

工业机械臂多工位作业下的视觉对准技术研究*

祝鸿宇¹,曾令斌²,石世锋¹,叶南¹

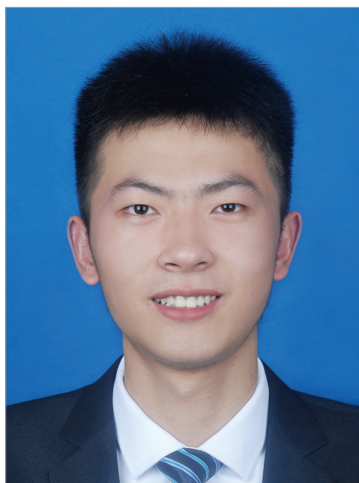
(1.南京航空航天大学机电学院,南京 210016;

2.上海宇航系统工程研究所,上海 201109)

[摘要] 为实现工业机械臂多工位作业下末端工具与工件的精确对准,提出了一种基于单目视觉的对准技术。首先利用系统标定建立起各坐标系之间的位置关系。其次,设计了一套合作靶标,将其布置在各个工位的对准目标附近,通过离线测量,获取示教对准下靶标的期望位姿,以此建立对准目标任务表。在多工位在线作业阶段,视觉系统实时识别并测量当前工位下的靶标及其位姿,依据任务表的期望位姿,获得位姿偏差,并通过系统标定建立的坐标映射,将偏差量解算为机械臂的运动数据,从而驱动机械臂末端进行位姿调整,最终实现末端工具与对准目标的精确对准。搭建了螺纹旋拧和抓手夹持多工位试验平台,同时进行了精度验证试验,结果表明测量距离约 260mm 处,位置精度在 X、Y 方向达到 0.1mm, Z 方向达到 0.2mm,角度误差优于 0.1°。

关键词: 多工位作业;工业机械臂;合作靶标;位姿求解;视觉对准

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.19.056



祝鸿宇

硕士研究生,主要研究方向为视觉测量。

随着航空航天领域往智能制造方向不断发展,工业机械臂被广泛应用于飞机零部件的对准、旋拧和抓取等装配工作中^[1-3]。传统的机械臂装配工作依靠示教再现或固定编程实现基本的运动操作,绝对定位精度低,且对环境的感知能力差,无法满足智能装配的要求。为提升机械臂装配的灵活性和柔性,视觉传感器与工业机械臂逐渐融合,构建合适的机械臂视觉系统是完成装配作业的一个重要前提。

基于视觉反馈的机械臂装配系统可根据机械臂与视觉的结合方式分为“Eye-in-Hand”和“Eye-to-Hand”两种,又可依据视觉传感器数目分为单目、双目和多目系统。宋薇^[4]研究了一种基于模板匹配的单目视觉抓取方法,但只能实现机械臂的三维

抓取,位置误差在 2mm 以内、角度误差在 2° 以内。朱正伟^[5]研究了单目“Eye-to-Hand”机械臂抓取系统,机械臂能快速有效地抓取工件,位姿误差小,满足工业生产的预期要求,但前提是目标工件的尺寸已知。傅华强^[6]将 KUKA 机械臂与单目相机以“Eye-in-Hand”形式结合,通过采集工件轮廓并查找平行线段来确定工件抓取位姿,通过手眼关系将抓取位姿转化为机械臂坐标完成抓取工作。以上系统在抓取方面表现较好,但均无法满足对准系统的高精度定位要求。冯志刚等^[7]利用双目系统获取机械臂末端与工件间的位姿关系,驱动末端调整姿态实现精确的装配定位,但该系统需要在工件上布置反射靶标来协助双目系统完成图像的匹配和重建工作,使得在工业现场

* 基金项目:国家自然科学基金(51605222);上海航天科技创新基金。

的应用产生一定程度的局限性,且使用双目相机增加了系统成本。雷金周等^[8]提出了一种单目机械臂对准技术,其中假设对准目标和视觉靶标间的位姿关系已知,这在复杂的装配任务中难以保证,且不适用于多工位的装配任务。Zhu等^[9]研究了单目机械臂钻孔系统,使用高精度的特制标定板对系统进行标定,并提出了一种稳定可靠的圆孔边缘检测算法,试验结果表明视觉系统测量精度达到0.15mm,满足工业生产需求。

目前,双目和多目系统存在结构复杂、鲁棒性较差、图像之间的立体匹配困难等问题;而单目系统结构简单、相机标定容易且精度高,近年来大多数研究基于单目系统。“Eye-to-Hand”的结合方式使机械臂视场变大,但容易产生遮挡问题;“Eye-in-Hand”系统的局部精度更高,视场观察范围更加灵活。本文研究的是机械臂多工位作业下的高精度对准问题,系统结构力求简洁,在对准过程中不能产生遮挡,精度要求高,且满足实时性需求,因此单目“Eye-in-Hand”系统更为合适。

在此基础上,为了准确复现对准目标的位姿信息,工程中一般考虑非合作式方案和合作式方案。非合作式方案^[10]是利用目标自身的特征属性辅助完成测量,但这些特征不固定,难以稳定提取,且未必满足位姿解算要求。因此本文采用鲁棒性更好的合作式方案^[11-13],即设计一款合作靶标用以提供特征点,利用特征点在靶标坐标系中的三维坐标和图像上特征点的二维坐标解算相机和靶标的位姿关系,该方案稳健可靠,测量结果精度更高。

在使用单目“Eye-in-Hand”系统和采用合作式方案的基础上,本文研究了一种多工位作业下的视觉对准技术。本文设计的一套合作靶标具有精度高、成本低、灵活性强的特点,用于解决多工位对准问题具有一

定优势,适合工业现场的应用。

系统描述

本文搭建了基于视觉引导的多工位对准系统,该系统主要由机械臂、相机、末端工具快换装置(包括抓手、旋拧工具等)、合作靶标、对准目标(如对准孔、螺丝等)和计算机软件系统组成,如图1所示。相机和末端工具分别固连在机械臂末端法兰上,相机的光轴与末端工具中轴线近似平行,二者以“Eye-in-Hand”方式构成手眼视觉系统。每个合作靶标上都布置着8个特征点,特征点之间的空间位置约束关系经过了精确测量。在对准目标附近布置合作靶标,布置的位置应根据相机视场大小灵活调整,使靶标图像处于相机视场中心。每一块靶标视区域大小可以对应1个或多个对准目标,对准目标与其相应靶标的位置关系在整个工作过程中不发生改变。

