

# 基于多传感器的大口径器件自动对准策略

卢金燕<sup>1</sup> 徐德<sup>1</sup> 覃政科<sup>1</sup> 王鹏<sup>1</sup> 任超<sup>1</sup>

**摘要** 针对大口径器件的装配, 基于搭建的实验平台, 提出了一种多传感器反馈的分阶段自动对准策略, 实现了大口径器件的六自由度位姿对准. 对准过程中, 在机器人末端远离装配位置时, 采用视觉测量安装框架的相对位姿进行粗对准; 在机器人末端接近装配位置时, 由于安装框架尺寸大导致视觉不能获得完整的框架相对于大口径器件的位姿, 所以采用视觉采集安装框架的局部图像, 利用基于图像的控制消除绕  $Z$  轴的旋转误差和沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移误差, 采用多个激光测距传感器测量相对距离, 利用基于位置的控制消除沿  $Z$  轴的平移误差和绕  $X$ 、 $Y$  轴的旋转误差, 实现大口径器件与安装框架的精对准. 采用增量式 PI 控制算法, 实现了对准的运动控制. 实验结果验证了所提方法的有效性.

**关键词** 多传感器, 位姿检测, 视觉伺服, 六自由度对准

**引用格式** 卢金燕, 徐德, 覃政科, 王鹏, 任超. 基于多传感器的大口径器件自动对准策略. 自动化学报, 2015, 41(10): 1711–1722

**DOI** 10.16383/j.aas.2015.c150053

## An Automatic Alignment Strategy of Large Diameter Components with a Multi-sensor System

LU Jin-Yan<sup>1</sup> XU De<sup>1</sup> QIN Zheng-Ke<sup>1</sup> WANG Peng<sup>1</sup> REN Chao<sup>1</sup>

**Abstract** In this paper, a high precision alignment strategy with multiple stages using different sensors is developed to realize the automatic alignment of large diameter components in the three-dimensional (3D) space of an experimental platform. In the process of alignment, when the end-effector is far from the target, a vision sensor is used to measure the relative pose between the large diameter component and the target for coarse alignment. When the end effector approaches the target, due to the large diameter of the target, relative pose cannot be measured only by its local image, so image-based control is used to eliminate angle error around the  $Z$  axis and translation errors along the  $X$  axis and  $Y$  axis, laser sensors are used to measure the relative distance, position-based control is used to eliminate translation error along the  $Z$  axis and angle errors along the  $X$  axis and  $Y$  axis. Fine coarse alignment is realized by the two-stage adjustments. An incremental PI controller is used to control the motion of the robot during the alignment. Experiments and results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words** Multi-sensors, pose detection, visual servo, six degree of freedom (DOF) alignment

**Citation** Lu Jin-Yan, Xu De, Qin Zheng-Ke, Wang Peng, Ren Chao. An automatic alignment strategy of large diameter components with a multi-sensor system. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(10): 1711–1722

随着工业生产的飞速发展, 自动化装配作为提高生产效率、降低人工成本的重要手段, 在汽车制造、医药生产、物流运输等行业得到越来越广泛的应用. 然而, 工业生产线上的自动化装配往往功能简单, 且多是针对固定场景. 传感器种类丰富、功能多样, 是获取外界环境信息的重要工具. 因此, 基于传感器信息的自动化装配成为提高装配灵活性的重要途径, 引起了学者们的广泛关注<sup>[1–3]</sup>.

视觉传感器能够感知丰富的环境信息, 且安装使用方便, 是较常使用的一种外部传感器. 通过对视觉传感器获取的图像信息进行处理, 可以得到目标的轮廓、形状、颜色, 还可以实现目标的运动检测、相对定位等. Song 等<sup>[4]</sup> 通过视觉信息引导, 得到目标的位置和姿态信息, 实现复杂几何外形零件的位姿对准. Chang 等<sup>[5]</sup> 使用两个 CCD 相机, 搭建 Eye-to-hand 双目视觉系统, 从视觉图像得到三维表面的法向量和深度信息, 实现在三维表面上钻孔、螺栓连接等操作. Kwon 等<sup>[6]</sup> 基于视觉图像信息, 先根据几何模板匹配, 从低分辨率图像中快速得到标记的大致位姿, 然后从高分辨率图像中得到标记之间的三自由度位姿偏差, 实现显示屏的贴膜. Makita 等<sup>[7]</sup> 使用 HexSight 视觉软件, 将 CCD 获取的视觉图像和事先建立的目标轮廓库进行匹配, 得到目

收稿日期 2015-01-27 录用日期 2015-05-23  
Manuscript received January 27, 2015; accepted May 23, 2015  
国家自然科学基金 (61379097, 61100098) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (61379097, 61100098)  
本文责任编辑 倪茂林  
Recommended by Associate Editor NI Mao-Lin  
1. 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  
1. Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

标的位姿信息, 实现亚毫米电子零件的位姿对准. Thomas 等<sup>[8]</sup> 使用粒子滤波方法融合视觉信息和接触力信息, 实现轴孔零件装配. 在信息融合过程中, 对比从视觉图像得到的相对位姿和从 CAD 模型得到的相对位姿, 根据二者的差值来衡量粒子的质量好坏. Skotheim 等<sup>[9]</sup> 离线从装配件的三维 CAD 模型得到其点云信息, 在线利用视觉传感器和激光三角传感器得到目标点云信息, 然后基于点对和类似 HOUGH 变换的投票机制, 进行点云匹配, 最后使用分簇算法进一步提高定位精度, 实现办公座椅零部件的抓取和转运.

然而, 当前基于视觉的自动化装配方法大多仅适用于小尺寸零件, 要求目标在装配过程中一直完全可见. 当不能得到充分目标信息时, 如目标尺寸较大、部分视觉特征不可见等, 就需要借助其他传感器如激光测距传感器、力觉传感器等来完成装配任务. Liu 等<sup>[10]</sup> 使用激光跟踪仪实现大尺寸、大重量零件的轴孔装配. 他们根据激光干涉测量法标定出零件的圆柱表面、端点等几何特征, 通过安装在激光跟踪仪上的探头和凸轮, 得到目标六个自由度的位姿信息. 激光跟踪仪非常适合用于大尺寸零部件的位姿测量, 但价格昂贵. Yamataka 等<sup>[11]</sup> 先将机器人示教到目标位置, 然后根据力反馈进行位姿的微调, 实现液晶电视的装配. 此方法简化了大尺寸目标的位姿对准过程, 但仅适用于目标固定的场景. Gil 等<sup>[12]</sup> 为了实现大型建筑玻璃的安装, 设计了一个便携的机器人装卸设备, 该设备能够吸附在玻璃的任意位置. 他们先利用位置传感器检测出设备中心, 然后根据设备坐标系和机器人坐标系的转换关系, 将工人在设备的输入力转换成对应的机器人作用力. 该方法将工人的安装经验和机器人进行有效结合, 简化了目标的位姿对准过程, 但是自动化程度不高. Kim 等<sup>[13]</sup> 为了实现大型货船的位姿对准, 使用 1 个视觉传感器和 3 个一维激光测距传感器搭建传感器检测平台, 实现对目标的六自由度位姿测量. 三个激光测距传感器呈三角形分布, 固定在支架上, 视觉传感器安装在目标上. 通过世界坐标系、激光坐标系和相机坐标系之间的转换关系, 得到目标六个自由度的位姿信息. 仿真实验表明, 在距离目标 30 m 范围内, 该系统的位置测量精度为 3 mm, 角度测量精度为 1°. 随后, 他们又通过改变激光测距传感器的布局以及激光测距传感器的数量对文献 [13] 提出的系统进行了优化<sup>[14]</sup>. 仿真实验表明, 合理的激光测距传感器布局能够显著的降低系统误差. 此外, 增加 1 个激光测距传感器也能获得更好的系统性能.

