 的微管与直径13 μm 的微孔的对准与装配。

该微装配系统还存在以下一些问题需要进一步的优化:

(1) 在对微球、微孔进行边缘特征提取时,高倍率显微相机视场内的明亮程度受外界环境影响比较大,且会影响特征提取的准确性。操作台附近的轻微震动都会引起微球的晃动。这需要进一步对操作台进行优化,消除外界环境的干扰。

(2) 进一步优化控制程序并精简装配流程,提高系统的自动化程度及装配效率。

参考文献

- [1] 沈飞,徐德,唐永建,等. 微操作/微装配中微力觉的测量与控制技术研究现状综述[J]. 自动化学报, 2014, 40(5):785-797
- [2] Li F, Xu D, Shi Y, et al. Development of vision based force measurement[C]. In: Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, Hefei, China, 2012. 3769-3773 (EI)
- [3] Liu S, Xu D, Liu F, et al. Relative pose estimation for alignment of long cylindrical components based on microscopic vision[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mecha-*

tronics, 2016, 21(3): 1388- 1398

- [4] 李福东,徐德,史亚莉,等. 微管与微球装配中的姿态测量与姿态对准[J]. 高技术通讯, 2014,24(4): 401-406
- [5] 张娟,吴文荣,毕列. 微颗粒的三维空间跨尺度装配方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1):115-122
- [6] 史亚莉,张正涛,徐德. 跨尺度微管微球三维半自动装配点胶系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3121-3128
- [7] 李海鹏,邢登鹏,张正涛,等. 宏微结合的多机械手微装配机器人系统[J]. 机器人, 2015, 37(1): 35-42
- [8] 唐永龙,张之敬,张晓峰,等. 微装配正交精确对准系统的设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1542-1550
- [9] Liu S, Xu D, Zhang D, et al. High precision automatic assembly based on microscopic vision and force information[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(1): 382-393
- [10] Das A N, Zhang P, Lee W H, et al. $\mu 3$: Multiscale, deterministic micro-nano assembly system for construction of on-wafer microrobots[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 2007. 10-14
- [11] Wason J D, Wen J T, Choi Y M, et al. Vision guided multi-probe assembly of 3D microstructures [C]. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taiwan, China, 2010. 5603-5609
- [12] Yang G, Gaines J, Nelson B J. A flexible experimental workcell for efficient and reliable wafer-level 3D micro-assembly[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001. 133-138
- [13] Xu D, Li F, Zhang Z, Shi Y, et al. Characteristic of monocular microscope vision and its application on assembly of micro-pipe and micro- Sphere[C]. In: Proceedings of the 32st Chinese Control Conference, Xi'an, China, 2013. 5758-5763

Precision assembly for micro-sphere and micro-tube based on microscopic vision

Qu Jiawang^{* **}, Xu Jiazhong^{*}, Zhang Dapeng^{**}, Xu De^{**}

(^{*} School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

(^{**} Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract

An assembly system based on microscopic vision is designed for the assembly of micro-sphere and micro-tube. It consists of four microscopic cameras and their motion adjusting mechanisms, an operation manipulator of micro-tube, an adjusting platform of micro-sphere, and grippers. The two microscopic cameras with low magnification are orthogonally arranged on the horizontal plane, which are used for the coarse location of components. The other two microscopic cameras with high magnification are orthogonally arranged on an inclined plane, which are used for the fine location of components. The adjusting platform of micro-sphere is used to adjust the micro-sphere's pose. The operation manipulator of micro-tube is employed to align the micro-tube and the micro-sphere and insert the micro-tube into the micro-hole of micro-sphere. The coarse location of micro-sphere and the measurement of the micro-tube's pose are realized with the vision information from the two microscopic cameras with low magnification. The vision information from the two microscopic cameras with high magnification is utilized to measure the micro-sphere's pose, which is used to control the movement of the adjusting platform of micro-sphere in order to realize the pose alignment of the micro-sphere and the micro-tube. It is also employed to measure the relative position error between the micro-tube and the micro-hole of micro-sphere, which is used to control the movement of the operation manipulator of micro-tube in order to realize the position alignment of the micro-tube and the micro-hole. In the experiments with the designed assembly system, the micro-tube with the end size of 10 μm in diameter is successfully inserted into the 13 μm micro-hole in diameter. The micro-tube and the micro-sphere are precisely assembled.

Key words: micro-assembly, micro-sphere positioning, micro-vision, sphere tube alignment