

基于显微视觉的微零件在线检测与装配策略研究^①张娟^② 张正涛 徐德

(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 基于搭建的微装配实验平台,提出了一种基于三路显微视觉的粗精结合的微零件在线检测与装配策略,实现了对 mm 级复杂几何结构微零件的在线检测与装配。该策略通过粗调流程和精调流程分别在最小放大倍数和较高放大倍数下实现对微零件相对位姿的检测与调整,从而实现微零件位姿对准与装配。基于图像特征区域跟踪,提出了一种自动变倍算法,在保证微零件特征区域位于视野范围内的同时,实现了对显微视觉系统的自动变倍。基于对微零件成像特征的分析,提出了基于图像特征的微零件相对位姿检测算法,实现了对微零件相对位姿的在线检测。实验结果表明,姿态检测误差小于 0.5° ,位置检测误差小于 $5\mu\text{m}$ 。实验结果验证了所提算法的有效性。

关键词 位姿检测,自动变倍,装配策略,显微视觉,微装配

0 引 言

随着微机电系统的快速发展,对微装配技术的需求日益迫切。精确感知与控制微目标物在三维空间中的位置,对实现微装配自动化是十分必要的。显微视觉是微装配领域中应用最广泛的对微目标的感知方式^[1-4]。然而,显微视觉系统存在着景深短、视野小的问题,使得微装配比宏观装配面临更多的挑战,国内外对此进行了许多研究。文献[5]提出利用两种不同视觉系统实现微零件装配,分别基于常规视觉和显微视觉实现微器件在大空间和小空间范围内的运动控制。该装配策略实现了针尖与针孔空间位置的对准,但装配系统结构简单,不适合复杂几何结构微器件的装配。文献[6]针对微零件姿态调整过程中容易移出视野的问题,基于对微零件图像位置的实时跟踪,提出了一种运动控制策略:通过控制工作平台做二维平移运动,保证微零件在姿态调整过程中始终处于视野范围内。该策略实现了硅片滚轴姿态调整过程中始终位于视野指定位置的目标,但由于微装配工作空间往往较小,工作平台运动过程中容易和其他设备发生碰撞,因此适用范围有限。文献[7]提出了一种显微视觉系统主动变倍策

略,以解决微装配过程中显微视觉系统大视野、长景深与高分辨率相矛盾的问题。装配过程中,采用粗精调整相结合的装配策略。粗调阶段,根据 $X-Y$ 平面图像中孔器件的图像位置及其聚焦函数值,控制显微镜头变倍速度,保证孔器件向轴器件运动过程中始终清晰的呈现在视野范围内;精调阶段,孔器件在高分辨率视觉系统引导下,向轴器件运动,最终实现高精度轴孔装配。文献[8]基于文献[7],将视场及景深对变倍速度的约束,引入到人工势场的概念中,建立了基于人工势场的变倍控制模型,实现了对显微镜头的变倍控制。该变倍控制策略实现了微装配过程中对显微视觉系统的自动变倍,但装配过程只涉及孔器件的三维空间位置和滚轴姿态调整,并且轴孔零件结构简单,因此不适用于复杂零件的装配。

为了实现复杂几何结构微零件的三维空间装配,本文提出了一种基于三路显微视觉系统的粗精调整结合的微零件装配策略。该装配策略基于对微零件图像特征的在线提取,实现了对 mm 级微零件的高精度装配。粗调阶段,在低放大倍数视觉系统引导下,实现微零件空间位姿的粗对准,并且基于对微零件图像特征区域的跟踪,实现显微视觉系统放大倍数的自动调整;精调阶段,在高放大倍数视觉系

① 国家自然科学基金(61105036 和 61227804)资助项目。

② 女,1985 年生,博士;研究方向:精密视觉测量与控制,微装配;联系人,E-mail:juan.zhang@ia.ac.cn
(收稿日期:2012-11-05)

统引导下,实现对微零件空间相对位姿的高精度检测与调整。

1 微装配平台

1.1 平台硬件结构

微装配平台共由5部分组成(如图1所示),包括三路显微视觉系统(1、2、3号显微视觉系统)、一个操作台和一个机械臂。1号显微视觉系统由1个CCD、1个变倍变焦显微镜头和1个环形光源组成;2号显微视觉系统由1个CCD、1个变倍变焦镜头、1个环形光源和1个背光光源组成,背光光源结合环形光源在清晰呈现物体边缘的同时又能够呈现物体的纹理;3号显微视觉系统由1个CCD、1个变倍变焦显微镜头和1个同轴光源组成。

三路显微视觉系统分别具有3个电动平移度和2个手动旋转自由度(俯仰,偏转)。操作台具有俯仰、偏转两个电动旋转自由度、1个手动旋转自由度(滚轴)和1个Z向电动平移自由度。机械臂具有3个电动平移和3个手动旋转自由度。三路显微视觉系统在空间位置上彼此近似正交排布。