为了实现大口径器件的自动装配, 针对大口径器件自动化实验平台, 本文提出了一种基于多传感器信息的分阶段位姿对准策略, 实现了大口径器件

的六自由度位姿快速有效对准. 在机器人末端远离安装框架时, 视觉系统能够获得完整的安装框架图像, 采用基于视觉的方法测量安装框架相对于大口径器件的相对位姿, 实现粗对准. 在机器人末端接近安装框架时, 利用视觉采集安装框架的局部图像, 测量绕  $Z$  轴的旋转偏差和沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移偏差; 采用激光测距传感器测量相对距离, 计算获得绕  $X$ 、 $Y$  轴的旋转偏差和沿  $Z$  轴的平移偏差, 实现大口径器件与安装框架的精对准.

## 1 平台及坐标系介绍

### 1.1 平台介绍

如图 1 所示, 装配平台主要由四部分组成, 包括机器人、夹具、传感器系统和装配件. 机器人负载 50 kg, 具有六个旋转关节. 夹具专门针对平台的装配件设计, 主要用于固定装配件和安放传感器. 传感器检测定位系统包括 2 个视觉传感器和 3 个一维激光测距传感器, 主要用于获取目标信息, 传感器都安装在末端夹具上.

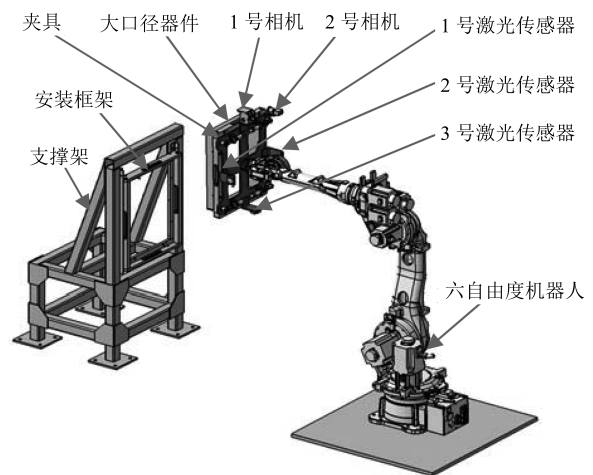


图 1 大口径器件自动化装配平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of automated assembly platform for large diameter components

装配件包括大口径器件和安装框架两部分. 大口径器件固定在机器人末端夹具上, 安装框架固定在支撑架上. 大口径器件由航空铝合金材料加工而成, 口径为 555 mm × 665 mm. 安装框架的材质与大口径器件相同, 口径为 557 mm × 667 mm.

### 1.2 坐标系

大口径器件装配平台使用了六种坐标系: 世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系、大口径器件坐标系、机器人末端坐标系和机器人基坐标系. 如图 2 所示, 世界坐标系  $O_W X_W Y_W Z_W$  建立在安装框架上,

以安装框架的中心为原点,  $X_W$  轴沿安装框架的水平边方向,  $Y_W$  轴沿安装框架的竖直边方向,  $Z_W$  轴垂直于安装框架且指向安装框架.  $O_{C1}X_{C1}Y_{C1}Z_{C1}$  和  $O_{C2}X_{C2}Y_{C2}Z_{C2}$  是两个相机的坐标系, 分别建立在两个相机的光轴中心点处,  $Z_{C1}$  和  $Z_{C2}$  轴分别沿光轴指向景物方向,  $X_{C1}$  和  $X_{C2}$  轴分别平行于其图像坐标的横轴,  $Y_{C1}$  和  $Y_{C2}$  轴分别平行于其图像坐标的纵轴.  $O_1U_1V_1$  和  $O_2U_2V_2$  是两个相机分别对应的图像坐标系. 大口径器件坐标系  $O_MX_MY_MZ_M$  建立在大口径器件上, 以大口径器件的中心为原点,  $X_M$  轴沿大口径器件的水平边方向,  $Y_M$  轴沿大口径的竖直边方向. 机器人末端坐标系  $O_{T1}X_{T1}Y_{T1}Z_{T1}$  建立在机器人法兰盘上, 以法兰盘的中心为原点,  $X_{T1}$  轴与  $X_W$  轴平行,  $Y_{T1}$  轴与  $Y_W$  轴平行.

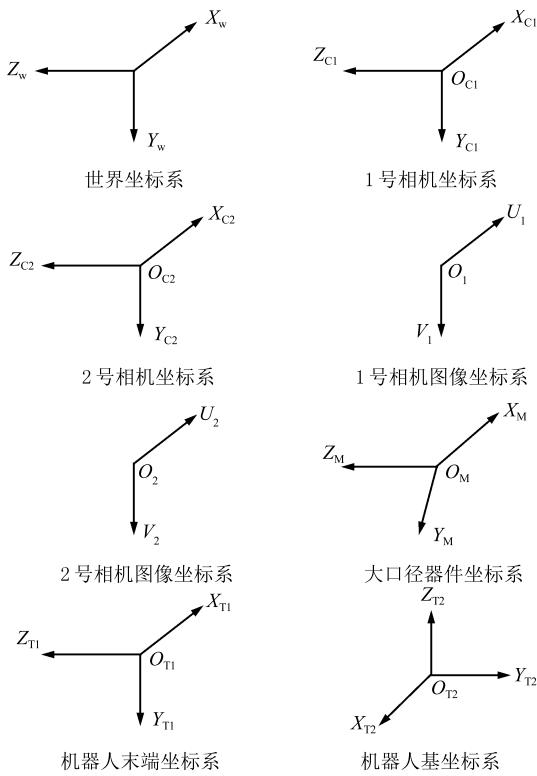


图 2 坐标系示意图  
Fig. 2 The coordinate systems

## 2 自动对准流程

由于装配件口径较大, 当距离目标较近时, 视觉传感器只能获取其局部图像, 此时视觉传感器只对绕  $Z$  轴的旋转和沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移敏感, 绕  $X$ 、 $Y$  轴的旋转和沿  $Z$  轴的平移难以通过视觉图像获得. 激光测距传感器测量精度高、性能稳定、抗干扰能力强、体积小、便于安装. 因此, 采用视觉和激光两种传感器共同获取目标信息, 实现大口径器件和安装框架的六自由度位姿对准.

当距离目标较远时, 根据视觉传感器获取的安装框架图像, 得到目标的六维位姿信息, 然后控制机器人运动, 实现大口径器件和安装框架的粗对准. 当距离目标较近时, 根据视觉传感器获取的安装框架局部图像, 采用基于图像的控制消除绕  $Z$  轴的旋转误差和沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移误差, 根据多个激光测距传感器测量相对距离, 利用基于位置的控制消除沿  $Z$  轴的平移误差和绕  $X$ 、 $Y$  轴的旋转误差, 实现大口径器件和安装框架的精对准. 然而, 视觉测量容易受机械加工误差及环境光照影响, 为了保证测量结果的精度和稳定性, 在精对准的最后阶段, 再利用激光测距传感器测量沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移误差, 并根据测量结果进行最后的位置调整.

设计的自动对准流程如图 3 所示. 先根据 1 号相机获取的安装框架图像, 提取安装框架的边框特征, 得到安装框架相对于 1 号相机的六维位姿, 进而得到安装框架相对于机器人末端的位姿, 从而得到大口径器件和安装框架的六维位姿偏差, 实现大口径器件和安装框架的粗对准. 当 1 号相机获得的安装框架图像无法用于测量后, 启动 2 号相机, 获取安装框架的局部图像. 根据 2 号相机采集的图像, 提取安装框架的图像特征参数, 得到当前和期望图像特征的偏差, 根据此偏差及设计的运动控制律, 实现大口径器件和安装框架在绕  $Z$  轴和沿  $X$ 、 $Y$  轴的精确对准. 根据三个激光测距传感器反馈的距离信息, 得到三个激光测距传感器构成的平面的法向量, 进而得到当前和期望法向量之间的夹角, 从而实现大口径器件和安装框架在沿  $Z$  轴和绕  $X$ 、 $Y$  轴的精确

