

文章编号 1004-924X(2018)09-2139-11

基于双目立体视觉的工业机器人在线温度补偿

郝继贵, 张楠楠, 任永杰*, 尹仕斌, 郭寅, 郭思阳
(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: 工业机器人在工业现场进行连续高速作业过程中, 电机发热和关节摩擦生热将导致机械臂本体温度升高, 引起机器人末端定位漂移, 严重影响机器人的重复定位精度和作业精度。针对制造现场的工业机器人, 提出了一种基于双目立体视觉的温度误差在线补偿方法, 并基于微分运动学和双目视觉原理构建了温度误差补偿模型。在机器人末端安装基准球, 同时在基座附近固定视觉测量传感器, 机器人完成作业循环之后, 以不同的姿态带动基准球至传感器视场内进行补偿测量。此外, 通过分析各关节参数随时间变化的规律, 筛选出符合温度漂移规律的显著性参数进行补偿, 有效降低了补偿测量次数和耗时。实验结果显示, 补偿后机器人的重复定位精度可维持在 ± 0.1 mm 的水平, 能够显著改善制造现场工业机器人的作业精度, 且整个补偿测量过程耗时 10 s 左右。

关键词: 立体视觉; 工业机器人; 连杆参数; 温度误差; 在线补偿; 视觉传感器

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182609.2139

In-line thermal compensation of industrial robots based on binocular stereo vision

ZHU Ji-gui, ZHANG Nan-nan, REN Yong-jie*, YIN Shi-bin, GUO Yin, GUO Si-yang

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

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

Abstract: When an industrial robot is operational continuously at a high speed, the heating of the motor and joint friction heat will result in a higher temperature in the manipulator; furthermore, the position of the end flange will drift and significantly influence the robot's repeatability and accuracy. To deal with these problems, in this paper, an in-line thermal compensation method based on binocular stereo vision was presented for an industrial robot working in the manufacturing field. A thermal compensation model was established based on the principles of differential kinematics and vision measurement method. In this method, a standard sphere was installed at the end of the robot arm and a vision sensor was installed around the base of the robot. After working in a regular circulation, the robot carried the standard sphere to the working field of the vision sensor to be measured from different postures. Besides, significant parameters were chosen to compensate for the thermal error from all joint parameters after analyzing their time-varying patterns. With fewer parameters that correspond to the thermo-drifting pattern, the measuring times and time consumption

收稿日期: 2018-01-09; 修订日期: 2018-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51475329, 51225505)

could be effectively reduced. The experimental result demonstrates that the proposed in-line thermal error compensation method can maintain the repeatability of the robot within ± 0.1 mm and the compensation time is approximately 10 s, which can noticeably improve the operating precision of the industrial robot at the manufacturing site.

Key words: stereo vision; industrial robot; link parameter; thermal error; in-line compensation; vision sensor

1 引言

以工业机器人为代表的多关节柔性运动平台具有高度的灵活性,可以高效率实现非常复杂的空间姿态和定位,同时在可编程、可通信的高性能控制器的支持下,能够迅速调整运动轨迹和设备状态,实现产品变更后的高效生产。以工业机器人为基础,构建柔性制造单元或柔性生产线,实现产品快速化、柔性化、自动化生产是现代制造发展的重点。

工业机器人作为自动化设备,通常工作在恶劣、多变的环境下,加之在机器人高速运行过程中,各关节电机发热、转动关节相互摩擦将导致机械臂温度升高,工业机器人长期处于发热-稳定-冷却的热循环中。机械臂的温度变化将引起机器人杆件和关节膨胀变形,使机器人连杆参数发生改变,进而引起明显的末端位置漂移,运动轨迹的长期稳定性很难保证。以臂展为 3 100 mm 的工业机器人为例,在 3 h 连续高速运动后,其末端 TCP(Tool Center Point)的位置漂移可达到 0.5 mm,已无法满足如精密制孔、打磨、切削等高精度应用场合的需求。因此,机器人实时温度补偿是维持生产工艺稳定、保证产品质量必须面对的问题。

为提高机器人的运动精度,国内外对机器人的运动学参数标定做了大量研究^[1-3],主要包括用于误差标定的机器人运动学模型研究,如 DH(Denavit-Hartenberg)模型^[4]和 MDH 模型^[5];以及对模型参数误差辨识方法研究,如最小二乘法、L-M(Levenberg-Marquardt)算法和奇异值分解法(Singular Value Decomposition, SVD)^[6]等。标定后机器人定位精度显著提升,甚至可接近其重复定位精度水平^[7]。不过,针对机器人温度误差补偿的研究仍然较少。Chunhe Gong 等^[8]重点研究了机器人标定中的非几何参数误差,尤其

是机器人的柔性误差和温度误差,基于不同温度场获取经验误差,根据主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)和正交回归法建立了温度误差预测模型;但这种方法过于复杂,模型参数建立时间长,对样本的数量和性质都有较高的要求,否则模型的可靠性和鲁棒性很难保证。王一等^[9]以 DH 运动学模型为基础,利用测量机器人末端安装的视觉传感器和在机器人附近设置的基准靶标,建立了测量机器人温度误差自标定系统,但这种方法只适用于携带了视觉传感器的测量机器人,无法应用于通用工业机器人。李睿等^[10]利用有限元分析建立机器人热传导模型,根据温度改变后主要的误差方向和有限元分析手段判断对误差起主要作用的参数;但该方法根据轴动温度误差实验推测机器人运动学模型的显著变化参数,其合理性有待考察。

本文针对工业机器人连续高速作业产生的温度效应进行研究,建立了面向通用工业机器人的温度误差补偿方法。通过在机器人附近设置固定的校准视觉传感器来测量安装在机器人末端的基准球球心,建立了工业机器人在线温度误差补偿数学模型,以 MDH 运动学模型为基础,结合微分运动学,对待辨识关节参数进行求解。校准视觉测量系统采用双目条纹投影测量系统,扩大测量范围的同时可提高特征点的测量精度。研究了机器人关节参数随测量时间的变化趋势,选取对末端法兰位置影响显著的关节参数进行温度补偿,从而提高通用机器人的在线温度补偿效率。

