

基于机械关节反馈的机器人精度补偿技术*

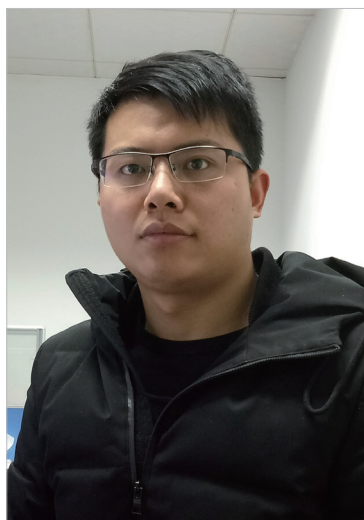
刘双龙¹, 田威¹, 何晓煦², 谭红², 廖文和¹, 张霖¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 工业机器人因其高柔性和低成本而正被越来越多地应用于飞机自动化装配生产线中,但其绝对定位精度差一直是制约其发展的瓶颈。为了进一步提高机器人末端的定位精度,提出了基于机械关节反馈的机器人定位精度补偿方法,该方法通过在机器人的关节处安装绝对式光栅尺,将关节伺服引入到机器人的控制中,来实现机器人关节的闭环控制,从而降低关节误差对末端位置的影响,提高关节的定位精度。试验结果表明,机器人的绝对定位误差由补偿前的最大值 1.125mm 降低到 0.167mm,该方法能够有效地降低机器人的绝对定位误差,实现机器人的高精度控制。
关键词: 工业机器人; 关节误差; 运动回差; 定位精度; 精密补偿技术

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.04.060



刘双龙

硕士研究生,主要研究方向为自动化柔性装配制造技术,从事工业机器人的误差补偿和自动化柔性装配生产线的集成控制技术研发工作。

以工业机器人为载体的飞机自动钻铆设备因其高质量和高效率而正被广泛地应用于各大主机厂和航天部门,并且逐步取代人工作业^[1-2]。实际上,工业机器人正逐渐从定位精度要求不高的码垛、焊接等场合进入到自动化钻孔、铣削、铺丝铺带^[3]等定位精度要求较高的场合。随着机器人应用场合的拓展,其定位精度成为不可忽视的问题。通常,对于没加任何补偿措施的重载机器人,其重复定位精度在 0.1mm 左右,绝对定位精度在 1mm~2mm^[4],这样的绝对定位精度不能满足航空航天大型部件自动钻铆的需求(航空工业要求孔的位置误差小于 0.5mm),因此有必要对提高机器人绝对定位精度的措施进行研究。

机器人的误差可以分为几何误差和非几何误差^[5],在几何误差中,关节的零位偏差是造成定位误差的

主要因素^[6-7]。在非几何误差中,由于连杆的刚度远大于关节的刚度,因此关节的变形要远大于连杆的变形,一般忽略连杆变形引起的误差^[8-9],同时,控制系统的稳态误差、计算机内部数值计算的截断误差、关节的齿轮间隙、摩擦以及运动速度、惯性力都会对机器人的关节产生影响。由以上的分析可知,机器人的定位误差主要是关节误差引起的,因此有必要采用外部手段来消除关节误差。

对于工业重载机器人的误差补偿,很多研究人员对此做过研究,主要可以分为两大类:有模型的参数标定方式和无模型的误差补偿方式。在有模型的参数标定方式中,如果只进行几何误差的标定,能补偿出一定的效果,如果进一步对关节进行标定,则需要建立复杂的补偿模型^[10-12]。此外,即使辨识出了运动学参数,由于大多数机器人的控制系统

* 基金项目: 国家自然科学基金(51575273); 轨道车辆转向架智能装配系统关键技术研究项目(BY2016003-06)。

不开放,无法将运动学参数输入到控制系统中去,只能通过数值逆解的方式求解,降低求解的效率和精度;在无模型的误差补偿方式中,一般将机器人视为“黑盒子”,通过空间采样点的误差来研究误差的分布规律,从而预测或者估计目标点的误差,由于机器人多向重复定位精度和测量设备精度的影响,采样点误差本身具有一部分不确定成分,无法进一步提高补偿效果,使得最终的补偿效果也只在 0.3mm 左右^[13-14]。

本文提出了一种基于机械关节反馈的机器人精度补偿技术,该技术在机器人的前 3 个关节安装绝对式光栅尺,降低关节误差的影响,之后通过空间位置误差估计模型以及误差映射模型来补偿机器人的定位误差。

