

# 工业机器人视觉测量系统的在线校准技术

王 一, 刘常杰, 杨学友, 叶声华

(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:** 汽车车身总成、分总成的加工过程中应用工业机器人视觉测量系统对关键尺寸进行在线实时监测。机械臂及环境温度变化导致杆件和关节热膨胀变形, 造成测量结果产生温度漂移。本文提出了一种在线校准方法。首先根据机器人的 D-H 正向运动学模型和微分运动学模型建立末端关节坐标系的定位误差模型, 然后结合轴动实验并利用多元线性回归方法确定受温度变化影响最为显著的机器人连杆参数, 最后建立基于基准球的温度误差补偿模型。现场测量数据表明, 该方法能将温度变化引起的测量误差控制在 0.05 mm 左右, 并且适应生产线的正常节拍。

**关键词:** 工业机器人; 视觉测量; 温度漂移; 多元线性回归

**中图分类号:** TP241.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0446(2011)-03-0299-04

## Online Calibration of Visual Measurement System Based on Industrial Robot

WANG Yi, LIU Changjie, YANG Xueyou, YE Shenghua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Visual measurement system based on industrial robot is applied to the online and real-time monitoring and inspection of key dimensions in the process of automobile body assembly and subassembly. Temperature variations of the manipulator and environment lead to expansion or deformation of links and joints, therefore cause the temperature drift error. An online calibration approach is proposed. Firstly, positioning error model of the end-effector is established by adopting D-H forward kinematics and differential kinematics. Secondly, combining with thermal experiments on axis rotation, link parameters that change significantly because of robot's temperature variation are determined by using multivariate linear regression method. At last, thermal error is compensated by using a reference sphere. Practical measurement results show that the measurement errors caused by temperature variation can be reduced to about 0.05 mm and the approach can meet the requirement of the production tact.

**Keywords:** industrial robot; visual measurement; thermal error; multivariate linear regression

## 1 引言 (Introduction)

工业机器人视觉测量系统在汽车车身总成、分总成加工过程中对关键尺寸进行在线实时监测, 发现质量问题及时采取措施, 可有效控制白车身焊接总成产品质量的稳定性<sup>[1-2]</sup>。由于结合了非接触测量方式和机器人运动灵活的优点, 可以解决传统三坐标测量机对盲孔、深孔等的测量难题, 也可以克服接触式测量头对复杂工件的干涉, 其在国内轿车制造业逐渐得到应用推广。工业现场环境复杂, 多种因素导致系统在运行过程中测量精度降低, 其中最不容忽视的就是温度漂移——主要是由机器人运动导致杆件和关节热膨胀变形引起的, 它使模型参数改变从而导致定位误差增大, 既与机器人所处姿态有关又与温度变化有关。温度变化主要包括两个

方面: 机器人自身的往复运动会主动发热, 如电机散热、齿轮和驱动带等机械构件相对运动摩擦生热; 环境温度的变化, 如四季交替带来的气候温差。温度漂移误差是动态误差, 与机器人自身的热效应有关, 在未到达热平衡状态之前是不断变化的, 因此必须在线补偿<sup>[3]</sup>。

实时温度误差补偿技术已经成功应用到了坐标测量机和一些加工制造系统中, 但工业机器人的热效应研究尚未广泛展开。工业机器人视觉测量系统中, 机器人的定位精度直接影响系统的测量精度, 因此有必要对温度误差进行补偿。目前机器人温度误差补偿主要采用基于温度值观测模型的补偿方法, 在机器臂及其所处环境设置多个温度传感器, 采用某种建模技术, 如人工神经网络或者有限元分

析等,建立补偿模型<sup>[4-5]</sup>.这种方法可建立温度与定位误差之间的直接函数关系,但传感器位置对于补偿精度、效率和稳健性具有至关重要的作用,且建模过程比较复杂.

本文对温度误差进行了相关研究,建立了针对显著变化参数的温度误差模型,并使用对温度变化不敏感的材料作为测量基准实现误差补偿.

