

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006068

# 机器人自动钻铆系统的现场快速自定位方法\*

韦 溟, 张丽艳

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

**摘要:** 机器人自动钻铆系统在航空产品零部件制造和装配中得到了越来越广泛的应用。提出了一种利用钻铆机器人末端执行器上携带的单个工业相机进行现场机器人快速自定位的方法。该方法只需要以示教方式驱动钻铆机器人带动末端的工业相机对工件坐标系下6个以上坐标已知的定位点依次单独成像,即可简便快捷地确定出机器人基坐标系与工件坐标系之间的变换关系,结果表明,坐标系之间的旋转向量的偏差小于0.004,平移向量在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的偏差的绝对值都小于0.5 mm,实现机器人高精度自定位。推导了基于定位点依次单独成像的机器人自定位数学模型,并针对这一新模型提出了一种高效稳健的求解算法。该方法不受定位点分布结构的限制,可以直接利用自动钻铆系统自带的单个工业相机,无需激光跟踪仪等额外的坐标测量系统进行繁琐的三维测量和数据处理,因此机器人与工件的现场找正过程更加便捷高效。针对多个定位点依次单独成像所建立的定位模型和求解方法可以广泛应用于解决各类“手-眼”机器人系统的自定位问题。

**关键词:** 机器人;自动钻铆;自定位;找正;手-眼标定

**中图分类号:** TP242.2 V262.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.5030

## Fast on-site self-positioning method for robot automatic drilling and riveting system

Wei Ming, Zhang Liyan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Robot automatic drilling and riveting system has got more and more extensive applications in the manufacture and assembly of aeronautical parts. This paper proposes a fast on-site self-positioning method of the robot, which uses the single industrial camera carried in the end effector of the drilling and riveting robot to carry out the fast on-site self-positioning. The method only needs to drive the industrial camera at the end of the drilling and riveting robot in teaching mode to sequentially image more than six locating points whose coordinates are known in advance in the workpiece coordinate system, the transformation relationship between the robot base coordinate system and workpiece coordinate system can be determined quickly and easily. The results show that the deviation of the rotation vector between coordinate systems is less than 0.004, and the absolute deviations of the translation vectors in  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  directions are less than 0.5 mm, the high-precision self-positioning of the robot is achieved. The mathematical model of the robot self-positioning method based on sequentially, individually imaging of the locating points is derived. Aiming at the new model, a high efficient and steady solving algorithm is put forward. The proposed method directly makes use of the industrial camera carried in the automatic drilling and riveting system itself, is not restricted by the locating point distribution. Since no additional coordinate measuring system, for instance a laser tracker, is necessary to carry out tedious on-site three-dimensional measurement and data processing, the on-site alignment process of the robot and workpiece is much more convenient and efficient. The proposed robot positioning model and solving method established aiming at sequentially, individually imaging of multiple locating points can be widely used to solve the self-positioning problem of various kinds of eye-in-hand robotic systems.

**Keywords:** robot; automatic drilling and riveting; self-positioning; alignment; hand-eye calibration

## 0 引 言

随着智能制造技术的高速发展,工业机器人在工业领域中的应用越来越广泛。其中,将钻铆执行器固联于关节臂式工业机器人末端进行自动化钻孔和铆接是目前飞机装配领域中的一个研究热点,并已逐渐开始步入实际应用阶段,替代传统的人工作业。机器人自动钻铆不但可以大大提高制孔和铆接质量,也可以有效提高钻铆效率。

机器人钻铆系统工作之前,需要确定机器人在相对于工件坐标系的位置和姿态<sup>[1-2]</sup>,这是机器人钻铆工作的前提。这一环节称为机器人定位,也称为机器人找正、工件定位、工件找正。目前飞机装配自动钻铆作业中,机器人相对于工件的定位主要采用激光跟踪仪等大尺寸测量设备来完成<sup>[3-6]</sup>。一方面,利用这些外部测量设备对被钻铆工件上的多个特征点进行测量,进而建立工件坐标系与测量坐标系之间的变换关系;另一方面,在机器人末端上布置靶点(靶球),控制机器人绕不同的轴旋转,每旋转到一个位置,利用外部测量设备对机器人末端上布置的靶点进行三维坐标测量,再通过绕各轴旋转时靶点的一系列三维坐标进行圆弧拟合,进而建立起机器人基坐标系与测量坐标系之间的变换关系。然后,根据工件坐标系与测量坐标系之间的变换关系、机器人基坐标系与测量坐标系之间的变换关系,算出工件坐标系与机器人基坐标系之间的变换关系,从而实现机器人定位<sup>[7-9]</sup>。这种利用外部测量设备进行机器人定位的方法,不但需要借助额外的测量设备,而且步骤繁琐耗时,测量过程和定位解算过程难以实现集成和自动化。

在面向飞机装配的机器人自动钻铆系统中,为了保证机器人制孔位置的准确性,机器人末端的钻铆执行器中会固联一个工业相机,用于制孔位置误差的在线补偿<sup>[10-11]</sup>。根据已有的机器视觉理论和方法,利用一个工业相机一次性拍摄  $n$  个相对位置已知的目标点,可以求解出相机相对于已知目标点的位姿,这被称为透视  $n$  点问题(PnP问题)<sup>[12-14]</sup>。然而,经典 PnP 问题的求解要求相机在一幅图像中同时成像  $n$  个目标点,为了保证解的唯一性和精确性,工业应用中一般  $n \geq 6$ ,且  $n$  个目标点应尽可能分布于一个尽可能大的空间范围内。由于钻铆执行器中的工业相机在进行制孔误差在线补偿时,每次拍摄图像通常都只需要对单独一个直径 5 mm 左右的基准孔(或者基准铆钉)进行成像,而为了避免所拍摄的单个基准孔在图像中所占区域过小,保证基准孔的成像质量和定位孔图像中心的定位精度,机器人末端执行器中所固联的工业相机的视场通常较小,无法在一幅图像中