系统的坐标系定义如下:世界坐标系 $\{W\}$,机械臂基坐标系 $\{B\}$,机械臂末端法兰坐标系 $\{F\}$,相机坐标系 $\{C\}$,合作靶标坐标系 $\{T\}$ 。相机坐标系的原点建立在光轴中心处,

Z_c 轴为相机的光轴,以相机到工件的方向为正方向。法兰坐标系的原点设置在法兰中心, Z_f 轴为法兰平面的法线,以法兰到工件的方向为正方向。合作靶标坐标系的原点定义为任一特征点中心,原点与另一特征点中心的连线定义为 X_t 轴,8个特征点中心所拟合平面的法线为 Z_t 轴,方向垂直平面向外。所有坐标系都遵循右手法则。

多工位对准系统的具体工作流程如图2所示。

(1)系统标定。首先进行(Tool center point, TCP工具中心点)标定,计算机械臂上的工具中心点相对于机械臂基坐标系的位姿变换关系,一般工业机械臂都给出了标定的标准流程。本文将工具中心点设置为机械臂的法兰中心,机械臂默认获得法兰坐标系相对于机械臂基坐标系的位姿变换关系 b_fT 。然后根据后文所阐述的标定方法进行相机标定和手眼标定,手眼标定获得相机坐标系相对于法兰坐标系的变换关系 f_cT 。

(2)获取合作靶标的期望位姿并建立任务表。控制机械臂运动使

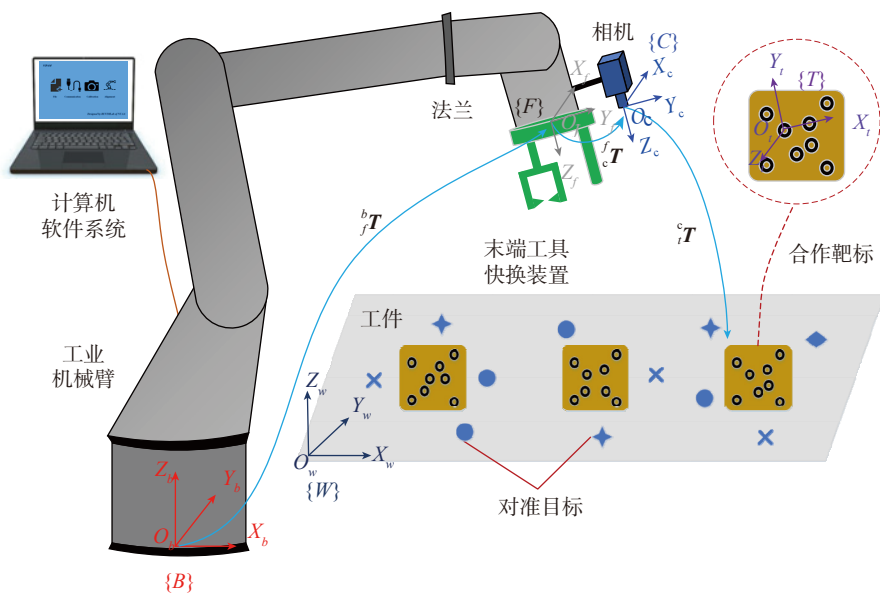


图1 系统结构示意图

Fig.1 Schematic of system structure

得末端工具在装配作业前与各工位上的对准目标进行预对准。相机采集该目标所对应合作靶标的图像,计算靶标相对于相机坐标系的位姿,将其定义为期望位姿变换关系 cT_E ,具体过程见后文特征提取与位姿求解部分。接着为目标建立对准任务,末端工具与单个目标的对准过程为一项对准任务,该任务中需要用到末端工具信息、期望位姿变换关系 cT_E 和靶标特征点信息,获取这些先验知识并进行存储后便完成了一项任务的建立。重复此过程,为所有工位的目标分别建立对准任务,形成任务表。

值得说明的是,这仅是对单个工件或单个对准任务的一种资料入库操作,不涉及全局位姿的求解,在机械臂多工位作业前,这一步的操作并不困难,且是必要的。

(3)在机械臂多工位作业阶段,机械臂基于上述建立的任务表开始执行对准任务。相机采集靶标当前图像并计算得到靶标相对于相机坐标系的当前位姿变换关系 cT_i ,然后计算当前位姿与期望位姿的偏差 $\Delta_i{}^cT$,其中包括位置偏差和角度偏差。若偏差大于设定的阈值,则结合系统标定结果,解算出机械臂末端法兰下

一步应该到达的位姿,具体计算过程见式(6)。

(4)当机械臂运动到新位置后,重复步骤(3),直到 $\Delta_i{}^cT$ 小于设定的阈值,则完成对准任务。

(5)查找任务表,判断是否完成所有对准任务。若没有,则继续执行下一项任务,直至完成所有任务。

除第(1)、(2)步需要借助人工离线或线下操作之外,在实际多工位作业中,(3)~(5)步是自动完成的。

系统标定

1 相机标定

相机标定将三维空间和图像空间关联起来,是后续手眼标定和图像处理的基础。最常用的相机模型为针孔模型,一般成像方式为透视投影,同时考虑二阶畸变补偿。本文使用 11×9 阵列的大小圆孔平面标定板,采用Yin^[14]的方法进行标定。

2 手眼标定

手眼标定的目的是获得相机坐标系和法兰坐标系的位姿关系。对于本文“Eye-in-Hand”视觉系统,法兰固连着的末端工具即为“手”,相机即为“眼”,求解法兰和相机的位姿关系 fT_c 的过程称为机械臂手眼标定。手眼标定的基本思路是控制机械臂运动到不同位置,利用相机观察空间中一个已知的标定参考物,从而推导出 fT_c 和多次观察结果的关系,图3表示标定过程。手眼关系的基本方程式为:

$$CX=XD \quad (1)$$

其中, X 就是待求解的手眼关系,即 fT_c ; C 由相机标定的外参数得到; D 是位置1运动到位置2时法兰的位姿变换矩阵,由机械臂自身程序提供。本文使用Tsai两步法^[15]进行标定,参考物为相机标定所用的平面标定板。