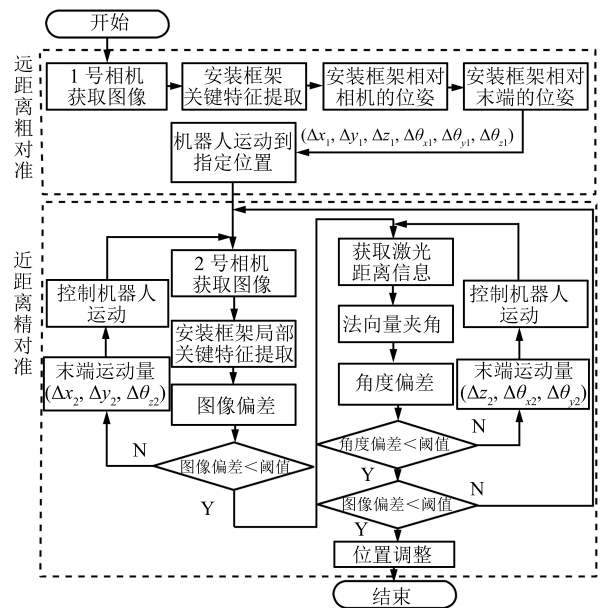


图 3 自动对准流程图  
Fig. 3 The process of automatic alignment

对准. 在精对准过程中, 由于基于 2 号相机采集的局部图像的视觉控制和基于激光测距传感器的位置控制相互干扰, 所以需要根据相机反馈的图像信息和激光反馈的距离信息进行反复迭代调整, 直到图像偏差和角度偏差同时都在允许的误差范围内后, 再根据激光反馈信息测量沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移误差, 进行最后的位置调整, 实现大口径器件和安装框架的自动对准.

### 3 安装框架相对位姿测量

由于装配件口径较大, 并且安装精度要求较高, 在自动对准过程中, 仅靠视觉传感器难以实现其与安装框架相对位姿的精确位姿测量. 因此, 使用视觉和激光两种传感器, 分阶段实现安装框架与大口径器件的位姿测量. 在粗对准过程中, 二者之间的距离较远, 根据 1 号相机获取安装框架的图像信息, 实现安装框架相对位姿测量. 在精对准过程中, 二者之间的距离较近, 根据 2 号相机获取的安装框架局部图像, 测量出安装框架绕  $Z$  轴的旋转偏差和沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移偏差, 根据三个激光测距传感器的测量值, 计算得到安装框架沿  $Z$  轴的平移偏差和绕  $X$ 、 $Y$  轴的旋转偏差, 实现安装框架相对位姿测量.

#### 3.1 粗对准位姿测量

在粗对准过程中, 1 号相机获取的安装框架图像如图 4 所示. 根据 Ulrich 等<sup>[15]</sup>提出的三维 CAD 模型匹配方法, 选择图中两个矩形之间的矩形框部分作为安装框架的 CAD 模型, 离线建立目标的模型库, 然后将当前目标图像和 CAD 模型进行在线匹配, 实现安装框架的位姿测量. 离线建模时使用虚拟相机从不同经度、纬度、深度对目标的 CAD 模型进行拍摄, 得到物体的投影视图集合. 在线检测过程中, 先根据相似度大小, 找到与当前图像中物体位姿最接近的视图, 进而得到目标的大致位姿. 以这个位姿为初始点, 进行最优化搜索, 得到安装框架在相机坐标系的位姿.

记安装框架在相机坐标系的位姿为  $T_p$ , 手眼关系矩阵为  $T_m$ , 则安装框架相对机器人末端的位姿  $T_r$  为

$$T_r = T_m T_p \quad (1)$$

记大口径器件相对于机器人末端的位姿为  $T_s$ , 则大口径器件和安装框架的位姿偏差  $T_d$  为

$$T_d = T_s^{-1} T_r \quad (2)$$

从安全角度考虑, 粗对准结束时在  $Z$  方向上大口径器件与安装框架之间的距离设定为  $Z_d$ , 其他误差设定为 0. 于是, 可以得到粗对准结束时的位姿偏

差矩阵  $T_{dd}$ :

$$T_{dd} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

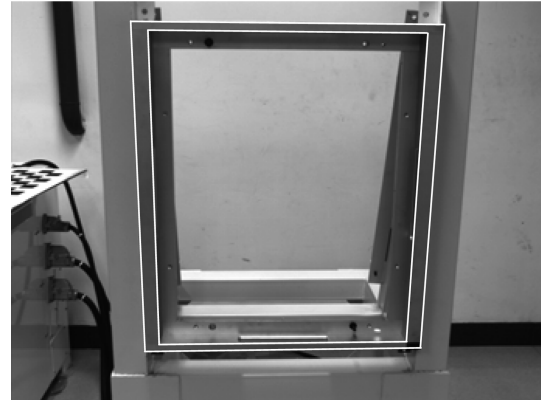


图 4 1 号相机获取的安装框架图像

Fig. 4 The image of the target from No. 1 camera

为了将位姿偏差  $T_d$  调整为  $T_{dd}$ , 机器人末端相对于末端坐标系的运动为

$$T_e = T_r (T_s T_{dd})^{-1} = \begin{bmatrix} R & \mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$T_e$  的位置向量  $\mathbf{P}$  即为机器人末端沿  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  方向的平移运动量 ( $\Delta x_1$ ,  $\Delta y_1$ ,  $\Delta z_1$ ). 将姿态变换矩阵  $R$  转换为横滚、俯仰和偏转角表示的姿态<sup>[16]</sup>, 从而得到机器人末端分别在绕  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴方向的旋转运动量 ( $\Delta \theta_{x1}$ ,  $\Delta \theta_{y1}$ ,  $\Delta \theta_{z1}$ ).

#### 3.2 基于视觉/激光的精对准位姿测量

在精对准过程中, 2 号相机只能获取安装框架的局部图像, 此时无法仅通过图像信息实现安装框架的相对位姿测量. 由于视觉测量对于绕  $Z$  轴的旋转和沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移很敏感, 测量精度较高, 所以精对准时利用视觉采集安装框架的局部图像, 测量绕  $Z$  轴的旋转误差和沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移误差. 因此, 精对准时激光测距传感器只需要测量绕  $X$ 、 $Y$  轴的旋转误差和沿  $Z$  轴的平移误差即可. 然而, 视觉测量容易受机械加工误差及环境光照影响, 为了保证测量结果的精度和稳定性, 在精对准的最后阶段, 再利用激光测距传感器测量沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移误差.

##### 3.2.1 基于框架局部图像的位姿表示

精对准过程中, 2 号相机获取到的安装框架的局部图像如图 5 所示. 为了得到目标的位姿信息, 选

择安装框架的两条水平边缘线  $L1$  和  $L2$ , 以及两条垂直边缘线  $L3$  和  $L4$  作为图像特征. 通过提取四条直线, 得到目标矩形, 进而得到矩形的中心点, 将该中心点作为控制机器人运动的图像特征参数, 实现大口径器件沿  $X$ 、 $Y$  轴方向的位置调整. 任意选择四条边缘线中的一条直线, 以该直线的角度作为控制机器人运动的图像特征参数, 实现大口径器件绕  $Z$  轴方向的姿态调整. 期望的图像特征参数通过提取离线对准时的四条边缘直线获得. 根据当前图像特征参数和期望图像特征参数, 得到图像特征偏差如下:

$$\begin{cases} \Delta u = u_d - u \\ \Delta v = v_d - v \\ \theta_{z2} = \theta_d - \arctan(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $(u_d, v_d)$  为矩形中心点期望图像坐标,  $(u, v)$  为矩形中心点实际图像坐标,  $\theta_d$  为期望的直线角度,  $k$  为选择的特征直线的斜率.  $\Delta u$  为矩形中心点在  $U$  方向的图像偏差, 与安装框架和大口径器件在  $X$  轴方向的位置偏差成比例关系;  $\Delta v$  为矩形中心点在  $V$  方向的图像偏差, 与安装框架和大口径器件在  $Y$  轴方向的位置偏差成比例关系;  $\theta_{z2}$  为特征直线角度偏差, 与安装框架和大口径器件在绕  $Z$  轴方向的角度偏差相同. 因此,  $\Delta u$ 、 $\Delta v$  和  $\theta_{z2}$  可以很好地描述沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移误差和绕  $Z$  轴的旋转误差.

