

文章编号 1004-924X(2019)03-0661-10

## 机器人工具坐标系自动校准

刘 涛, 尹仕斌, 任永杰\*, 张楠楠, 赵 进

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了实现工业现场中对机器人工具坐标系进行快速高效地校准, 同时提升坐标系的校准精度, 提出了一种机器人工具坐标系快速校准方法, 搭建了校准系统和实验平台。对校准系统的校准测量速度和精度进行了测量和研究。该校准方法使机器人按照预定圆周和直线的轨迹进行运动, 运动时统计该系统在光电传感器中出现的时刻, 得到工具坐标系偏斜的位置。本文分析了光电传感器由于装配工艺的原因无法形成直角坐标系而引起的误差, 同时根据坐标系转换原理, 对此项误差进行分析。最后实验结果表明: 机器人工具坐标系的校准精度为 $\pm 0.5$  mm, 恢复时间为 15 s。该结果满足汽车生产线对于精度和效率的要求, 能够快速有效地对机器人工具坐标系进行校准。

**关键词:** 机器人工具坐标系; 光电传感器; 交叉激光法; 自动校准

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192703.0661

## Automatic calibration of robot tool center frame robot tool center frame

LIU Tao, YIN Shi-bin, REN Yong-jie\*, ZHANG Nan-nan, ZHAO Jin

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

\* Corresponding author, E-mail: yongjieren@tju.edu.cn

**Abstract:** A calibration method for the robotic Tool Center Frame (TCF) was proposed, and a calibration sensor system and experimental platform are constructed in this study. The calibration speed and accuracy of the system were measured and studied. This calibration method involved robot movement along the trajectory of a predetermined circle and a straight line. The photoelectric calibration sensor records the time while the system was moving. The position of the deviation of the tool coordinate system was obtained. In this study the error caused by the photoelectric calibration sensor was analyzed, which may not achieve a rectangular coordinate system due to the cause of the assembly. Experimental results reveal the calibration accuracy of a robot tool coordinate system at  $\pm 0.5$  mm, and a calibration and recovery time of 15 s. These values meet the requirements for accuracy and efficiency in vehicle production, indicating that our method is capable of calibrating the robot tool coordinate system quickly and effectively.

**Key words:** robot tool center frame; photoelectric sensor; cross laser method; automatic calibration

收稿日期: 2018-08-31; 修订日期: 2018-10-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51475329, No. 51721003); 天津市自然科学基金资助项目 (No. 18JCYBJC19400); 国家重大科技专项资助 (No. 2014ZX04001-081-06)

## 1 引言

现代汽车制造中,为提升工厂自动化程度,控制车身制造质量,工业机器人已经广泛应用到车身的焊接、装配、涂胶等工艺中<sup>[1-2]</sup>。然而在弧焊、点焊、涂胶等机器人末端执行器与车身零件紧密接触的应用场合,工装夹具磨损、碰撞偏斜等因素会导致零件的位置发生变化,导致焊机、涂胶机等末端执行器与零件发生碰撞,机器人工具坐标系 TCF (Tool Control Frame)<sup>[3]</sup> 执行器的 TCP (Tool Control Point) 偏移,致使轨迹无法满足工艺要求,严重影响焊接或涂胶等质量。

为了快速恢复正常的轨迹状态,需要重新校准执行器末端点相对机器人法兰末端的准确位姿;然而,由于汽车厂的生产节拍很高,恢复时间必须控制在很短的时间内才能不影响生产线的正常运行<sup>[4]</sup>(如 1 min 生产一台车,恢复时间必须保证在 20 s 以内)。因此快速、准确的工具坐标系校准技术才能满足生产需求。

朴永杰等人<sup>[5]</sup>利用机器人正向运动学模型和空间坐标系的转换关系求解末端执行器的位姿参数,该方法借助标准件,在不安装工具的情形下获得机器人的参考坐标系,并求解出该坐标系的位姿。赵娇娇等人<sup>[6-7]</sup>使用七点法对机器人末端工具坐标系进行标定,其中前四点用于标定末端工具的 TCP,后三点用于标定末端工具的方向,这种方法适用于末端执行器为实物点的工具。虽然这两种方法精度满足要求,但人工参与过多,耗时较长,不满足汽车厂的实际使用要求;周祥<sup>[8]</sup>采用了基于视觉的工具坐标系标定方法,通过双目相机拍摄待标定末端执行器表面的反光标记点实现变动后末端执行器的 TCP 的标定,该方法虽然不用手动示教,但是它也仅限原理可行,因为实际应用时很难在执行器的末端贴反光标记点,因此该方法并不实用;尹仕斌等人<sup>[9]</sup>针对在线测量应用的机器人提出了一种快速恢复的方法,简单可靠,然而由于其只能应用到在线测量的产品上,应用受限,无法推广;Paananen<sup>[10]</sup>利用双激光线条实现 TCP 的自动标定,但调试复杂,机器人需要慢速运动才能获得较为准确的结果,不满足快速标定的需求;杨聚庆<sup>[11]</sup>等提出了一种机器人坐标系与激光测量坐标系快速标定转换方法,但其基于

距离原则的方法所产生的误差容易受到测距误差的影响。

传统的 TCF 校准方法需要人工参与,效率较低,精度也受操作人员熟练度和人眼分辨率的影响。为了解决传统的 TCF 校准中人工参与过多,标定效率低下的问题,同时提高机器人末端执行器坐标系的标定精度,本文提出了一种在线 TCF 快速自动校准方法,可以快速、准确地实现工具坐标系的校准,满足现场的使用需求。

## 2 校准系统坐标系建立

工业机器人的末端执行器上特殊用途的设备一般称作为工具,如抓手、弧焊机、涂胶的定量机等工具,这些工具上通常会在某个固定位置建立一个坐标系,称之为工具坐标系,工具坐标系的原点被称为工具中心点,即 TCP。诸如抓手类工具, TCP 一般选取抓手上的某个定位销<sup>[12]</sup>;弧焊机、定量机等工具, TCP 一般选取工具的尖端点作为 TCP 点<sup>[13]</sup>。由此可见,工具被安装到机器人的法兰末端后,除非磨损消耗、人为改变其位置或遭遇碰撞,否则工具坐标系相对于机器人法兰末端坐标系的关系是固定不变的,为了方便调试与维护,机器人示教轨迹时必须参考对应的 TCF,做好工具坐标系与工件坐标系的坐标转换<sup>[14]</sup>。