2 温度误差补偿模型

2.1 温度误差补偿原理

为建立一种面向通用工业机器人的温度误差补偿模型,构建了如图 1 所示的校准系统。该系统由工业机器人、机器人末端工具、机器人末端基准球和校准视觉测量系统 4 部分组成。

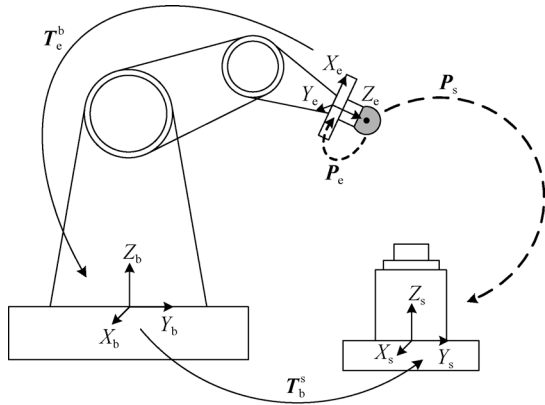


图 1 温度误差补偿模型

Fig. 1 Thermal error compensation model

系统坐标系包含机器人末端法兰坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 、机器人基坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 和校准传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 。 $P_e \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为某一个特征点在机器人末端法兰坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 下的三维坐标向量, $P_s \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为该特征点在校准传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 下的三维坐标向量, 根据齐次坐标转换关系可得:

$$\begin{bmatrix} P_s \\ 1 \end{bmatrix} = T_b^s \cdot T_e^b \cdot \begin{bmatrix} P_e \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $T_b^s \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 和 $T_e^b \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 分别为校准传感器坐标系到机器人基坐标系和基坐标系到末端法兰坐标系的齐次转换矩阵。对于六自由度串联机器人, T_e^b 可表示为:

$$T_e^b = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4 \cdot T_6^5, \quad (2)$$

其中: $T_i^{i-1} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 为关节 $i-1$ 到关节 i 的坐标系转换矩阵。根据 MDH 运动学模型, 相邻关节转换关系 T_i^{i-1} 可以用 $d_i, \theta_i, a_i, \alpha_i, \beta_i$ 五个参数完全表示^[5], 因此六自由度串联机器人共 30 个参数。 d_i, θ_i, a_i 和 α_i 分别为关节距离、关节转角、连杆长度和连杆扭角, β_i 为 X、Z 轴绕 Y 轴的微小转角。

当机器人以一定速度连续工作若干小时后, 关节电机发热以及关节之间相互摩擦会导致机械臂温度升高, 机器人杆件受热膨胀, 从而导致机器人末端法兰位置发生漂移。对于图 1 所示的机器人系统, 校准视觉传感器固定不动, 机器人以某一固定姿态携带末端基准球运动至校准视觉传感器上方进行长时间高速度反复测量, 可以发现基准球球心的测量结果将发生远大于机器人重复测量精度的漂移, 且漂移方向基本固定, 这个测量结果的漂移就是由机器人温度误差引起的。

将基准球球心作为特征点, 它在机器人末端法兰坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 下坐标为 P_e 。工业机器人冷态下(机器人尚未经过长时间高速运动), 根据式(1)可得特征点在传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 下的坐标向量 $P_{scool} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为:

$$\begin{bmatrix} P_{scool} \\ 1 \end{bmatrix} = T_b^s \cdot T_e^b \cdot \begin{bmatrix} P_e \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

工业机器人热态下(机器人连续高速运动后), 机器人本体发热引起关节参数发生变化, 即末端法兰姿态 T_e^b 发生变化。根据文献[11]中运动误差模型的表述, 特征点在校准传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 下的坐标 $P_{swarm} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 可表示为:

$$\begin{bmatrix} P_{swarm} \\ 1 \end{bmatrix} = T_b^s \cdot (T_e^b + dT_e^b) \cdot \begin{bmatrix} P_e \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 $dT_e^b \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 为机器人末端姿态的变化量, 即转换矩阵 T_e^b 的微分变换。式(3)和式(4)相减得到热态与冷态下特征点的测量值偏差:

$$\begin{bmatrix} P_{swarm} - P_{scool} \\ 0 \end{bmatrix} = T_b^s \cdot dT_e^b \cdot \begin{bmatrix} P_{swarm} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

微分运动学是机器人运动学误差建模的基础理论^[12], 根据文献[6,9]得到微分变换 dT_e^b 为:

$$\begin{aligned} dT_e^b = & T_1^0 A_{d1} T_2^1 dd_1 + \dots + T_1^0 A_{\beta 1} T_6^5 d\beta_1 + \dots + \\ & T_i^0 A_{di} T_6^i dd_i + \dots + T_i^0 A_{\beta i} T_6^i d\beta_i + \dots + \\ & T_6^0 A_{d6} dd_6 + \dots + T_6^0 A_{\beta 6} d\beta_6 = \\ & \sum_{i=1}^6 \sum_{q=d}^{\beta} T_i^0 A_{q_i} T_6^i dq_i, \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $A_{q_i} = (T_i^{i-1})^{-1} \cdot \frac{\partial T_i^{i-1}}{\partial q_i}$, dq_i 为机器人 MDH 模型中 30 个参数的变化量。将式(6)代入式(5)中得:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P_{swarm} - P_{scool} \\ 0 \end{bmatrix} = & \sum_{i=1}^6 \sum_{q=d}^{\beta} T_b^s T_i^0 A_{q_i} T_6^i \begin{bmatrix} P_e \\ 1 \end{bmatrix} dq_i = \\ & \sum_{i=1}^6 \sum_{q=d}^{\beta} k_{q_i} dq_i = M \cdot \Delta H, \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $k_{q_i} = T_b^s T_i^0 A_{q_i} T_6^i \begin{bmatrix} P_e \\ 1 \end{bmatrix}$, $k_{q_i} \in \mathbf{R}^{4 \times 1}$, 系数矩阵 $M = [k_{d1} \quad k_{d2} \quad k_{d3} \quad \dots \quad k_{\beta 1} \quad k_{\beta 5} \quad k_{\beta 6}]$, $M \in \mathbf{R}^{4 \times 30}$, 参数变化量向量 $\Delta X = [dd_1 \quad dd_2 \quad dd_3 \quad \dots \quad d\beta_1 \quad d\beta_5 \quad d\beta_6]^T \in \mathbf{R}^{30 \times 1}$ 。由于式(7)等号两边向量最后一个元素均为 0, 因此式(7)仅提供 3 个有效等式。

