

引文格式: 杜福洲, 叶晗鸣. 基于视觉的大尺度部件相对位姿实时测量方法研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(6): 34-40, 47.

DU Fuzhou, YE Hanming. Research on real-time relative pose measurement method of large-scale components based on vision[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(6): 34-40, 47.

基于视觉的大尺度部件相对位姿实时测量方法研究*

杜福洲, 叶晗鸣

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 相对位姿是装配过程中的一项重要监控项。针对大尺度部件对接过程中的相对位姿测量需求, 提出了一种基于视觉的相对位姿实时测量方法。该方法利用单目视觉技术, 通过采集合作靶标的图像, 实时解算大部段间的相对位姿, 用于辅助大尺度部件的装配。首先, 设计了一套相对位姿实时测量系统, 包括搭载单目相机的视觉测量单元, 以及用于辅助位姿解算的合作靶标; 其次, 对相对位姿测量的完整流程进行了研究, 包含系统标定方法与实时位姿解算方法; 最后, 在实验室环境下对位姿测量系统的精度进行测试。试验结果表明, 位姿测量系统在垂直于光轴方向的重复精度可达 0.02mm, 沿光轴方向重复精度优于 0.2mm, 输出位姿结果时间低于 0.3s; 对多测量单元组网测量进行了仿真计算, 垂直于光轴方向的重复精度优于 0.1mm, 沿光轴方向重复精度优于 0.2mm, 输出位姿结果时间优于 1.3s。试验结果表明, 提出的方法可满足一般大尺度部件对接过程实时位姿监控与对接状态评估的需求。

关键词: 相对位姿测量; 实时位姿测量; 大尺度部件; 测量辅助装配; 数字化测量

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.06.034



杜福洲

副教授、博士, 主要从事智能制造技术与系统、数字化装配与测量技术应用及装备研发等。

飞机、船舶、卫星等大尺度机械产品, 由于其结构复杂, 几何尺度较大, 大多采用分段分舱制造的方式, 最终将各分段对接装配而成^[1]。在装配过程的最终阶段, 各部件尺度大, 同时要求较高的对接精度, 工艺难度大, 是大尺度机械产品装配过程中的关键环节。在大尺度产品的最终对接过程中, 相对位姿是一个重要的监控项, 可为部段对接提供有效的数据支撑, 辅助装配作业的进行。因此, 高精度的实时相对位姿测量方法在大尺度装配这一工业场景具有重要意义。

目前常用的大尺度位姿测量设备包括全站仪、激光跟踪仪、iGPS、三坐标测量机和视觉测量系统等。全站仪、激光跟踪仪^[2]、iGPS^[3]等测量设备具有测量范围大、测量精度高等优点, 但在位姿测量时需逐一获取各测点坐标, 测量效率相对较低, 并且在大尺度部件装配的场景下, 需通过转站以覆盖完整测量场。三坐标测量机^[4]结构稳定, 具有很高的测量精度和重复性, 但其测量范围有限, 不适用于大尺度装配场景。

基于视觉的相对位姿测量方法结构简单, 装置安装方便灵活, 测量

* 基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2018206B002, JCKY2017206B004)。

精度高,同时具有较好的实时性。中国科学院的赵汝进等^[5]提出了一种基于直线特征的单目视觉位姿测量方法,利用新颖的匹配评价函数,提高了位姿解算的精度和鲁棒性。北京理工大学的蔡晗^[6]提出了基于双目视觉的非合作目标相对测量方法,利用综合匹配的方法解算相对位姿。哈尔滨工业大学的刘俊^[7]利用物体的CAD模型,通过图像金字塔和层次聚类结合的方法实现基于单目视觉的目标识别与位姿估计。中国科学院大学的王煜睿^[8]提出了基于比例预测的精度提升网络模型,通过比较物体三维模型渲染图像和真实图像的差异优化位姿估计结果,提升了算法的鲁棒性和泛化能力。Kehl等^[9]在快速物体检测网络架构(Single shot multiple-box detector, SSD)的基础之上,进一步完善了目标位姿的损失函数,同时在训练数据中增加了虚拟样本,在PASCAL数据集上得到了较高的位姿估计精度。Li等^[10]提出了迭代匹配深度神经网络(Deep iterative matching, DeepIM)用于解算物体的位姿,该方法需要首先获得一个目标位姿的初始估计,通过匹配虚拟空间图像与实物图像优化位姿估计结果。