以涂胶机器人为例,其末端执行器为定量机,通常工具坐标系选取在定量机的枪嘴上。为了实现工具坐标系的标定,将机器人各姿态下的结果统一到机器人基坐标系下,建立如图 1 所示的现场坐标系。

图 1 包括机器人基坐标系  $O_b X_b Y_b Z_b$ , 机器人法兰末端坐标系  $O_e X_e Y_e Z_e$ , 工具坐标系  $O_{tcf} X_{tcf} Y_{tcf} Z_{tcf}$ , 校准传感器的坐标系  $O_s X_s Y_s Z_s$ 。如果没有末端执行器,工具坐标系与机器人法兰末端坐标系重合。工具坐标系到机器人基坐标系的关系可由公式(1)确认:

$${}^b T = {}^e T {}^e T, \quad (1)$$

其中:  ${}^e T$  为工具坐标系到法兰末端坐标系的转换关系,当工具发生碰撞或者更换时,需要重新标定该值;  ${}^b T$  为机器人法兰末端到机器人基坐标系的转换关系,它由机器人正向运动学模型及各个关节角度值得出;  ${}^b T$  是工具坐标系相对机器人基坐标系的转换关系。

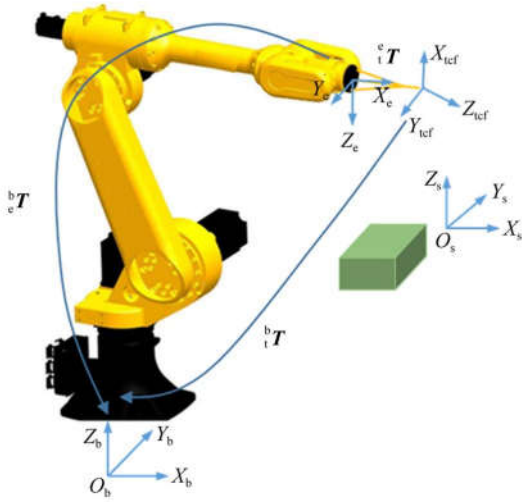


图 1 现场坐标系示意图

Fig. 1 Example of coordinate system

如图 2 所示,定义平面  $X_s O_s Y_s$  为测量平面,机器人携带的末端工具垂直于测量平面做半径为  $R$  的匀速圆周运动,则运动轨迹可与  $X_s O_s Y_s$  坐标系存在 4 个交点,交点与圆心的连线的夹角分别为  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ,当运动轨迹的圆心恰为传感器坐标系原点  $O_s$  时,这 4 个角均为  $90^\circ$ 。

如图 3 所示,当机器人的工具端发生偏移时,末端工具在测量平面内圆周运动的圆心也将偏离原点  $O_s$ ,因而  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  不再是直角。由于机器人的运动速度恒定,可根据两条激光被遮挡的时间间隔求出该夹角的大小,根据  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  的值计算轨迹圆心到  $X_s$  轴的距离  $d_x$  和到  $Y_s$  轴的距离  $d_y$ ,即圆心在测量平面  $X_s O_s Y_s$  下的坐标为  $(d_x, d_y)$ :

$$\begin{cases} d_x = R \cdot \cos\left(\frac{\beta + \gamma}{2}\right) \\ d_y = R \cdot \cos\left(\frac{\alpha + \delta}{2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

### 3 系统校准方法

#### 3.1 TCF 快速校准基本原理

TCF 校准传感器结构如图 2 所示,两组激光对管发射出十字交叉的激光条,假设两组激光严格垂直,并将从发射端指向接收端的方向分别定义为校准传感器坐标系  $O_s X_s Y_s Z_s$  的  $X_s$  轴和  $Y_s$  轴正方向;交点定义为原点  $O_s$ ;根据右手定确定  $Z_s$  轴方向。

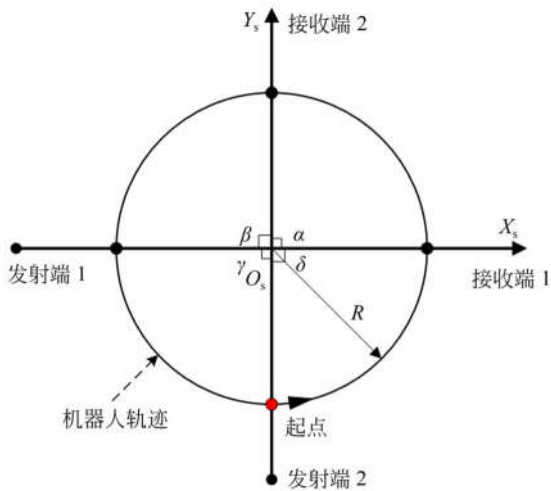


图 2 TCF 校准传感器示意图

Fig. 2 TCF calibration sensor schematic diagram

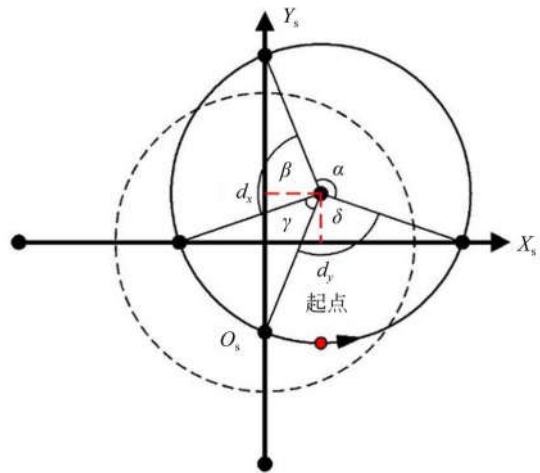


图 3 工具偏移后引起的圆心偏移

Fig. 3 Center shift caused by tool migration

#### 3.2 新 TCF 建立方法

建立如图 1 所示坐标系,安装时尽量保证传感器坐标系  $O_s X_s Y_s Z_s$  与基坐标系  $O_b X_b Y_b Z_b$  平行,  $X_s$  与  $X_b$  方向相同,  $Y_s$  与  $Y_b$  方向相反,  $Z_s$  由右手定则确认。