同时成像分布于较大空间范围内的多个定位点。在本文之前未见有利用自动钻铆机器人自带的单个工业相机进行机器人自身定位的研究报道。目前业内一直沿用激光跟踪仪等额外的测量设备进行繁琐的机器人现场定位工作。

针对上述问题,本文提出一种直接利用钻铆机器人末端执行器上自带的单个工业相机进行机器人自定位的新方法。该方法只需以示教方式移动机器人末端,使其携带的工业相机对工件坐标系中 6 个以上坐标已知的定位参考点依次单独成像,即可简便快捷地确定出工件与机器人之间的位姿关系,实现机器人自定位。详细阐述了这一新方法的理论基础,推导了基于定位点依次单独成像的机器人自定位数学模型,并提出了一种高效稳健的模型求解算法。本文方法除了在飞机装配机器人自动钻铆中有明确需求以外,也可以应用于其他领域中末端带有工业相机的机器人自定位。

## 1 机器人自定位方法

### 1.1 坐标系的定义

为了对机器人进行自定位,本文建立的坐标系包括机器人坐标系(记为  $O_R$ )、末端法兰坐标系(记为  $O_F$ )、相机坐标系(记为  $O_C$ )以及工件坐标系(记为  $O_W$ )。如图 1 所示,工件坐标系中有  $n$  个在视觉图像中可分辨的定位点(如定位孔中心点), $n \geq 6$ 。 $n$  个定位点在工件坐标系  $O_W$  下任意分布且坐标已知,记为  ${}^W P_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T, i = 1, 2, \dots, n$ 。本文以  $R, t$  分别表示坐标系之间的旋转、平移关系,以  ${}^A B T$  表示从  $O_A$  坐标系到  $O_B$  坐标系之间的  $4 \times 4$  坐标变换矩阵。

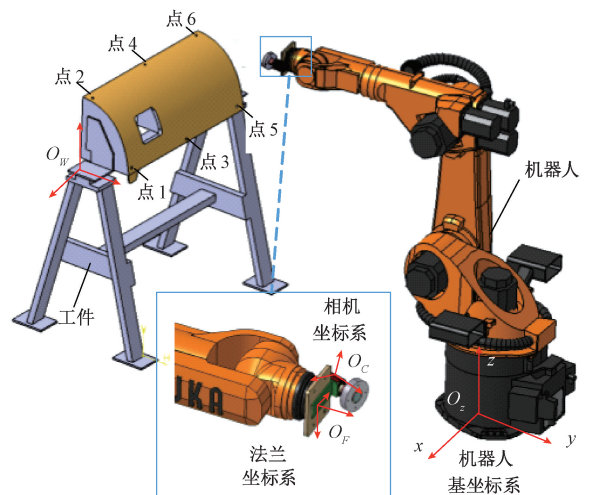


图 1 机器人自定位方法

Fig. 1 Schematic diagram of robot self-positioning method

## 1.2 机器人运动成像模型的建立

本文提出的机器人自定位方法,建立在以下的机器人运动成像模型基础之上。

### 1) 定位点的依次拍摄

将工业相机坐标系  $O_C$  与钻铆机器人法兰盘坐标系  $O_F$  之间的  $4 \times 4$  变换矩阵记为  ${}^C_F T$ ,称为“手-眼”关系,钻铆系统自定位前,工业相机成像内参数以及相机坐标系与机器人法兰盘坐标系间的手-眼关系已进行过标定。固定好工件和机器人后,通过机器人交互示教功能控制机器人移动,使机器人末端所载工业相机依次到达第  $i$  个 ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 定位点上方可以对该定位点清晰成像的位置,控制工业相机拍摄该定位点的图像,如图2所示。记录机器人示教器面板上该位置下机器人法兰盘坐标系  $O_F$  原点相对机器人基坐标系  $O_R$  原点之间的平移向量  ${}^R_F t_i$  以及机器人法兰盘的欧拉角  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 。

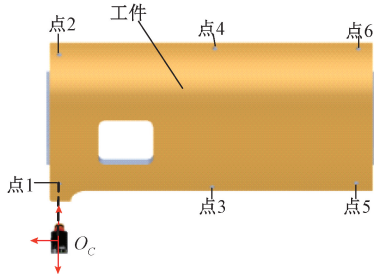


图2 机器人带动相机依次拍摄定位点

Fig. 2 Schematic diagram of the robot drives the camera to shoot locating points sequentially

利用式(1)<sup>[15]</sup>计算拍摄第  $i$  个 ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 定位点时机器人法兰盘坐标系  $O_F$  相对于机器人基坐标系  $O_R$  的旋转矩阵  ${}^R_F R_i$ 。

$${}^R_F R_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_i & 0 & -\sin \beta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \beta_i & 0 & \cos \beta_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_i & -\sin \gamma_i \\ 0 & \sin \gamma_i & \cos \gamma_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(2)表示拍摄第  $i$  个定位点时机器人法兰盘坐标系  $O_F$  相对于机器人基坐标系  $O_R$  的变换矩阵  ${}^R_F T_i$ 。

$${}^R_F T_i = \begin{bmatrix} {}^R_F R_i & {}^R_F t_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (2)$$

需要说明的是,在依次拍摄定位点的过程中,每个拍摄位置不需要精确控制,而是只要该位置下定位点能够清晰成像在图像平面上即可。另外,  $n$  个定位点在所拍摄的各幅图像中的图像坐标  $(u_i, v_i), i = 1, 2, \dots, n$ , 应尽可能离散分布于工业相机图像平面的不同位置。

### 2) 机器人运动成像模型

如图3所示,根据坐标系之间的复合变换关系和相机成像模型<sup>[16-17]</sup>,本文建立如式(3)所示的第  $i$  个定位点的运动成像模型:

$$\lambda_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot {}^C_F T \cdot {}^R_F T_i^{-1} \cdot {}^R_W T \cdot {}^W \bar{P}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中:  ${}^W \bar{P}_i$  为第  $i$  个定位点在工件坐标系下的已知三维坐标  ${}^W P_i$  的齐次坐标;  $\lambda_i$  为比例系数;  $K$  为已标定过的机器人自身所带工业相机的针孔模型成像参数矩阵。