针对大尺度装配的具体工业场景,本文提出了一种基于单目视觉的相对位姿实时测量方法。采用基于合作目标的位姿测量方法,保证测量系统的精度和稳定性。设计了一套可独立工作的视觉测量系统,包含若干对视觉测量单元和合作靶标,视觉测量单元固定在调整部段上,合作靶标固定在基准部段上,视觉系统采集靶标图像,实时解算部段间的相对位姿,并通过无线传输的方式将测量数据返回。后端接收各测量单元的位姿测量结果,通过多源数据融合算法,解算大尺度部件的实时相对位姿。在实验室环境下对相对位姿实时测量系统进行测试,验证其精度和

实时性。

相对位姿实时测量系统构建

基于视觉的大尺度部件相对位姿实时测量系统框架如图1所示。系统可分为应用层、算法层、信息层与物理层4个层次。应用层将测量过程分为相机参数标定、安装参数标定、实时位姿测量和系统精度评价4部分。算法层给出了位姿测量系统涉及的所有算法。信息层包含了整个系统所涉及的数据,包括标定参数、实时采集图像信息和实时解算的位姿结果等。物理层为测量系统所包含的硬件,包括视觉测量单元、合作靶标和上位机。其中,视觉测量单元安装在调整部段上,合作靶标安装在基准部段上,上位机以无线通信的

方式调度视觉测量单元工作,接收实时测量数据。

基于视觉的大尺度部件相对位姿实时测量系统由合作靶标和视觉测量单元共同组成。其中,合作靶标固定在基准部段上,视觉测量单元固定在调整部段上。视觉测量单元与合作靶标对应布置,保证合作靶标在视觉测量单元的视场范围内。对于刚性较好的部件,满足刚体假设,利用一组视觉测量单元即可满足位姿测量需求。对于刚性稍差的大尺度部件,无法满足刚体假设,则可采用多组视觉测量单元联合测量的方法。如图2所示,在调整部段上设置3组视觉测量单元,两组视觉测量单元布置在对接端面上,一组视觉测量单元布置在调整部段尾端底面的中心线



图1 基于视觉的大尺度部件相对位姿实时测量系统框架

Fig.1 Vision-based real-time measurement system framework for relative pose of large-scale components

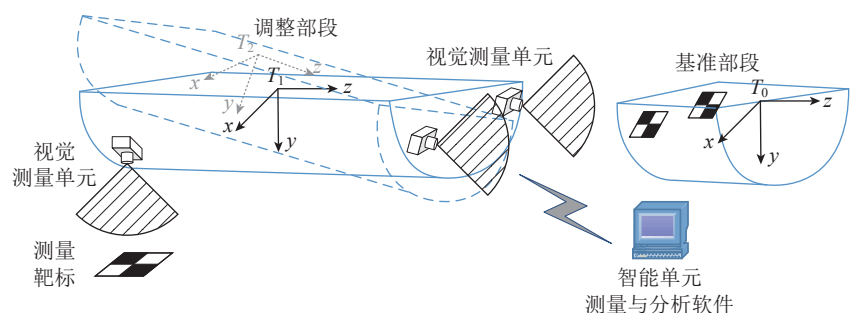


图2 相对位姿实时测量系统的组成

Fig.2 Composition of real-time relative pose measurement system

上,完整覆盖整个测量场。

视觉测量单元结构如图 3 所示,硬件组成包括工业相机、处理器、无线通信模块等。工业相机是前端的传感单元,实时采集图像,并传输至处理器。处理器接收来自工业相机的图像,实时解算相对位姿,并通过无线通信模块将位姿解算结果传输至上位机。处理器具有独立的供电模块,因此视觉测量单元可独立工作,无需额外的线缆,安装灵活,具有较强的便携性。视觉测量单元底板上具有 4 个定位孔,方便安装在待测物段上;同时具有 4 个标定孔,便于标定视觉测量单元的安装位置。图 4 为视觉测量单元实物图。

视觉测量单元的数据处理单元是嵌入式开发板,搭载四核 Cortex-A57 处理器,128 核 Maxwell GPU 及 4GB LPDDR 内存,能够为位姿解

算提供足够的算力。工业相机分辨率为 2592 × 1944,帧率为 14fps,采用 1/2.5' CMOS 传感器,像素尺寸为 2.2μm × 2.2μm,满足位姿解算的精度要求。