## 2 工业机器人视觉测量系统工作原理 (Principle of visual measurement system based on industrial robot)

图1为测量系统工作原理示意图.图中共存在4个坐标系,分别为机器人基础坐标系 $O_R X_R Y_R Z_R$ 、机器人末端关节坐标系 $O_H X_H Y_H Z_H$ 、工件坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ 和视觉传感器坐标系 $O_C X_C Y_C Z_C$ .测量结果为被测点 $P$ 在工件坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ 下的坐标 $P_W$ ,即

$$P_W = A_W^R \times A_R^H \times A_H^E \times P_C \quad (1)$$

式中, $P_C$ 为被测点 $P$ 在视觉传感器测量坐标系下的坐标值; $A_H^E$ 为机器人手眼关系,即机器人末端关节坐标系到视觉传感器测量坐标系的齐次坐标变换关系,一旦传感器安装到末端关节上就保持不变; $A_W^R$ 为机器人基础坐标系到白车身坐标系的齐次坐标变换关系,工件安装完成后同样为定值; $A_R^H$ 为机器人末端关节坐标系到机器人基础坐标系的齐次坐标变换关系,即

$$A_R^H = \prod_{i=1}^N A_i^{i-1} \quad (2)$$

式中的 $A_i^{i-1}$ 表示 $i-1$ 坐标系到 $i$ 坐标系的齐次坐标变换矩阵,在测量过程中会受到温度变化的影响.

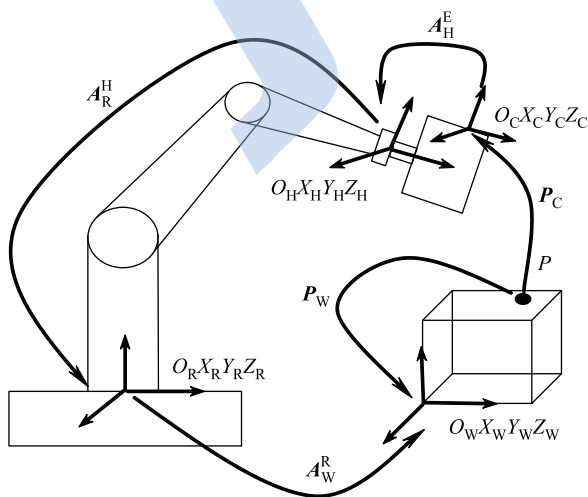


图1 测量系统工作原理

Fig.1 Principle of measurement system

## 3 机器人定位误差模型 (Robot positioning error model)

采用 D-H 模型<sup>[6]</sup>对机器人进行分析,假设每个关节都存在连杆参数偏差,那么传感器坐标系相对于机器人基础坐标系的变换为

$$A_R^E + dA_R^E = \left( \prod_{i=1}^N (A_i^{i-1} + dA_i^{i-1}) \right) \times A_H^E \quad (3)$$

结合变换微分可以推导出末端关节相对于机器人基础坐标系的位置偏差为

$$dA_{B[1:3,4]}^E = \left( \sum_{i=0}^N (A_0^i A_{qi} A_i^N A_H^E dq_i) \right)_{[1:3,4]} \quad (4)$$

其中

$$A_{qi} = (A_i^{i-1})^{-1} \frac{\partial A_i^{i-1}}{\partial q_i} \quad (5)$$

$q_i$ 表示第 $i$ 个关节的连杆参数 $\theta_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $a_i$ 、 $d_i$ <sup>[7]</sup>,下角标 $[1:3,4]$ 表示取对应矩阵第4列的1至3行.可以看出,对于6个自由度的机械臂,待补偿参数总共有30个,因此要完全求解这些参数至少需要10个测量姿态,如果考虑噪声的存在而采用最小二乘法求解则需要建立更多方程.

## 4 机器人温度误差补偿模型 (Robot thermal error compensation model)

### 4.1 轴动温度误差实验

令 ABB2400 型机器人做足够长时间的、不同关节组合的全速转动,测量末端 TCP (tool center point, 工具中心点) 在机器人运动前后的定位偏差.机械臂上的热量分布不均匀,以电机散发的热量最多,其次是转动关节附近,此外邻近电机和关节的连杆也有较为明显的热量变化.机器人的结构如图2所示.