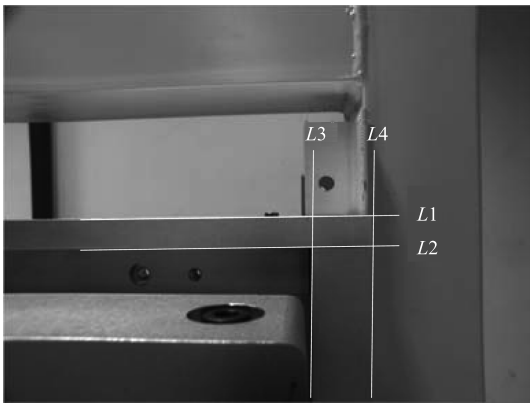


图5 2号相机获取的安装框架图像

Fig. 5 The image of the target from No. 2 camera

### 3.2.2 基于激光信息的位姿估计

三个激光测距传感器分别安装在夹具的左侧、右侧和下侧, 将激光测距传感器当成质点, 则这三个激光测距传感器构成一个平面, 基于三个质点的坐标及相对距离测量值, 得到这个平面的法向量.

根据三个激光测距传感器的测量值以及它们的安装位置, 构造激光测距传感器的三维坐标如下:

$$\begin{cases} x_i = x_{Li}, \\ y_i = y_{Li}, \\ z_i = d_i, \end{cases} \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中,  $(x_{Li}, y_{Li})$  是第  $i$  个激光测距传感器在大口径坐标系中的坐标,  $d_i$  为第  $i$  个激光测距传感器的读数.

记三个激光测距传感器质点为  $A$ 、 $B$  和  $C$ , 则三个质点构成的平面法向量  $\mathbf{V}$  如下:

$$\mathbf{V} = \overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC} \quad (7)$$

在离线完成大口径器件对准的情况下, 按照上述计算方法, 得到期望的法向量  $\mathbf{V}_q$ . 将  $\mathbf{V}$  和  $\mathbf{V}_q$  投影到  $YOZ$  平面和  $ZOX$  平面, 则两个法向量在  $YOZ$  平面的投影之间的夹角即为大口径器件与安装框架在绕  $X$  轴方向的角度偏差, 两个法向量在  $ZOX$  平面的投影之间的夹角即为大口径器件与安装框架在绕  $Y$  轴方向的角度偏差. 因此, 得到角度偏差如下:

$$\begin{cases} \cos(\theta_{Lx}) = \frac{\mathbf{V}_{qyoz} \mathbf{V}_{yoz}}{|\mathbf{V}_{qyoz}| \cdot |\mathbf{V}_{yoz}|} \\ \cos(\theta_{Ly}) = \frac{\mathbf{V}_{qzox} \mathbf{V}_{zox}}{|\mathbf{V}_{qzox}| \cdot |\mathbf{V}_{zox}|} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\theta_{Lx}$  和  $\theta_{Ly}$  分别为安装框架和大口径器件在绕  $X$  轴方向和绕  $Y$  轴方向的角度偏差.  $\mathbf{V}_{qyoz}$  和  $\mathbf{V}_{qzox}$  是  $\mathbf{V}_q$  分别在  $YOZ$  平面和  $ZOX$  平面的投影,  $\mathbf{V}_{yoz}$  和  $\mathbf{V}_{zox}$  是  $\mathbf{V}$  分别在  $YOZ$  平面和  $ZOX$  平面的投影.

基于激光信息进行位姿估计时, 认为绕  $Z$  轴方向的角度偏差为 0. 利用式 (8) 得到  $\theta_{Lx}$  和  $\theta_{Ly}$  后, 将  $(\theta_{Lx}, \theta_{Ly}, 0)$  表示为姿态变换矩阵  $R_L^{[16]}$ , 即大口径器件和安装框架的姿态偏差.

为了将  $R_L$  调整为单位阵, 机器人末端相对于末端坐标系的运动为

$$R_f = R_S R_L R_S^{-1} \quad (9)$$

式中,  $R_S$  为  $T_s$  中的旋转变换矩阵.

将旋转变换矩阵  $R_f$  转换为横滚、俯仰和偏转角表示的姿态<sup>[16]</sup>, 从而得到机器人末端分别在绕  $X$  轴、绕  $Y$  轴方向的角度偏差  $(\theta_{x2}, \theta_{y2})$ .

根据 3 个激光测距传感器的测量值, 得到大口径器件和安装框架在深度方向上的距离偏差:

$$z_2 = \frac{1}{3}(d_1 + d_2 + d_3) \quad (10)$$

利用激光测距传感器测量沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移误差时, 先离线完成大口径器件位姿对准, 然后向左平

移 1 号激光测距传感器,使其打到安装框架右方边缘,得到机器人在  $X$  方向的平移量.再向上平移 3 号激光测距传感器,使其打到安装框架下方边缘,得到机器人在  $Y$  方向的平移量.在线调整时,如图 5 所示,开始时 1 号激光测距传感器打在  $L3$  和  $L4$  之间的区域,将机器人逐步向左平移,当激光第一次打到  $L3$  左侧时,1 号激光测距传感器读数发生明显跳变,此时可找到边缘  $L3$ ,根据机器人在  $X$  方向的当前平移量和离线平移量的偏差  $L_x$ ,进而得到大口径器件和安装框架在  $X$  方向的位置偏差:

$$x'_2 = L_x \quad (11)$$

同理,可得大口径器件和安装框架在  $Y$  方向的位置偏差:

$$y'_2 = L_y \quad (12)$$

#### 4 对准控制策略

粗对准过程中,由于安装框架尺寸较大,1 号相机在初始位置附近很小的范围后就不能得到完整的安装框架图像.因此,根据从 1 号相机图像获取的测量结果得到大口径器件与安装框架的相对位姿偏差后,在深度方向上设定与测量值相差一定数值的安全距离后得到粗对准的指定位姿,然后控制机器人到达指定的位姿,使大口径器件与安装框架位姿大致对准.

精对准过程中,根据 2 号相机获取的安装框架的局部图像,得到当前特征和期望特征的图像偏差,采用基于图像的视觉控制,实现机器人绕  $Z$  轴的旋转控制和沿  $X$ 、 $Y$  轴的平移控制:根据三个激光测距传感器的测量值,计算得到安装框架和大口径器件的相对位姿偏差,采用基于位置的控制,实现机器人在沿  $Z$  轴的平移控制和绕  $X$ 、 $Y$  轴的旋转控制.

##### 4.1 基于局部图像的控制

基于局部图像的控制采用基于图像的视觉控制方案,其控制框图如图 6 所示.根据 2 号相机反馈的图像,提取当前图像特征参数,并与期望特征参数比较,得到式 (5) 所示的当前图像偏差.结合此偏差并根据 PI 控制律,得到机器人末端的运动调整量  $(\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta \theta_{z2})$ ,进而实现机器人的运动控制.

根据 2 号相机反馈的图像偏差建立运动控制律,如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_2(k) \\ \Delta y_2(k) \\ \Delta \theta_{z2}(k) \end{bmatrix} = K_{p2} \left( \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta v(k) \\ \theta_{z2}(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \Delta v(k-1) \\ \theta_{z2}(k-1) \end{bmatrix} \right) + K_{i2} \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta v(k) \\ \theta_{z2}(k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中,  $\Delta x_2(k)$  和  $\Delta y_2(k)$  是机器人末端第  $k$  次在  $X$  轴方向和  $Y$  轴方向的位置调整量,  $\Delta \theta_{z2}(k)$  是机器人末端第  $k$  次绕  $Z$  轴方向的角度调整量.  $\Delta u(k)$ 、 $\Delta v(k)$  分别为第  $k$  次测量得到的特征点在  $U$  方向和  $V$  方向的图像误差,  $\theta_{z2}(k)$  为第  $k$  次测量得到的特征直线的角度误差.  $K_{p2}$  和  $K_{i2}$  分别为 PI 控制器的比例系数和积分系数.