TCF 坐标系的五自由度校准(3 个方向的平移自由度和 2 个方向的旋转自由度)过程如图 4 所示,具体流程如下:

第一步:将末端执行器工具探入测量平面中,与平面的交点记为  $P_1$ ,该测量平面的法向与校准传感器的  $Z_s$  轴方向一致,机器人带动工具在测量

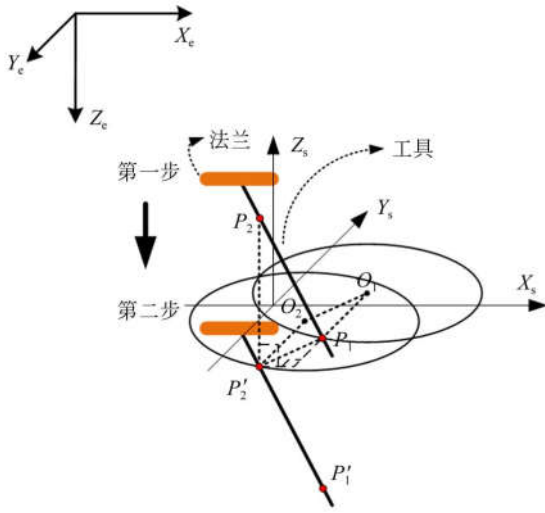


图 4 十字交叉激光法第一步和第二步坐标系和运动轨迹示意图

Fig. 4 Cross step laser method: first and second step coordinate system and moving path sketch map

$$\begin{cases} \psi = \frac{-\Delta x}{|-\Delta x|} \arccos \frac{\Delta y}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}, -180^\circ \leq \psi < 180^\circ \\ \theta = \arccos \frac{\Delta z}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}}, 0^\circ \leq \theta < 180^\circ \\ \varphi = -\psi \end{cases} \quad (5)$$

从而求出 ${}^e\mathbf{T}$ 中对应的旋转矩阵 ${}^e\mathbf{R}$ 为:

$${}^e\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos^2 \psi + \sin^2 \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \psi (1 - \cos \theta) & \sin \psi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \psi (1 - \cos \theta) & \sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \psi \sin \theta & \cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

第三步:如图 5 所示,调整工具主轴方向,模拟末端工具被碰撞之后的状态,则末端法兰坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 相对于传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 发生变化,机器人带动工具以相同的角速度与半径做匀速圆周运动,根据记录的时间计算出轨迹圆心 $O_3$ 坐标 $(d_{x3}, d_{y3})$ 。

将工具沿 $X_s$ 轴反向移动距离 $d_{x3}$ ,沿 $Y_s$ 轴反向移动距离 $d_{y3}$ ,最终移动到虚线所示位置,此时工具主轴与 $Z_s$ 轴平行。

第四步:如图 5 所示,在新位置,机器人携带末端工具沿 $Z_s$ 轴上下两个位置做两次圆周运动,记录两束激光恰好被遮挡和恰好不被遮挡时轨迹圆心坐标 $O_e$ ,并计算 4 次坐标平均值 $(x_e, y_e, z_e)$ ,根据 $O_e$ 和 $O_s$ 坐标计算出 TCP 在末端工具坐标系下的位置 $(x_0, y_0, z_0)$ ;

平面内做匀速圆周运动,根据接收端传感器记录的时间计算出轨迹圆心 $O_1$ 坐标 $(d_{x1}, d_{y1})$ ;

第二步:沿 $Z_s$ 轴使工具向下运动距离 $\Delta z$ ,末端工具与测量平面交点记为 $P'_2$ ,机器人带动工具以相同的角速度与半径做匀速圆周运动,根据记录的时间计算出轨迹圆心 $O_2$ 坐标 $(d_{x2}, d_{y2})$ 。

根据图 4 所示几何关系,工具主轴方向 $\mathbf{P}_2\mathbf{P}_1$ 在坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 下的方向向量为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_2\mathbf{P}_1 &= \mathbf{P}_2\mathbf{P}'_2 + \mathbf{P}'_2\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}_2\mathbf{P}'_2 + \mathbf{O}_2\mathbf{O}_1 = \\ &= (0, 0, -\Delta z) + (d_{y1} - d_{y2}, d_{x1} - d_{x2}, 0) = \\ &= (d_{y1} - d_{y2}, d_{x1} - d_{x2}, -\Delta z). \end{aligned} \quad (3)$$

由于 $Y_e$ 轴与 $Y_s$ 轴方向相反, $Z_e$ 与 $Z_s$ 轴方向相反,因此 $\mathbf{P}_2\mathbf{P}_1$ 在坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 下的方向向量为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_2\mathbf{P}_1 &= (d_{x1} - d_{x2}, d_{y2} - d_{y1}, \Delta z) = \\ &= (\Delta x, \Delta y, \Delta z). \end{aligned} \quad (4)$$

工具坐标系到法兰末端坐标系的转换关系为 ${}^e\mathbf{T}$ ,其对应的欧拉角 $\psi$ 和 $\theta$ <sup>[15]</sup>可根据 $\mathbf{P}_2\mathbf{P}_1$ 的坐标求出:

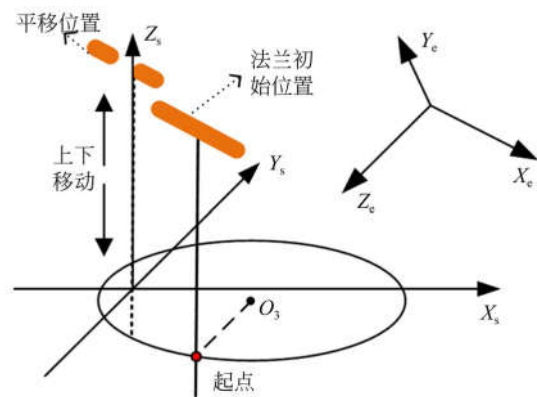


图 5 十字交叉激光法第三步和第四步坐标系和运动轨迹示意图

Fig. 5 Cross step laser method: third and fourth step coordinate system and moving track sketch map

$$(x_0, y_0, z_0) = (x_s, y_s, z_s) - (x_e, y_e, z_e). \quad (7)$$

值得注意的是,理论上  $O_s X_s Y_s Z_s$  与  $O_b X_b Y_b Z_b$  两坐标系各轴平行,但实际情况很难实现,因此在做平移或圆周运动时需严格沿(或绕) $O_s X_s Y_s Z_s$  坐标系各轴进行运动以保证 TCF 校准精度。

#### 4 传感器坐标系标定与误差分析

由于加工精度与安装工艺的限制,很难保证  $O_s X_s Y_s Z_s$  与  $O_b X_b Y_b Z_b$  两坐标系各轴平行,实际应用时存在如下限制,例如: $X_s$  与  $X_b$  坐标轴之间存在小角度偏差、十字交叉的激光条不垂直或实际拟合的直线不相交、 $X_s O_s Y_s$  平面与  $X_b O_b Y_b$  平面不平行等,都会严重影响系统校准精度,因此需要对各参数进行标定和误差分析,并对 3.2 节得出的 TCF 计算公式做出相应改进,从而提高 TCF 校准精度。

##### 4.1 传感器坐标系的标定

第三节提出了通过记录遮挡激光的时间点进行工具坐标系校准的方法,由于传感器坐标系根据激光器的收发方向而定,因此需要对激光收发端构成的直线(坐标轴)进行标定,并根据直线方程确认准确的坐标系原点及坐标轴方向。

将  $X_s$  方向设为激光方向, $Y_b$  轴和  $Z_b$  轴方向如图 6 所示,测量该激光上两点 A 和 B 确定直线

方程。测量过程中需保持机器人末端法兰坐标系  $X_e$  轴与  $X_b$  方向一致。为方便说明原理,本节以机器人末端法兰坐标系为例进行校准,实际校准时使用专用校准工具安装在法兰末端实现 TCF 校准,具体描述见 5.1 节。

测量步骤如下:

(1)沿  $Y_b$  轴方向平移机器人法兰,在遮挡激光瞬间记录法兰坐标系原点在基坐标系下的坐标  $A_1(x_{A1}, y_{A1})$ ;继续沿  $Y_b$  轴方向平移,在恰好不遮挡激光瞬间记录法兰坐标系原点在基坐标系下的坐标  $A_2(x_{A2}, y_{A2})$ ;记 A 点为  $A_1$  点和  $A_2$  点的中点,则点 A 坐标为:

$$A(x_A, y_A) = \left\{ \frac{x_{A1} + x_{A2}}{2}, \frac{y_{A1} + y_{A2}}{2} \right\}. \quad (8)$$

(2)与上述步骤类似,调整法兰坐标系绕  $X_b$  轴旋转,使  $Z_e$  轴与  $Y_b$  轴方向一致,根据式(8)所得坐标平移法兰,使法兰中心点与 A 点 X 坐标一致;将机器人法兰沿  $Z_b$  轴负向平移,在遮挡激光瞬间记录法兰中心点在基坐标系下 Z 方向坐标  $A_3(z_{A3})$ ;继续沿  $Z_b$  轴方向平移,在恰好不遮挡激光瞬间记录法兰中心点在基坐标系下 Z 方向坐标  $A_4(z_{A4})$ ;则中心点 A 的坐标为:

$$A(x_A, y_A, z_A) = \left\{ \frac{x_{A1} + x_{A2}}{2}, \frac{y_{A1} + y_{A2}}{2}, \frac{z_{A3} + z_{A4}}{2} \right\}, \quad (9)$$

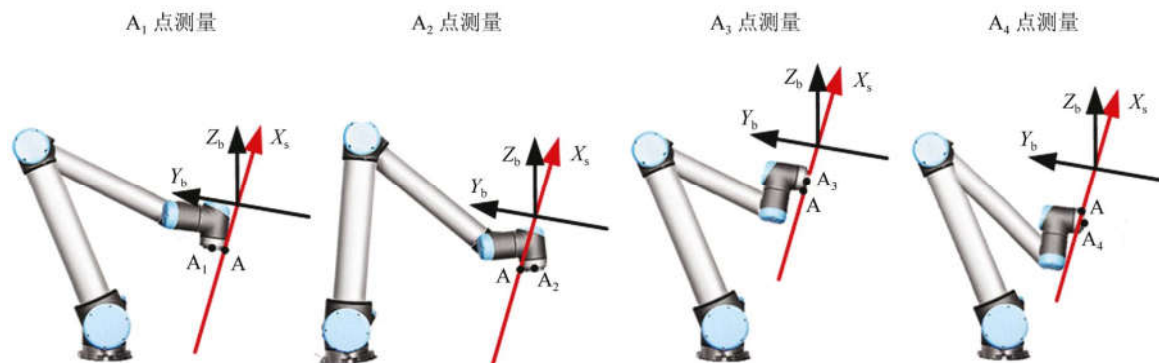


图 6 利用法兰盘测量激光光线上的点 A

Fig. 6 Measuring point A in laser light with a flange

采用相同的步骤得到激光线上另外一点坐标  $B(x_B, y_B, z_B)$ , 据此得到直线 AB 的参数方程为:

$$\begin{cases} x = x_A + (x_B - x_A)r = x_A + m_1 r \\ y = y_A + (y_B - y_A)r = y_A + n_1 r \\ z = z_A + (z_B - z_A)r = z_A + p_1 r \end{cases}, \quad (10)$$

其中:  $r$  为参数,  $m_1 = (x_B - x_A)$ ,  $n_1 = (y_B - y_A)$ ,  $p_1 = (z_B - z_A)$ 。