实施方案

将直线光栅贴到机器人的圆弧面上,通过光栅的闭环反馈来修正关节到达目标位置。由于机器人关节处的安装面不是一个理想圆弧面以及直线光栅贴到圆弧面上的黏结剂厚度不一,导致光栅弧面的弧心并不与关节的旋转中心重合,这给光栅的标定工作带来了一定的困难。光栅虽然难以精确地标定,但是在微小角度范围内,光栅能够准确地反映出关节运动的相对角度,因此可以通过光栅修正小角度误差,从而补偿机器人末端位置误差。因为描述空间位置只需要 3 个自由度,所以可以将空间位置误差换算成为前 3 个关节的角度误差来补偿。在进行误差修正之前,必须先知道目标点的空间位置误差,本文根据 Zeng 等^[14]提出的空间误差具有相似性的原理,建立了在光栅作用下的空间误差估计模型,为了将末端位置误差转化为机器人的前 3 个关节的角度误差,建立了由笛卡尔空间到关节空间的误差映射模型。误差估计模型和误差映射模型分别

实现了目标点位置误差的估计和空间位置误差到关节角度误差的转化。为了实现关节精确定位,降低关节反馈的控制误差,设计 PD 控制器作为关节闭环反馈的控制器。基于关节反馈的机器人位置误差补偿方法如图 1 所示。

模型的建立

1 误差估计模型

根据位置误差在关节空间具有相似性^[14],提出机器人在关节反馈下,位置误差在关节空间误差同样具有相似性。对六自由度串联机器人进行分析,在耦合关节约束的情况下,机器人末端的位姿对应唯一一组逆解。由六自由度串联机器人的运动学模型可知,机器人的位置误差矢量在笛卡尔坐标系下的分量是由各个运动学参数组成的一系列三角函数来描述的。对于旋转关节而言,只有关节转角为变量,因此在机器人的可达空间内各个误差分量是连续的,而且经过粗标定的光栅,其角度误差量很小,所以可以认为位姿相近的两个点其位姿误差也是相近的,即空间位置误差具有相似性。

构建一个映射函数,来描述空间位置误差与关节角度的关系,用这个模型得到目标点与采样点之间的相关性。根据点与点之间的相关性数学定量描述,利用 Kriging 差值^[15],估

计出目标点的空间位置误差。

空间一位姿单方向的位置误差可以近似地描述为:

$$e_l(\theta) = \rho(\beta_l, \theta) + g_l(\theta) \quad (1)$$

$$l = x, y, z$$

其中, $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$ 为 n 自由度机器人的关节输入; l 为坐标系方向,以下均是在 x 方向进行讨论,省略下标 l ,其他方向计算方式相同; $\rho(\beta_l, \theta)$ 为线性回归方程,表示确定性误差,其形式如下:

$$\rho(\beta_l, \theta) = \beta_1 + \beta_2\theta_1 + \dots + \beta_{n+1}\theta_n = (1\theta_1 \dots \theta_n)\beta = f(\theta)^T\beta \quad (2)$$

其中, β 为线性回归方程的系数, $g(\theta)$ 表示位置误差的随机部分。

这里假设随机性误差具有无偏性,即 $E(g(\theta)) = 0$ 。任意两组关节输入 $g(\theta)^{(i)}$ 和 $g(\theta)^{(j)}$ 对应的协方差为:

$$\text{cov}(g(\theta)^{(i)}, g(\theta)^{(j)}) = E(g(\theta)^{(i)}, g(\theta)^{(j)}) = \sigma^2 S(\zeta, \theta^{(i)}, \theta^{(j)}) \quad (3)$$

其中, σ^2 为采样点在 x 方向的方差, $S(\zeta, \theta_i, \theta_j)$ 是以 ζ 为参数的相关性模型,这里选用高斯模型。

$$S(\xi, \theta^i, \theta^j) = \prod_{k=1}^n \exp(-\xi_k |\theta_k^i - \theta_k^j|^2)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

其中, m 为采样点的个数, $\zeta = (\zeta_1, \dots, \zeta_n)^T$, 为高斯模型的参数矢量。用高斯模型来描述两组关节输入的相关性,从式(4)可以看出,两组关节输