系统标定与位姿解算

1 系统标定方法

1.1 相机内参数标定

相机内参数标定是一切视觉测量系统的基础。

针孔相机模型是最常见的表示相机成像原理的数学模型,如图 5 所示。二维像点 $p(x, y)$ 与对应的三维物点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 之间关系满足以下关系式:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = M_c(R|T) \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$M_c = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_o & 0 \\ 0 & f_y & v_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, M_c 为相机内参数矩阵,表征相机坐标系到像素坐标系的转换关系;而 $(R|T)$ 为相机外参数齐次矩阵,即相机位姿,表征相机坐标系相对于世界坐标系的转换关系。在已知相机内参数矩阵的前提下,通过采集已知目标的图像,建立若干特征点的三维空间坐标及其对应的二维像素坐标的映射,即可求解得到相机位姿。因此,相机标定将直接影响位姿测量的精度。

利用张正友相机标定法^[11],通过在不同姿态下采集已知尺寸标定板的图像,能够快速准确地实现工业相机内参数矩阵的标定。

1.2 手眼参数标定

为确定相机坐标系与相机基座坐标系之间的转换关系,还需要进行手眼标定的工作。

手眼标定常用于机器人视觉,是为了确定相机(眼)相对于机械臂(手)的位姿转换关系,本文利用同样的方法确定相机坐标系与相机基座坐标系的位姿转换关系。

手眼标定可以用式(3)简洁地表示:

$$AX=XB \quad (3)$$

其中, A 表示相机移动前后位姿变换矩阵; B 表示机器人移动前后的机器

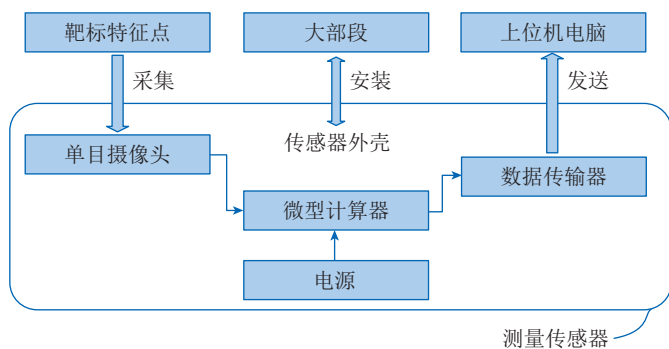


图 3 视觉测量单元组成

Fig.3 Composition of visual measurement unit



图 4 视觉测量单元实物图

Fig.4 Physical image of visual measurement unit

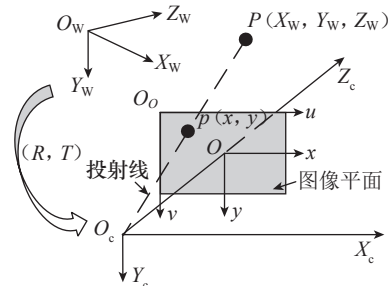


图 5 相机标定中的针孔相机模型

Fig.5 Pinhole camera model in camera calibration

人末端执行机构坐标系的变换关系; X 表示机器人末端执行机构坐标系到相机坐标系地转换矩阵。

设相机在两个不同位置时, p_{c1} 、 p_{c2} 分别表示两相机坐标系下的点, p_{e1} 、 p_{e2} 分别表示两机器人末端坐标系下的点,则有如下关系:

$$p_{c2}=Ap_{c1} \quad (4)$$

$$p_{e2}=Bp_{e1} \quad (5)$$

$$p_{c1}=Xp_{e1} \quad (6)$$

$$p_{c2}=Xp_{e2} \quad (7)$$

相机坐标系到标定物坐标系的转换关系可由PnP算法计算得到,设 N_1 、 N_2 分别为相机在两个位置相对标定物的外参数矩阵(标定物固定), p_o 标定物坐标系下的点,则有

$$p_{c1}=N_1 p_o \quad (8)$$

$$p_{c2}=N_2 p_o \quad (9)$$

机器人末端执行机构坐标系与机器人基座坐标系的转换关系可以由机器人系统的控制面板读取,设 E_1 、 E_2 分别为机器人末端执行机构在两个位置机器人基座的坐标转换关系(机器人基座固定), p_b 为基座坐标系下的点,有