同理可得  $Y_s$  轴激光线上两点  $C(x_C, y_C, z_C)$  和  $D(x_D, y_D, z_D)$ , 并求得直线  $CD$  的参数方程为:

$$\begin{cases} x = x_C + (x_D - x_C)t = x_C + m_2 t \\ y = y_C + (y_D - y_C)t = y_C + n_2 t, \\ z = z_C + (z_D - z_C)t = z_C + p_2 t \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $t$  为参数,  $m_2 = (x_D - x_C)$ ,  $n_2 = (y_D - y_C)$ ,  $p_2 = (z_D - z_C)$ 。

理论上, 直线  $AB$  和  $CD$  相交于点  $O_s$ , 但由于测量误差的存在, 这两条直线为异面直线, 将它们的公垂线段  $PQ$  的中点  $M$  定义为原点  $O_s$ , 如图 7 所示。

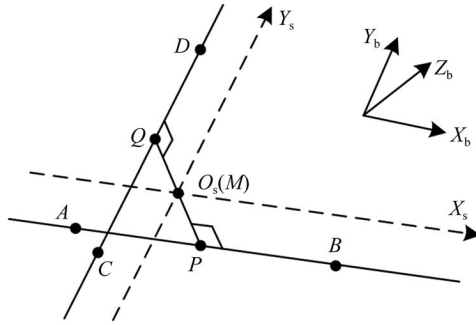


图 7 直线  $AB$  和  $CD$  的公垂线中点作为点  $O_s$

Fig. 7 Middle point of line  $AB$  and line  $CD$ 's straight line as  $O_s$

由公垂线性质可知, 直线  $AB$  和  $CD$  上任意两点连线的最短距离为公垂线段, 以两点之间距离建立如下函数  $f(r, t)$ :

$$f(r, t) = (x_A - x_C + m_1 r - m_2 t)^2 + (y_A - y_C + n_1 r - n_2 t)^2 + (z_A - z_C + p_1 r - p_2 t)^2. \quad (12)$$

对  $f(r, t)$  求偏微分方程得:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(r, t)}{\partial t} = 2(k_1 r - k_3 t + k_4) = 0 \\ \frac{\partial f(r, t)}{\partial r} = 2(k_2 t - k_3 r - k_5) = 0 \end{cases}, \quad (13)$$

其中:  $k_1 = (m_1^2 + n_1^2 + p_1^2)$ ,  $k_2 = (m_2^2 + n_2^2 + p_2^2)$ ,  $k_3 = (m_1 m_2 + n_1 n_2 + p_1 p_2)$ ,  $k_4 = (x_A - x_C) m_1 + (y_A - y_C) n_1 + (z_A - z_C) p_1$ ,  $k_5 = (x_A - x_C) m_2 + (y_A - y_C) n_2 + (z_A - z_C) p_2$ 。

由式(13)可求解点  $P$  和点  $Q$  对应的参变量  $r_P$  和  $t_Q$  为:

$$\begin{cases} r_P = \frac{k_2 k_4 - k_3 k_5}{k_3^2 - k_1 k_2} \\ t_Q = \frac{k_3 k_4 - k_1 k_5}{k_3^2 - k_1 k_2} \end{cases}. \quad (14)$$

将式(14)带入式(10)和式(11)可分别求得坐标  $P(x_P, y_P, z_P)$  和  $Q(x_Q, y_Q, z_Q)$ , 取点  $P$  和点  $Q$  中点  $M(x_M, y_M, z_M)$  作为传感器坐标系的原点:

$$\begin{cases} x_M = \frac{x_A + x_C + m_1 r_P + m_2 t_Q}{2} \\ y_M = \frac{y_A + y_C + n_1 r_P + n_2 t_Q}{2} \\ z_M = \frac{z_A + z_C + p_1 r_P + p_2 t_Q}{2} \end{cases}. \quad (15)$$

传感器坐标系  $X_s$  方向单位向量为:

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{AB}}{|\mathbf{AB}|} = \frac{1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \begin{bmatrix} m_1 \\ n_1 \\ p_1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

$Y_s$  方向单位向量为:

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{CD}}{|\mathbf{CD}|} = \frac{1}{\sqrt{m_2^2 + n_2^2 + p_2^2}} \begin{bmatrix} m_2 \\ n_2 \\ p_2 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

$Z_s$  方向单位向量为:

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{m}}{|\mathbf{n} \times \mathbf{m}|}. \quad (18)$$

## 4.2 斜坐标系下测量误差补偿方法

在 TCP 快速校准系统安装时, 由于制造工艺的限制,  $X_s$  与  $Y_s$  坐标轴之间的夹角  $\epsilon$  不可能恰好垂直。当  $\epsilon$  不为  $90^\circ$  时,  $X_s O_s Y_s$  不是直角坐标系, 但由于  $Z_s$  与该平面垂直, 因此用与  $X_s O_s Z_s$  垂直的  $Y'_s$  轴代替  $Y_s$  轴。根据式(16)和式(18)得  $Y'_s$  的单位向量为:

$$\mathbf{o} = \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{bmatrix} = \mathbf{p} \times \mathbf{n} = \begin{bmatrix} p_y n_z - p_z n_y \\ p_z n_x - p_x n_z \\ p_x n_y - p_y n_x \end{bmatrix}. \quad (19)$$

因此机器人基坐标系  $O_b X_b Y_b Z_b$  到校准传感器坐标系  $O_s X_s Y_s Z_s$  的转换关系为:

$${}^b \mathbf{T}_s = \begin{bmatrix} n_x & o_x & p_x & x_M \\ n_y & o_y & p_y & y_M \\ n_z & o_z & p_z & z_M \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

如图 8 所示,测量过程中,工具做圆周运动,即使  $Y_s$  轴与  $X_s$  夹角不为  $90^\circ$ ,在斜坐标系  $X_s O_s Y_s$  中仍可以使用公式(2)通过  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  得到圆周的圆心坐标,从而得出圆心  $O_1$  到  $X_s$  轴和  $Y_s$  轴的距离  $d_y$  和  $d_x$ 。得出圆心  $O_1$  在斜坐标系  $X_s O_s Y_s$  下的坐标  $(x_1, y_1)$  为:

$$(x_1, y_1) = \left( \frac{d_x}{\cos(\epsilon - 90^\circ)}, \frac{d_y}{\sin \epsilon} \right). \quad (21)$$