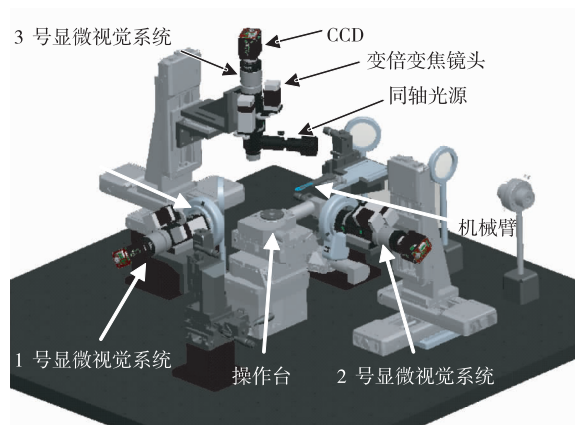
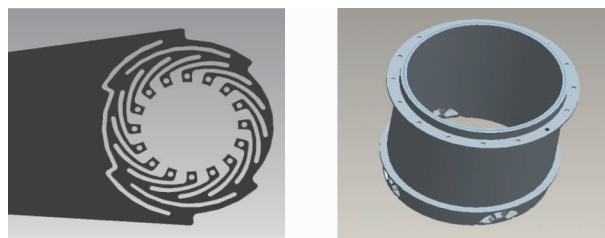


图1 微装配系统

1.2 微零件结构

硅臂如图2(a)所示,为薄片结构,末端为环形结构,均匀分布了16个大小相同的特征圆孔。套筒如图2(b)所示,底部有4个均匀分布的扇形窗,顶部有16个均匀分布的特征圆孔。套筒高度约为6mm,外径约为7mm。



(a) 硅臂

(b) 套筒

图2 硅臂和套筒物理结构

套筒位于操作台上,硅臂位于机械臂末端。三路显微视觉系统、硅臂、套筒的近似空间位姿关系如图3所示。基于三路显微视觉系统在线检测硅臂和套筒的空间相对位姿($\Delta T_x, \Delta T_y, \Delta T_z, \Delta \theta_x, \Delta \theta_y, \Delta \theta_z$),基于检测结果调整二者空间位姿,从而实现微零件装配。

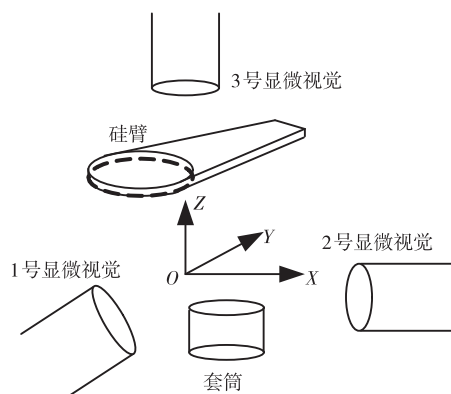


图3 微零件与显微视觉系统的空间位姿关系示意图

2 装配策略

对于显微视觉系统,放大倍数越大则视场越小,景深越短;反之,放大倍数越小则视场越大,景深越长^[9]。因此,为了实现硅臂和套筒在高放大倍数下的装配,首先在低放大倍数下,实现硅臂和套筒的位姿粗对准,从而保证放大倍数增大时,硅臂和套筒的特征区域均位于视野范围内,最终实现高放大倍数下的位姿对准与装配。

装配策略分为粗调流程和精调流程两部分。粗调流程如下所述:首先,基于1号视觉系统,通过提取硅臂和套筒的几何特征,实现对 $\Delta T_x, \Delta T_z, \Delta \theta_y$ 的检测和调整,调整完毕后,通过调整1号显微视觉系统的空间位置,将硅臂和套筒的特征区域移至视野中心,然后通过自动变倍算法,实现对1号镜头的自动变倍;其次,基于2号视觉系统,实现对 $\Delta T_y, \Delta T_z, \Delta \theta_z$

$\Delta\theta_x$ 的检测和调整,调整完毕后实现对 2 号视觉系统的位置调整和自动变倍;最后,基于 3 号视觉系统,实现对 ΔT_x 、 ΔT_y 、 $\Delta\theta_z$ 的检测和调整,通过调整 3 号视觉系统的位置将特征区域移至视野中心,然后实现对 3 号视觉系统的手动变倍。精调流程在高放大倍数视觉系统引导下,首先顺次实现基于 1 号、2 号、3 号显微视觉引导的硅臂和套筒相对位姿检测与调整,然后基于 2 号显微视觉引导,控制套筒 Z 向运动,最终实现装配。

3 相对位姿检测

通过水平 1 号显微视觉系统检测出相对位姿 ΔT_x 、 ΔT_z 、 $\Delta\theta_y$;通过水平 2 号显微视觉系统通路检测出相对位姿 ΔT_y 、 ΔT_z 、 $\Delta\theta_x$;通过垂直 3 号显微视觉系统检测出相对位姿 ΔT_x 、 ΔT_y 、 $\Delta\theta_z$ 。

3.1 水平视觉引导下的相对位姿检测

硅臂和套筒在 1 号水平显微视觉系统中的投影如图 4 所示。经分析发现,通过提取硅臂和套筒的水平边缘线,可以计算出 ΔT_x 、 ΔT_z 、 $\Delta\theta_y$ 。计算步骤如下:

(1) 划分出硅臂和套筒的图像区域。

(2) 在硅臂图像区域内,通过边缘提取算法提取出硅臂的垂直边缘线 l_1 ,设其斜率为 k_1 ,然后利用几何先验知识,推导出硅臂的中轴线方程 l_2 ;根据 l_2 的图像位置确定水平边缘线的搜索区域,在搜索区域内采用边缘提取算法提取出水平边缘线 l_3 ;求出 l_2 和 l_3 的图像交点 $A(x_1, y_1)$ 。

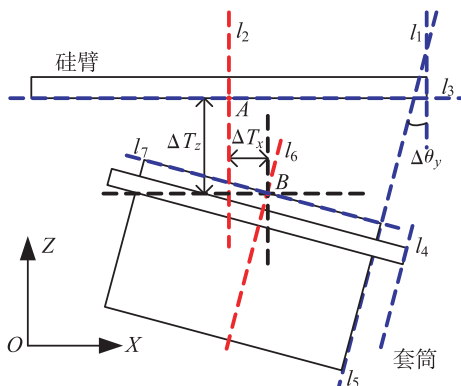


图 4 水平视觉引导下的相对位姿检测示意图

(3) 在套筒图像区域内,首先通过边缘提取算法提取出套筒垂直边缘线 l_4 ;然后根据 l_4 的图像位置,结合几何先验知识,定位并提取套筒垂直边缘线 l_5 ,设其斜率为 k_2 ;最后根据套筒几何先验知识推导

出套筒中轴线 l_6 。

(4) 根据 l_6 的图像位置确定套筒水平边缘线的搜索区域,采用边缘提取法定位并提取套筒水平边缘线 l_7 ;求出 l_6 和 l_7 的交点 $B(x_2, y_2)$ 。

(5) 二者的垂直度 $\Delta\theta_y$ 通过斜率 k_1 、 k_2 计算获得,计算公式为

$$\Delta\theta_y = \arctan[(k_1 - k_2)/(1 + k_1 k_2)] \quad (1)$$

ΔT_x 、 ΔT_z 通过 A、B 点的图像坐标计算获得,计算公式为

$$\begin{cases} \Delta T_x = \lambda_1(x_2 - x_1) \\ \Delta T_z = \lambda_1(y_2 - y_1) \\ \lambda_1 = s_1/s_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, λ_1 是从图像空间到笛卡尔空间单位长度的转换系数, s_1 是笛卡尔空间的单位长度, s_2 是对应于图像空间的像素个数。采用同样方案可以实现基于 2 号显微视觉系统的相对位姿检测。

3.2 边缘特征提取

由于显微视觉系统景深短,水平方向观测硅臂和套筒时往往只能部分区域清晰成像,这里提出一种边缘特征提取算法,能够准确定位并提取硅臂和套筒的边缘线。以硅臂垂直边缘线提取为例,提取步骤如下:

(1) 首先采用灰度投影法确定硅臂在图像中的大致区域 S ,然后根据 S 的图像位置,判别垂直边缘线搜索方向,判别公式为

$$S_d = \begin{cases} P, & |x_l - x_c| < |x_r - x_c| \\ N, & |x_l - x_c| \geq |x_r - x_c| \end{cases} \quad (3)$$

其中, S_d 是搜索方向; P, N 分别代表沿 X 轴正向和负向搜索; x_l, x_r 分别为 S 的左右边界在图像中的 X 轴坐标; x_c 为图像中心点的 X 轴坐标。

(2) 将 S 平均分为若干个子区域,沿搜索方向依次检测子区域 $a_r (r=1, 2, \dots, p)$ 。检测过程如下:首先,聚焦子区域 a_r ;其次,二值化子区域 a_r ;最后,将二值化图像向 X 轴方向投影,投影公式为

$$V(i) = \sum_{j=1}^m g(x_i, y_j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其中, m, n 分别为子区域 a_r 的行列数, $g(x_i, y_i)$ 是二值化图像中点 (x_i, y_i) 的值, $V(i)$ 是 x_i 位置对应的灰度投影值。

如果该子区域包含垂直边缘线,则灰度投影图中存在前景区和背景区,前景区是指由一段连续的前景点构成的区域,背景区是指由一段连续的背景点构成的区域。前景点和背景点的判别公式为

$$S(i) = \begin{cases} 1, & V(i) > T \\ 0, & V(i) \leq T \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

其中, $S(i)$ 是 x_i 位置对应的灰度投影值, 如果值为 1, 则 x_i 位置对应前景点, 否则对应背景点; T 是前景点背景点的判别阈值。前景区和背景区的分界位置即为边缘线的粗略位置。

(3) 根据垂直边缘线的粗略位置, 划分局部区域, 聚焦局部区域, 然后采用改进的基于随机抽样一致 (random sample consensus, RANSAC) 的最小二乘直线提取算法提取垂直边缘线^[10]。

以上过程实现了对硅臂垂直边缘线的提取, 水平边缘线的提取与垂直边缘线类似, 搜索方向沿 Z 轴方向。套筒边缘线的提取过程与硅臂边缘线的提取过程类似, 此处不再赘述。