机器人携带基准球以 m 个不同姿态在校准视觉测量系统下进行测量, 记第 j 个测量姿态的

末端定位误差为 $Y_j = P_{\text{swarm}j} - P_{\text{scool}j}$, 对应系数矩阵为 $M_j = M_{(1,3,\dots)}$, 则 m 个测量姿态组成的方程组为:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_j \\ \vdots \\ Y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_j \\ \vdots \\ M_m \end{bmatrix} \cdot \Delta X = A \cdot \Delta X. \quad (8)$$

利用 SVD 分解法对式(8)中关节参数 ΔX 的部分或全部元素进行求解。为保证求解精度, 方程个数通常为待求参数个数的 2~3 倍。式(8)中系数矩阵 $A \in \mathbf{R}^{3m \times 30}$ 的 SVD 分解式为:

$$A = U \cdot S \cdot V^T, \quad (9)$$

其中: $U \in \mathbf{R}^{3m \times 3m}$ 、 $V \in \mathbf{R}^{30 \times 30}$ 分别为方阵 AA^T 和 $A^T A$ 的单位特征向量构成的矩阵, $S \in \mathbf{R}^{3m \times 30}$ 为 A 的奇异值矩阵, 因此有:

$$\Delta X = V \cdot S^{-1} \cdot U^T \cdot Y. \quad (10)$$

根据式(10)求解关节参数向量 ΔX , 可得到受温度效应影响后机器人关节参数的变化量。与冷态相比, 此时机器人末端法兰坐标系位姿已经发生改变, 需要对轨迹重新规划。文献[13]结合机器人逆运动学原理和迭代数值方法给出了合理的机器人关节角度计算方法, 迭代次数不超过 3 次, 计算快速准确。控制机器人按照重新计算的关节角度运动, 可以精准控制机器人末端法兰坐标系的位姿, 即实现机器人运动轨迹误差补偿。

2.2 特征测量方法

采用视觉传感器测量基准球球心, 为准确测量球心位置, 需要在基准球表面投射结构光。从结构光投射方法和测量方法考虑, 可以采用单目结构光测量系统和双目条纹投影测量系统对基准球球心进行测量。目前, 应用较多的是单目结构光测量系统^[14-16], 此方法结构简单。但单目结构光传感器只能获得结构光平面上的点云, 测量区域较小, 对机器人运动姿态限制较大。由式(8)可知, 机器人温度误差补偿需要机器人从多个不同的姿态将基准球带动至传感器上方进行测量, 以保证参数识别的精度, 单目结构光较小的测量范围必然影响系统最终的补偿精度。为了保证单目结构光测量系统的测量精度, 结构光投射角需要在 $45^\circ \sim 75^\circ$ ^[15], 这进一步限制了机器人末端基准球的测量范围。而双目条纹投影测量系统的投影面广、视场范围大, 对机器人运动姿态限制小。另

外, 单目结构光测量系统是通过拟合结构光平面与基准球相交圆的圆心位置间接求解球心坐标^[15]; 而双目条纹投影测量系统可以利用条纹投影的相位信息辅助双目相机进行同名点匹配, 得到基准球表面大量点云, 通过点云直接拟合球心位置, 球心测量精度比单目结构光测量系统高。

本文搭建的双目视觉测量系统如图 2 所示, 采用两个 IMPERX B3320M 相机并装配两个 ZEISS Distagon T* 2.8/25 定焦镜头, 相机分辨率为 $3\,312 \times 2\,488$ 。投影仪为 TI 公司的 LightCrafter 4500 PRO, 分辨率为 $912 \times 1\,140$ 。双相机系统在工作距 700 mm 处的视场约为 $570 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$ 。机器人测量姿态设定时应保证基准球在该双目条纹投影传感器的标定范围之内, 同时, 不同测量姿态六轴转角在允许范围内都有较大的差异, 以保证标定精度。