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

式中:  $\alpha_x, \alpha_y, s, u_0, v_0$  为已经标定出的相机成像参数。考虑相机非线性畸变的影响,实际成像点  $(u', v')$  可在针孔模型成像点  $(u, v)$  的基础上进一步表示为:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_u(u, v) \\ \delta_v(u, v) \end{bmatrix}$$

本文使用的畸变模型为:

$$\begin{cases} \delta_u(u, v) = u(k_1 r^2 + k_2 r^4) + (2p_1 uv + p_2(r^2 + 2u^2)) \\ \delta_v(u, v) = v(k_1 r^2 + k_2 r^4) + (2p_2 uv + p_1(r^2 + 2v^2)) \end{cases}$$

式中:  $r = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2}$ ;  $k_1, k_2, p_1, p_2$  为工业相机的已标定的畸变模型参数。

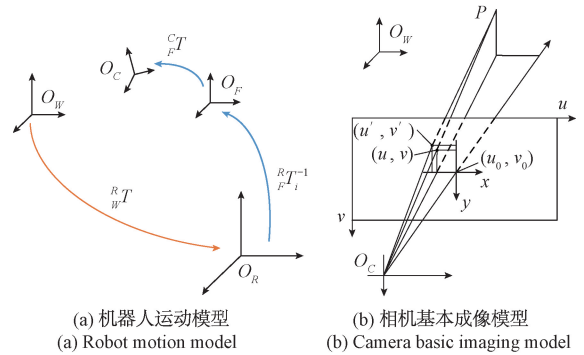


图3 机器人运动成像模型

Fig. 3 Robot motion imaging model

式(3)中  ${}^R_W T$  即为待求解的工件坐标系  $O_W$  相对于机器人基坐标系  $O_R$  的变换矩阵。根据矢量方程式(3),消除系数  $\lambda_i$  以后,每个定位点的已知三维坐标  ${}^W P_i$  及其相应的图像坐标  $(u_i, v_i)$  可以提供关于变换  ${}^R_W T$  的两个有效约束方程,  $n$  个定位点的三维坐标与其成像位置坐标的对应关系  ${}^W P_i \leftrightarrow (u_i, v_i), i = 1, 2, \dots, n$  将会形成  $2n$  个有效约束方程。而  ${}^R_W T$  形式上中有 12 个未知数,因此当  $n \geq 6$  时,理论上即可根据式(3)所表达的约束关系模型求解

出 ${}^R_w T$ 。然而,由于要保证旋转矩阵的单位正交性,式(3)难以直接精确求解。下一小节将提出根据式(3)求解 ${}^R_w T$ 的一种高效稳健方法。

### 1.3 机器人自定位问题的求解

#### 1) 基于线性方法的初值计算

本文首先对式(3)模型中的 ${}^R_w T$ 给出一个快速线性求解算法,得到初步的线性计算结果。在本求解步骤中,暂时忽略相机畸变的影响。

对于已知量 $K \cdot {}^C_F T \cdot {}^R_F T_i^{-1}, i = 1, 2, \dots, n$ , 令:

$$M_{3 \times 4}^i = \begin{bmatrix} m_1^i & m_{14}^i \\ m_2^i & m_{24}^i \\ m_3^i & m_{34}^i \end{bmatrix} = K \cdot {}^C_F T \cdot {}^R_F T_i^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} X_1 m_1^1 - u_1 X_1 m_3^1 & Y_1 m_1^1 - u_1 Y_1 m_3^1 & Z_1 m_1^1 - u_1 Z_1 m_3^1 & m_1^1 - u_1 m_3^1 \\ X_1 m_2^1 - v_1 X_1 m_3^1 & Y_1 m_2^1 - v_1 Y_1 m_3^1 & Z_1 m_2^1 - v_1 Z_1 m_3^1 & m_2^1 - v_1 m_3^1 \\ & & \vdots & \\ X_n m_1^n - u_n X_n m_3^n & Y_n m_1^n - u_n Y_n m_3^n & Z_n m_1^n - u_n Z_n m_3^n & m_1^n - u_n m_3^n \\ X_n m_2^n - v_n X_n m_3^n & Y_n m_2^n - v_n Y_n m_3^n & Z_n m_2^n - v_n Z_n m_3^n & m_2^n - v_n m_3^n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 m_{34}^1 - m_{14}^1 \\ v_1 m_{34}^1 - m_{24}^1 \\ \vdots \\ u_n m_{34}^n - m_{14}^n \\ v_n m_{34}^n - m_{24}^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

当定位点个数 $n \geq 6$ 时,方程个数大于等于未知量个数12。因此,用最小二乘法可快速求解线性方程组式(5),得到待求解的工件坐标系 $O_w$ 相对于机器人基坐标系 $O_R$ 的变换关系 ${}^R_w T$ 中的旋转矩阵和平移向量的线性求解结果为: ${}^R_w R = [r_1 \ r_2 \ r_3]$ ,  ${}^R_w t = t$ 。

#### 2) 旋转矩阵的单位正交化

由于上一部分线性求解方法在计算旋转平移矩阵时,并没有考虑旋转矩阵内部各向量的单位正交性约束关系,因此初步求解出的定位变换矩阵往往误差较大。为此,本文进一步求解使得 $({}^R_w R' - {}^R_w R)$ 的Frobenius范数最小的单位正交矩阵

$${}^R_w R' = [r_1' \ r_2' \ r_3']$$

即求解目标函数:

$$\min_{{}^R_w R'} \| {}^R_w R' - {}^R_w R \|_F^2 \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 m_3^1 - m_1^1 \\ v_1 m_3^1 - m_2^1 \\ \vdots \\ u_n m_3^n - m_1^n \\ v_n m_3^n - m_2^n \end{bmatrix} [t'] = \begin{bmatrix} m_1^1 r_1' X_1 + m_1^1 r_2' Y_1 + m_1^1 r_3' Z_1 + m_{14}^1 - u_1 (m_3^1 r_1' X_1 + m_3^1 r_2' Y_1 + m_3^1 r_3' Z_1 + m_{34}^1) \\ m_2^1 r_1' X_1 + m_2^1 r_2' Y_1 + m_2^1 r_3' Z_1 + m_{24}^1 - v_1 (m_3^1 r_1' X_1 + m_3^1 r_2' Y_1 + m_3^1 r_3' Z_1 + m_{34}^1) \\ \vdots \\ m_1^n r_1' X_n + m_1^n r_2' Y_n + m_1^n r_3' Z_n + m_{14}^n - u_n (m_3^n r_1' X_n + m_3^n r_2' Y_n + m_3^n r_3' Z_n + m_{34}^n) \\ m_2^n r_1' X_n + m_2^n r_2' Y_n + m_2^n r_3' Z_n + m_{24}^n - v_n (m_3^n r_1' X_n + m_3^n r_2' Y_n + m_3^n r_3' Z_n + m_{34}^n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