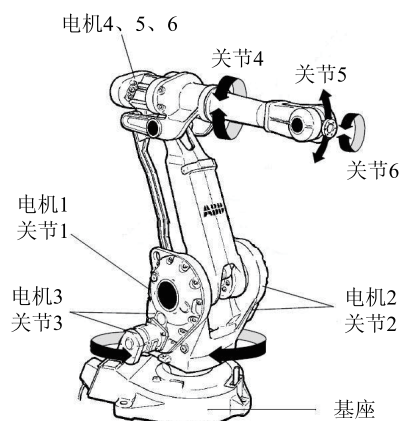


图2 ABB2400 型机器人结构示意图

Fig.2 Structure of robot ABB2400

关节 1 单独转动时,对机器人 6 个不同姿态的 TCP 进行了测量,关节 2、3 单独转动时,各测量了 5 个不同姿态下的 TCP 坐标值,关节 4、5、6 单独转动时,分别测量了 9 个、6 个和 10 个不同姿态下的 TCP 坐标值. 另外,为了考察多轴同时转动的温度误差规律,又令关节 2、3 和关节 4、5、6 同时转动,分别对 6 个和 7 个不同姿态下的 TCP 进行了测量.

实验数据表明,相当一部分的坐标偏差处于 0.1 mm 到 0.2 mm 之间,少数偏差甚至达到了 0.3 mm 以上. 其中,关节单独转动时,以关节 2、3、4 产生的偏差最明显,然而,当关节 2、3 同时转动时, TCP

在 y 方向的定位偏差反而减小,这说明关节 2、3 同时转动对 y 轴方向的温度误差有抵消作用.

结合实验数据进一步分析,当关节 1 转动时,7 个姿态中只有 x 方向的坐标出现了较大偏差,若考虑测量噪声的存在,其它方向的坐标值可以认为没有变化,对照机器人运动学模型,可以确定此时杆件长度参数  $a_1$  产生了较为明显的变化. 采用同样的方法并结合发热区域对其余各关节组合转动情况进行分析,总结出有可能产生较大变化量的模型参数如表 1 所示. 轴动温度误差实验只能获得温度误差数量级和模型参数变化定性规律,不能定量地得到

表 1 轴动温度误差  
Tab.1 Thermal error of axis rotation

转动关节	明显发热区域	显著变化坐标	可能变化的模型参数
1	电机 1 附近	x	$a_1$
2	电机 2 附近	y	$a_1、\alpha_2、\beta_2$
3	电机 3 附近	y	$\alpha_2、\beta_2$
4	电机 4、5、6 附近	x、z	$a_3、a_4、d_4$
5	关节 5、6 附近	x、z	$a_4、a_5、d_6$
6	关节 5、6 附近	x、z	$a_4、a_5、d_6$
2、3	电机 2、3 附近	无	不易判断
4、5、6	电机 4、5、6 附近, 关节 5、6 附近	x、z	$a_5、d_6$

随温度变化的模型参数的偏差值.

4.2 待补偿模型参数的确定

受生产线节拍制约,测量系统用于误差补偿的姿态不能多于 12 个,运用多元线性回归方法确定变化最为显著的连杆参数,以达到减少求解方程规模的目的. 为减少计算量,将轴动温度误差实验中初步确定的、有可能解释末端 TCP 产生位置偏差的连杆参数作为预测变量,只遍历这些变量的子集.

最佳选择需要通过检查某个准则来确定,可选择马罗 (Mallow) 的  $C_p$  统计量 [8]:

$$C_p = \left[ \frac{E_p}{\sigma} \right] - (n - 2p) \tag{6}$$

式中  $E_p$  为包括常数项在内的含  $p$  个参数的子模型的残差的平方和,  $\sigma$  为全模型的残差的方差,  $n$  为实测资料点的个数.

对每个预测子集作  $(p, C_p)$  标绘图,此图将显示出能很好预测响应观测值的模型. 典型的情况是好模型的  $(p, C_p)$  坐标在 45° 线附近. 利用马罗  $C_p$  统计量确定最佳模型参数子集如图 3 所示.

$C_p$  标绘图中共遍历了 25 种参数的组合,正方形表示的是所有连杆长度参数形成的组合,该点与

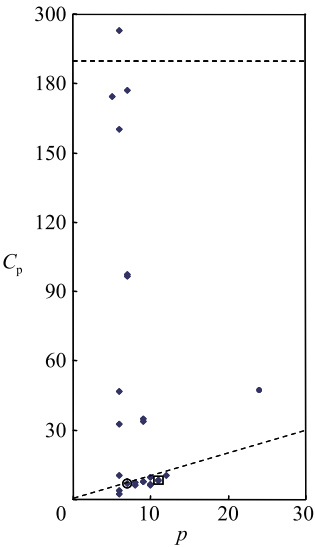


图 3 温度误差补偿参数的  $C_p$  标绘图  
Fig.3  $C_p$  plotting chart of thermal error compensation parameters

原点构成的直线的斜率为 0.777 533 6; 最接近 45° 线的参数组合为  $(d_1, \alpha_2, a_2, \beta_2, d_4, a_5, d_6)$ , 即图中圆圈表示的“最佳”预测变量子集,该点与原点构成的直线的斜率为 0.988 360 9, 因此只针对  $(d_1, \alpha_2, a_2, \beta_2, d_4, a_5, d_6)$  这几个连杆参数进行温度误差修正.