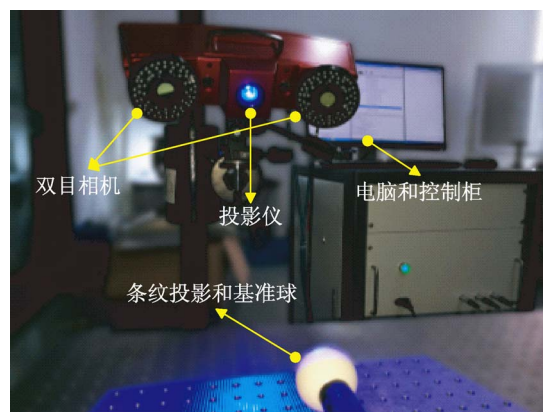


图 2 双目视觉测量系统

Fig. 2 Components of binocular vision measuring system

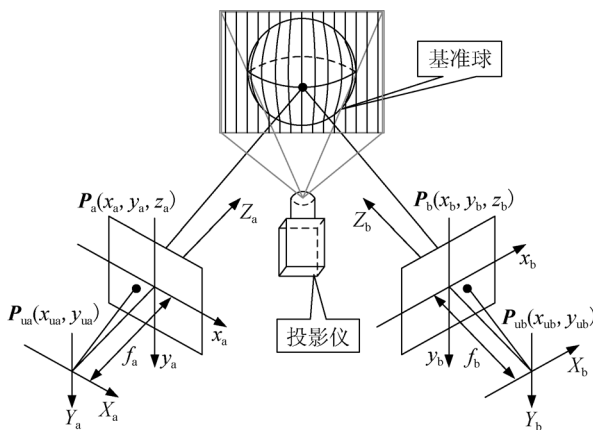


图 3 双目视觉测量原理

Fig. 3 Principle of binocular vision measurement

双目视觉测量系统原理如图 3 所示。左相机坐标系 $O_L X_L Y_L Z_L$ 与校准视觉传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 重合,球面上一点 P 在坐标系 $O_L X_L Y_L Z_L$ 中的坐标为 $\mathbf{P}_L(x_L, y_L, z_L)$,在左像平面坐标系 $o_L x_L y_L$ 中的坐标为 $\mathbf{P}_{uL}(x_{uL}, y_{uL})$;点 P 在右相机坐标系 $O_R X_R Y_R Z_R$ 中的坐标为 $\mathbf{P}_R(x_R, y_R, z_R)$,在右像平面坐标系 $o_R x_R y_R$ 中的坐标为

$$\begin{cases} x_L = z_L \frac{x_{uL}}{f_L} \\ y_L = z_L \frac{y_{uL}}{f_L} \\ z_L = \frac{f_L(f_R t_1 - x_{uR} t_3)}{x_{uR}(r_7 x_{uL} + r_8 y_{uL} + f_L r_9) - f_R(r_1 x_{uL} + r_2 y_{uL} + f_L r_3)} = \frac{f_L(f_R t_2 - y_{uR} t_3)}{y_{uR}(r_7 x_{uL} + r_8 y_{uL} + f_L r_9) - f_R(r_4 x_{uL} + r_5 y_{uL} + f_L r_6)} \end{cases}, \quad (11)$$

其中 $\mathbf{R}_L^R, \mathbf{T}_L^R, f_L$ 和 f_R 均可通过双目传感器的标定获取。

由于基准球表面光滑无特征可提取,左相机像平面某点 $\mathbf{P}_{uL}(x_{uL}, y_{uL})$ 对应右相机像平面外极线上一组点,需要在双目视觉测量系统中加入竖向条纹相位约束^[18]。点 $\mathbf{P}_{uL}(x_{uL}, y_{uL})$ 对应相位为 φ_L ,右相机像平面外极线上的点的相位为 φ_i ,只需找到外极线上 $\varphi_i = \varphi_L$ 的点即为 $\mathbf{P}_{uR}(x_{uR}, y_{uR})$,从而达到左右像平面同名点匹配的目的。

机器人末端基准球采用精密轴承球,直径为 (38.1 ± 0.01) mm,其材料为掺杂了 6% 钽元素的碳化钨,莫氏硬度达到 9.5,热膨胀系数极低,对热冲击和温度波动有极强的抵抗作用。该基准球符合温度误差补偿要求^[14],视觉测量系统将其球心作为特征点进行测量。利用搭建好的双目条纹投影传感器测量一根标准球杆,测量结果显示,基准球的半径误差和球间距误差分别为 -0.02 mm 和 -0.018 mm,满足基准球测量精度要求。

2.3 补偿参数选择方法

MDH 模型中规定每个关节包含 5 个参数:当相邻关节轴线平行或接近平行时,设定参数 d 恒为 0;相邻关节轴线不平行时,设定参数 β 恒为 0,因此只有 4 个参数可随温度的变化产生漂移。表 1 为 KUKA 公司 KR150R3100 机器人的 MDH 模型中可辨识的全部 24 个参数。对于实际生产线上工作的机器人,基准球测量通常是在机器人完成一个正常的工作循环之后进行,一般是在生产线输送期间进行。由于生产节拍的限

$\mathbf{P}_{uR}(x_{uR}, y_{uR})$ 。左右相机焦距分别为 f_L 和 f_R ,坐标系 $O_R X_R Y_R Z_R$ 到坐标系 $O_L X_L Y_L Z_L$ 的旋转矩

阵和平移矩阵分别为 $\mathbf{R}_L^R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 和 $\mathbf{T}_L^R = [t_1 \quad t_2 \quad t_3]^T$ 。根据小孔成像原理^[17]可得:

制,可用于基准球测量的时间非常有限,机器人通常只能运动 6 个位姿。由式(8)可知,以 6 个不同姿态测量基准球时,只能建立 18 个方程,因此无法对表 1 中的 24 个参数进行辨识。为了提高参数辨识的准确性,方程个数通常是参数个数的 2~3 倍,因此需要从表 1 中的 24 个参数中筛选出 6~9 个主要变化参数进行补偿,通过补偿这几个主要参数来达到机器人温度补偿的目的。传统的机器人温度补偿方法认为温度变化只影响参数 d 和 a 中的非零值^[19],对于 KR150R3100 机器人, $d_1, d_4, d_6, a_1, a_2, a_3$ 为非零参数,传统方法只补偿这 6 个参数。

表 1 MDH 模型的可辨识参数

Tab. 1 Identifiable parameters of MDH model

关节序号	可辨识参数	关节序号	可辨识参数
1	$d_1, \theta_1, a_1, \alpha_1$	4	$d_4, \theta_4, a_4, \alpha_4$
2	$\beta_2, \theta_2, a_2, \alpha_2$	5	$d_5, \theta_5, a_5, \alpha_5$
3	$d_3, \theta_3, a_3, \alpha_3$	6	$d_6, \theta_6, a_6, \alpha_6$

因温度引起的参数显著性变化呈现一定规律,机器人从冷态变化到热态的过程中,显著变化参数变化量呈现出与机器人末端 TCP 近似的变化曲线,如图 4(a)所示,这样的参数为非平稳变化参数;非显著变化参数的变化量则围绕 0 点上下波动,如图 4(b)所示,这样的参数为平稳变化参数,不作为最终的补偿参数。