同样用最小二乘法求解式(7),得到修正的平移向量:

$${}^R_w t' = t'$$

式中: $m_1^i, m_2^i, m_3^i$ 均为三维行向量; $m_{14}^i, m_{24}^i, m_{34}^i$ 为标量值,则:

$${}^R_w T = \begin{bmatrix} {}^R_w R & {}^R_w t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则根据式(3)可得:

$$\lambda_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1^i r_1 & m_1^i r_2 & m_1^i r_3 & m_1^i t + m_{14}^i \\ m_2^i r_1 & m_2^i r_2 & m_2^i r_3 & m_2^i t + m_{24}^i \\ m_3^i r_1 & m_3^i r_2 & m_3^i r_3 & m_3^i t + m_{34}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式(4),消去 $\lambda_i$ 形成线性方程组式(5)。

其中 ${}^R_w R'$ 满足 ${}^R_w R'^T \cdot {}^R_w R' = I$ 。由于:

$$\| {}^R_w R' - {}^R_w R \|_F^2 = \text{trace}(({}^R_w R' - {}^R_w R)^T ({}^R_w R' - {}^R_w R)) = 3 + \text{trace}({}^R_w R'^T {}^R_w R) - 2\text{trace}({}^R_w R'^T {}^R_w R)$$

上述问题可等价于求矩阵 $({}^R_w R'^T {}^R_w R)$ 迹最大的问题。利用SVD方法分解 ${}^R_w R$ 为 $USV^T$ ,其中 $S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 。定义一个正交矩阵 $Z, Z = V^T {}^R_w R'^T U$ ,可得:

$$\text{trace}({}^R_w R'^T {}^R_w R) = \text{trace}({}^R_w R'^T USV^T) = \text{trace}(V^T {}^R_w R'^T US) = \text{trace}(ZS) = \sum_{i=1}^3 z_{ii} \sigma_i \leq \sum_{i=1}^3 \sigma_i$$

所以,当 ${}^R_w R' = UV^T$ 时, $Z = I$ ,即得到满足上述的迹最大化问题的解。

#### 3) 平移向量的初值修正

利用上一步求解出来的满足单位正交性约束的旋转矩阵 ${}^R_w R'$ ,重新建立线性方程组式(7)。

#### 4) 定位变换矩阵的非线性迭代优化

以 ${}^R_w R'$ 和 ${}^R_w t'$ 为待求解的变换关系 ${}^R_w T$ 中的旋转矩阵和平移向量的初值,同时考虑工业相机非线性畸变的影响,通过非线性优化方法求解式(8),优化得到 ${}^R_w T$ 的最终结果。

$${}^R_w T = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \times \left\| \begin{bmatrix} u(M^i, k_1, k_2, p_1, p_2, {}^R_w T, P_i) \\ v(M^i, k_1, k_2, p_1, p_2, {}^R_w T, P_i) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (8)$$

式中:  $[u(M^i, k_1, k_2, p_1, p_2, {}^R_w T, P_i) \quad v(M^i, k_1, k_2, p_1, p_2, {}^R_w T, P_i)]^T$  为定位点使用非线性成像模型计算出来的第  $i(i=1, 2, \dots, n)$  个定位点的图像坐标。

#### 1.4 基于误差评估的稳健性保证

前文给出了机器人自定位方法的基本原理和最小可解条件, 即对  $n \geq 6$  个定位点依次各拍摄 1 幅图像即可实现对 12 个未知定位参数的求解。然而, 由于从采集的图像中提取圆孔中心会出现误差, 机器人自身运动也存在误差, 因此, 在最小可解条件下获得的定位结果容易受这些因素中的随机误差影响。为了提高方法的定位精度和稳健性, 实际应用中可以对每个定位点拍摄多张图像, 通过更多图像参与求解, 从而利用冗余提高模型求解的稳健性。具体而言是, 对于每个定位点, 保持机器人基坐标系和工件坐标系不变, 改变法兰盘末端位姿对该定位点拍摄多幅图像, 每幅图像中均只成像当前的一个点。设第  $i$  个定位点拍摄了  $k_i$  幅图像, 则  $n$  个定位点共拍摄  $N = \sum_{i=1}^n k_i$  幅图像。因此, 方程组(5)中将有  $2N$  个方程。更多的约束方程有助于更好地抑制随机误差的影响。本文通过以下方法进一步地对拍摄的每幅定位点图像进行质量评价, 并自动剔除误差较大的图像, 以提高最后优化结果的自定位精度和可靠性。

由式(3)可知, 多次改变姿态拍摄同一个定位点, 对应的  ${}^R_w T \cdot {}^w \tilde{P}$  为定值, 记为  ${}^R \tilde{P}$ 。因此, 对于第  $i$  个定位点拍摄的每幅图像, 本文利用式(9) 评估其可靠性。

$$e_j^i = \overline{{}^R \tilde{P}_i} - [{}^R \tilde{P}_i]_j \quad (9)$$

其中

$$[{}^R \tilde{P}_i]_j = [{}^R T_i]_j \cdot {}^c_f T^{-1} \cdot (K^T \cdot K)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix}_j$$