$$p_{c1}=E_1 p_b \quad (10)$$

$$p_{c2}=E_2 p_b \quad (11)$$

由式(10)、(11)可以得到

$$A=N_2 N_1^{-1} \quad (12)$$

$$B=E_2 E_1^{-1} \quad (13)$$

将相机固定于机械臂执行机构的末端,在场景中固定一个标定板,控制机器人使相机在不同位姿采集标定板图像,同时记录该位置下机器人面板的示数。为了取得更好的标定结果,数据采集过程视点需分布在以标定板为中心的半球上。在每个位置,由视觉系统可求取相机相对于标定板的相对位姿,由机器人面板可知相机基座相对于机器人坐标系的相对位姿,采集若干图像,可将该问题转化为 $AX=XB$ 的最优化问题,综合求解得到相机坐标系与相机基座坐标系之间的转换关系。

2 相对位姿实时解算方法

2.1 图像靶点提取

视觉单元实时采集合作靶标图像,为求取位姿,首先应提取靶点,即合作靶标上6组同心几何图形的中心。

合作靶标如图6所示。该靶标包含5组同心圆环和一组同心正方形。靶标呈不对称式分布,避免位姿解算出现多解的情况。同心几何图形的设计使合作目标与环境中的其他几何特征区分,并且可通过多次测量取平均值的方法提高靶标提取的精度。

视觉测量系统采集到靶标图像之后,首先需要提取靶标上的6个靶点坐标。

图像靶点提取算法如下:

(1)图像预处理操作,通过滤波算法去除图像的噪声;

(2)对图像进行二值化处理;

(3)提取所有轮廓,并按其包含关系将其存储为树形结构;

(4)以深度遍历方式检索存在连续4层轮廓的轮廓组,同时按照轮廓两两面积比进行二次筛选;

(5)提取轮廓求取重心,得到6个靶标中心点的像素坐标。

提取得到6个靶点的像素坐标后,需将6个靶点按照预先设计好的规则进行排序。称圆形靶点为普通靶点,正方形靶点为特殊靶点。规定靶点排列顺序如下:以特殊靶点为起始,按逆时针方向排列各个靶点坐标。靶点排序算法的主要步骤如下:

(1)计算普通靶点云重心

$$P_c = \frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N P_i;$$

(2)计算 P_c 到特殊靶点 P_s 的向量 $\overline{P_c P_s}$,以此作为参照,根据所有普通靶点 P_i ($i=2,3, \dots, N$)到 P_s 的向量 $\overline{P_i P_s}$ ($i=2,3, \dots, N$),求出 $\overline{P_c P_s}$

$$\text{与 } \overline{P_i P_s} \text{ 夹角 } \theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{\overline{P_c P_s} \cdot \overline{P_i P_s}}{|\overline{P_c P_s}| \cdot |\overline{P_i P_s}|} \right)$$

($i=2,3, \dots, N$);

(3)判断向量 $\overline{P_c P_s} \times \overline{P_i P_s}$ 方向,即 Z 值正负,若 $Z < 0$ 则修正 $\theta_i' = \theta_i + \pi$;

(4)根据 θ_i 从小到大对点 P_i ($i=2,3, \dots, N$)进行排序,最后将点 P_s 合并入 P_i ,得到与三维坐标点顺序一致的二维坐标点序列。

2.2 相对位姿解算

根据空间三维点与成像平面二维点的对应关系求解相机的位置与姿态(即相机的外参数)的问题,被称为透视 n 点投影问题,也就是人们所熟知的PnP(Perspective- n -points)问题^[12]。PnP问题讨论的是,基于待测物的 n 个在三维空间坐标系内相对位置关系确定的点,根据相机采集到的待测物的图像信息,计算相机相对于待测物的相对位置与姿态。PnP模型是在已知相机内参的情况下讨论的问题,给定条件是空间内的 n 个已知坐标系的点与其对应的图像坐标系下的投影点,求解目标是相机的外参数矩阵 M ,包含一个旋转矩阵 R 与平移矩阵 T 。