选定一组参数后,需用这组参数对测点数据进行补偿,因此补偿效果的评价至关重要。每个测点最多有三个监测方向,将补偿后残差小于某一阈值的监测方向数量占总监测方向数量的百分比 λ 作为补偿效果优劣的评估标准,并据此进行参数筛选。用 λ 这一指标评价筛选结果可以保证更多的监测方向补偿后残差小于设定阈值,从而控制整体的补偿效果,满足工业现场的精度要求。由于筛选过程可以在线下完成,因此在筛选阶段应不限制机器人携带基准球测量的姿态数。参数筛选过程中选取的测量姿态数为 20 个,以满足初始 24 个参数的解算精度需求。补偿参数的筛选流程如图 5 所示,筛选步骤如下:

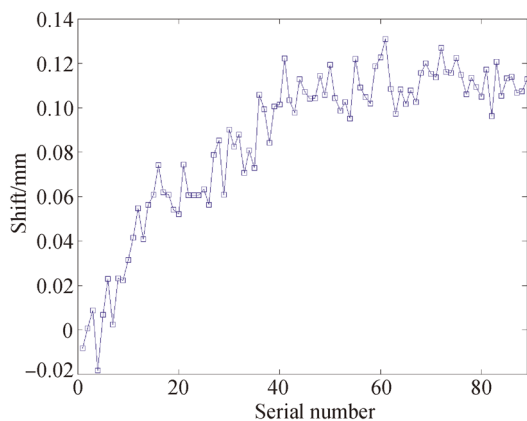
(1) 开始,初始待选参数集合 ΔX_0 为全部 24 个参数, ΔX_0 中元素个数记作 $card(\Delta X_0)$,设置预留参数个数 n ,实验阶段设置为 8;

(2) 按式(8)解算 ΔX_0 中所有参数,计算补偿结果对应的 λ 值,获取 ΔX_0 中每个参数类似于图 4(a)和 4(b)的变化趋势曲线;

(3) 对步骤(2)中获取的变化趋势曲线进行评估,选出集合 ΔX_0 中变化趋势平稳的参数放入集合 S 中, S 中元素个数记作 $card(S)$;

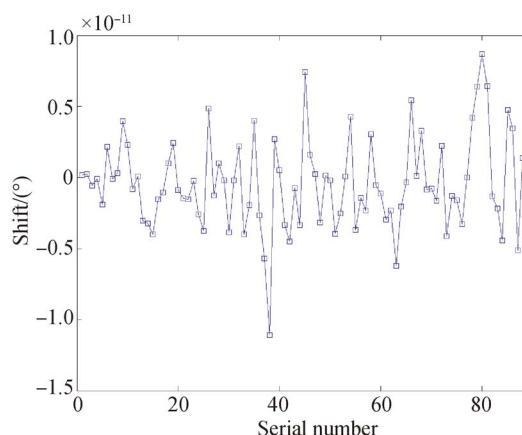
(4) 逐个选出集合 S 中元素 $s_k, k=1, 2, 3, \dots, card(S)$,令 $\Delta X_k = \Delta X_0 - s_k$,即将 s_k 从 ΔX_0 中删除,按式(8)解算 ΔX_k 中所有参数,计算补偿结果对应的 λ_k 值,令 $\lambda = \max_{k=1, 2, \dots, card(S)} \{\lambda_k\}$, ΔX_0 等于对应的 ΔX_k ;

(5) 如果 $card(\Delta X_0) > n$,重复步骤(2)~(4);如果 $card(\Delta X_0) \leq n$,筛选结束。



(a) 非平稳参数的变化趋势

(a) Variation tendency of a non-stationary parameter



(b) 平稳参数的变化趋势

(b) Variation tendency of a stationary parameter

图 4 温度对不同关节参数的影响

Fig. 4 Effects of thermal variation on different joint parameters

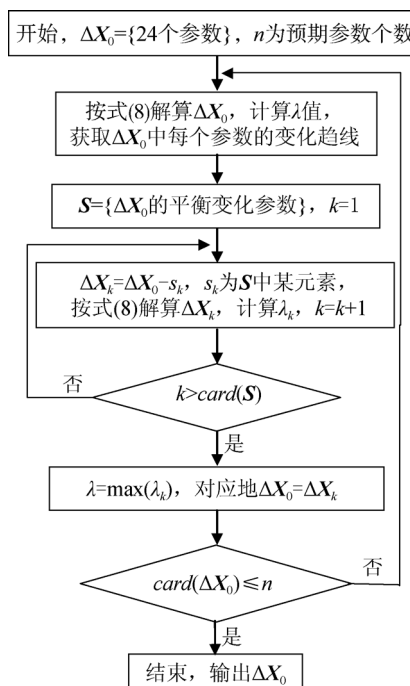


图 5 参数筛选流程图

Fig. 5 Flowchart of parameter filtering

3 系统标定方法

2.1 节中温度补偿模型需要利用 T_b 和 P_e 进行计算,因此在温度误差补偿前需要对这两个系统参数进行精确标定。借鉴机器人手眼标定方法原理^[6,20],不同的是系统中的视觉传感器固定安装在机器人基座附近,需要标定该视觉传感器坐标系相对于机器人坐标系的转换关系 T_b 。此外,提出的系统标定方法可对 T_b 和 P_e 同时进行标定,标定效率较高。

设特征点在机器人末端法兰坐标系和传感器坐标系下的坐标向量分别为 $\mathbf{P}_e = [x_e \ y_e \ z_e]^T$ 和 $\mathbf{P}_s = [x_s \ y_s \ z_s]^T$, 根据式(1)可得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{t}_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P}_e \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中: $\mathbf{R}_s \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 和 $\mathbf{T}_s \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为待标定的校准传感器坐标系到基坐标系转换关系 \mathbf{T}_s 的旋转量和平移量; $\mathbf{R} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 和 $\mathbf{t} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为基坐标系到末端法兰坐标系转换关系 \mathbf{T}_e 的旋转量和平移量, 可通过机器人运动学模型(2)获取; \mathbf{P}_e 为待标定参数; $\mathbf{0} = [0 \ 0 \ 0]$, 下同。化简式(12)得:

$$\mathbf{P}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{R} \mathbf{P}_e + \mathbf{R}_s \mathbf{t} + \mathbf{t}_s. \quad (13)$$