3.3 垂直视觉引导下的相对位姿检测

通过对硅臂和套筒沿 Z 轴方向的投影图像分析发现: 通过提取硅臂和套筒的圆心位置可以实现对相对位置 ΔT_x 、 ΔT_y 的计算; 通过提取硅臂和套筒顶部的 16 个特征孔, 可以实现对旋转自由度 $\Delta \theta_z$ 的计算。这里设计了一种顶部特征提取算法, 可以自动提取出硅臂和套筒的顶部几何特征。

图 5 是硅臂和套筒沿 Z 轴方向的投影示意图, 其中 O_1 、 O_2 分别是硅臂和套筒的圆心, α_i 是硅臂第 i 个特征孔圆心 g_i 与 O_1 连线的夹角, β_j 是套筒第 j 个特征孔圆心 t_j 与 O_2 连线的夹角。硅臂的特征提取算法可分为以下几步:

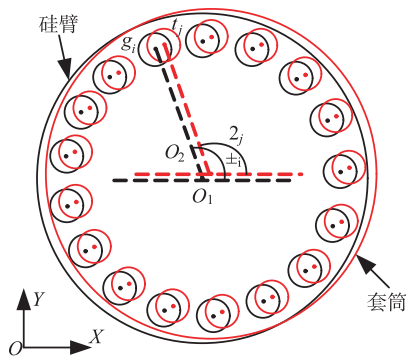


图 5 垂直视觉引导下的相对位姿检测示意图

(1) 采用 Hough 变换实现对硅臂 16 个特征孔的粗提取, 并且根据粗略提取的特征孔圆心位置, 拟合出特征孔所在圆的椭圆方程, 椭圆记为 E_0 , 圆心记为 O_0 。

(2) 从粗略提取的特征孔中选取一个圆心位置 (记为 A_0) 作为特征孔精确提取的起始点, 并根据先验知识获得该特征孔所在的图像区域, 在该图像区

域内采用最小二乘椭圆拟合算法实现对特征孔的精确提取, 圆心记为 A_1 。

(3) 根据 16 个特征孔均匀排列的先验知识, 将该特征孔圆心与圆心 O_0 所在的线段顺时针旋转特定角度, 得到下一个特征孔的图像处理区, 并在该图像处理区中对当前特征孔的圆心进行精确提取。

(4) 不断重复步骤 3, 从而实现对 16 个特征孔的精确提取。

(5) 根据 16 个特征孔的圆心位置, 采用改进的基于 RANSAC 的最小二乘椭圆拟合算法^[10], 拟合出特征孔所在圆的精确椭圆方程, 椭圆记为 E_1 , 圆心记为 O_1 , 该圆心即为硅臂内圆圆心。

以上 5 个步骤即实现了对硅臂顶部图像特征的提取, 套筒 16 个特征孔的提取过程和硅臂特征孔的提取过程类似。套筒内圆圆心 O_2 的提取与 O_1 提取过程不同, 套筒内圆圆心是通过采样套筒外圆边缘点, 采用最小二乘椭圆拟合算法计算得到。

硅臂和套筒的圆心位置确定后, 通过下式计算出相对位置 ΔT_x 、 ΔT_y :

$$\begin{cases} \Delta T_x = \lambda_3(x_4 - x_3) \\ \Delta T_y = \lambda_3(y_4 - y_3) \end{cases} \quad (6)$$

其中 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) 分别是硅臂圆心 O_1 和套筒圆心 O_2 的图像坐标, λ_3 是从图像空间到笛卡尔空间单位长度的转换系数。

通过比较硅臂和套筒相应特征孔的圆心角度计算相对姿态 $\Delta \theta_z$, 计算过程如下:

(1) 计算出 g_i ($i = 1, 2, \dots, 16$) 与 O_1 连线的图像夹角 α_i 。同样计算 t_j ($j = 1, 2, \dots, 16$) 与 O_2 连线的夹角 β_j 。

(2) 比较 α_i 与 β_j ($j = 1, 2, \dots, 16$), 找到与 α_i 差值最小的 β_j , 角度差即为该对特征孔对应的角度差 e_i , 计算公式如下式所示:

$$e_i = \min_{j=1,2,\dots,16} |\alpha_i - \beta_j| \quad i = 1, 2, \dots, 16 \quad (7)$$

(3) $\Delta \theta_z$ 为 16 对特征孔对应的旋转误差均值, 计算公式如下式所示:

$$\Delta \theta_z = (\sum_{i=1}^{16} e_i) / 16 \quad (8)$$

3.4 自动变倍算法

为了保证放大倍数调整后硅臂和套筒的特征区域仍然位于视野范围内, 基于硅臂角点区域跟踪, 提出了一种显微视觉系统自动变倍算法, 实现微装配过程中水平方向显微视觉系统的自动变倍。自动变倍算法分为以下几步:

(1) 聚焦硅臂角点区域 M_0 , 并选取该区域作为匹配模版。

(2) 显微镜镜头变倍电机运动固定步长 L 以增大放大倍数。

(3) 根据先验知识划分出变倍后包含硅臂角点区域的搜索区域 $N(k)$, k 是变倍次数。

(4) 聚焦搜索区域, 并采用模版匹配算法匹配出变倍后的硅臂角点区域 $M(k)$ 。

(5) 判别 $M(k)$ 是否超出限定视野范围 H , 如果没有超出, 则重复步骤 (2) — (5), 否则则停止变倍过程。

变倍电机的运动控制率如式

$$u(k) = \begin{cases} L, & M(k-1) \in H \\ 0, & M(k-1) \notin H \end{cases} \quad (9)$$