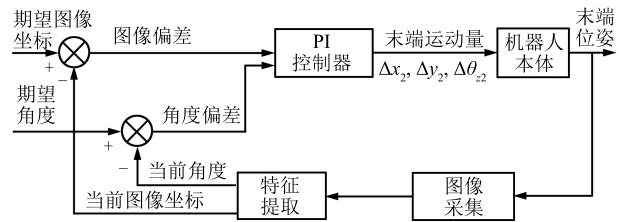


图 6 基于局部图像的机器人控制框图  
Fig. 6 Control block diagram based on the local image of the target

##### 4.2 基于激光传感器的控制

基于激光传感器的控制采用基于位置的控制方案,控制框图如图 7 所示.根据三个激光测距传感器的测量值,得到安装框架的深度信息和激光平面的法向量,并结合对应的期望深度和期望法向量,得到沿  $Z$  轴的平移误差和绕  $X$ 、 $Y$  轴的旋转误差,根据 PI 控制律,得到机器人末端的运动调整量  $(\Delta x_2, \Delta \theta_{y2}, \Delta z_2)$ ,进而实现机器人的运动控制.

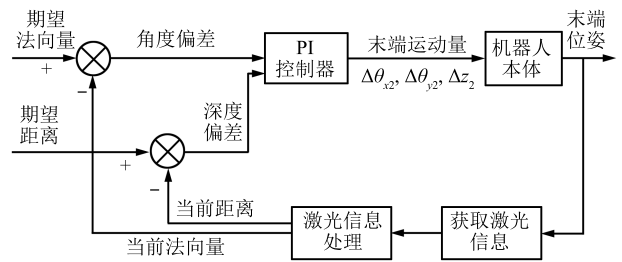


图 7 基于激光反馈的机器人控制框图  
Fig. 7 Control block diagram based on the feedback from laser sensors

根据激光测距传感器的测量值,得到安装框架和大口径器件的位姿偏差,建立如下运动控制律:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_{x2}(k) \\ \Delta \theta_{y2}(k) \\ \Delta z_2(k) \end{bmatrix} = K_{p3} \left( \begin{bmatrix} \theta_{x2}(k) \\ \theta_{y2}(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta_{x2}(k-1) \\ \theta_{y2}(k-1) \\ z_2(k-1) \end{bmatrix} \right) + K_{i3} \begin{bmatrix} \theta_{x2}(k) \\ \theta_{y2}(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \theta_{x_2}(k-1) \\ \theta_{y_2}(k-1) \\ z_2(k-1) \end{pmatrix} + K_{i3} \begin{pmatrix} \theta_{x_2}(k) \\ \theta_{y_2}(k) \\ z_2(k) \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中,  $\Delta\theta_{x_2}(k)$  和  $\Delta\theta_{y_2}(k)$  是机器人末端第  $k$  次绕  $X$  轴方向和绕  $Y$  轴方向的角度调整量,  $\Delta z_2(k)$  是机器人末端第  $k$  次在  $Z$  轴方向的位置调整量.  $\theta_{x_2}(k)$  和  $\theta_{y_2}(k)$  分别是第  $k$  次测量得到的绕  $X$  轴方向和绕  $Y$  轴方向的角度偏差,  $z_2(k)$  是第  $k$  次测量得到的  $Z$  方向的位置偏差.  $K_{p3}$  和  $K_{i3}$  分别为 PI 控制器的比例系数和积分系数.

利用激光测距传感器进行  $X$  和  $Y$  方向的调整时, 由于测量时可以直接得到相应的位置偏差, 所以控制机器人直接在当前位置上移动该偏差, 实现对自由度上的对准.

$$\begin{bmatrix} \Delta x'_2 \\ \Delta y'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中,  $x'_2$  和  $y'_2$  是测量得到的安装框架和大口径器件分别在  $X$  方向和  $Y$  方向的位置偏差,  $\Delta x'_2$  和  $\Delta y'_2$  是机器人末端在对应自由度上的位置调整量.

## 5 实验与结果

### 5.1 实验平台

大口径器件自动化装配实验平台如图 8 所示, 机器人为安川公司生产的六自由度机器人, 型号为 MCL50. 相机采集的图像尺寸为 1620 像素  $\times$  1220 像素, 最大帧率为 25 帧/秒. 激光测距传感器采用 Casati PT50220S, 测量范围为 80~300 mm, 测量精度为测量值的 0.1%.

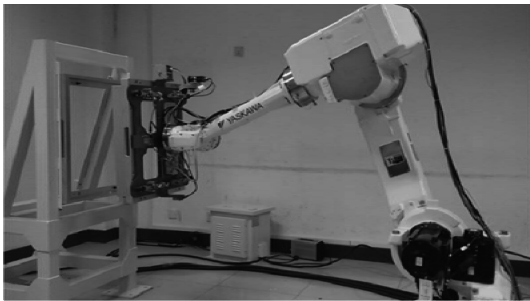


图 8 大口径器件装配平台实物图

Fig. 8 Automated assembly platform for large diameter components

### 5.2 系统标定

粗对准过程中, 为了从安装框架图像得到当前位姿偏差, 需要对 1 号相机进行内外参数标定. 精定位过程中, 为了从三个激光测距传感器的测量值得

到当前位姿偏差, 需要对三个激光测距传感器进行标定. 此外, 为了通过安装框架的相对位姿得到机器人末端调整量, 还需要标定大口径器件与机器人末端的位姿矩阵  $T_s$ .

#### 1) 视觉传感器标定

本文采用张正友的标定方法<sup>[17]</sup>进行相机标定, 靶标为  $9 \times 6$  的棋盘格. 在不同距离不同视角下采集 20 幅靶标图像, 得到相机的内参数和畸变系数如下.

内参数矩阵:

$$\begin{bmatrix} 1898.20 & 0 & 799.65 \\ 0 & 1908.09 & 627.19 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

畸变系数:  $k_1 = -0.095107$ ,  $k_2 = 0.190043$ ,  $p_1 = 0.001094$ ,  $p_2 = 0.001151$ .

在不同机器人位姿下采集 5 幅靶标图像, 得到 1 号相机相对于靶标的外参数, 然后根据文献 [16] 的手眼标定方法, 得到 1 号相机相对机器人末端的手眼矩阵  $T_m$  (位置单位: mm).

$$T_m = \begin{bmatrix} -0.8707 & -0.4836 & -0.0325 & 189.7469 \\ 0.4922 & -0.8699 & -0.0093 & 345.3072 \\ -0.0264 & -0.0350 & 0.9991 & 30.8856 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

#### 2) 激光测距传感器标定

使用机器人示教器, 将大口径器件装入到安装框架中, 记录三个激光测距传感器的测量值, 以其中的最大值为基准, 将剩余两个激光测量值分别加上相应的数值, 使任意两个激光测距传感器的测量值的差值在 0.5 mm 以内.

#### 3) $T_s$ 的标定

根据大口径器件的安装位姿, 经测量绕  $Z$  轴的旋转角度和沿  $Z$  轴的位移量, 得到大口径器件与机器人末端的位姿矩阵 (位置单位: mm).

$$T_s = \begin{bmatrix} -0.8660 & -0.5000 & 0 & 0 \\ 0.5000 & -0.8660 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 65.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

### 5.3 图像特征提取结果

粗对准过程中, 根据 1 号相机反馈的视觉图像, 提取安装框架的边框特征. 先离线建立目标的模型库, 然后通过三维 CAD 模型匹配在线提取目标特征. 安装框架特征提取的实验结果如图 9 所示, 图

9(a)~9(c) 为不同位姿下提取的安装框架边框特征.

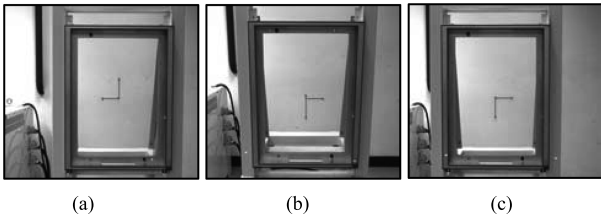


图 9 粗对准过程中提取的边框特征

Fig.9 The feature extract from the coarse alignment

精对准过程中, 根据 2 号相机反馈的视觉图像, 提取安装框架的局部特征. 先利用 HOUGH 变换提取出特征边缘直线, 然后采用基于 RANSAC 的最小二乘算法进一步精确提取特征边缘直线. 图 10 是安装框架局部特征提取的实验结果. 图 10(a)~10(c) 为从远及近提取的安装框架局部图像特征.