式中:  $[{}^R \tilde{P}_i]_j$  表示第  $i$  个定位点的第  $j(j=1, 2, \dots, k_i)$  幅图像所对应的  ${}^R \tilde{P}$  的值;  ${}^R \tilde{P}_i$  表示根据第  $i(i=1, 2, \dots, n)$  个定位点的所有图像计算的  ${}^R \tilde{P}$  的均值。

$$\overline{{}^R \tilde{P}_i} = \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^{k_i} \left\| [{}^R T_i]_j \cdot {}^c_f T^{-1} \cdot (K^T \cdot K)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix}_j \right\|$$

根据这一可靠性评估度量, 计算每一张图像的  $e_j^i$ , 对  $e_j^i$  的模长进行从小到大排序, 利用离群点剔除算法, 对排

序的结果设置阈值为 0.8, 表示对排序的结果取前 80% 的图像, 然后将选取图像输入到式(8) 优化模型再次进行变换矩阵的优化求解。本文方法的总流程如图 4 所示。

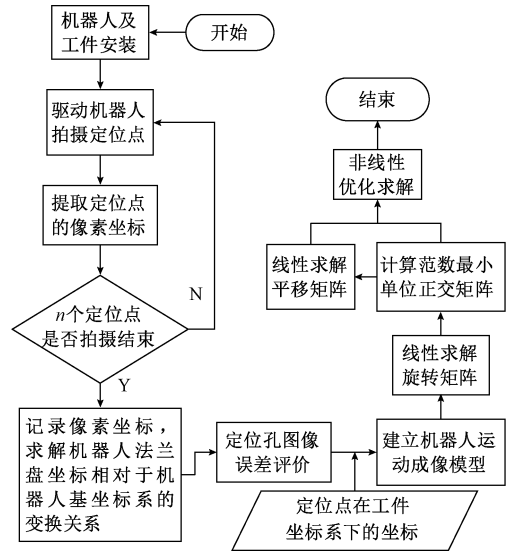


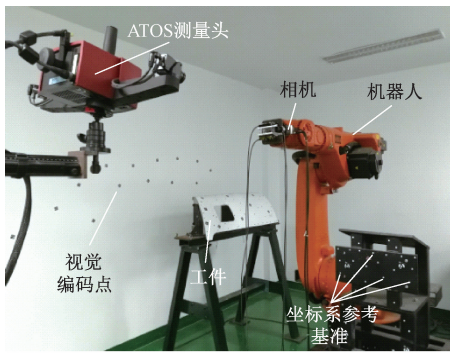
图4 机器人自定位流程

Fig. 4 Flow chart of robot self-positioning

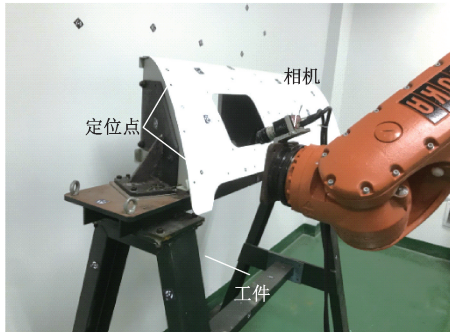
## 2 实验验证

本文对上述自动钻铆机器人自定位方法进行了验证实验, 实验使用的是德国 KUKA 公司生产的 KR30-3 型六自由度工业机器人; 实验对象为中航工业哈尔滨工业集团有限责任公司提供的飞机蒙皮自动钻铆实验工件, 实验采用德国 AVT 公司生产的 GC2 450 M 型相机、施耐德公司生产的 KREUZNACH APO-XENOPLAN 1.4/23-0903 型号镜头, 图像分辨率为  $2\,448 \times 2\,050$ , 有效视场  $77\text{ mm} \times 59\text{ mm}$ 。

在实际工程应用中, 定位点一般可以是工件及其工装上散布的定位孔中心, 其三维坐标在设计阶段设定, 并通过加工过程保证定位孔中心的位置。本实验中, 预先在试验件上布置了若干个视觉目标点, 并以其其中 6 个黑白同心的圆形视觉目标的圆心作为本实验中工件上的定位点。为了进行实验结果的验证, 事先采用德国 GOM 公司的 TRITOP 摄影测量系统和 ATOS 三维点云扫描测量系统对机器人基坐标系  $O_R$ 、法兰盘中心点、工件上的定位点的三维坐标等进行了测量。所有程序采用 C++ 语言在 VS2013 上编写。实验场景如图 5 所示, 表 1 所示为测得的定位点在工件坐标系下坐标。



(a) 预先测量场景  
(a) Pre measurement scenario



(b) 机器人驱动相机拍摄定位点  
(b) Robot drives the camera to shoot locating points

图 5 实验场景

Fig. 5 Experiment scene

表 1 定位点在工件坐标系下坐标

Table 1 Locating point coordinates in workpiece coordinate system

定位点编号	工件坐标系下坐标		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	376.748	-1 453.768	432.573
2	668.369	-1 432.380	485.868
3	347.762	-1 452.732	979.239
4	679.321	-1 421.106	932.490
5	349.300	-1 456.201	1 395.856
6	693.631	-1 429.199	1 404.292

2.1 相机标定和手眼关系的标定实验

本实验中采用张氏平面标定法<sup>[18]</sup>进行相机标定, 标定出的相机内参数矩阵为:

$$K = \begin{bmatrix} 7\ 060.384 & 0 & 1\ 203.062 & 0 \\ 0 & 7\ 058.370 & 1\ 071.345 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

畸变系数为:  $k_1 = -0.374$ ,  $k_2 = 0.218$ ,  $p_1 = -0.001\ 45$ ,  $p_2 = 0.001\ 29$ 。

实验中采用文献[19-20]中的方法进行手-眼关系标

定。概括而言, 利用一块高精度专用标定板安装在机器人法兰盘上, 测得标定板上用于标定的定位孔在机器人法兰盘坐标系下三维坐标, 如表 2 所示。然后利用工业相机拍摄定位孔并提取定位孔孔心图像坐标, 如图 6 所示。利用定位孔在机器人法兰盘坐标系下三维坐标值和图像坐标系下的像素值之间的对应关系求解手眼关系, 因为相机参数已经求得, 本方法中只需要 1 幅图像就可以对手眼关系进行标定。