控制机器人运动, 使视觉测量系统测量两个不同机器人位姿下的基准点坐标:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{s1} = \mathbf{R}_s \mathbf{R}_1 \mathbf{P}_e + \mathbf{R}_s \mathbf{t}_1 + \mathbf{t}_s \\ \mathbf{P}_{s2} = \mathbf{R}_s \mathbf{R}_2 \mathbf{P}_e + \mathbf{R}_s \mathbf{t}_2 + \mathbf{t}_s \end{cases}. \quad (14)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \Delta P_{s,x} & \Delta P_{s,y} & \Delta P_{s,z} & 0 & 0 & r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ 0 & \Delta P_{s,x} & \Delta P_{s,y} & \Delta P_{s,z} & 0 & r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ 0 & 0 & \Delta P_{s,x} & \Delta P_{s,y} & \Delta P_{s,z} & r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3 \times 12},$$

$$\Delta \mathbf{K} = [r_{s11} \ r_{s12} \ r_{s13} \ \cdots \ r_{s33} \ x_e \ y_e \ z_e]^T \in \mathbf{R}^{12 \times 1},$$

$$\mathbf{b} = [\Delta t_x \ \Delta t_y \ \Delta t_z]^T,$$

根据式(16), 两个不同位姿即可得到3个方程。

实验过程中机器人携带基准球运动 $l+1$ 个不同的位姿进行测量, 使用第1个运动姿态和第 $i+1$ ($i=1, 2, 3, \dots, l$) 个运动姿态数据, 根据式(16)中 \mathbf{B} 和 \mathbf{b} 的定义, 计算这两个位姿对应的 \mathbf{B}_i 和 \mathbf{b}_i , 因此 $l+1$ 次测量可得 l 组方程组, 共计 $3l$ 个方程:

$$\mathbf{B}' \cdot \Delta \mathbf{K} = \mathbf{b}', \quad (17)$$

其中:

$$\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{B}_l \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3l \times 12}, \mathbf{b}' = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_l \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3l \times 1}.$$

$\Delta \mathbf{K}$ 中有12个待求量, 解算方程数量应不少于待求量个数, 即 $3l \geq 12$, 因此系统标定时至少进行5次测量。另外, 求解式(17)的过程中, \mathbf{R}_s^T 需满足旋转矩阵的正交性约束, 即:

$$\begin{cases} f_1 = r_{s11}^2 + r_{s12}^2 + r_{s13}^2 - 1 = 0 \\ f_2 = r_{s21}^2 + r_{s22}^2 + r_{s23}^2 - 1 = 0 \\ f_3 = r_{s31}^2 + r_{s32}^2 + r_{s33}^2 - 1 = 0 \\ f_4 = r_{s11} r_{s21} + r_{s12} r_{s22} + r_{s13} r_{s23} = 0 \\ f_5 = r_{s11} r_{s31} + r_{s12} r_{s32} + r_{s13} r_{s33} = 0 \\ f_6 = r_{s21} r_{s31} + r_{s22} r_{s32} + r_{s23} r_{s33} = 0 \end{cases}. \quad (18)$$

式(14)中两式相减并化简得:

$$\mathbf{R}_s^T (\mathbf{P}_{s1} - \mathbf{P}_{s2}) - (\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2) \mathbf{P}_e = \mathbf{t}_1 - \mathbf{t}_2, \quad (15)$$

记:

$$\mathbf{R}_s^T = \begin{bmatrix} r_{s11} & r_{s12} & r_{s13} \\ r_{s21} & r_{s22} & r_{s23} \\ r_{s31} & r_{s32} & r_{s33} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P}_{s1} - \mathbf{P}_{s2} = \begin{bmatrix} \Delta P_{s,x} \\ \Delta P_{s,y} \\ \Delta P_{s,z} \end{bmatrix}, \mathbf{P}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix}, \mathbf{t}_1 - \mathbf{t}_2 = \begin{bmatrix} \Delta t_x \\ \Delta t_y \\ \Delta t_z \end{bmatrix},$$

则式(15)可等价于:

$$\mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{K} = \mathbf{b}, \quad (16)$$

其中:

由此构造优化目标函数如下:

$$\min (\mathbf{B}' \cdot \Delta \mathbf{K} - \mathbf{b}')^T (\mathbf{B}' \cdot \Delta \mathbf{K} - \mathbf{b}') + M \sum_{i=1}^6 f_i^2, \quad (19)$$

其中 M 为罚因子。采用 L-M 优化算法对式(19)求最优解, 求得 \mathbf{R}_s^T 和 \mathbf{P}_e 后代入到第 i 次测量得到的式(13)中, 求解 \mathbf{t}_{si} , 对所有 \mathbf{t}_{si} 求均值即为 \mathbf{t}_s :

$$\mathbf{t}_s = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{l+1} \mathbf{t}_{si}. \quad (20)$$

至此, \mathbf{T}_s 和 \mathbf{P}_e 在冷态下的精确值标定完成。

4 温度误差补偿实验

4.1 系统搭建和系统标定

第3节提出的机器人温度误差在线补偿方法是针对工业现场从事如焊接、搬运、冲孔等通用工作的工业机器人。但由于焊接、冲孔等机器人系统不易搭建, 而且这类系统中的温度误差补偿效果无法直观评价, 只能通过肉眼或卡尺评价焊点位置变化, 因此搭建了如图6所示的机器人测试系统。以末端视觉传感器代替焊枪等工具, 机器人带动视觉传感器对车身上多个特征孔进行测量。