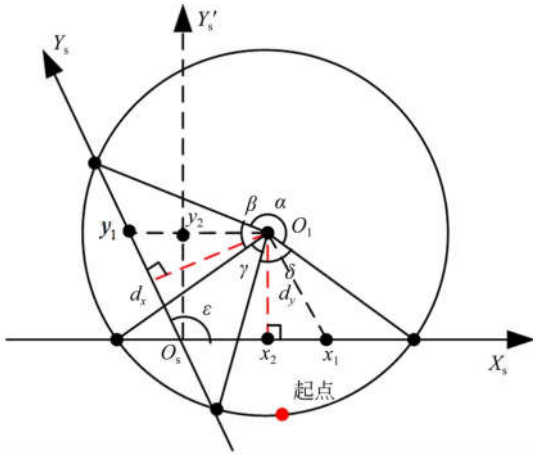


图 8 坐标系  $X_s O_s Y_s$  到坐标系  $X_s O_s Y'_s$  坐标转换  
Fig. 8 Frame from  $X_s O_s Y_s$  to  $X_s O_s Y'_s$

在平面  $X_s O_s Y_s$  内,做  $Y'_s$  轴垂直于  $X_s$  轴,由解析几何可得圆心  $O_1$  在直角坐标系  $X_s O_s Y'_s$  下的坐标  $(x_2, y_2)$ :

$$(x_2, y_2) = \left( x_1 + \frac{d_y}{\tan \epsilon}, d_y \right) = \left( \frac{d_x}{\cos(\epsilon - 90^\circ)} + \frac{d_y}{\tan \epsilon}, d_y \right), \quad (22)$$

式(22)表明由于坐标轴不垂直,导致圆心到  $Y_s$  轴距离变化较大,其偏差为:

$$\Delta E = d_x - x_2 = d_x - \frac{d_x}{\cos(\epsilon - 90^\circ)} - \frac{d_y}{\tan \epsilon}. \quad (23)$$

如图 9 所示,选取  $d_x = d_y = 5 \text{ mm}$ ,  $-5^\circ \leq \epsilon - 90^\circ \leq 5^\circ$ ,当  $\epsilon$  接近  $90^\circ$  时,式(23)中  $d_x - \frac{d_x}{\cos(\epsilon - 90^\circ)}$  近似为 0,而误差项  $-\frac{d_y}{\tan \epsilon}$  影响较大,误差会随着  $d_y$  绝对值的增大而增大,当  $\epsilon - 90^\circ$  值大于  $\pm 1.2^\circ$  时,误差  $\Delta E$  将达到  $\pm 0.1 \text{ mm}$ ,因此需要通过机械的调整装置,保证传感器的装置的垂直度误差控制在 20 角秒内,此时误差约  $\pm 0.03 \text{ mm}$ ,满足使用要求。

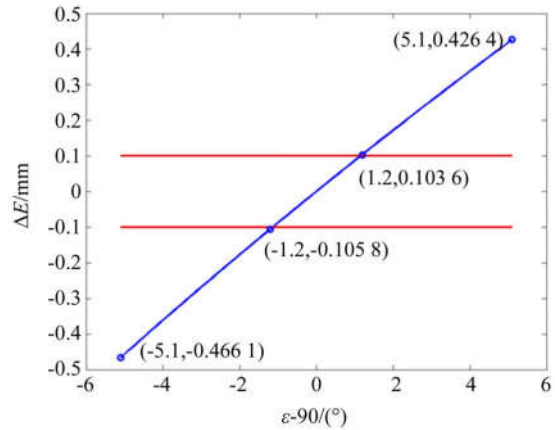


图 9 圆心坐标修正前后误差图  
Fig. 9 Error map before and after coordinate correction of locus of the center

## 5 实验及结果分析

搭建如图 10 所示的 TCF 快速自动校准实验平台,使用 UR10 机器人作为末端执行器的工具载体,UR10 机器人重复定位精度为  $\pm 0.1 \text{ mm}$ ;在机器人法兰末端安装经过精密加工的仿真涂胶枪头作为机器人的末端执行器;校准传感器系统中使用的激光对管,其尺寸为直径  $12 \text{ mm}$ ,长  $35 \text{ mm}$ ,工作距离  $0 \sim 30 \text{ m}$ ;最后采用 ROMER 超高精度关节臂测量机(空间测长精度  $0.069 \text{ mm}$ )

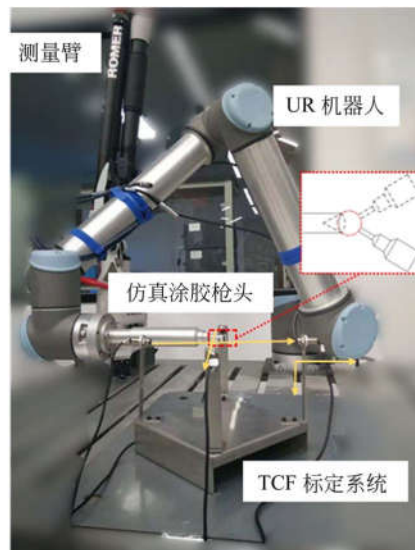


图 10 TCF 自动校准实验平台  
Fig. 10 TCF automatic calibration experimental platform

测量涂胶枪头 TCP 点,验证工具坐标系校准方法的重复定位精度。仿真涂胶枪头尖端加工出锥形内窝,配合关节臂圆形测头,可保证每次测量 TCP 位置均为同一点。

### 5.1 TCF 快速校准系统标定结果

根据 4.1 节提出的十字交叉激光测量系统标定方法,对搭建的实验装置进行标定,由于机器人末端法兰盘大小不一或法兰坐标系原点位置不一,导致无法直接通过机器人法兰盘末端进行标

定,需要在法兰盘上安装特制的标定工具,如图 10 所示。该测量工具经过精密机械加工,安装后工具轴心与末端法兰坐标系的  $Z_c$  重合,用该工具可完全取代 4.1 节中末端法兰在系统标定中的作用。