靶标的位姿求解

1 靶标设计

航空航天领域的大多数工件表

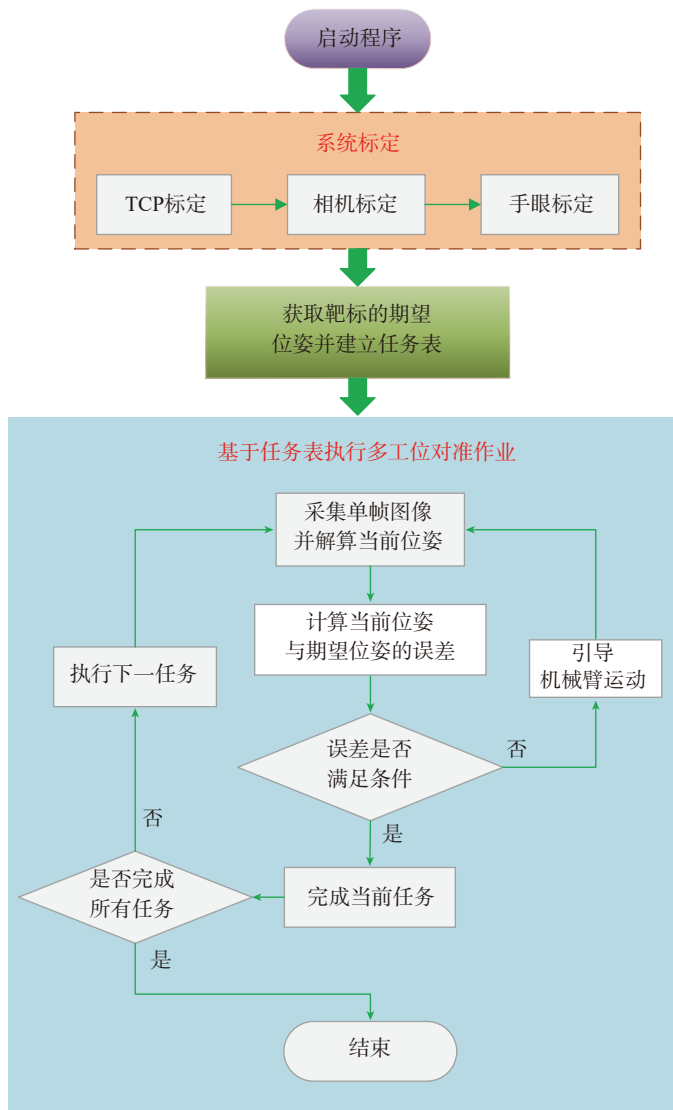


图2 系统技术路线
Fig.2 Flow chart of system

面不具备明显的纹理特征,直接提取工件上目标的特征难度较大,因此需要借助合作靶标来完成定位测量等任务。在设计合作靶标时,通常采用圆形特征实现编码设计。本文设计的一套合作靶标如图4所示,每个靶标上布置有8个特征点,其中4个特征点相连形成凸包,剩余4个特征点处于凸包内部。位于凸包边界上的特征点按照顺时针顺序编号为1、2、3、4,凸包内的特征点分别编号为5、6、7、8,1~4号特征点用于计算单应矩阵,5~8号特征点用于验证单应矩阵。

2 特征提取与位姿求解

在使用合作靶标之前,需要利用相关设备对特征点的位置关系进行测量并在三维建模软件中建系,得到靶标三维点点集 $P=\{X_i\}$, $i=1,2,\dots,8$, i 表示三维坐标点的编号。

相机采集到靶标图像后需进行图像处理,获得精确的特征点中心,构成图像特征点点集。图5表示了靶标的图像处理过程。首先对图像进行高斯滤波,去除多余噪声;使用Canny算子进行边缘检测,将检测到的边缘以树形结构存储;根据面积约束和圆度准则得到可能的特征点轮廓,圆度准则见式(2),接着对每个轮廓直径上的像素点灰度值是否连续进行判断,进一步筛选得到正确的特征点轮廓;采用最小二乘拟合特征点轮廓的最小外接矩形,将该矩形的中心认定为特征点中心,得到图像特征点点集 $Q=\{x_j\}$, $j=1,2,\dots,8$, j 表示图像特征点编号。

$$N = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (2)$$

其中, L 表示轮廓的周长; A 表示轮廓内的面积; N 表示圆度。

图像特征提取完后,需要建立图像特征点与靶标三维点之间的对应关系。求解过程如下:

(1) 利用凸包算法找到靶标三维点点集 P 的凸包,将位于凸包边

界上的点按顺时针排序,得到凸包边界上的点集 $P_1=\{X_i\}$, $i=1,2,3,4$ 和凸包内的点集 $P_2=\{X_i\}$, $i=5,6,7,8$ 。对图像特征点点集 Q 执行相同操作,得到位于图像凸包边界上的点集 $Q_1=\{x_j\}$, $j=1,2,3,4$ 和凸包内的点集 $Q_2=\{x_j\}$, $j=5,6,7,8$ 。

(2) 利用点集 P_1 和 Q_1 的4对点计算单应矩阵 H ,用此单应关系对靶标三维点点集作投影变换。

(3) 遍历图像特征点点集,分别

计算每个点与变换后的靶标三维点的欧氏距离。若此距离小于设定值,则该图像特征点与变换前的靶标三维点是一组对应点,为其编号存储。若距离都大于设定值,则放弃该靶标三维点,继续寻找下一组对应点。

(4) 若找到8组对应点,则单应矩阵 H 求解正确,靶标三维点点集和图像特征点点集建立正确的对应关系。当对应点少于8组时,单应矩阵 H 求解错误,调整点集 Q_1 中特征