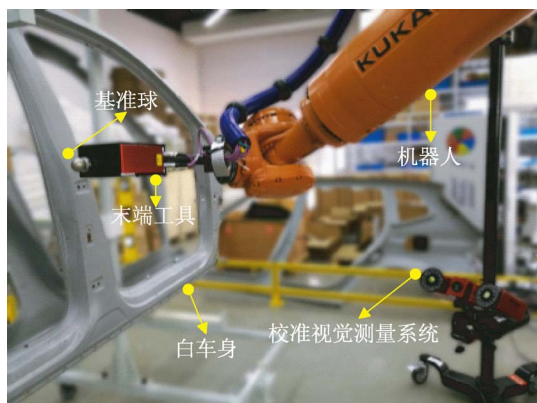


图 6 温度误差补偿实验装置

Fig. 6 Experimental setup of thermal error compensation method

搭建完实验系统后,标定校准视觉传感器坐标系到基坐标系的转换关系 T_b 和特征点在末端法兰坐标系下的坐标 P_e 。机器人携带基准球运动 9 个姿态,校准视觉传感器对基准球球心进行测量,如图 7 所示。标定结果如下:

$$T_b =$$

$$\begin{bmatrix} 0.9003 & -0.1695 & -0.4009 & 2037.2109 \\ -0.1695 & 0.7117 & -0.6817 & -1761.8217 \\ 0.4009 & 0.6817 & 0.6120 & 343.7652 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$P_e = \begin{bmatrix} 43.0823 \\ -5.6419 \\ 306.7015 \end{bmatrix}. \quad (22)$$



图 7 系统标定过程

Fig. 7 Process of system calibration

4.2 温度漂移现象及参数筛选结果

在每个测量周期中,首先对车身上 34 个测点进行测量,之后机器人再带动基准球至校准视觉传感器上方,校准视觉传感器从 6 个不同姿态测量基准球的球心位置。单次测量循环的时间约为 2 min,其中用于基准球测量的时间约为 10 s。理论上,车身固定不动的情况下,机器人连续多次测量的结果应大致不变。但由于机器人存在温度效应,连续多次测量的结果将出现缓慢漂移现象。实验使用 KUKA 公司 KR150R3100 机器人,连续测量约 3 h 后,可以获取 90 组测量数据。车身上某测点的温度漂移数据如图 8 所示,数据显示单坐标漂移量在 0.1~0.5 mm,且坐标漂移最终趋于平稳。

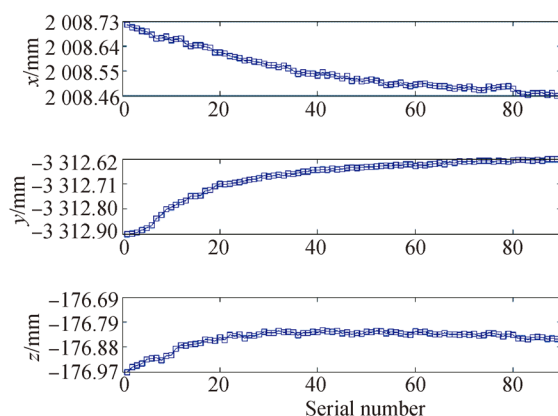


图 8 某点三坐标测量漂移量

Fig. 8 Three-dimensional measuring drift distance of a point

测试过程在 3 台轨迹互不相同的 KR150R3100 型号机器人上进行。3 台机器人同时连续测量 3 h,获取实验数据。使用第 1 台机器人数据进行参数筛选。最终筛选出的显著变化参数为: $d_4, d_6, a_1, a_2, a_3, \alpha_3, \alpha_4, \beta_2$ 。可以发现,内部热源发热的确只导致部分参数发生显著变化,但不一定为非零长度参数。

图 9 描述了参数筛选过程中,随着参数个数越来越少,对应的残差优于 0.1 mm 的监测方向所占百分比 λ 的变化曲线。 λ 值整体呈上升趋势,当补偿参数个数减小到 10 以后, λ 值略有下降,说明补偿参数也不可过少,解算方程个数一般为补偿参数个数的 2~3 倍。

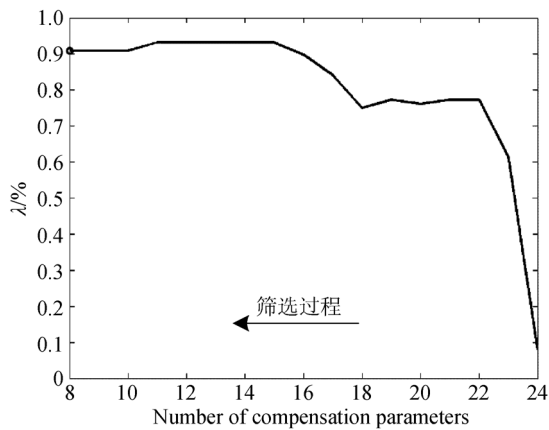


图 9 补偿参数个数与 λ 值的关系曲线

Fig. 9 Relation curve between number of compensation parameters and λ value

4.3 温度补偿效果及分析

使用上述显著变化参数组合对 3 台机器人获得的实验数据进行补偿,补偿统计结果如表 2 所示。表中数据显示,3 台机器人的补偿效果均在 90% 以上,说明该补偿参数组合具有普适性,提出的温度补偿方法和参数选取策略优于传统方法。用 8 个参数替代全部参数进行补偿,也可有效提高温度误差的补偿效率。

表 2 残差优于 0.1 mm 监测方向百分比

Tab. 2 Ratio of monitoring direction with residual error less than 0.1 mm (%)

测试序号	补偿前	传统方法	本文方法
1	43.18	73.86	90.91
2	49.41	80.00	96.47
3	48.05	87.01	94.81

参考文献:

[1] HA I C. Kinematic parameter calibration method for industrial robot manipulator using the relative position [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008, 22(6): 1084.
 [2] BAI Y. On the comparison of model-based and modelless robotic calibration based on a fuzzy inter-