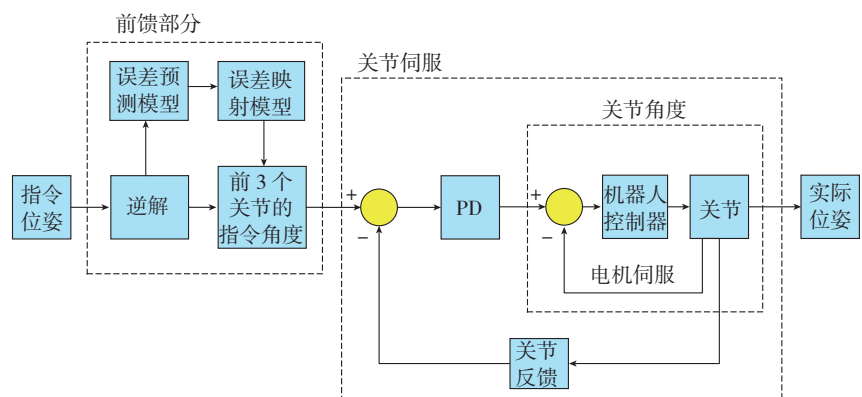


图1 基于关节反馈的机器人位置误差补偿方法

Fig.1 Robot positioning error compensation method based on joint feedback

入越接近,相关性就越大。相关性模型中的参数 ζ 可以由极大似然估计求得^[16]:

$$\min_{\xi} \{ |R| \frac{1}{m} \sigma^2 \} \quad (5)$$

其中, $R \in R^{m \times m}$ 为相关性矩阵,其中矩阵中元素表示两点之间的相关性:

$$R_{i,j} = S(\zeta, \theta^{(i)}, \theta^{(j)}) \quad (6)$$

由 Kriging 差值可知,空间内任意一点在某方向的估计误差可以表示为:

$$\hat{e} = w^T e \quad (7)$$

其中, $w \in R^m$ 为目标点与采样点的权值矢量; $e \in R^m$ 为采样点在 x 方向的误差矢量。

构建矩阵 $J \in R^{m \times n+1}$ 描述采样点的关节输入:

$$J = (f(\theta^{(1)}) \cdots f(\theta^{(m)}))^T \quad (8)$$

构建相关性矢量 $r \in R^m$ 描述目标点与采样点的相关性,即:

$$r(\theta) = (S(\zeta, \theta^{(1)}, \theta) \cdots S(\zeta, \theta^{(m)}, \theta))^T \quad (9)$$

利用线性无偏最优估计的方法求出权值 w , 应该保证目标点的估计值与实际值的差值是无偏的,即 $E(\hat{e}(\theta) - e(\theta)) = 0$ 。

$$E(\hat{e}(\theta) - e(\theta)) = w^T E(e - e(\theta)) = w^T (J\beta + G) - (f(\theta)^T \beta + g(\theta)) = w^T G - g(\theta) + (J^T w - f(\theta))^T \beta \quad (10)$$

其中, $G = (g(\theta^{(1)}) \cdots g(\theta^{(m)}))^T$ 。

要保证式(10)是无偏的,则需使:

$$J^T w = f(\theta) \quad (11)$$

为了保证求得权值最优,需使式(10)的方差最小,则:

$$\psi(\theta) = E((\hat{e}(\theta) - e(\theta))^2) = E((w^T G - g(\theta))^2) = E(g^2(\theta) + w^T G G^T w - 2w^T G g(\theta)) = \delta^2 (1 + w^T R w - 2w^T r) \quad (12)$$

求解上述问题可以转化为条件极值的问题,由拉格朗日乘数法解决,即:

$$L(w, \lambda) = \delta^2 (1 + w^T R w - 2w^T r) -$$

$$\lambda^T (J^T w - f(\theta)) \quad (13)$$

其中, λ 为拉格朗日乘子。令 $L'_w = 0$, 得:

$$L'_w(w, \lambda) = 2\delta^2 (Rw - r) - J\lambda = 0 \quad (14)$$

求解式(14)即可解出最优 w , 带入式(7)可求出目标点的估计误差。

2 误差映射模型

机器人末端测量点的实际位置在机器人基坐标系可以表示为:

$$P_a = F(\theta + \Delta\theta, d + \Delta d, a + \Delta a, a + \Delta a, \beta + \Delta\beta, s + \Delta s) \quad (15)$$