表 2 九孔阵列在法兰坐标系下的坐标

Table 2 The coordinates of the 9-hole array under flange coordinate system

编号	$O_F$ 坐标系下坐标值 <sup>F</sup> $P_i$		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
孔 1	11.311	-14.132	202.554
孔 2	16.175	-9.970	202.400
孔 3	6.651	-9.969	202.405
孔 4	22.245	-5.526	202.545
孔 5	12.721	-4.565	202.549
孔 6	2.419	-3.603	202.554
孔 7	17.790	-0.121	202.694
孔 8	7.827	0.841	202.699
孔 9	13.336	5.284	202.844

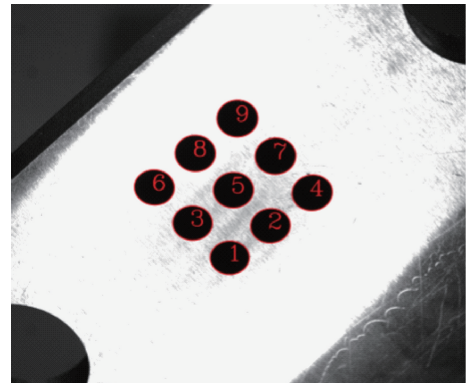


图 6 手眼关系标定图像

Fig. 6 Hand-eye relationship calibration image

为了验证手-眼标定结果是否准确, 每次选取九孔阵列中 8 个孔的中心点坐标进行手-眼关系求解, 然后利用求解出的手-眼关系计算出剩下的一个孔对应的图像坐标, 并计算其与图像中实际提取的坐标之间的距离误差  $e_d = \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}$ , 其单位为像素, 以验证手-眼关系标定的精度。9 次手-眼关系标定实验的验证结果如表 3 所示。其中孔的编号表示该孔为当次手-眼关系标定实验中的验证孔。在本实验中, 经过相机标定, 1 像素代表标

表3 手眼关系精度验证

Table 3 Accuracy verification of hand-eye relationship

编号	孔1	孔2	孔3	孔4	孔5	孔6	孔7	孔8	孔9
$e_d$	0.100	0.109	0.104	0.108	0.117	0.106	0.117	0.125	0.125

定板上约 0.03 mm 的物理距离,因此表 3 中距离误差  $e_d$  对应的实际物理偏差在 0.003 ~ 0.003 75 mm 之间,表明标定出的手-眼关系精确可靠。

除了本实验中所用的方法,其他有效的手-眼标定方法<sup>[21-24]</sup>也可以应用,不影响本文机器人自定位方法整体模型的建立和求解。

## 2.2 机器人自定位变换矩阵求解实验

根据本文提出的方法,实验中通过机器人交互示教功能控制机器人末端移动,使机器人末端所载工业相机依次到达工件上 6 个视觉定位点上方对相应定位点单独成像,并记录该位置下机器人法兰盘坐标系  $O_F$  原点相对机器人基坐标系  $O_R$  原点之间的平移向量 ${}^R_F T_i$ 以及机器人法兰盘的欧拉角  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = 1, 2, \dots, 6$ 。本实验中的 6 次机器人运动参数具体记录结果如表 4 所示。从表 4 中的平移向量可见,机器人手臂在分别拍摄定位点 1 和定位点 6 时, $x$  方向位移接近 1 m。

表4 机器人智能板读数

Table 4 Readings of robot smartPAD

编号	欧拉角/(°)			${}^R_F T_i$ /mm		
	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\gamma_i$	$x$	$y$	$z$
1	-2.21	-1.85	87.64	1 059.33	-1 170.31	1 173.08
2	-8.81	-8.57	110.90	1 012.76	-1 349.55	1 452.22
3	-3.12	-6.81	89.25	533.75	-1 143.72	1 150.89
4	-4.81	-6.87	99.47	581.64	-1 320.48	1 432.41
5	1.09	0.23	88.05	134.45	-1 133.24	1 143.89
6	2.95	-5.64	114.04	102.64	1 338.22	1 495.01

利用拍摄第  $i$  个定位点时机器人法兰盘欧拉角读数以及法兰盘平移向量得到拍摄第  $i$  个定位点时机器人法兰盘坐标系  $O_F$  相对于机器人基坐标系  $O_R$  的变换矩阵 ${}^R_F T_i, i = 1, 2, \dots, 6$ 。

如图 7 所示,以示教的形式驱动机器人携带工业相机依次拍摄各定位点,得到图 8 所示的 6 幅图像,形成一组数据。从图 8 中标识的各定位点在各自图像中的坐标  $(u_i, v_i)$  可见,这些图像坐标离散分布于工业相机图像平面的不同位置。

根据已知相机内参、手眼关系、定位点的像素坐标、定位点在工件坐标系的三维坐标以及机器人示教器读数,最后由所建立的式(3)约束模型及第 1.3 节中提出的

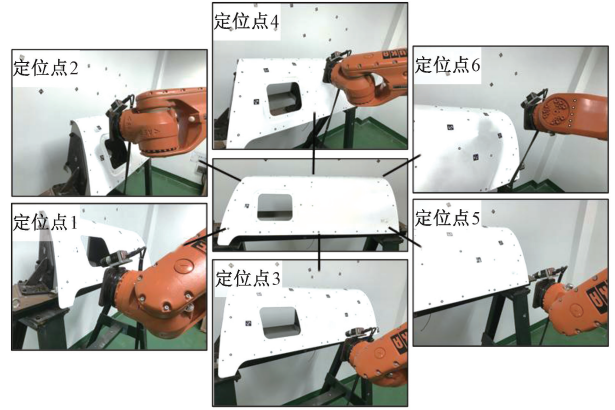


图7 机器人携带工业相机拍摄定位点实验现场

Fig. 7 Robot carries industrial camera to shoot the experiment field of locating points