车身某测点两种方法的补偿效果如图 10 所示,传统方法只在 y 方向的补偿效果较好,本文方法在三个坐标方向的补偿效果均较好。

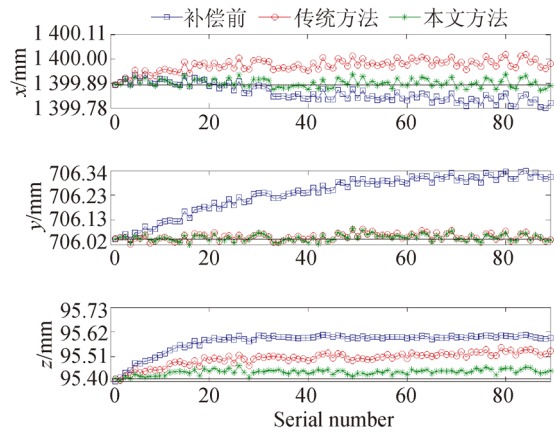


图 10 补偿效果对比图

Fig. 10 Comparison between conventional and proposed compensation methods

5 结 论

本文针对制造现场环境下通用工业机器人的温度误差补偿问题,建立了一套完整的在线温度误差补偿系统和温度误差补偿数学模型。为提高特征点的测量精度、增加测量姿态多样性、降低 SVD 求解噪声,选取双目条纹投影测量系统作为校准视觉测量传感器。为简化温度误差补偿模型,适应生产线的工作节拍,提出了新的关节参数选取方法,考虑到内部热源对连杆参数和结构参数影响的复杂性,将长度和角度关节参数作为温度误差补偿候选参数。实验表明,90% 以上的机器人轨迹点在补偿后的重复定位精度可维持在 ± 0.1 mm 的水平,满足通用工业机器人制造现场的需求。

polation method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 31(11): 1243-1250.

[3] GATTI G, DANIELI G. A practical approach to compensate for geometric errors in measuring arms: application to a six-degree-of-freedom kinematic structure[J]. *Measurement Science & Technology*, 2007, 19(1): 015107.

- [4] DENAVIT J, HARTENBERG R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices [J]. *Trans. of the Asme. Journal of Applied Mechanics*, 1955, 22: 215-221.
- [5] 戚祯祥, 叶超强, 吴建华, 等. 基于 MDH 模型的工业机器人标定算法与实验研究[J]. *制造业自动化*, 2015(4): 15-17.
- QI Z X, YE C Q, WU J H, *et al.*. Research on the algorithm and experiment of robot calibration based on MDH model [J]. *Manufacturing Automation*, 2015(4): 15-17. (in Chinese)
- [6] 尹仕斌. 工业机器人定位误差分级补偿与精度维护方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- YIN S B. *Research on the Graded Calibration and Accuracy Maintenance Technique for Industrial Robot* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)
- [7] BUSCHHAUS A, GRIINSTEUDEL H, FRANKE J. Geometry-based 6D-pose visual servoing system enabling accuracy improvements of industrial robots [C]. *Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS)*, 2016 International Conference on, IEEE, 2016: 195-200.
- [8] GONG C, YUAN J, NI J. Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, 40(14): 2119-2137.
- [9] 王一, 任永杰, 郝继贵, 等. 测量机器人在线动态温度误差补偿技术[J]. *光电子·激光*, 2009(4): 70-73.
- WANG Y, REN Y J, ZHU J G, *et al.*. On-line and dynamic thermal error compensation for Measuring robot [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009(4): 70-73. (in Chinese)
- [10] 李睿, 赵阳. 机器人热影响模型分析及动态精度补偿 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2382-2388.
- LI R, ZHAO Y. Thermal effect model analysis and dynamic error compensation of industrial robot [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2382-2388. (in Chinese)
- [11] 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. *Robotics. Version 3*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)
- [12] PARK I W, LEE B J, CHO S H, *et al.*. Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(6): 1059-1067.
- [13] NUBIOLA A. *Calibration of a Serial, Robot Using a Laser Tracker*[M]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011.
- [14] YIN S, GUO Y, REN Y, *et al.*. Real-time thermal error compensation method for robotic visual inspection system [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75(5): 933-946.
- [15] WU B, ZHANG Y. Reference sphere positioning measurement based on line-structured light vision sensor [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013: 533-542.
- [16] 杨守瑞, 尹仕斌, 任永杰, 等. 机器人柔性视觉测量系统标定方法的改进[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3239-3246.
- YANG SH R, YIN SH B, REN Y J, *et al.*. Improvement of calibration method for robotic flexible visual measurement systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3239-3246. (in Chinese)
- [17] 韩延祥, 张志胜, 戴敏. 用于目标测距的单目视觉测量方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1110-1117.
- HAN Y X, ZHANG ZH SH, DAI M. Monocular vision system for distance measurement based on feature points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1110-1117. (in Chinese)
- [18] 周平, 朱统晶, 刘欣冉, 等. 结构光测量中相位误差的过补偿与欠补偿校正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 56-62.
- ZHOU P, ZHU T J, LIU X R, *et al.*. Correction of phase error over compensation and under-compensation in structured light measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 56-62. (in Chinese)
- [19] DE SMET P. Method for calibration of a robot inspection system: US, US6321137[P]. 2001.

[20] LI W L, XIE H, ZHANG G, *et al.*. Hand-eye calibration in visually-guided robot grinding [J].

IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 46 (11): 2634-2642.

作者简介:



郝继贵(1970—),男,安徽无为,人,博士,教授,博士生导师,1991年、1994年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,1997年于天津大学获得博士学位,主要从事激光及光电检测技术方面的研究。E-mail: jiguizhu@tju.edu.cn



张楠楠(1991—),女,河北丰润人,硕士研究生,2015年于天津大学获得学士学位,主要从事工业机器人温度误差补偿方面的研究。E-mail: tju_2011znn@tju.edu.cn

通讯作者:



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、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