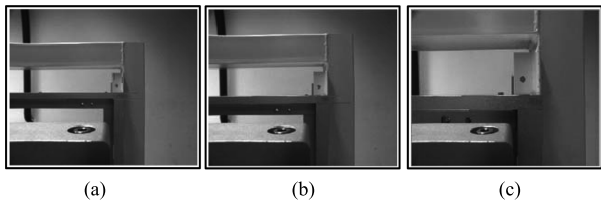


图 10 精对准过程中提取的边框特征

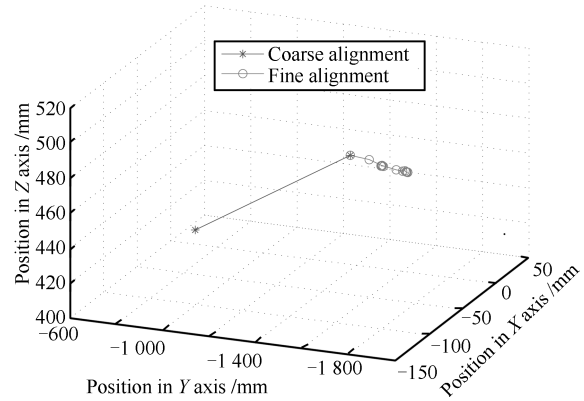
Fig.10 The feature extract from the fine alignment

### 5.4 对准实验结果

为保证粗对准结束时大口径器件和安装框架之间具有足够的安全距离, 同时 2 号相机又能采集到图 10 所示区域的图像, 将粗对准结束时 Z 方向位置偏差设定为  $Z_d = 400$  mm. 在进行对准实验时, 利用 1 号相机采集安装框架图像, 利用标定出的 1 号相机内外参数, 按照式 (1) 和式 (4) 计算出矩阵表示的机器人末端的运动量. 该矩阵沿 X、Y 和 Z 方向的位置量作为机器人末端沿 X、Y 和 Z 轴的运动量, 其姿态矩阵 R 转换为横滚、俯仰和偏转角, 作为机器人末端绕 X 轴、Y 轴和 Z 轴的旋转角度. 粗对准结束后, 2 号相机采集局部图像特征, 按照式 (13) 调整沿 X 和 Y 方向的位置偏差和绕 Z 轴的角度偏差. 然后, 利用激光测距传感器测量大口径器件与安装框架的相对距离, 按照式 (9) 和式 (10) 计算角度和距离偏差, 按照式 (14) 调整绕 X 和 Y 方向的角度偏差和沿 Z 轴的位置偏差. 最后, 利用式 (15) 做位置调整, 实现大口径器件和安装框架的精对准. 图 11 为记录的机器人在一次完整的自动对准过程中其末端在基坐标系中的运动轨迹. 其中, 图 11(a) 和图 11(c) 分别是机器人在自动对准过程中的位置和姿

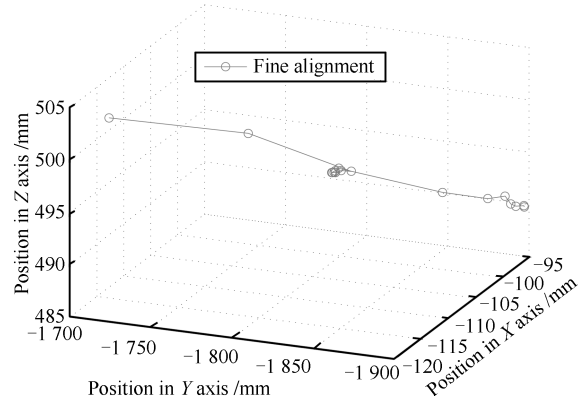
态角曲线. 为了便于观察细节, 分别给出了放大显示的机器人在精对准过程中的位置和姿态角曲线, 见图 11(b) 和图 11(d). 由图 11 可以发现, 对准过程运动平稳.

图 12 给出了不同对准阶段时 1 号和 2 号相机采集的图像. 其中, 图 12(a) 是 1 号相机在粗对准前采集的图像, 图 12(b) 是 1 号相机在粗对准后采集的图像, 图 12(c) 是 2 号相机在精对准前采集的图像, 图 12(d) 是 2 号相机在精对准后采集的图像. 其



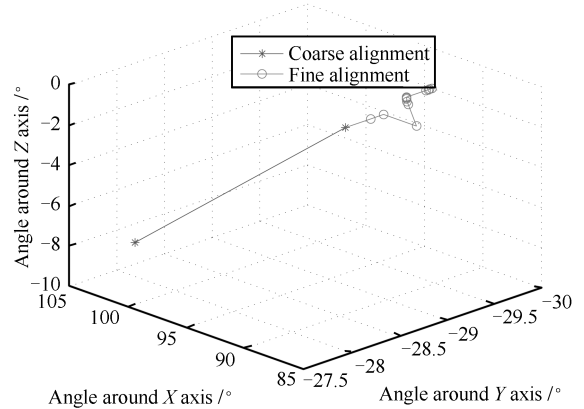
(a) 自动对准过程机器人位置变化曲线

(a) Positions of the robot in the automatic alignment



(b) 精对准过程机器人位置变化曲线

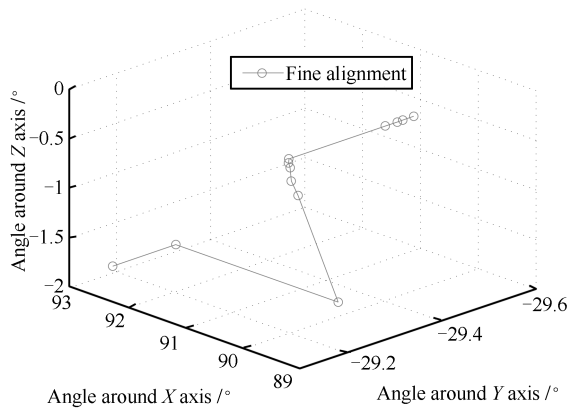
(b) Positions of the robot in the fine alignment



(c) 自动对准过程机器人姿态角变化曲线

(c) Poses of the robot in the automatic alignment

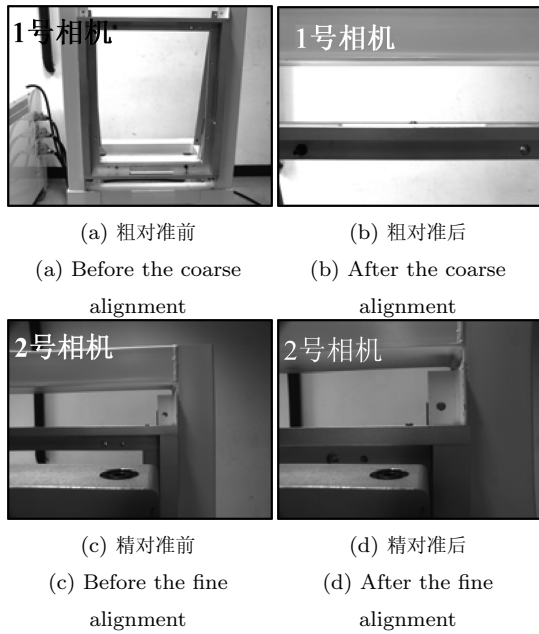




(d) 精对准过程机器人姿态角变化曲线  
 (d) Poses of the robot in the fine alignment

图 11 机器人轨迹

Fig. 11 Trace of the end-effector



(a) 粗对准前 (b) 粗对准后  
 (a) Before the coarse alignment (b) After the coarse alignment  
 (c) 精对准前 (d) 精对准后  
 (c) Before the fine alignment (d) After the fine alignment

图 12 自动对准过程中的图像

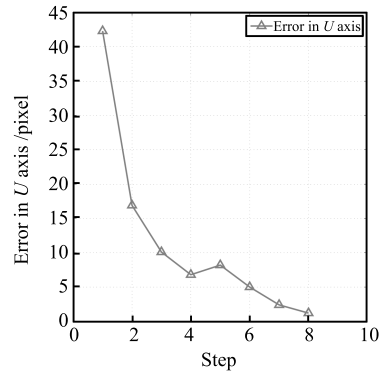
Fig. 12 The images during the automatic alignment