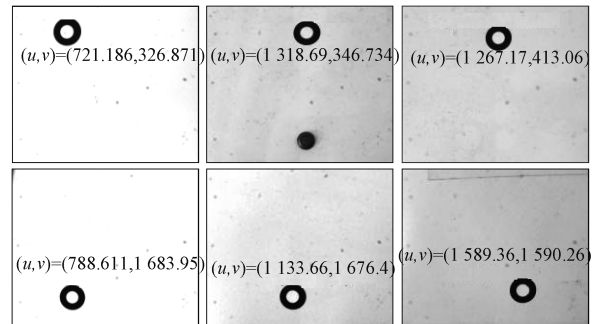


图8 各定位点图像及其图像坐标

Fig. 8 Schematic diagram of image of the locating points and their image coordinates

求解方法,解出本实验中工件坐标系  $O_W$  相对于机器人基坐标系  $O_R$  的变换关系。

$${}^R_W T = \begin{bmatrix} -0.0207 & 0.0194 & -0.999 & 1541.780 \\ -0.636 & 0.772 & 0.0289 & -35.170 \\ 0.771 & 0.636 & -0.00359 & 1773.400 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

为了对本文方法完成的机器人自定位结果进行精度评价,采用 TRITOP 商用摄影测量系统对机器人基坐标系与工件坐标系之间的变换关系进行了测量,得到的结果记为 ${}^R_W \bar{T}$ , 具体为:

$${}^R_w \bar{T} = \begin{bmatrix} {}^R_w R - & {}^R_w \bar{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} -0.0208 & 0.0219 & -0.999 & 1543.204 \\ -0.635 & 0.772 & 0.0296 & -35.452 \\ 0.772 & 0.635 & -0.00156 & 1772.324 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

基于图 8 所示的 6 幅图像获得的结果  ${}^R_w \bar{T}$  与 TRITOP 测量系统的定位结果  ${}^R_w \bar{T}$  比较, 对应的旋转矩阵之差的 Frobenius 范数、对应的平移向量之差的 Frobenius 范数分别为

$$\| {}^R_w \bar{R} - {}^R_w R \|_F = 0.00385, \| {}^R_w \bar{t} - {}^R_w t \|_F = 1.804$$

用  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  表示平移向量在  $x, y$  和  $z$  方向的偏差, 其中  $\Delta x = -1.424 \text{ mm}, \Delta y = -0.281 \text{ mm}, \Delta z = 1.071 \text{ mm}$ 。可以看出此时旋转矩阵的偏差很小, 但是最低可解条件下解出的平移向量较商用测量系统结果偏差相对较大。

对上述 6 个定位点分别再进行 3 次拍摄, 得到了第 2~4 组图像, 根据每组中的 6 幅图像又分别进行了 3 次实验, 结果如表 5 中第 2, 3, 4 次实验所示, 可见利用每组中的 6 幅图像计算得到的结果和第一次实验相比结果类似。为了验证 1.4 节中提出的方法, 进一步考察增加图像个数对精度的影响, 第 5, 6, 7 次实验分别为前 2 组图像、前 3 组图像和全部 4 组图像参与计算的结果, 第 5 次实验相比前面 1~4 次利用单组图像实验求得的定位结果误差明显减小, 第 6, 第 7 次实验随着优化的图像数量增多, 误差呈进一步减小的趋势, 但是减小的幅度呈递减趋势。计算每一张图像的  $e_i$  如图 9 所示。进一步根据 1.4 节的方法剔除 4 组数据中可靠性度量值不高的定位点图像, 获得第 8 次实验结果, 即本文完整方法的实验结果, 可见最终结果的平移向量之差的 Frobenius 范数明显减小, 其中平移向量在  $x, y$  和  $z$  方向的偏差的绝对值都小于 0.5 mm。本文提出的机器人自定位方法整个求解过程用时约 10 s。

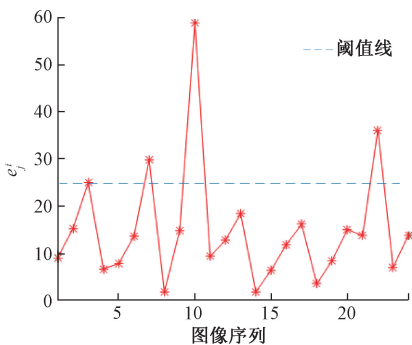


图 9 图像的可靠性评估度量

Fig. 9 Image reliability evaluation metrics

表 5 自定位结果偏差

Table 5 Self-positioning result deviation

实验	$\  {}^R_w \bar{R} - {}^R_w R \ _F$	$\  {}^R_w \bar{t} - {}^R_w t \ _F$	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$
1	0.00384	1.804	-1.424	0.282	1.071
2	0.00381	1.768	-1.405	0.273	1.038
3	0.00373	1.800	-0.694	-0.532	1.573
4	0.00372	1.766	-0.689	-0.537	1.535
5	0.00363	1.535	-1.207	0.160	0.934
6	0.00351	1.483	-1.326	0.389	0.539
7	0.00348	1.379	-0.728	-0.389	1.105
8	0.00287	0.629	-0.429	-0.406	0.215

### 3 结 论

本文面向飞机装配机器人自动钻铆系统, 提出了一种利用钻铆机器人末端执行器上携带的单个工业相机进行机器人自定位的方法。该方法直接利用工业机器人上自带的单个工业相机, 通过示教方式使机器人带动工业相机依次分别对 6 个以上的定位点单独进行成像, 进而建立了一个以机器人基坐标系与工件坐标系之间的变换矩阵为参数的机器人自定位约束关系模型, 提出并实现了一套线性化初值求解、旋转矩阵单位正交化、非线性迭代优化以及图像可靠性评价相结合的自定位参数快速稳健求解方法。对提出的方法进行了实验验证, 获得的机器人自定位结果与采用商用测量系统的定位结果比较偏差较小, 验证了方法的有效性。

本文提出的机器人现场自定位方法, 无需额外的测量设备和繁琐的测量过程, 可以使机器人现场定位更加简便、快捷、易行。每次拍摄只需对一个定位点(定位孔中心)进行成像, 对相机视场大小没有严格的限制, 同时又可以充分利用大尺寸零部件上分布范围较大的若干定位点进行机器人自定位, 保证定位结果的可靠性。对于机器人整体需要平移运动的大型钻铆系统, 只要在示教拍摄各定位点时机器人的整体运动参数可以读出, 本文方法经简单扩展即可适用。

本文所述方法虽然是飞机装配自动钻铆为主要应用背景, 但基于示教方式对多个定位点依次单独成像所建立的机器人自定位约束模型和求解方法, 可以广泛应用于解决各类“手-眼”机器人系统的自定位问题。

### 参考文献

[1] 曲巍崑, 董辉跃, 柯映林. 机器人辅助飞机装配制孔中心姿精度补偿技术[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1951-1960.