所示, 其中, $u(k)$ 是第 k 次变倍时电机的运动控制量, $M(k-1)$ 是第 $k-1$ 次变倍后图像中的硅臂角点区域。

变倍结束后, 通过查询事先标定的电机步长对应表, 获得从图像空间到笛卡尔空间单位长度的转换系数。

4 实验与结果

4.1 实验平台

图 6 是微装配实验平台图像。CCD 传感器 (GC2450) 采集的图像尺寸为 2448×2050 像素, 最大帧率为 15 帧/秒; 显微镜镜头的放大倍数为 $0.71 \sim 4.5$ 倍, 视场范围为 $15.6 \sim 2.44\text{mm}$, 景深范围为 $0.43 \sim 0.04\text{mm}$; 操作台的旋转角度为 10° , 分辨率为 0.02° , 平移量程为 25cm , 分辨率为 $1\mu\text{m}$; 显微视觉系统运动平台、机械手运动平台的最小分辨率均为 $1\mu\text{m}$ 。

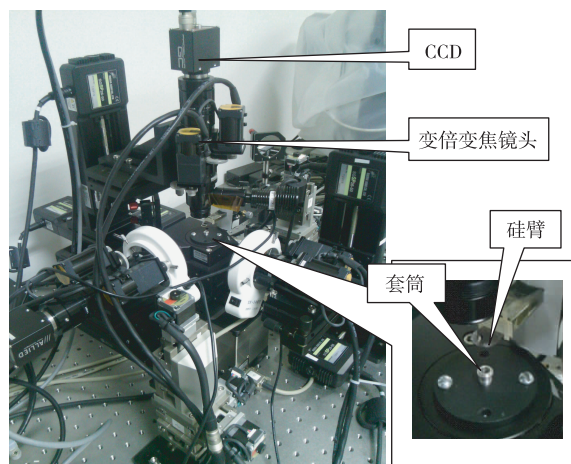


图 6 微装配系统图片

4.2 特征提取和自动变倍

为了实现硅臂和套筒水平方向上的相对位姿检测, 需要分别提取出硅臂和套筒水平方向的图像特征。图 7 是水平视觉系统引导下硅臂和套筒特征提取的过程图片。图 7(a) 是沿着由右向左的方向搜索并定位硅臂垂直边缘线所在的图像区域; 图 7(b) 是提取硅臂垂直边缘线, 并且确定水平边缘线的搜索区域; 图 7(c) 是搜索水平边缘线所在图像区域; 图 7(d) 是提取水平边缘线; 图 7(e) 是套筒移至视野范围内后, 沿着由右向左的方向搜索并定位套筒外边缘区域; 图 7(f) 是提取出套筒垂直边缘线; 图 7(g) 是沿着从上向下的方向搜索定位套筒水平边缘线所在区域; 图 7(h) 是提取套筒水平边缘线。

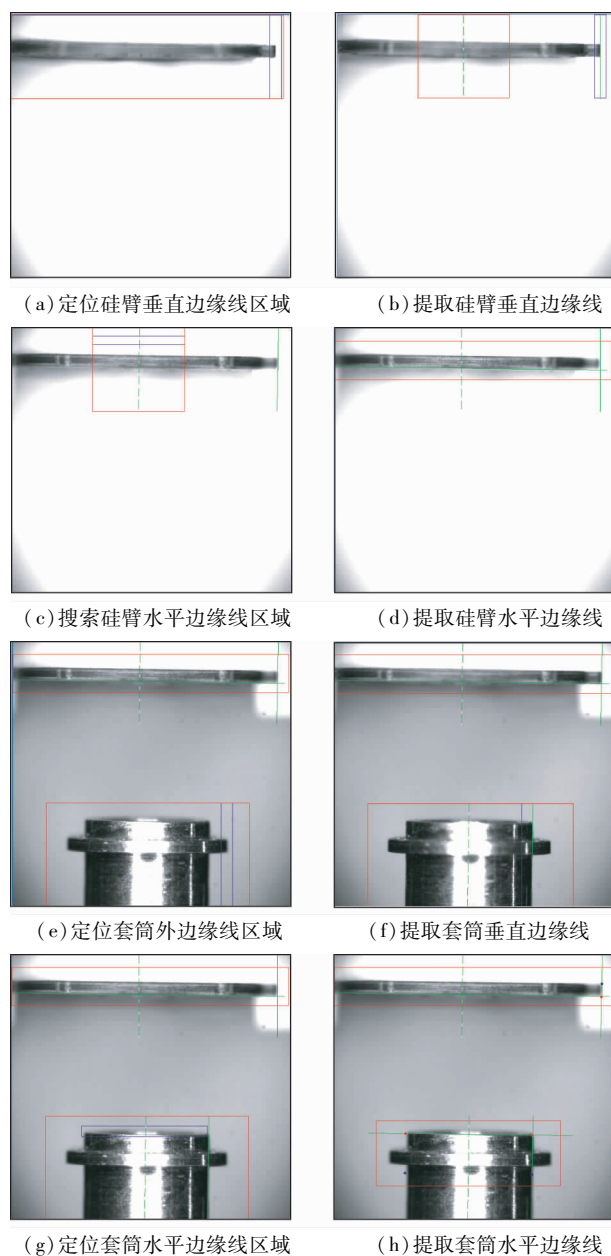
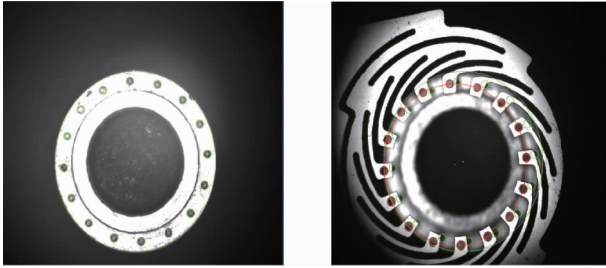