分别测量两条激光轴所在直线上点 A、B 与 C、D 坐标,将向量 **AB** 定义为  $X_s$  轴正方向,向量 **CD** 定义为  $Y_s$  轴正方向,根据式(9)~式(11)计算对应点的坐标,并得出直线参数方程,结果如表 1 所示。

表 1 激光上点坐标和激光所在直线方程

Tab. 1 Linear equation of laser point coordinates and laser

激光测量点	坐标/mm	直线	直线参数方程
A	(932.025, -77.7, 197.19)	AB	$\begin{cases} x=932.025+113.91r \\ y=-77.7+2.645r \\ z=197.19+0.475r \end{cases}$
B	(1045.935, -75.055, 197.665)		
C	(985.96, -136.76, 197.31)	CD	$\begin{cases} x=985.96+1.345t \\ y=-136.76+113.045t \\ z=197.31+0.27t \end{cases}$
D	(987.305, -23.715, 197.58)		

表 2 TCP 校准 10 次后 probe 测量 TCP 点坐标的结果

Tab. 2 Results of probe measurement of TCP point coordinates after TCP calibration 10 times

测量序号	坐标/mm
1	(1063.052671, 84.898516, 47.605879)
2	(1063.359407, 85.105973, 47.754873)
3	(1063.697484, 84.972187, 47.605489)
4	(1063.423849, 84.635871, 47.955623)
5	(1062.960982, 84.789240, 48.150726)
6	(1063.126482, 84.660189, 47.903640)
7	(1063.808963, 85.195469, 47.598287)
8	(1063.251397, 84.560317, 48.050144)
9	(1062.935807, 84.364872, 47.986563)
10	(1063.148796, 84.649812, 48.205480)

得到直线 AB 和 CD 参数方程后,结合式(13)~式(15)可计算出两条直线公垂线的中点 M 坐标,再结合式(16)~式(19)分别求出  $X_s, Y_s, Z_s, Y'_s$  的单位向量  $\mathbf{n}, \mathbf{m}, \mathbf{o}, \mathbf{p}$  的值,从而得机器人基坐标系到校准传感器转换关系为:

$$\mathbf{T}_s^b =$$

$$\begin{bmatrix} 0.9997 & -0.0232 & -0.0041 & 986.68 \\ 0.0232 & 0.9997 & -0.0023 & -76.43 \\ 0.0042 & 0.0022 & 1.0000 & 197.57 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

根据向量  $\mathbf{n}$  和  $\mathbf{m}$  计算  $\epsilon$  值为:

$$\epsilon = \arccos(\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}) = \arccos(0.0351) = 87.99^\circ$$

### 5.2 TCF 快速校准测量系统修正结果及分析

完成系统标定后,根据 3.2 节方法进行工具坐标系的测量。首先测量工具处于正常安装状态下工具坐标系的位姿,测量结果为:

$$\mathbf{T}_t^c =$$

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & -0.0007 & 0.1048 \\ -0.0000 & 1.0000 & 0.0016 & -0.0436 \\ 0.0007 & -0.0016 & 1.0000 & 149.2500 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

测量后手动示教机器人使仿真涂胶枪头的 TCP 点与另一固定的尖端点重合,如图 11(a)图所示,记录此时 TCP 点在机器人基坐标系下的坐标为 K(1 147.69, -278.15, 147.52)。手动示教机器人至某一位置,记录此处 TCP 点在机器人基坐标系下的坐标为 L(1 147.69, -210.00,

200.00),同时用关节臂对涂胶枪头的尖端进行测量,如图 11(c)图所示,记录关节臂下的坐标  $J(1\ 063.852\ 671,84.621\ 584,47.235\ 482)$ 。

在工具与法兰连接处增加垫片,测量工具处于偏斜状态下工具坐标系的位姿,测量结果为:

$$T_1^r = \begin{bmatrix} 0.994\ 8 & 0.006\ 0 & -0.102\ 1 & 16.097\ 7 \\ 0.006\ 0 & 0.993\ 2 & 0.116\ 1 & -18.309\ 8 \\ 0.102\ 1 & -0.116\ 1 & 0.988\ 0 & 155.783\ 8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

机器人按照 K 点坐标示教,则 TCP 点到达的位置如图 11(b)图所示,与固定的仿真涂胶工具尖端点仍能基本重合;机器人按照 L 点坐标示教,TCP 点到达的位置如图 11(d)图所示,此时再次用关节臂对工具尖端进行测量,记录此时 TCP 点在关节臂下的坐标为  $J'(1\ 063.052\ 671,84.898\ 516,47.605\ 879)$ 。通过调整垫片位置与尺寸变换不同的工具坐标系位姿,同时用关节臂测量不同状态下 TCP 点的结果如表 2 所示。

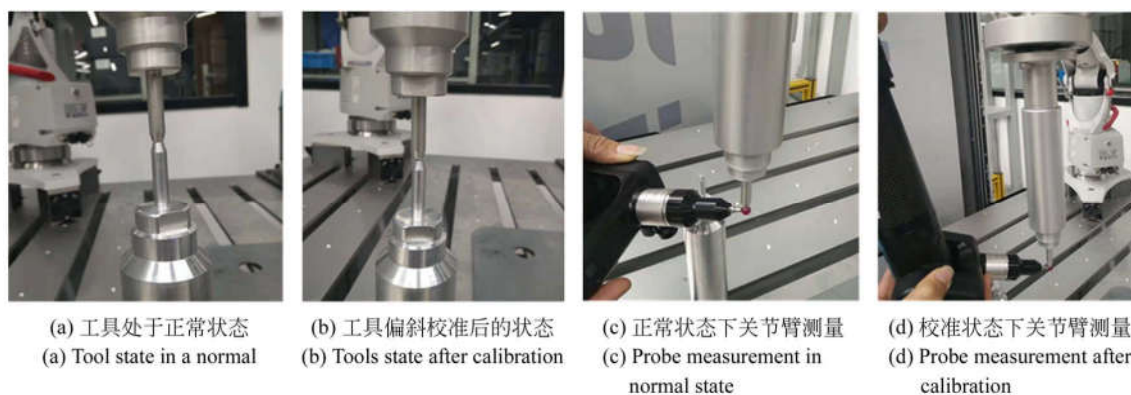


图 11 TCF 快速校准测量系统实验验证

Fig. 11 TCF automatic calibration experimental

根据表 2 中数据可计算此 10 个测点的位置均方根误差为 0.46 mm。该精度与传统七点法测量精度水平相当,整个机器人工具坐标系标定及恢复时间仅为 15 s。