中, 图 12(b) 和图 12(c) 分别是 1 号相机和 2 号相机同时采集的图像, 此时粗对准过程结束, 1 号相机获取的图像已经不能用于测量, 而 2 号相机获取安装框架的局部图像则可以用于进行精对准。

图 13 给出了精对准过程中基于图像视觉控制的图像误差变化情况. PI 控制器的参数分别选为  $K_{p2} = 0.1$  和  $K_{i2} = 0.5$ ,  $U$  方向的给定误差为 2 个像素,  $V$  方向的给定误差为 1 个像素, 绕  $Z$  方向角度的给定误差为 0.1 度. 实验中, 位置与姿态分别调整, 即在完成姿态对准的情况下对位置进行调整. 图 13(a) 为  $U$  坐标误差的变化曲线, 图 13(b) 为  $V$  坐标误差的变化曲线, 图 13(c) 为直线角度误差的变

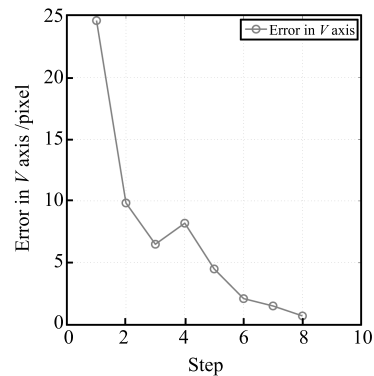
化曲线. 由图 13 可见, 图像特征误差能够快速收敛到给定阈值范围内。

图 14 给出了精对准过程中基于激光测距反馈控制的误差变化曲线. PI 控制器的参数分别选为  $K_{p3} = 0.1$  和  $K_{i3} = 0.6$ . 绕  $X$ 、 $Y$  轴的角度给定误差为 0.1 度, 沿  $Z$  轴的位置给定误差为 0.4 mm. 实验中, 与基于图像的控制采用类似的策略, 在完成姿态对准的情况下对位置进行调整. 图 14(a) 为绕  $X$



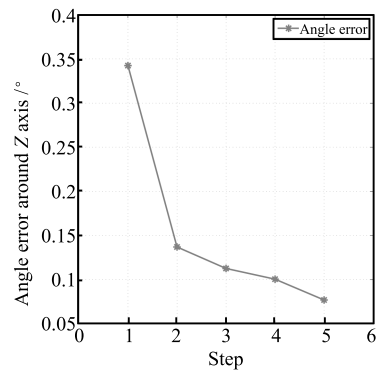
(a)  $U$  方向误差

(a) Errors in  $U$  axis



(b)  $V$  方向误差

(b) Errors in  $V$  axis

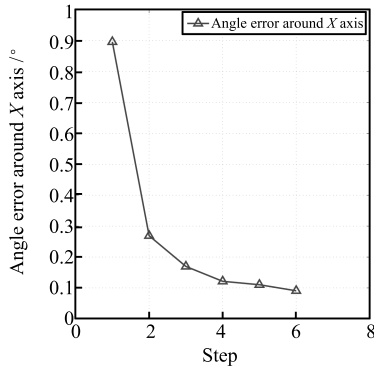


(c) 绕  $Z$  轴角度误差

(c) Errors around  $Z$  axis

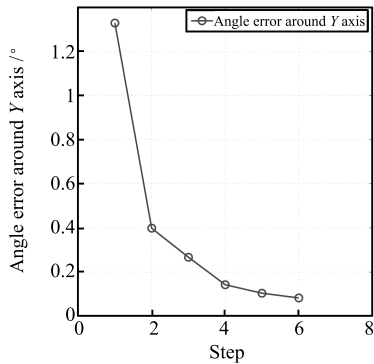
图 13 基于图像偏差的控制误差

Fig. 13 Errors based on the image deviations



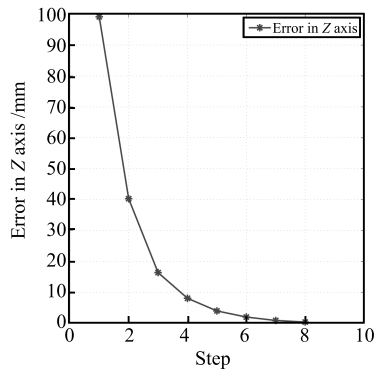
(a) 绕 X 轴角度误差

(a) Errors around X axis



(b) 绕 Y 轴角度误差

(b) Errors around Y axis



(c) Z 方向误差

(c) Errors in Z axis

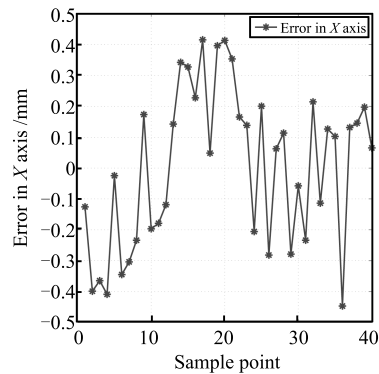
图 14 基于激光反馈的控制误差

Fig. 14 Errors based on the feedback from laser sensors

轴的角度误差曲线, 图 14(b) 为绕 Y 轴的角度误差曲线, 图 14(c) 为沿 Z 轴的位置偏差曲线. 从图 14(a) 和图 14(b) 可以看出, 经过 6 步调整, 绕 X、Y 轴的角度误差都收敛到误差范围内. 从图 14(c) 可以看出, 经过 8 步调整, 沿 Z 轴的位置误差收敛到误差范围内.

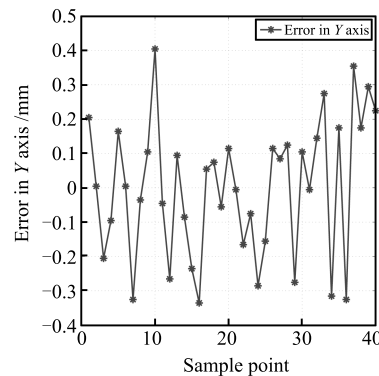
为了验证对准的重复精度, 进行了 40 次对准实验. 首先利用机器人示教器, 将大口径器件装入到

安装框架, 然后让机器人直线运动, 将大口径器件移动到对准位置, 记录此时的机器人位姿, 作为对准实验的真值. 保持安装框架不动, 重复进行 40 次位姿对准实验, 记录每次对准时的机器人位姿, 得到误差曲线如图 15 所示. 同时, 表 1 给出了真值、均值、最大误差绝对值和方差. X 方向的对准最大误差绝对值为 0.45 mm, Y 方向的对准最大误差绝对值为 0.4 mm, Z 方向的对准最大误差绝对值为 0.35 mm, 绕 X、Y 和 Z 轴方向的角度对准最大误差绝对值均为 0.1°.