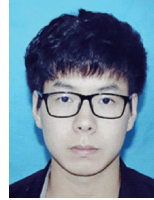


- compensation technology in robot-aided aircraft assembly drilling process [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(10):1951-1960.
- [2] 史晓佳, 张福民, 曲兴华, 等. KUKA 工业机器人位姿测量与在线误差补偿[J]. *机械工程学报*, 2017, 3(8):1-7.
- SHI X J, ZHANG F M, QU X H, et al, KUKA industrial robot posture measurement and on-line error compensation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 3(8):1-7.
- [3] 周炜. 飞机自动化装配工业机器人精度补偿方法与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHOU W. Compensation method of industrial robot accuracy and experimental research for aircraft automated assembly [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [4] 蔡锦达, 李军华, 张剑皓, 等. 六轴工业机器人在线误差补偿方法的研究[J]. *控制工程*, 2014(5):638-642.
- CAI J D, LI J H, ZHANG J H, et al, Research on on-line error compensation method of six axis industrial robot[J]. *Control Engineering*, 2014(5):638-642.
- [5] 毕德学, 王欣亮, 刘志芳, 等. 机器人工具和相机位姿标定的新方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(1):101-108.
- BI D X, WANG X L, LIU ZH F, et al. New method for robot tool and camera pose calibration [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(1):101-108.
- [6] 陆艺, 于丽梅, 郭斌. 基于封闭尺寸链的工业机器人结构参数标定[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(2):38-46.
- LU Y, YU L M, GUO B. Calibration of industrial robot structure parameters based on closed dimensional chain [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(2):38-46.
- [7] TIAN W, ZENG Y F, YUAN F, et al. Calibration of robotic drilling systems with a moving rail [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(6):1598-1604.
- [8] 王龙飞, 李旭, 张丽艳, 等. 工业机器人定位误差规律分析及基于 ELM 算法的精度补偿研究[J]. *机器人*, 2018, 40(6):843-851.
- WANG L F, LI X, ZHANG L Y, et al. Analysis of positioning error of industrial robot and accuracy compensation based on ELM algorithm [J]. *Robot*, 2018, 40(6):843-851.
- [9] 温秀兰, 康传帅, 宋爱国, 等. 基于全位姿测量优化的机器人精度研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7):81-89.
- WENG X L, KANG CH SH, SONG AI G, et al. Study on robot accuracy based on full pose measurement and optimization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7):81-89.
- [10] 王龙飞, 张丽艳, 叶南. 一种适用于曲面结构的机器人制孔误差在线补偿技术[J]. *航空学报*, 2019, 40(10):292-306.
- WANG L F, ZHANG L Y, YE N. An on-line compensation technology for robotic drilling error suitable for curved structure [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(10):292-306.
- [11] 曾远帆, 田威, 廖文和. 面向飞机自动钻铆系统的工业机器人精度补偿技术[J]. *航空制造技术*, 2016, 513(18):46-52.
- ZENG Y F, TIAN W, LIAO W H. Precision compensation technology of industrial robot for aircraft automatic drilling and riveting system [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 513(18):46-52.
- [12] WOLFE W J, MATHIS D. The perspective view of three points [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 1(1):66-73.
- [13] LEPETIE V, MORENO-NOGURE F, FUA P. EPnP: An accurate  $O(n)$  solution to the PnP problem [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(2):155-166.
- [14] HESCH J A, ROUMELIOTIS S I. A direct least-squares (DLS) method for PnP [C]. 2011 International Conference on Computer Vision, IEEE, 2011: 383-390.
- [15] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- XIONG Y L. *Fundamentals of robot techniques* [M]. Beijing: China Machine Press, 1996.
- [16] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- ZHANG G J. *Machine vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [17] 马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- MA S D, ZHANG ZH Y. *Computer vision: Computational theory and algorithm basis* [M]. Beijing: Science Press, 1998.

- [18] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [19] TSAI R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [20] ZHU W D, MEI B, YAN G R, et al. Development of a monocular vision system for robotic drilling[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2014, 15(8):593-606.
- [21] ZHAO Z J, WENG Y. A flexible method combining camera calibration and hand-eye calibration [J]. *Robotica*, 2013,31(5):747-756.
- [22] NICOLAS A, RADU H, BERNARD E. Robot hand-eye calibration using structure from motion [J]. *The International Journal of Robotics Research*, SAGE Publications, 2001, 20 (3):228-248.
- [23] ZHAN Q, WANG X. Hand-Eye calibration and positioning for a robot drilling system [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61(5-8):691-701.
- [24] 罗坚铭, 陈新度, 吴磊. 移动机器人高精度上下料的研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(11): 192-198.

LUO J M, CHEN X D, WU L. Research on high precision loading and unloading of mobile robot [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2018, 32(11):192-198.

### 作者简介



韦溟, 2018 年于安徽农业大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉。

E-mail: 1185121220@qq.com

**Wei Ming** received his B. Sc. degree from Anhui Agricultural University in 2018. Now, he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests includes computer vision.



张丽艳(通信作者), 2001 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为三维视觉检测、智能制造、逆向工程。

E-mail: zhangly@nuaa.edu.cn

**Zhang Liyan** (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2001. She is now a professor and Ph. D. supervisor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interests include 3D vision inspection, intelligent manufacturing, and reverse engineering.