## 6 结 论

本文提出一种快捷高效的校准方法,该校准方法无需人为干预,完全通过机器人以及光电标定传感器系统进行调整,通过控制机器人在校准传感器内的按照预定的圆周或直线轨迹移动,实现机器人工具坐标系的校准。实验证明,本文提

出的机器人工具坐标系的快速校准方法通过直观结果(图 11(b))和定量数据(表 2)说明校准精度可达  $\pm 0.5$  mm,各项误差可通过一系列的工或坐标转换来消除,机器人工具坐标系测量及恢复过程时间仅为 15 s,满足车身生产线现场精度要求和时间要求,并且自动化程度高、传感器成本低。经过验证该工具坐标系的校准方法达到了初期标准,适合工业现场使用,能够极大地促进汽车生产线的正常运作。未来的工作可针对光电校准传感器的坐标系建立进一步展开,提升初始建立的坐标系的精度,从而进一步提升工具坐标系的校准精度。

### 参考文献:

- [1] 谭建荣. 智能制造与机器人应用关键技术与发展趋势[J]. 机器人技术与应用,2017(3):18-19.  
TAN J R. The key technology and development trend of intelligent manufacturing and robot application [J]. *Robot Technique and Application*, 2017

(3):18-19. (in Chinese)

- [2] 何玉庆,赵忆文,韩建达,等. 与人共融——机器人技术发展的新趋势[J]. 机器人产业,2015(5):74-80.  
HE Y Q, ZHAO Y W, HAN J D, *et al.*. Communion with people—the new trend of robot technology development [J]. *Robot industry*, 2015(5): 74-

80. (in Chinese)
- [3] 蔡自兴, 谢斌. 机器人学第 3 版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.  
CAI Z X, XIE B. *Robotics (3th)* [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2015. (in Chinese)
- [4] 赵志坚, 温力强. 中国汽车产业内外资企业生产效率研究[J]. 经济数学, 2009, 26(1): 81-87.  
ZHAO ZH J, WEN L Q. Research on production efficiency of domestic and foreign enterprises in China's automobile industry [J]. *Mathematics in economics*, 2009, 26(1): 81-87. (in Chinese)
- [5] 朴永杰, 邱涛, 陈善本. 弧焊机器人 TCF 参数的标定[J]. 机器人, 2001, 23(2): 109-112.  
PIAO Y J, QIU T, CHEN SH B. Calibration of TCF parameters of arc welding robot [J]. *Robot*, 2001, 23(2): 109-112. (in Chinese)
- [6] 赵娇娇, 朱伟. 弧焊机器人系统标定[J]. 福州大学学报, 2008, 36(s1): 36-39.  
ZHAO J J, ZHU W. Arc welding robot calibration [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science)*, 2008, 36(s1): 36-39. (in Chinese)
- [7] 刘蕾. 一种弧焊机器人工具标定方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2014(9): 76-77.  
LIU L. A tool calibration method for arc welding robot [J]. *Automation and instrumentation*, 2014 (9): 76-77. (in Chinese)
- [8] 周祥. 工业机器人工具及工件坐标系的标定研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.  
ZHOU X. *Research on calibration of industrial robot tools and workpiece coordinate system* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] YIN S, GUO Y, REN Y, *et al.*. A novel TCF calibration method for robotic visual measurement system [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(23): 6920-6925.
- [10] PAANANEN V J. Dual light barrier method for six degrees of freedom tool center point calibration of an industrial robot [J]. *Lutpub*, 2014.
- [11] 杨聚庆, 王大勇, 董登峰, 等. 激光测量标定机器人坐标系位姿变换的正交化解算方法[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8).  
YANG J Q, WANG D Y, DONG D F, *et al.*. Orthogonal solution method for pose transformation of coordinate system of laser measuring and calibrating robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8). (in Chinese)
- [12] 吴聊, 杨向东, 蓝善清, 等. 基于平面模板的机器人 TCF 标定[J]. 机器人, 2012, 34(1): 98-103.  
WU L, YANG X D, LAN SH Q, *et al.*. Robotic TCF calibration based on a planar template [J]. *Robot*, 2012, 34(1): 98-103. (in Chinese)
- [13] 刘成业, 李文广, 马世国, 等. 一种机器人工具坐标系标定方法[J]. 山东科学, 2012, 25(1): 69-74.  
LIU CH Y, LI W G, MA SH G, *et al.*. A robot tool frame calibration method [J]. *Shandong science*, 2012, 25(1): 69-74. (in Chinese)
- [14] 黄婷, 许辉, 樊成, 等. 叶片复杂曲面的机器人抛磨工艺规划[J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 132-141.  
HUANG T, XU H, FAN CH, *et al.*. Robotic grinding process planning for complex blade surfaces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(1): 132-141. (in Chinese)
- [15] 王天宇, 董文博, 王震宇. 基于单目视觉和固定靶标的位姿测量系统[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 153-160.  
WANG T Y, DONG W B, WANG Z Y. Position and orientation measurement system based on monocular vision and fixed target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 153-160. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘涛(1989—),男,安徽滁州人,博士研究生,主要从事激光及光电测试,视觉检测技术,机器人测量技术方面的研究。E-mail: liutao1943@tju.edu.cn

#### 导师简介:



任永杰(1975—),男,河北河间人,博士,副教授,1998年于华北电力大学获得学士学位,2004年和2007年于天津大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光及光电测试,视觉检测技术,机器人控制及机器人测量技术方面的研究。E-mail: yongjieren@tju.edu.cn

(本栏目编辑:秦思)