$$M = \begin{pmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

相对位姿解算流程如图7所示。PnP算法需要的内参数包括相机内参数和靶点在世界坐标系下的三维坐标,可分别通过相机标定与靶点标定得到。相机实时采集图像,通

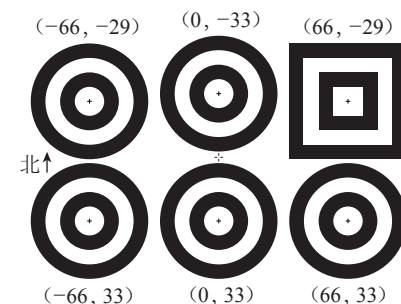


图6 合作靶标设计

Fig.6 Cooperative target design

过靶标提取算法得到各靶点在像素坐标系下的二维坐标,将靶点在像素坐标系下的二维坐标与其在靶标坐标系下的三维坐标一一对应,建立 PnP 模型,利用 EPnP 方法求解,由此得到相机坐标系相对靶标坐标系的相对位姿。

3 多源数据融合方法

若大尺度部件在对接过程中具有较好的刚性,可视为一个刚体,那么一组视觉测量单元和靶标即可满足对接过程中的位姿测量需求。但在实际对接过程中,由于部件尺度较大,仅能满足局部刚体假设,因此需要多对视觉测量单元与靶标联合测量,以完整覆盖测量域,得到更为准确的实时位姿测量结果。

大尺度部件装配的视觉测量场景中,包含多个坐标转换关系。以 3 组视觉测量单元、靶标的情况为例,详细说明测量场景的坐标转换关系,其他情况同理。

定义如下 6 个坐标系:调整部段坐标系、基准部段坐标系、相机基座坐标系、相机坐标系、靶标基座坐标系、靶标坐标系。如图 8 所示,其中实线表示两个坐标系固连,虚线表示两个坐标系无相对约束。

基准部段坐标系与调整部段坐标系是两个对接部段的坐标系,它们之间的相对位姿转换关系是测量系统的目标输出量。

视觉测量单元安装在调整部段上,因此相机坐标系、相机基座坐标系、调整部段坐标系彼此之间的转换关系在对接过程是保持不变的,它们之间的坐标转换关系可以通过预先的标定工作确定。其中,相机坐标系和相机基座坐标系之间的转换关系可以通过手眼标定方法解算得到,而相机基座坐标系和调整部段坐标系之间的转换关系可以利用激光跟踪仪等高精度测量设备标定。

同理,靶标坐标系、靶标基座坐标系和基准部段坐标系三者之间的转换关系也是固定不变的。定义靶标坐标系和靶标基座坐标系重合,靶标基座坐标系与基准部段坐标系之间的转换关系同样可通过激光跟踪仪等设备进行标定。

因此,在基准部段与调整部段之间的位姿链中,仅有相机坐标系与靶标坐标系之间的转换关系是未知的。在对接过程中,相机与靶标的相对位姿在不断变化,相机采集靶标图像,按照相对位姿实时解算方法,可实时解算靶标坐标系相对相机坐标系的相对位姿。

得到 3 组视觉测量单元返回的位姿测量结果后,选取全局特征点,对各视觉测量单元的测量结果进行融合,得到相对位姿。一般选取全局特征点为各靶标上的靶标点。通过靶标坐标系 - 靶标基座坐标系 - 基

准部段坐标系的位姿链,可将所有靶标点坐标转换到基准部段坐标系下,通过靶标坐标系 - 相机坐标系 - 相机基座坐标系 - 待装部段坐标系的位姿链,可将所有靶标点坐标转换到调整部段坐标系下。由此,得到了靶标点在基准部段坐标系与调整部段坐标系下的坐标,利用最小二乘法即可求解调整部段相对于基准部段的相对位姿。

试验与分析

1 系统标定

任何测量系统在使用之前都需要进行标定,标定精度将直接影响测量系统的整体精度。

采用张正友标定法对相机进行标定。固定相机,将标定板置于相机视场内,变换标定板的姿态采集多张图像,综合求解得到相机内参数矩阵和畸变系数:

$$M_c = \begin{pmatrix} 2468.455 & 0 & 626.752 \\ 0 & 2467.841 & 499.696 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\delta = (-0.24028, 0.50094, 0.00062, 0.00008, -5.45378)$$