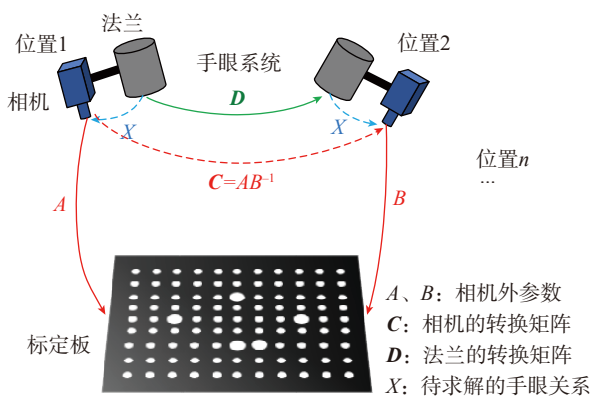


图3 手眼标定过程
Fig.3 Processing of hand-eye calibration

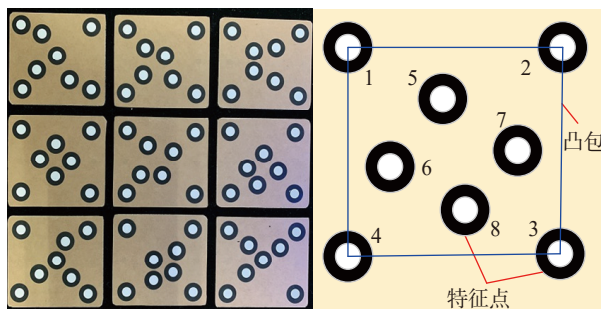


图4 合作靶标
Fig.4 Cooperative target

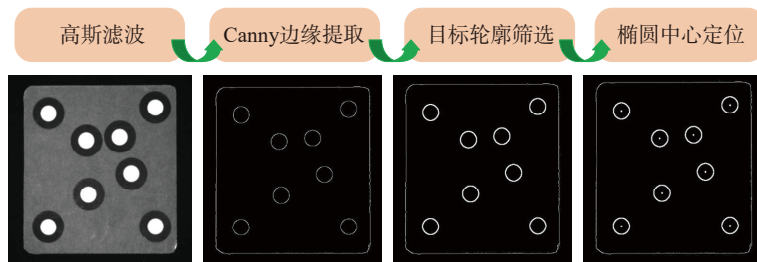


图5 靶标的图像处理
Fig.5 Image processing diagram of cooperative target

点的编号顺序(至多调整4次),如图6所示。重复执行步骤(2)、(3),直至找到8组对应点。

在已知靶标三维点和图像特征点对应关系和相机模型参数的情况下,计算合作靶标在相机坐标系下的位姿可以归纳为求解PNP(Perspective-N-Point,多点透视投影)问题^[16],得到靶标坐标系相对于相机坐标系的变换关系 cT 。

3 建立任务表

末端工具在装配作业前与各工位上的对准目标进行预对准,相机采集目标所对应合作靶标的图像,利用上节中的位姿求解算法获得靶标的位姿,此位姿定义为期望位姿,记为 cT_E 。本文将末端工具与单个目标的对准过程定义为一项对准任务,该任务需要用到末端工具信息、期望位姿变换关系 cT_E 和靶标特征点信息。末端工具信息由人为设定,期望位姿变换关系已求解,靶标特征点信息由测量设备事先测得,获取这些先验知识并进行存储后便完成了一项对准任务的建立。按照此过程分别为各工位上的对准目标建立任务,最终形成一张任务表。

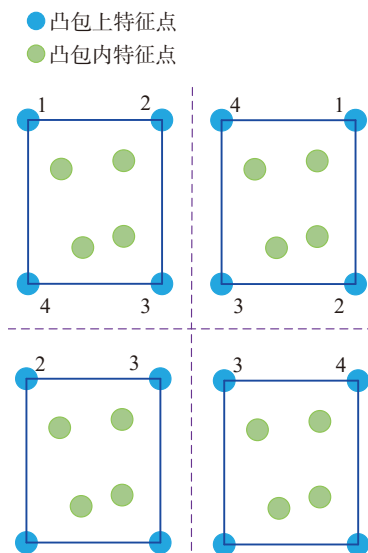


图6 凸包点顺序调整

Fig.6 Order adjustment of markers on convex hull

机械臂对准系统控制策略

在工位作业阶段,系统以任务表为依据,驱动末端工具完成指定的对准作业。在执行每一项对准任务的过程中,系统采用的控制策略为“Look-then-Move”的闭环控制方式。其中,“Look”部分包括相机采集靶标图像和对靶标的位姿估计,“Move”部分是机械臂运动使末端工具与目标对准^[4,8]。

相机采集到合作靶标的图像,由前文提出的方法解算出靶标相对于相机的当前位姿变换关系 cT_1 ,计算其与期望位姿变换关系 cT_E 的偏差 $\Delta{}^cT$:

$$\Delta{}^cT = {}^cT_1 - {}^cT_E \quad (3)$$

判断偏差是否满足对准精度要求。若满足,则系统判定完成当前对准任务,然后查找任务表,继续执行下一项任务。如果偏差不满足要求,则计算机械臂的运动量,并引导机械臂运动。

设当前法兰坐标系相对于机械臂基坐标系的变换关系为 bT_1 ,则靶标相对于机械臂基坐标系的变换关系 bT 为:

$${}^bT = {}^bT_1 {}^cT_1 \quad (4)$$

设最终对准时法兰坐标系相对于机械臂基坐标系的变换关系为 bT_E ,则此时靶标相对于机械臂基坐标系的变换关系 bT 为:

$${}^bT = {}^bT_E {}^cT_E \quad (5)$$

由于在对准过程中靶标与机械臂基坐标系的变换关系 bT 不发生变

化,因此由式(4)、(5)可解算出 bT_E

$${}^bT_E = {}^bT_1 {}^cT_1 ({}^cT_E)^{-1} ({}^cT)^{-1} = {}^bT_1 {}^cT_1 {}^cT_E {}^cT \quad (6)$$

其中, bT_1 由机械臂自身程序给出; cT 由手眼标定获得, cT 和 cT_1 互为逆运算; cT_1 表示靶标相对于相机坐标系的当前位姿变换关系; cT_E 表示靶标相对于相机坐标系的期望位姿变换关系,从任务表的数据中直接读取, cT_E 和 cT_1 互为逆运算。所有变换矩阵都是已知量,可直接计算得到 bT_E ,也就是机械臂的运动数据。

机械臂自身存在定位误差,为提高系统的对准精度,本文对机械臂的运动量进行插补。 bT_E 中包含两个分量:旋转矩阵 bR_E 和平移向量 ${}^b\mathbf{t}_E$,将旋转矩阵转换为四元数进行坐标旋转插补,对平移向量进行位置插补^[17]。计算过程如下:

$$\begin{cases} {}^bR^* = \text{Slerp}({}^bR_1, {}^bR_E, k_1) \\ {}^b\mathbf{t}^* = {}^b\mathbf{t}_1 + k_2({}^b\mathbf{t}_E - {}^b\mathbf{t}_1) \end{cases} \quad (7)$$