## 5 基于基准球的在线温度误差补偿技术 (On-line thermal compensation technique based on reference sphere)

使用碳化硅材料制作成的球体作为基准, 用视觉传感器测量球上的标准孔, 用前后测量得到的坐标偏差作为补偿量修正连杆参数. 设  $[x_b \ y_b \ z_b]^T$  为基准球上某个标准孔在传感器坐标系下的测量值, 机器人不断运动的过程中, 标准孔相对机器人基础坐标系或者车身坐标系的位置不发生改变, 但机械臂的温度变化会导致定位误差增大,  $A_R^H$  变化为  $A_R^H$ , 传感器对同一标准孔的测量结果变为  $[x'_b \ y'_b \ z'_b]^T$ , 如果近似认为该变化完全是由机器人的热变形引起, 就可以将标准孔坐标偏差作为补偿值对连杆参数进行修正. 图 4 为基于基准球的在线温度误差补偿原理示意图.

若检测系统长时间没有运行, 启动时首先对基准孔测量一遍, 进行参数初始化, 然后进入车身测量阶段, 为了提高效率, 并不是每次车身测量完成后都会进行温度误差补偿, 而是先运行校准判断程序, 只对球体上的 3 个标准孔进行测量, 根据接受准则判断是否需要温度误差补偿程序, 最后经过坐标统一给出被测特征在车身坐标系下的测量结果.

## 6 结论 (Conclusions)

在现场对同一车身反复进行测量, 整个过程中车身保持不动, 某检测点的误差曲线如图 5 所示. 图中共划分了 A、B、C 三个时间段, A 段为机器人从室温开始测量并且没有进行温度误差补偿, B 段记录的测量结果进行了补偿运算, 进入 C 段后再次取消了补偿. 可以看出,  $x$  和  $y$  方向的坐标测量值都产生了规律性的变化, 且  $x$  方向的变化最为明显, 最后一次测量值较初始测量值偏离了 0.146 mm,  $y$  方向的测量值也有 0.057 mm 的小幅度偏差, 而  $z$  方向的测量值并没有体现出明显的漂移现象. 补偿阶段  $x$  方向的测量误差平均值与初始测量误差之间的偏差仅为 0.031 mm, 获得了比较理想的补偿效果.