图 7 水平视觉引导下的特征提取图片

图8是硅臂和套筒在垂直显微视觉引导下的特征提取图片。图8(a)是对套筒顶部圆心及16个特征孔的提取、套筒特征提取后,将硅臂移至视野范围,聚焦后对硅臂进行特征提取。图8(b)是对硅臂内圆圆心和16个特征孔的提取。基于硅臂和套筒垂直方向的图像特征提取,计算相对位姿 $\Delta T_x, \Delta T_y, \Delta \theta_z$ 。



(a) 套筒顶部特征提取 (b) 硅臂顶部特征提取

图8 垂直视觉引导下的特征提取图片

图9是水平视觉引导下,基于图像特征区域跟

踪的自动变倍过程图片。图9(a)是变倍前的图像,变倍前图像中划分出硅臂初始角点区域以及初始搜索区域;图9(b)是第1次变倍后的图像,变倍后在搜索区域内采用模版匹配算法匹配出硅臂角点区域,更新角点区域位置以及搜索区域位置;图9(c)是变倍后的图像,变倍前图像空间到笛卡尔空间单位长度的转换系数为 $4.91\mu\text{m}/\text{pixel}$,变倍后 $3.82\mu\text{m}/\text{pixel}$,显微视觉系统放大倍数较之前增大。

通过在线检测,精确给出了不同零件之间的相对位姿误差,在此基础上,调整零件位姿,移动零件位置即可实现两个不同零件之间的装配。图10是硅臂和套筒位姿对准前后在三路显微视觉系统中的图像。图10(a)是位姿对准前图像,此时硅臂位于三路视觉系统视野范围之内,套筒位于视野范围之外;图10(b)是位姿对准后图像。硅臂和套筒位姿对准后,基于2号显微视觉引导,控制套筒Z向运动,从而实现微零件装配。