其中, bR_1 和 ${}^b\mathbf{t}_1$ 分别是变换矩阵 bT_1 中的旋转部分和平移部分;Slerp()为插补函数; k_1 、 k_2 为插值系数,取 $k_1=k_2=0.8$ 。计算得到的 ${}^bR^*$ 、 ${}^b\mathbf{t}^*$ 构成新的变换矩阵 ${}^bT^*$,即机械臂需要运动到的位姿。

在机械臂位姿求解和控制机械臂运动的过程中,系统需要从机械臂自身程序读取位姿信息并将相关数据发送给机械臂,二者的通讯基于TCP/IP协议。机械臂数据格式如图7所示,其中第445字节到492字节是法兰在机械臂基坐标系下的位

q actual	48	32 - 37	Actual joint positions
qd actual	48	38 - 43	Actual joint velocities
I actual	48	44 - 49	Actual joint currents
I control	48	50 - 55	Joint control currents
Tool	48	56 - 61	Actual Cartesian coordinates of the tool: (x,y,z,rx,ry,rz)
TCP speed	48	62 - 67	Actual speed of the tool given in Cartesian coordinates
TCP force	48	68 - 73	Generalised forces in the TCP
Tool	48	74 - 79	Target Cartesian coordinates of the tool: (x,y,z,rx,ry,rz)
TCP speed	48	80 - 85	Target speed of the tool given in Cartesian coordinates

图7 机械臂数据格式

Fig.7 Data format of robot

姿,包括位置信息 x, y, z 和姿态信息 r_x, r_y, r_z 。当软件系统给机械臂发送位姿信息控制其运动时,运动指令格式为:

$$\text{command}([x, y, z, r_x, r_y, r_z], v, a) \quad (8)$$

其中, $[x, y, z]$ 是工具中心点在机械臂基坐标系下要到达的位置; $[r_x, r_y, r_z]$ 是工具中心点在机械臂基坐标系下要达到的角度; v 和 a 分别是机械臂运动速度和加速度,取 $v=100\text{mm/s}$, $a=30\text{mm/s}^2$ 。command 是机械臂运动方式,一般为 MoveJ 关节移动、MoveL 直线移动、MoveP 恒定速度运动和 MoveC 圆弧移动,本文使用直线移动方式。

试验

为验证多工位作业下的视觉对准系统的有效性,本研究搭建了螺纹旋拧和抓手夹持试验平台,如图 8 所示。本试验以 UR10 机械臂作为运动机构,使用的视觉装置为德国 Allied Vision Prosilica GC1600 工业相机和大恒图像 HN-0914-2M-C2/3X 定焦镜头,焦距为 9mm。试验过程如下:

(1) 机械臂末端法兰中心点设置为工具中心点,建立末端法兰和机械臂基坐标系的变换关系。

(2) 依次进行相机标定和手眼标定。基于第 2 节阐述的原理,将平面标定板固定放置在平台上,相机和标定板距离约 260mm。控制机械臂移动使其在相机视场范围内做 12 次运动,并在每次运动后采集标定板图像和机械臂位姿。相机标定结果如表 1 所示,手眼标定结果见式(9)。

(3) 按前文描述为各工位上的对准目标建立任务表。

(4) 在多工位作业环节,机械臂末端处于不同的初始位置,依据任务表执行对准操作,其中有螺纹旋拧工作和抓手自动夹持工作,对准结果如图 9 所示。试验结果表明,本文研发的多工位对准系统能够实现对各目

标的精确对准,满足工业现场的装配需求。

$${}^f_c T = \begin{bmatrix} 0.99998 & -0.00045 & -0.00616 \\ 0.00041 & 0.99998 & -0.00605 \\ 0.00616 & 0.00605 & 0.99996 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1.842 \\ 147.640 \\ -62.873 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

为验证对准系统所能达到的精度,搭建了精度验证试验平台,如图 10 所示。使用 GC1600 工业相

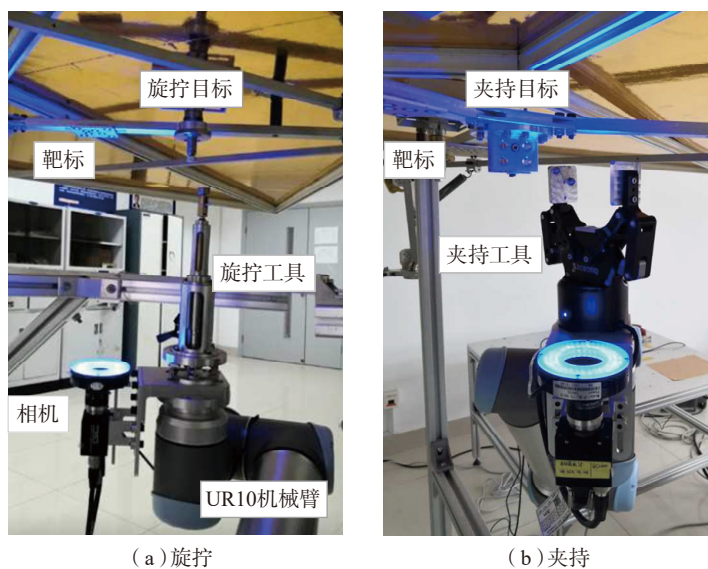
机和 9mm 定焦镜头,末端工具用长 200mm、直径 10mm 的圆轴代替,对准目标为直径 10mm 的圆孔。

(1) 精度验证试验 1。

位置精度要求在 X, Y 方向达到

表1 相机标定结果

相机内参	数值	畸变参数	数值
α	2115.637	k_1	-0.289
β	2115.596	k_2	0.615
u_0	828.534	p_1	-0.000730
v_0	632.431	p_2	0.000168