手眼标定试验场景如图 9 所示。

将测量单元固定在 KUKA 机器人的执行机构末端,在环境中固定一个标定板,控制 KUKA 机器人在不同视点下采集靶标板的图像,同时记录机器人当前的位姿。试验过程中,

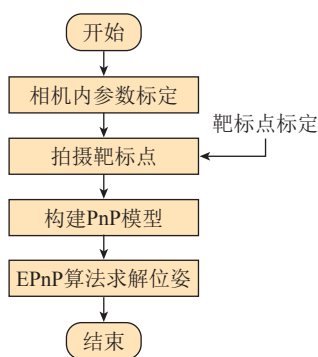


图 7 相对位姿解算算法流程

Fig.7 Relative pose calculation algorithm flow

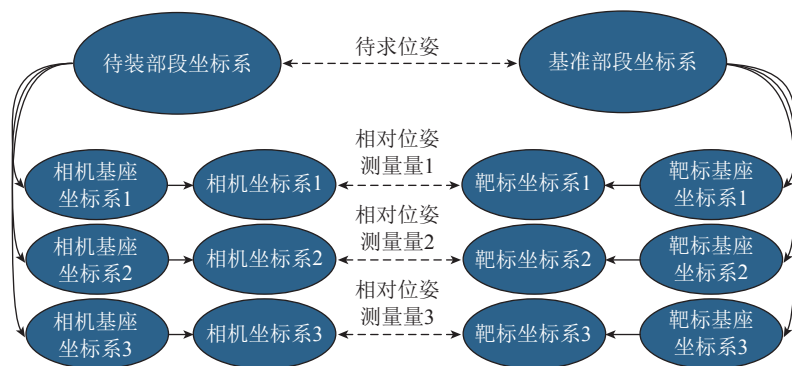


图 8 相对位姿测量系统坐标关系

Fig.8 Coordinate relation of relative pose measurement system

保证相机视点大致分布在以标定板为球心的半球上。

手眼标定试验结果如下:

$$x = 20.539\text{mm}$$

$$y = -7.830\text{mm}$$

$$z = 184.978\text{mm}$$

$$R_x = -0.020^\circ$$

$$R_y = 0.001^\circ$$

$$R_z = -1.582^\circ$$

2 单测量单元试验结果分析

在实验室环境下搭建模拟装配场景,如图 10 所示。其中,视觉测量单元固定在 KUKA 机器人执行机构的末端,模拟调整部段;靶标固定在基准部段上。

在某个固定位置,利用视觉测量单元多次采集位姿数据,分析相对位姿测量系统的重复精度。

对场景中的多个不同测点,分别进行多次数据采集,求取位姿解算结果各平移分量的标准差,如表 1 所示。随着序号的增大,合作靶标从相机视场的一侧移动至视场的另一侧。从结果可知,4~7 组的样本标准差 s 较小,而其余几组稍大,这是因为视觉测量系统在视场中央精度较高,而视场边缘由于存在一定的畸变,降低了测量精度。

对位姿测量结果各分量求取均值,得到位姿各平移分量的重复精度,如表 2 所示。可知,位姿测量系统在垂直于光轴方向(X 与 Y 方向)的平移分量重复精度可达 0.02mm ,在沿光轴方向的测量重复精度优于 0.2mm 。这是因为单目视觉系统对于深度信息不敏感,所以垂直于光轴方向的测量精度优于沿光轴方向的测量精度。

视觉测量单元测量得到一个位姿测量结果平均用时为 0.282s ,可实现大尺度部件装配过程中的实时位姿测量。激光跟踪仪、全站仪、iGPS 等传统方法,需逐点测量再拟合位姿,而本文所提出的方法可以直接由图像求解得到位姿,在位姿测量实时

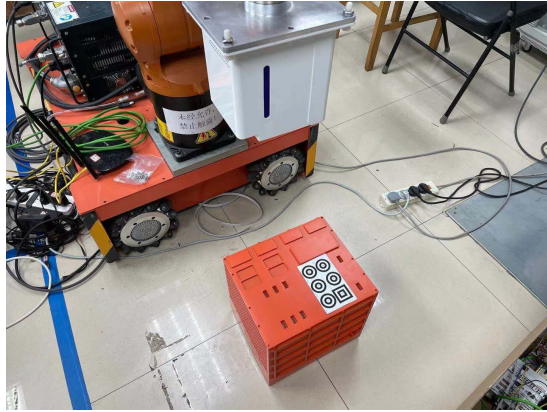


图 9 手眼标定试验

Fig.9 Hand-eye calibration experiment



图 10 相对位姿测量系统实验室验证场景

Fig.10 Laboratory verification scene of relative pose measurement system

表 1 相对位姿各平移分量在各测点的标准差

Table 1 Standard deviation of each translation component of relative pose at each measuring point