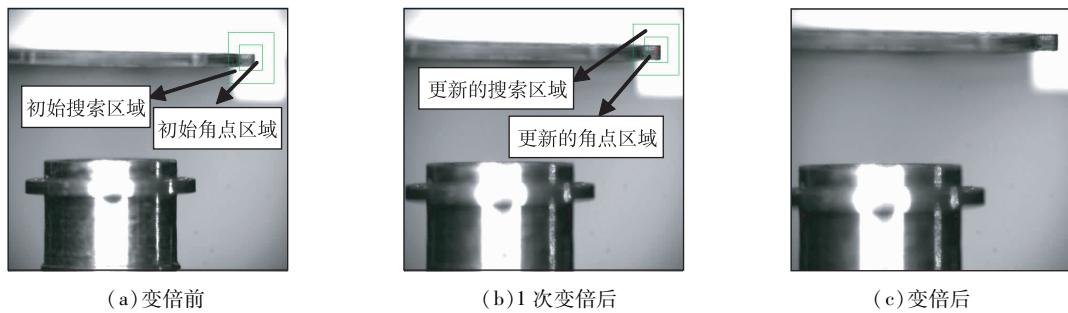


图9 水平视觉系统自动变倍过程图像

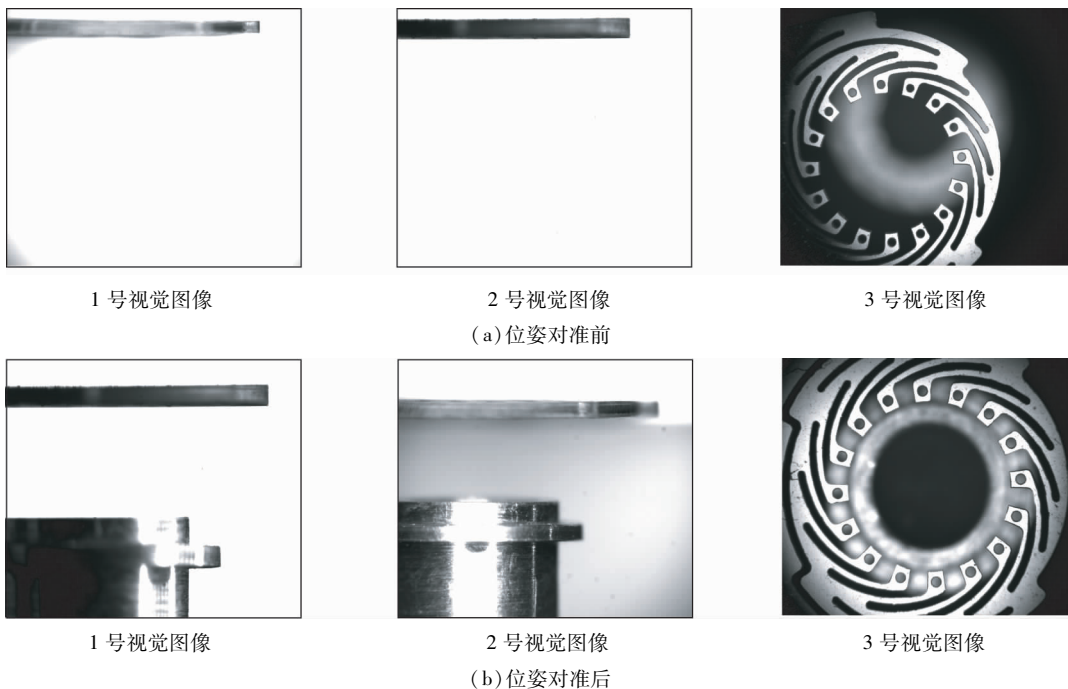


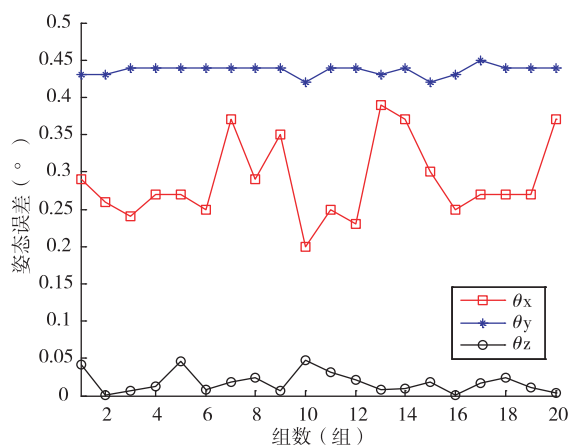
图10 硅臂和套筒位姿对准前后图像

4.3 误差分析

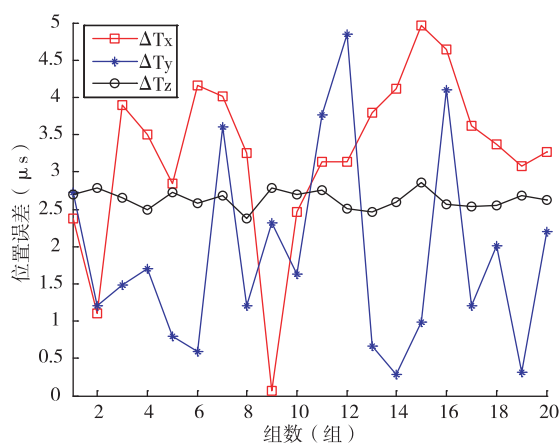
这里通过定义误差分析显微视觉系统变倍后相对位姿的检测精度。检测误差的测量方法如下:硅臂或套筒操作平台运动指定的角度或距离作为真值 T_m , 实际检测出的角度变化量或距离值作为测量值 T_r , 检测误差 E 的计算式如下:

$$E = |T_m - T_r| \quad (10)$$

首先对相对姿态检测误差, 即相对角度检测误差进行分析。令套筒分别绕 X 轴、 Y 轴、 Z 轴旋转 5° , 通过提取运动前后的套筒图像特征, 计算出 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$, 与真值相比较得到姿态检测误差。图 11(a) 给出了姿态误差检测结果。 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$ 的检测误差均值分别为 0.29° 、 0.44° 和 0.02° , 最大检测误差分别为 0.39° 、 0.45° 和 0.05° , 均小于 0.5° 。



(a) 姿态误差检测结果



(b) 位置误差检测结果

图 11 位姿误差检测结果

ΔT_x 、 ΔT_y 、 ΔT_z 的检测误差即为相对位置检测误差。令硅臂在 X 轴、 Y 轴方向上分别运动 $1000\mu\text{m}$, 检测运动前后硅臂的 X 轴、 Y 轴位置变化量, 检测值与真实值之间的差值即为 ΔT_x 、 ΔT_y 的检测误差; 令套筒垂直方向上运动 $1000\mu\text{m}$, 检测运动前后 Z 轴的位置变化量 ΔT_z , 计算出 ΔT_z 的检测误差。相对位置误差检测结果如图 11(b) 所示, ΔT_x 、 ΔT_y 、 ΔT_z 的检测误差均值分别为 $3.24\mu\text{m}$ 、 $1.88\mu\text{m}$ 和 $2.63\mu\text{m}$, 最大检测误差分别为 $4.97\mu\text{m}$ 、 $4.84\mu\text{m}$ 和 $2.86\mu\text{m}$, 均小于 $5\mu\text{m}$ 。