(a) 旋拧 (b) 夹持

图8 旋拧和夹持试验平台

Fig.8 Screwing and clamping experiment platform

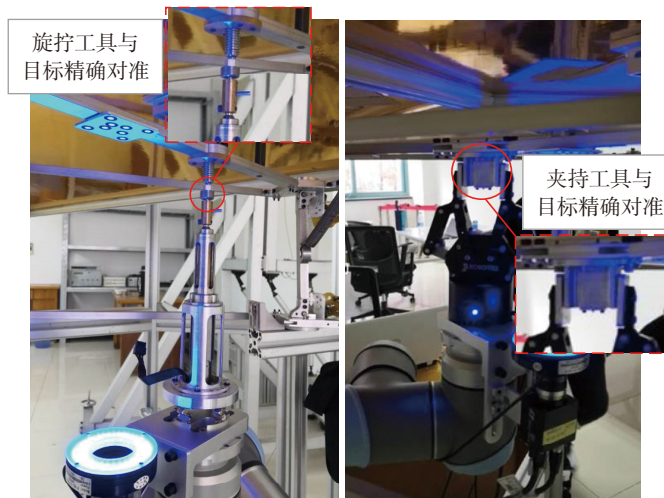


图9 试验结果

Fig.9 Experiment result

0.5mm, Z方向达到1mm,角度偏差不超过0.1°时,靶标实际位姿与期望位姿的偏差见表2和图11。其中 Δx 、 Δy 、 Δz 分别表示靶标实际位姿与期望位姿相比在相机坐标系下沿 X_c 轴、 Y_c 轴、 Z_c 轴的位移偏差量, $\Delta\eta$ 表示在相机坐标系下靶标实际位姿的法向与期望位姿法向的夹角, $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 分别表示靶标实际位姿与期望位姿在相机坐标系下绕 X_c 轴、 Y_c 轴、 Z_c 轴的转角差值。

对准轴与圆孔对准过程中,首先对姿态部分进行调整,姿态的调整引起靶标位姿在轴向发生变动;接着考虑3个轴向的对准,轴向的调整又会影响到姿态的变化,位置和姿态的调

整是耦合的。在第6次调整后,角度偏差 $\Delta\eta$ 达到0.026°,已经满足角度精度要求,但X、Y方向的偏差过大。轴向偏差的调整使得 $\Delta\eta$ 增大到0.091°,但仍满足精度要求。因此,机械臂经过7次自动调整实现末端工具与目标的对准。

(2)精度验证试验2。

位置精度要求在X、Y方向达到0.25mm,Z方向达到0.5mm,角度偏差不超过0.1°时,靶标实际位姿与期望位姿的偏差见表3和图12。系统前6次调整在逐渐逼近期望位姿,第7次调整缩小角度偏差, $\Delta\eta$ 达到0.040°,第8次对轴向偏差进行调整,角度偏差 $\Delta\eta$ 受影响而增大到

0.098°,但仍优于0.1°,最终经过8次自动调整实现对准。

(3)精度验证试验3。

位置精度要求在X、Y方向达到0.1mm,Z方向达到0.2mm,角度偏差不超过0.1°时,靶标实际位姿与期望位姿的偏差见表4和图13。系统前8次调整已经逼近到期望位姿附近,在第10次调整后只有X方向的精度不满足要求。在后续微调过程中,受机器臂自身定位精度以及位置和姿态耦合作用的影响,系统又偏离了期望位姿,最终经过12次自动调整实现对准。

除对准精度外,对定位效率也进行了统计。将精度要求按表5划分

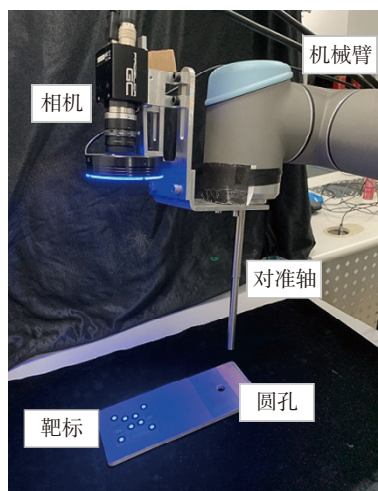


图10 精度验证试验平台

Fig.10 Accuracy verification experiment platform

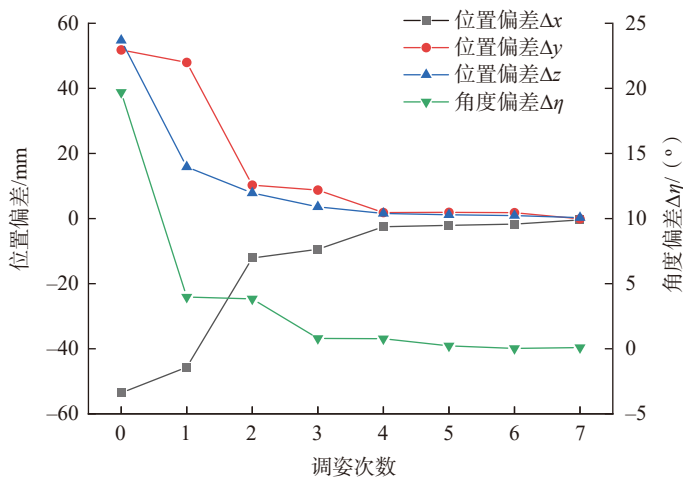


图11 试验1调姿偏差收敛曲线

Fig.11 Convergence curve of deviation from pose adjusting (Experiment 1)

表2 试验1靶标实际位姿与期望位姿的偏差

Table 2 Deviation between actual pose of cooperative target and expected pose (Experiment 1)

序号	$\Delta x/mm$	$\Delta y/mm$	$\Delta z/mm$	$\Delta\eta/(\text{°})$	$\Delta\alpha/(\text{°})$	$\Delta\beta/(\text{°})$	$\Delta\gamma/(\text{°})$
0	-53.566	51.819	54.748	19.698	9.492	17.252	0.518
1	-45.656	47.975	15.863	3.973	1.821	3.530	0.092
2	-12.129	10.276	7.859	3.830	1.583	3.487	0.071
3	-9.445	8.758	3.601	0.797	0.278	0.745	0.041
4	-2.525	1.846	1.572	0.771	0.214	0.740	0.030
5	-2.075	1.918	1.156	0.223	0.101	0.198	0.020
6	-1.714	1.817	0.924	0.026	0.020	0.017	0.001
7	-0.414	-0.093	0.274	0.091	-0.087	0.029	0.004

表3 试验2靶标实际位姿与期望位姿的偏差

Table 3 Deviation between actual pose of cooperative target and expected pose (Experiment 2)

序号	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$	$\Delta \eta/(\text{ }^\circ)$	$\Delta \alpha/(\text{ }^\circ)$	$\Delta \beta/(\text{ }^\circ)$	$\Delta \gamma/(\text{ }^\circ)$
0	-45.196	67.901	44.479	12.420	5.382	11.119	-1.290
1	-44.669	64.972	21.092	2.611	1.161	2.324	-0.262
2	-10.235	12.653	8.271	2.428	.784	2.280	-0.285
3	-9.326	12.083	6.195	0.539	0.188	0.503	-0.050
4	-1.993	2.349	2.275	0.460	0.107	0.446	-0.040
5	-1.607	2.279	2.020	0.090	0.025	0.085	-0.011
6	-0.948	0.364	0.571	0.219	-0.010	0.219	0.001
7	-0.400	0.298	0.551	0.040	-0.026	-0.030	-0.005
8	0.026	-0.227	0.047	0.098	-0.090	-0.038	0.009