mm

序号	s_x	s_y	s_z	s
1	0.033777	0.016635	0.231537	0.234578
2	0.016205	0.015308	0.171162	0.172608
3	0.004971	0.0153	0.122617	0.123668
4	0.001587	0.005228	0.068702	0.068919
5	0.003656	0.012216	0.054034	0.055518
6	0.004787	0.01111	0.035735	0.037727
7	0.008471	0.011533	0.058613	0.060334
8	0.021048	0.011366	0.120088	0.122447
9	0.026456	0.01029	0.115777	0.119206

表 2 单测量单元相对位姿各平移分量的重复精度

Table 2 Repeatability of each translation component of relative pose of a single measurement unit

mm

σ_x	σ_y	σ_z	σ
± 0.0134	± 0.0121	± 0.1087	± 0.1106

性上具有显著的优势。

3 多测量单元仿真结果分析

在 MATLAB 平台以仿真计算的方法测试多视觉融合方法的性能。按照图 2 所示设置 3 组视觉测量单元,其中两个固定于调整部段对接端面,光轴方向垂直于端面,指向基准部段;另一个视觉测量单元固定于调整部段末端底面中心,光轴方向垂直于地面,指向地面。基准部段与调整部段的尺寸均为 25m × 20m × 15m。

按照单测量单元试验结果设定各测量单元位姿测量结果的不确定度,仿真次数 1000 次,用蒙特卡洛法计算系统整体的测量重复精度。结果如表 3 所示。3 个平移分量的重复精度相较于单测量单元的重复精度均有所下降,但垂直于光轴方向的平移分量均优于 0.1mm,沿光轴方向平移分量优于 0.2mm。

多源协同测量过程包含各测量单元获取位姿、测量数据无线传输与位姿融合解算 3 个环节。其中,视觉测量单元获取位姿环节用时 0.282s,如前文所述;测量数据无线传输环节指上位机获取各测量单元的测量数据过程,在实验室环境下测试该环节用时优于 1s;位姿融合解算过程数据量较小,根据仿真计算结果,该环节用时优于 0.01s。因此,多源协同测量过程实际用时优于 1.3s,可以满足大尺度部件相对位姿实时测量的要求。

结论

(1) 本文提出了一种基于视觉的大尺度部件相对位姿实时测量方法。设计视觉测量单元与合作靶

标,通过图像信息实时解算基准部段与调整部段的相对位姿,精度满足大尺度部件装配过程的位姿测量需求。

(2) 本文所提出的方法具有很好的实时性。根据实验室下的测试结果,算法输出一次位姿测量结果耗时 0.3s,能够实现大尺度部件对接过程的实时位姿监控。

(3) 本文所提出的视觉测量单元体积较小,安装和使用过程简单,可多台设备组网工作,能够完整覆盖大尺度部件装配的测量场,具有很强的工业应用价值。

参考文献

[1] 杜福洲, 吴典. 面向大尺度产品对接的位姿测量模式研究与应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(15): 34-41.

[2] 聂海滨. 基于激光跟踪仪的大型设备精密测量关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.

[3] 范斌, 季青松, 李明飞, 等. iGPS 测量系统与激光跟踪仪在某飞机大部件数字化装配中的对比应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(5): 57-62.

[4] 韩振华, 刘书桂, 高礼圳, 等. 智能三坐标测量机的零件位姿识别[J]. 中国机械工程, 2017, 28(14): 1730-1734, 1741.

HAN Zhenhua, LIU Shugui, GAO Lizhen, et al. Part position and orientation recognitions on intelligent CMM[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(14): 1730-1734, 1741.

[5] 赵汝进, 张启衡, 左颖睿, 等. 一种基于直线特征的单目视觉位姿测量方法[J]. 光电子·激光, 2010, 21(6): 894-897.

ZHAO Rujin, ZHANG Qiheng, ZUO Haorui, et al. A mono-vision method of measuring pose based on line features[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(6): 894-897.