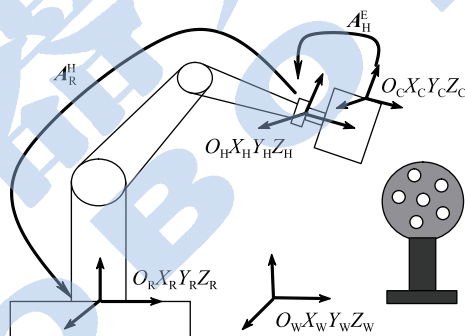


图 4 在线温度误差补偿

Fig.4 On-line thermal error compensation

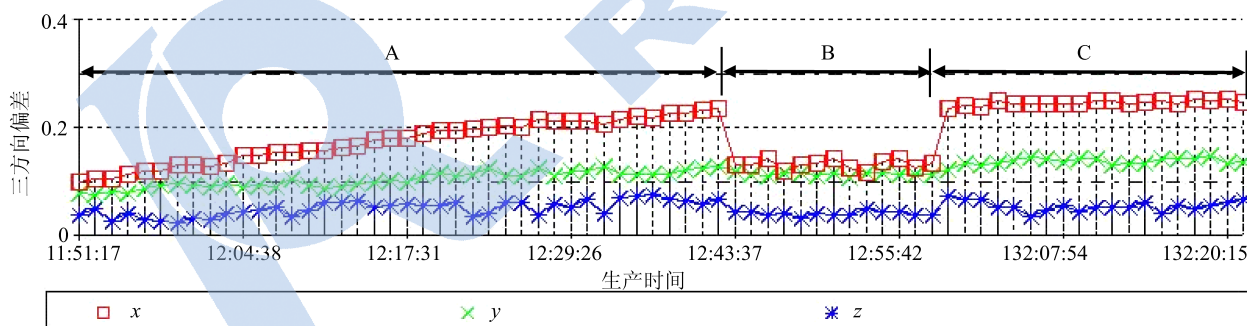


图 5 温度误差曲线图

Fig.5 Thermal error curve

## 参考文献 (References)

- [1] 王一, 刘常杰, 任永杰, 等. 通用机器人视觉检测系统的全局校准技术[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 3028-3033.  
Wang Y, Liu C J, Ren Y J, et al. Global calibration of visual inspection system based on universal robots[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(12): 3028-3033.
- [2] 任永杰, 郑继贵, 杨学友, 等. 机器人柔性视觉检测系统现场标定技术[J]. 机器人, 2009, 31(1): 82-87.  
Ren Y J, Zhu J G, Yang X Y, et al. On-line calibration technique of robot flexible visual inspection system[J]. Robot, 2009, 31(1): 82-87.
- [3] Gong C H, Yuan J X, 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.

- [4] Eastwood S, Webb P. Compensation of thermal deformation of a hybrid parallel kinematic machine[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(1): 81-90.
- [5] Zhu J. Robust thermal error modeling and compensation for CNC machine tools[D]. MI, USA: University of Michigan, 2008.
- [6] Denavit J, Hartenberg R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices[J]. Journal of Applied Mechanics, 1955, 22(2): 215-221.

(下转第 331 页)

- [8] 郑亚青, 林麒, 刘雄伟. 低速风洞绳牵引并联支撑系统的机构与模型姿态控制方案设计[J]. 航空学报, 2005, 26(6): 774-778.
- Zheng Y Q, Lin Q, Liu X W. Design methodology of wire-driven parallel support systems in the low speed wind tunnels and attitude control scheme of the scale model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(6): 774-778.
- [9] Pham C B, Yeo S H, Yang G L, et al. Force-closure workspace analysis of cable-driven parallel mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(1): 53-69.
- [10] Sui C P, Zhao M Y. Stiffness study on a 6-DOF parallel wire driven robot[C]//11th International Conference on Advanced Robotics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1787-1792.
- [11] Roberts R G, Graham T, Lippit T. On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots[J]. Journal of Robotic Systems, 1998, 15(10): 581-597.
- [12] Shiang W J, Cannon D, Gorman J. Dynamic analysis of the cable array robotic crane[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 2495-2500.
- [13] Shiang W J, Cannon D, Gorman J. Optimal force distribution applied to a robotic crane with flexible cables[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 1948-1954.
- [14] Pham C B, Yang G L, Yeo S H. Dynamic analysis of cable-driven parallel mechanisms[C]//IEEE/ASME Transactions on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 612-617.
- [15] Borgstrom P H, Borgstrom N P, Stealey M J, et al. Design and implementation of NIMS3D, a 3-D cabled robot for actuated sensing applications[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(2): 325-339.
- [16] Mikelsons L, Bruckmann T, Hiller M, et al. A real-time capable force calculation algorithm for redundant tendon-based parallel manipulators[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 3869-3874.
- [17] Craig J J, 负超. 机器人学导论[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 136-150.
- Craig J J, Yun C. Introduction of robotics[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 136-150.

#### 作者简介:

王建华 (1962-), 男, 硕士, 副教授. 研究领域: 机械电子, 机器人机构学.

刘素庆 (1984-), 男, 硕士生. 研究领域: 绳驱动机器人, 机器人运动控制技术.

陈伟海 (1955-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人技术, 嵌入式系统.

(上接第302页)

- [7] 周学才, 张启先. 距离误差模型在机器人精度研究中的应用[J]. 机器人, 1995, 17(1): 1-6.
- Zhou X C, Zhang Q X. Distance error model in the study on the position accuracy of robots[J]. Robot, 1995, 17(1): 1-6.
- [8] 张应山. 用  $C_p$  统计量选择多元线性模型及估计形式[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 1992, 20(3): 31-37, 48.
- Zhang Y S. Multivariate linear models and estimations by  $C_p$  statistics[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science, 1992, 20(3): 31-37, 48.

#### 作者简介:

王 一 (1981-), 男, 博士后. 研究领域: 机器人应用, 视觉测量.