表4 试验3靶标实际位姿与期望位姿的偏差

Table 4 Deviation between actual pose of cooperative target and expected pose (Experiment 3)

序号	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$	$\Delta \eta/(\text{ }^\circ)$	$\Delta \alpha/(\text{ }^\circ)$	$\Delta \beta/(\text{ }^\circ)$	$\Delta \gamma/(\text{ }^\circ)$
0	49.954	39.415	117.568	21.226	11.843	-17.523	1.798
1	63.047	42.904	72.464	4.274	2.211	-3.637	0.388
2	14.527	9.162	26.568	4.110	1.922	-3.612	0.391
3	14.027	8.454	21.938	0.965	0.470	-0.841	0.054
4	3.123	1.635	7.687	0.832	0.346	-0.755	0.053
5	2.833	1.393	6.948	0.193	0.072	-0.179	0.006
6	0.565	0.357	2.398	0.149	0.073	-0.130	0.005
7	0.197	0.256	0.948	0.162	0.101	-0.126	0.011
8	0.116	-0.076	0.329	0.115	0.033	-0.109	0.016
9	0.430	0.294	0.259	0.205	0.088	-0.182	0.028
10	-0.237	0.060	-0.003	0.083	-0.006	0.083	0.005
11	0.289	-0.056	-0.023	0.023	-0.021	-0.010	0.003
12	0.072	0.052	-0.128	0.033	-0.004	-0.033	0.001

5个等级,每个精度等级条件下进行5组对准试验,统计平均调姿次数,结果如图14所示。与前4个精度等级相比,在等级5的精度条件下,机械臂自动调姿平均次数增加至14次,即为达到更高的对准精度,需要较多次数进行微调。

结论

针对工业机械臂多工位作业下

的高精度对准需求,提出了一整套视觉对准技术方法。首先设计了一套合作靶标并通过单应变换技术获得靶标点唯一身份标识,以靶标的期望位姿建立多工位上作业任务表。以任务表为驱动,在视觉位姿动态测量下,获取靶标当前位姿与期望位姿的偏差,并以此为驱动量,控制机械臂运动。通过视觉反馈构成了闭环迭代调姿,克服了机械臂定位误差的

表5 调姿精度等级

Table 5 Precision grades of pose adjusting

等级	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$	$\Delta \eta/(\text{ }^\circ)$
1	0.5	0.5	1.0	0.1
2	0.25	0.25	0.5	0.1
3	0.2	0.2	0.4	0.1
4	0.15	0.15	0.3	0.1
5	0.1	0.1	0.2	0.1

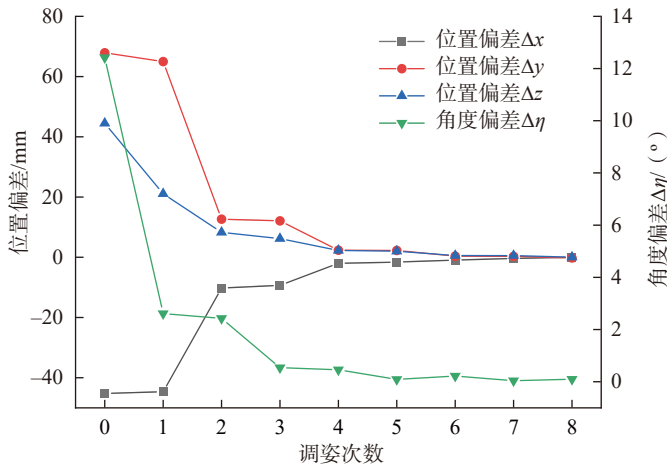


图12 试验2调姿偏差收敛曲线

Fig.12 Convergence curve of deviation from pose adjusting (Experiment 2)

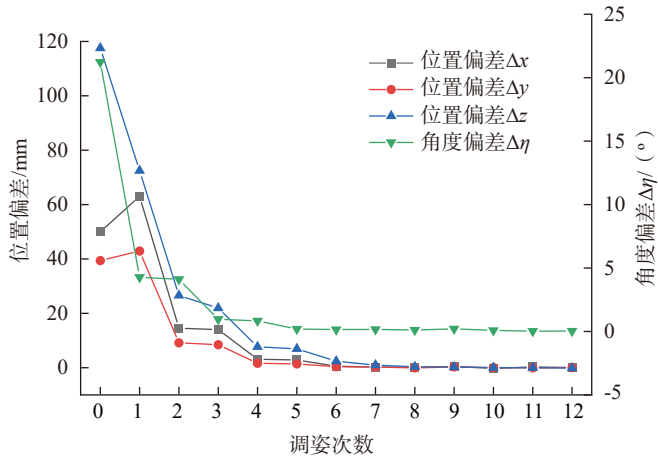


图13 试验3调姿偏差收敛曲线

Fig.13 Convergence curve of deviation from pose adjusting (Experiment 3)

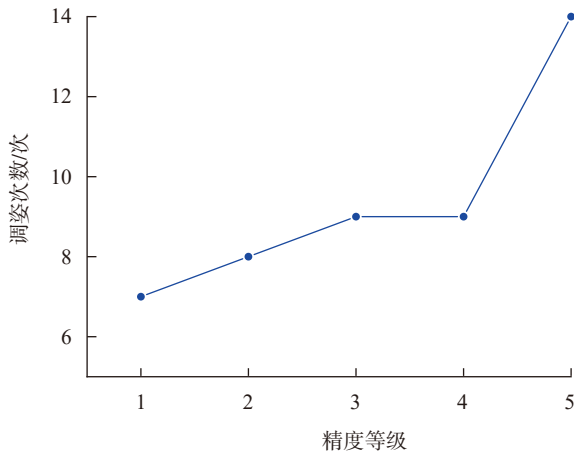


图14 调姿次数

Fig.14 Number of pose adjusting

影响,最终成功实现对准。以螺纹旋拧和抓手夹持多工位对准试验,对本文方法进行了验证。试验结果表明,测量距离约 260mm 处,位置精度在 X、Y 方向可达 0.1mm, Z 方向可达 0.2mm,角度误差优于 0.1°。本文技术具有精度高、灵活性强、成本低的特点,具备工程应用价值。接下来的研究主要集中在复杂背景下的靶标图像处理和多靶标图像分割技术,以及如何进一步减少调姿次数,获得更快的收敛速度,提高对准效率。

参考文献

[1] 吴丹,赵安安,陈恳,等.协作机器人及其在航空制造中的应用综述[J].航空制造技术,2019,62(10):24-34.