[6] 蔡晗. 基于双目视觉的非合作目标相对测量实验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

CAI Han. Experiment research of non-cooperative space target relative measurement based on binocular vision[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

[7] 刘俊. 基于单目视觉的物体位姿估计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

LIU Jun. Study on object pose estimation based on monocular vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[8] 王煜睿. 低成本视觉下的三维物体识别与位姿估计[D]. 深圳: 中国科学院深圳先进技术研究院, 2020.

WANG Yurui. 3D Object recognition and pose estimation in low-cost vision[D]. Shenzhen: Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, 2020.

[9] KEHL W, MANHARDT F, TOMBARI F, et al. SSD-6D: making RGB-based 3D detection and 6D pose estimation great again[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Venice, 2017.

[10] LI Y, WANG G, JI X, et al. DeepIM: deep iterative matching for 6D pose estimation[J]. International Journal of Computer Vision, 2020, 128(3): 657-678.

[11] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[12] 席志红, 李爽, 甘兴利. PnP 算法在室内定位中的应用[J]. 无线电工程, 2017, 47(10): 39-44.

XI Zhihong, LI Shuang, GAN Xingli. PnP solution applied in indoor location[J]. Radio Engineering, 2017, 47(10): 39-44.

表 3 多测量单元相对位姿各平移分量的重复精度
Table 3 Repeatability of each translation component of relative pose of multiple measurement units mm

σ_x	σ_y	σ_z	σ
± 0.0283	± 0.0379	± 0.1134	± 0.1229

通讯作者: 杜福洲, E-mail: du_fuzhou@163.com。

(下转第 47 页)

Study on Tool Setting Method of Micro-Milling Tool Based on in-Line Holography

ZHANG Xianghui, XU Jinkai, YU Zhanjiang, CHENG Yaya, YU Huadong

(Ministry of Education Key Laboratory for Cross-Scale Micro and Nano Manufacturing, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

[ABSTRACT] In view of the shortcomings of the existing tool setting methods, we proposed a new method of tool setting for micro-milling tools based on in-line holographic imaging. After researching and analyzing the holographic imaging principle and key problems of holographic image, a set of digital holographic tool setting prototype was built, and the micro-milling tools was measured on a five-axis machining center using a standard tool. The experimental results show that, the holographic tool setting prototype can effectively realize the detection of micro-milling tools, and the relative accuracy of this instrument is $5.1\mu\text{m}$. Under the same detection conditions, compared with the measurement results of a high-precision external presetter, the relative error of the tool setting instrument is 0.033% , while the relative error of the holographic tool setting prototype is 0.007% , and it can effectively realize the detection of micro-milling tool. This results verify that holographic imaging method can be used for the high-precision tool setting of micro-milling tools.

Keywords: Micro-milling tools; In-line holography; Tool setting method; Image denoising; Hologram reconstruction

(责编 阳光)

(上接第 40 页)

Research on Real-Time Relative Pose Measurement Method of Large-Scale Components Based on Vision

DU Fuzhou, YE Hanming

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Relative pose is an important monitoring item in the assembly process. Aiming at the relative pose measurement requirements during the docking of large-scale components, a vision-based real-time measurement method of relative pose is proposed. Based on the monocular vision technology, relative poses of sections is calculated in real time with the images of cooperative targets, which can be useful for the assembly work. Firstly, a real-time relative pose measurement system is designed, including a vision measurement unit equipped with a monocular camera, and a cooperative target for pose calculation. Secondly, the complete process of relative pose measurement is studied, including system calibration method and real-time pose calculation method. Finally, the accuracy of the pose measurement system is tested in laboratory. The result shows that the repeatability of the pose measurement system perpendicular to the optical axis can reach 0.02mm , the repeatability along the optical axis is better than 0.2mm , and the time of pose measurement is less than 0.3s . The network measurement of multi-measuring unit is simulated, and the repeatability perpendicular to the optical axis is better than 0.1mm , the repeatability along the optical axis is better than 0.2mm , and the time of pose measurement is less than 1.3s , which satisfies the requirement of pose monitor and docking state estimation for large-scale component docking.

Keywords: Relative pose measurement; Real-time pose measurement; Large-scale components; Measurement auxiliary assembly; Digital measurement

(责编 阳光)