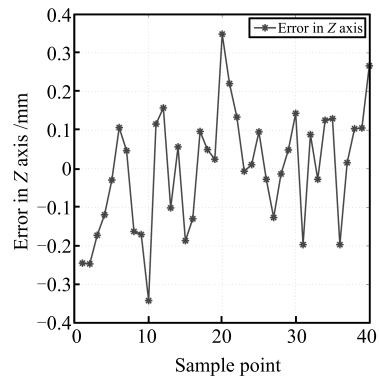
(a) X 方向误差

(a) Errors in X axis



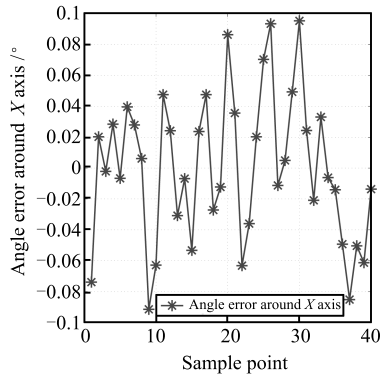
(b) Y 方向误差

(b) Errors in Y axis



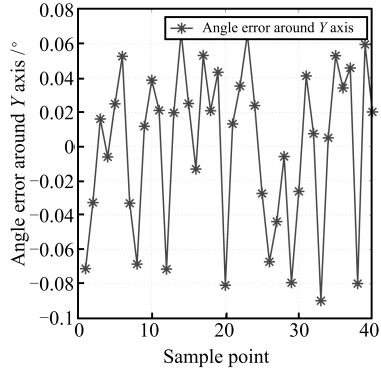
(c) Z 方向误差

(c) Errors in Z axis



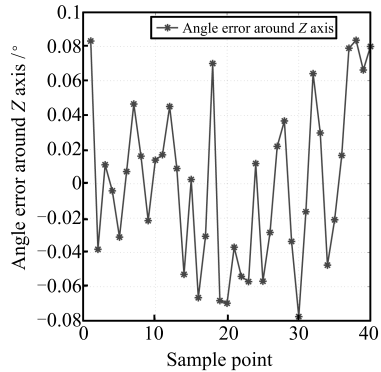
(d) 绕 X 方向角度误差

(d) Errors around X axis



(e) 绕 Y 方向角度误差

(e) Errors around Y axis



(f) 绕 Z 方向角度误差

(f) Errors around Z axis

图 15 对准实验误差

Fig. 15 Alignment experiments errors

表 1 对准实验结果

Table 1 Results from alignment experiments

参数	(X, Y, Z) (mm)	( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ) ( $^\circ$ )
真值	-95.35, -1 898.45, 489.75	90.36, -29.52, -0.32
均值	-95.49, -1 898.62, 489.84	90.40, -29.54, -0.31
最大误差绝对值	0.45, 0.40, 0.35	0.10, 0.10, 0.10

从表 1 可以看出, 位姿误差的方差都很小, 说明本文对准的控制稳定性很好, 能够很好的满足位置误差  $\pm 1$  mm, 姿态误差  $\pm 0.1^\circ$  的应用要求.

## 6 结论

本文提出了一种基于多传感器的大口径器件的自动对准策略, 实现了大口径器件的分阶段自动对准. 由于大口径器件尺寸较大, 仅靠视觉传感器难以获取其六个自由度的精确信息, 所以使用了视觉和激光两种传感器分阶段进行安装框架的相对位姿测量和对准控制. 粗对准过程中, 利用 1 号相机采集的安装框架图像, 测量安装框架的相对位姿, 使机器人末端接近安装框架. 精对准过程中, 根据 2 号相机采集的安装框架局部图像和激光测距传感器的测量值, 分阶段进行机器人的末端位姿控制. 实验结果表明, 所提出的方法能够很好的满足位置误差  $\pm 1$  mm, 姿态误差  $\pm 0.1^\circ$  的应用要求. 为了实现大口径器件的顺利装配, 位姿对准完成后, 需要进行大口径器件的插入, 如何实现插入过程中的力控制是下一步研究工作的重点.

## References

- 1 Bartenwerfer M, Diederichs C, Fatikow S. Automated robotic assembly for a micro-cartridge system inside the scanning electron microscope. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong, China: IEEE, 2014. 5197-5202
- 2 Park W, Chirikjian G G. An assembly automation approach to alignment of noncircular projections in electron microscopy. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(3): 668-679
- 3 Zhang B, Wang J J, Rossano G, Martinez C, Kock S. Vision-guided robot alignment for scalable, flexible assembly automation. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Karon Beach, Phuket, Thailand: IEEE, 2011. 944-951
- 4 Song H C, Kim Y L, Song J B. Automated guidance of peg-in-hole assembly tasks for complex-shaped parts. In: Proceedings of the 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, USA: IEEE, 2014. 4517-4522
- 5 Chang W C, Shao C K. Hybrid fuzzy control of an eye-to-hand robotic manipulator for autonomous assembly tasks. In: Proceedings of the 2010 SICE Annual Conference. Taipei, China: IEEE, 2010. 408-414
- 6 Kwon S, Jeong H, Hwang J. Kalman filter-based coarse-to-fine control for display visual alignment systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2012, 9(3): 621-628
- 7 Makita S, Kadono Y, Maeda Y, Miura S, Kunioka I, Yoshida K. Manipulation of submillimeter-sized electronic parts using force control and vision-based position control. In: Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, USA: IEEE, 2007. 1834-1839

- 8 Thomas U, Molkenstruck S, Iser R, Wahl F M. Multi sensor fusion in robot assembly using particle filters. In: Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, Italy: IEEE, 2007. 3837–3843
- 9 Skotheim O, Lind M, Ystgaard P, Fjerdingen S A. A flexible 3D object localization system for industrial part handling. In: Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Algarve, Portugal: IEEE, 2012. 3326–3333
- 10 Liu Z, Xie Y, Xu J, Chen K. Laser tracker based robotic assembly system for large scale peg-hole parts. In: Proceedings of the 4th Annual International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems. Hong Kong, China: IEEE, 2014. 574–578
- 11 Yamataka M, Kuga T, Takayama T, Furukawa M, Ishida J. Robot assembly system for LCD TV using cooperative force control. In: Proceedings of the 34th Annual Conference on Industrial Electronics. Orlando, USA: IEEE, 2008. 3443–3448
- 12 Gil M, Lee S, Kang M S, Shin K, Han C S. Sensor device for intuitively manipulating the heavy material-handling robot. In: Proceedings of the 2014 Annual International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems. Hong Kong, China: IEEE, 2014. 527–530
- 13 Kim Y K, Kim Y, Kim K S, Kim S, Jung Y S, Jang I G, Kim E H. Developing a robust sensing system for remote relative 6-DOF motion using 1-D laser sensors. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Systems. Vancouver, Canada: IEEE, 2012. 1–4
- 14 Kim Y, Kim Y K, Kim K S, Kim S, Kwak B M, Jung Y S, Jang I G, Kim E H. Structure optimization of 1-D laser sensors assembly for robust 6-DOF measurement. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Systems. Vancouver, Canada: IEEE, 2012. 1–4
- 15 Ulrich M, Wiedemann C, Steger C. Combining scale-space and similarity-based aspect graphs for fast 3D object recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, **34**(10): 1902–1914
- 16 Tan Min, Xu De, Hou Zeng-Guang, Wang Shuo, Cao Zhi-Qiang. *Advanced Robot Control*. Beijing: Higher Education Press, 2007. 26–27  
(谭民, 徐德, 侯增广, 王硕, 曹志强. 先进机器人控制. 北京: 高等教育出版社, 2007. 26–27)
- 17 Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330–1334



**卢金燕** 中国科学院自动化研究所博士研究生. 2011 年获得北京航空航天大学计算机科学与技术专业硕士学位. 主要研究方向为位姿检测, 视觉测量, 机器人控制. E-mail: jinyan.lu@ia.ac.cn  
(**LU Jin-Yan** Ph.D. candidate at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her

master degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2011. Her research interest covers pose detection, visual measurement, and robot control.)



**徐德** 中国科学院自动化研究所研究员. 主要研究方向为机器人和自动化, 视觉测量, 视觉控制, 智能控制, 焊缝跟踪, 视觉定位, 显微视觉, 微装配. 本文通信作者. E-mail: de.xu@ia.ac.cn

(**XU De** Professor at the Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers robotics and automation, visual measurement, visual control, intelligent control, welding seam tracking, visual positioning, microscopic vision, and micro-assembly. Corresponding author of this paper.)



**覃政科** 中国科学院自动化研究所博士研究生. 2012 年获得华中科技大学控制科学与工程学士学位. 主要研究方向为计算机视觉与机器人控制.

E-mail: zhengke.qin@ia.ac.cn

(**QIN Zheng-Ke** Ph.D. candidate at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received

his bachelor degree in control science and technology from Huazhong University of Science and Technology in 2012. His research interest covers computer vision and robot control.)



**王鹏** 中国科学院自动化研究所副研究员. 2010 年获得中国科学院自动化研究所博士学位. 主要研究方向为机器视觉, 机器人系统及应用, 系统建模与仿真. E-mail: peng\_wang@ia.ac.cn

(**WANG Peng** Associate professor at the Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his

Ph.D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2010. His research interest covers machine vision, robot system and application, and system modeling and simulation.)



**任超** 中国科学院自动化研究所工程师. 2008 年获西安电子科技大学机电学院学士学位. 主要研究方向为机械设计, 结构设计, 数字样机虚拟仿真技术. E-mail: renchao4185@sina.com

(**REN Chao** Engineer at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his bachelor

degree from Xidian University in 2008. His research interest covers mechanical design, structure design, and digital mock-up virtual simulation technology.)