WU Dan, ZHAO Anan, CHEN Ken, et al. A survey of collaborative robot for aircraft manufacturing application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(10): 24-34.

[2] 祁萌,李晓红,高彬彬.国外航空领域机器人技术发展现状与趋势分析[J].航空制造技术,2018,61(12):97-101.

QI Meng, LI Xiaohong, GAO Binbin. Development status and trend analysis of robot technology in foreign aviation field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(12): 97-101.

[3] 徐德,谭民,李原.机器人视觉测量与控制[M].第3版.北京:国防工业出版社,2016.

XU De, TAN Min, LI Yuan. Visual measurement and control for robots[M]. 3rd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.

[4] 宋薇,仇楠楠,沈林勇,等.面向工业零件的机器人单目立体匹配与抓取[J].机器人,2018,40(6):950-957.

SONG Wei, QIU Nannan, SHEN Linyong, et al. The monocular stereo matching and grasping of robot for industrial parts[J]. Robot, 2018, 40(6): 950-957.

[5] 朱正伟.基于单目视觉的目标位姿识别与机器人抓取引导[D].广州:华南理工大学,2015.

ZHU Zhengwei. Object posture recognition and robot pickup with guidance based on monocular vision[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

- [6] 傅华强, 房芳. 工业机器人视觉定位技术研究与应用[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(3): 1-3, 5.
- [7] FU Huaqiang, FANG Fang. Research and application of vision positioning technology of industrial robot[J]. Industrial Control Computer, 2016, 29(3): 1-3, 5.
- [8] 冯志刚, 李泷泉, 熊北辰, 等. 工业机器人视觉定位系统的实现[J]. 航空科学技术, 2018, 29(6): 48-53.
- [9] FENG Zhigang, LI Shuanggao, XIONG Tianchen, et al. Implementation of visual location system for industrial robot[J]. Aeronautical Science and Technology, 2018, 29(6): 48-53.
- [10] 雷金周, 曾令斌, 叶南. 工业机器人单目视觉对准技术研究[J]. 光学精密工程, 2018, 26(3): 733-741.
- [11] LEI Jinzhou, ZENG Lingbin, YE Nan. Research on industrial robot alignment technique with monocular vision[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(3): 733-741.
- [12] ZHU W D, MEI B, YAN G R, et al. Development of a monocular vision system for robotic drilling[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE C, 2014, 15(8): 593-606.
- [13] 徐文福, 梁斌, 李成, 等. 空间站机器人捕获非合作目标的测量与规划方法[J]. 机器人, 2010, 32(1): 61-69.
- [14] XU Wenfu, LIANG Bin, LI Cheng, et al. Measurement and planning approach of space robot for capturing non-cooperative target[J]. Robot, 2010, 32(1): 61-69.
- [15] 温卓漫, 王延杰, 邸男, 等. 空间站机械臂位姿测量中合作靶标的快速识别[J]. 航空学报, 2015, 36(4): 1330-1338.
- [16] WEN Zhuoman, WANG Yanjie, DI Nan, et al. Fast recognition of cooperative target used for position and orientation measurement of space station's robot arm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(4): 1330-1338.
- [17] 李俊杰, 黄翔, 李泷泉, 等. 基于人工地标的移动机器人定位与调整技术[J]. 航空制造技术, 2020, 63(5): 80-86.
- [18] LI Junjie, HUANG Xiang, LI Shuanggao, et al. Location and adjustment technology for mobile robot based on artificial landmark[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(5): 80-86.
- [19] WEN Z, WANG Y, LUO J, et al. Robust, fast and accurate vision-based localization of a cooperative target used for space robotic arm[J]. Acta Astronautica, 2017, 136: 101-114.
- [20] YIN H S, MA Z, ZHONG M, et al. SLAM-based self-calibration of a binocular stereo vision rig in real-time[J]. Sensors, 2020, 20(3): 621-641.
- [21] 吴广雨, 张伟军, 杨保佳. 机器人视觉装配中的精确定位策略研究[J]. 机械与电子, 2020, 38(3): 75-80.
- [22] WU Guangyu, ZHANG Weijun, YANG Baojia. Research on accurate positioning method in robot visual assembly system[J]. Machinery and Electronics, 2020, 38(3): 75-80.
- [23] ZHANG Z Y, A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [24] 孙斌, 常晓明, 段晋军. 基于四元数的机械臂平滑姿态规划与仿真[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(1): 56-59.
- [25] SUN Bin, CHANG Xiaoming, DUAN Jinjun. Smooth orientation planning and simulation of manipulator based on quaternion[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(1): 56-59.

通讯作者: 叶南, 讲师, 工学博士, 研究方向为视觉检测、工业摄影测量, E-mail: yen@nuaa.edu.cn.

Research on Visual Alignment Technology of Industrial Robotic Arm in Multi-Station Operation

ZHU Hongyu¹, ZENG Lingbin², SHI Shifeng¹, YE Nan¹

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shanghai Aerospace System Engineering Institution, Shanghai 201109, China)

[ABSTRACT] A monocular-vision-based alignment technique is proposed to achieve accurate alignment of tool end in multi-station operation with an industrial robotic arm. To begin with, the system calibration is carried out to establish coordinates mapping between the concerning coordinate systems. After that, a set of cooperative targets is designed and arranged near the alignment objects on the workpiece. The expected poses of cooperative targets can be obtained by offline measurement and a task table for alignment targets is then built up. In the multi-station operation stage, driven by the task table, the current poses of the targets are calculated by the vision system, and the deviations between the current poses and expected poses are calculated. Then parameters to move the robot arm are evaluated according to the deviations by the coordinates mapping. By iterating the above steps, the final alignment is worked out upon the designed threshold. The experimental results show that the alignment accuracy can reach 0.1mm in X and Y direction, 0.2mm in Z direction, and the angle error is better than 0.1° in the measuring distance of 260mm.

Keywords: Multi-station operation; Industrial robotic arm; Cooperative target; Pose solution; Visual alignment

(责编 阳光)