检测运动前后硅臂的 X 轴、 Y 轴位置变化量, 检测值与真实值之间的差值即为 ΔT_x 、 ΔT_y 的检测误差; 令套筒垂直方向上运动 $1000\mu\text{m}$, 检测运动前后 Z 轴的位置变化量 ΔT_z , 计算出 ΔT_z 的检测误差。相对位置误差检测结果如图 11(b) 所示, ΔT_x 、 ΔT_y 、 ΔT_z 的检测误差均值分别为 $3.24\mu\text{m}$ 、 $1.88\mu\text{m}$ 和 $2.63\mu\text{m}$, 最大检测误差分别为 $4.97\mu\text{m}$ 、 $4.84\mu\text{m}$ 和 $2.86\mu\text{m}$, 均小于 $5\mu\text{m}$ 。

相对姿态检测误差以及相对位置检测误差主要由运动轴与图像平面不平行造成的误差, 以及图像检测造成的误差构成。图像检测误差客观方面受到光源、微零件机械加工精度以及 CCD 噪声的影响; 主观方面受到自动聚焦算法、图像处理算法的影响, 图像处理算法主要指微零件的边缘线提取算法。图像对比度越强、微零件加工越精密、自动聚焦算法精度越高以及图像处理算法精度越高, 则检测误差越小。

5 结论

基于搭建的微装配实验平台, 本文提出了一种基于三路显微视觉的复杂几何结构微零件的在线检测与装配策略。该装配策略分为粗调和精调两个过程, 分别实现低放大倍数下和高放大倍数下对微零件的相对位姿检测和调整。针对微零件硅臂和套筒在水平方向的图像特征, 提出了一种基于边缘提取的微零件相对位姿检测算法, 实现了对相对位姿 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$ 的检测和调整; 垂直方向上, 基于硅臂和套筒的顶部几何图像特征, 结合几何先验知识, 实现了相对位姿 ΔT_x 、 ΔT_y 、 ΔT_z 的检测和调整。为实现微装配过程中显微镜头放大倍数的自动调整, 提出了一种基于图像特征区域跟踪的自动变倍算法, 实现了对水平显微视觉系统放大倍数的自动调整。实验结果证明了所提算法的有效性, 并且通过误差验证实验分析了相对位姿检测精度。实验结果表明, 姿态检测误差小于 0.5° , 位置检测误差小于 $5\mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] Yang G, Gaines J A, Nelson B J. A supervisory wafer-level 3D microassembly system for hybrid MEMS fabrication. *Intelligent and Robotic System*, 2003, 37: 43-68
- [2] 荣伟彬, 谢晖, 孙立宁. 用于 MEMS 传感器批量制造的微装配系统. *传感技术学报*, 2006, 19(5): 1573-1579

- [3] Schottler K, Raatz A, Hesseibach J. Precision assembly of active microsystems with a size-adapted assembly system. In: Micro-Assembly Technologies and Applications: IFIP TC5 WG5. 5 Fourth International Precision Assembly Seminar, Chamonix, France, 2008. 199-206
- [4] Tamadazte B, Dembele S, Fortier G, et al. Automatic micromanipulation using multiscale visual servoing. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Washington DC, USA, 2008. 977-982
- [5] Ralis S J, Vikramadiya B, Nelson B J. Micropositioning of a weakly calibrated microassembly system using coarse-to-fine visual servoing strategies. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2000, 23(2): 123-131
- [6] Chu H K, Mills J K, Cleghorn W L. Dynamic tracking of moving objects in microassembly through visual servoing. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Xian, China, 2010. 1738-1743
- [7] Tao X, Cho H, Cho Y. Visually guided microassembly with active zooming. *Robotics and Mechatronics*, 2006, 18(6): 787-794
- [8] Tao X, Janabi-Sharifi F, Cho H. An active zooming strategy for variable field of view and depth of field in vision-based microassembly. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(3): 504-513
- [9] Tamadazte B, Piat N L. Robotic micromanipulation and microassembly using monoview and multiscale visual servoing. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(2): 277-287
- [10] Zhang J, Zhang Z T, Xu D, et al. Aligning micro-gripper to ring object in high precision with microscope vision. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, Shanghai, China, 2011. 123-127

On-line detecting and assembling of micro parts based on microscope vision

Zhang Juan, Zhang Zhengtao, Xu De

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

Abstract

Based on an experimental platform constructed for micro-assembly, a strategy for online detection and assembly of micro parts based on three microscope vision systems is proposed to achieve complex micro parts assembly. The strategy uses the coarse adjustment process and the fine adjustment process to respectively detect and adjust the poses of the micro parts in the smallest and higher magnification, to realize the pose alignment and assembly for micro parts. An automatic zooming algorithm is proposed based on the image region of interest tracking technology, which can change the microscope vision system magnification automatically to ensure the feature area of the micro parts in the field of view. Through analysis of the image feature of the micro parts in the microscope vision system, the relative pose detection algorithm for micro parts is proposed based on image feature extraction. The relative pose detection of the micro parts in the three dimensional space was realized. The experimental results showed that the pose detection error was less than 0.5 degree, and the position detection error was less than 5 μm , which verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: pose detection, automatic zooming, assembly strategy, microscope vision, micro-assembly