其中, P_a 为机器人末端测量点的实际位置, $\theta, d, a, \alpha, \beta$ 为机器人 M-DH 模型的几何参数, s 为测量点在机器人法兰盘坐标系的位置, $s = (s_x, s_y, s_z)$, $\Delta\theta, \Delta d, \Delta a, \Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta s$ 为几何参数误差, Δs 为测量点的标定误差。则测量点的误差模型可以表示为:

$$\Delta P = P_a - P_{th} = F(\theta + \Delta\theta, d + \Delta d, a + \Delta a, a + \Delta a, \beta + \Delta\beta, s + \Delta s) - F(\theta, d, a, \alpha, \beta, s) \quad (16)$$

其中, P_{th} 为末端的理论位置。由泰勒展开并且舍去高阶项之后得到:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \theta} \Delta\theta + \frac{\partial P}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial P}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial P}{\partial \alpha} \Delta\alpha + \frac{\partial P}{\partial \beta} \Delta\beta + \frac{\partial P}{\partial s} \Delta s \quad (17)$$

因为描述空间位置只需要 3 个自由度,所以可以将空间位置误差换算成为前 3 个关节的角度误差。针对六自由度串联工业机器人,建立误差转化关系如下:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \theta} \Delta\theta + \frac{\partial P}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial P}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial P}{\partial \alpha} \Delta\alpha + \frac{\partial P}{\partial \beta} \Delta\beta + \frac{\partial P}{\partial s} \Delta s = \frac{\partial P}{\partial X} \Delta X \quad (18)$$

其中, $\Delta X = (\Delta\theta_1 \quad \Delta\theta_2 \quad \Delta\theta_3)^T$, $X = (\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3)^T$, 式(18)中的几何参数均采用名义 DH 参数。

由最小二乘法求解误差映射模型为:

$$\Delta X = \left(\left(\frac{\partial P}{\partial X} \right)^T \frac{\partial P}{\partial X} \right)^{-1} \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right)^T \Delta P \quad (19)$$

3 关节反馈控制模型

RSI (Robot Sensor Interface) 是 KUKA 机器人专门开放的通信接口,其既可以通过 Ethernet 总线也可以通过 I/O 与外部系统进行实时数据交互,其交互周期 T 为 12ms,光栅的闭环反馈就是借助于 RSI 的实时交互环境。对于机器人自动钻铆而言,机器人走到目标位置之后由末端执行器完成相应的钻铆工作,其对控制系统的实时性要求不高,因此考虑关节采用 PID 控制模型。

连续的 PID 控制模型:

$$\mu(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

其中, $\mu(t)$ 为控制模型的输出, $e(t)$ 为目标值与实际值的差值, k_p, k_i, k_d 分别为比例参数、积分参数和微分参数。离散化后的 PID 模型为:

$$\mu(n) = k_p e(n) + k_i \sum_{i=0}^n e(i) + k_d [e(n) - e(n-1)] \quad (21)$$

本文使用的控制器为 PD 控制器,控制器中的比例系数和微分系数通过参数整定的方法获得,关节反馈的控制模型为:

$$\mu(n) = k_p e(n) + k_d (e(n) - e(n-1)) \quad (22)$$

试验验证与数据分析

1 试验平台的搭建

试验以 KUKA KR210 R2700 extra 六自由度工业机器人为研究对象。光栅尺采用雷尼绍 RTLA-S 系列直线绝对式光栅尺,分辨率 50nm。在试验过程中,控制环境温度为 22℃,激光跟踪仪的位置固定不变,靶球放到末端执行器的侧面,其相对于机器人法兰盘的位置不变,末端执行器的 TCP 与靶球的相对位置也不变,研究靶球处的机器人定位误差经坐标转化即可视为刀具 TCP 处的定位误差。

本文采用文献 [12] 中的方法建

立机器人的基坐标系,测量数据在SA软件中处理。在建立坐标的过程中,由于拟合误差和测量误差的存在,使得所建立的坐标系与实际的机器人基坐标系存在偏差。然而,坐标系的偏差不会对机器人的误差补偿有影响,因为采样点误差的测量和验证点误差的补偿均在同一坐标系进行。机器人关节光栅的安装如图2所示,机器人与靶球的相对位置如图3所示。

2 关节的闭环反馈

基于误差相似度的空间位置误差补偿方法不需要对光栅进行精确的标定,但需要将光栅读数和角度对应起来。将光栅的弧面视为圆弧面并且圆心与旋转中心重合,由于机器人每次回HOME不在同一个位置,所以关节起点选取机器人回HOME区间中的任意数字;之后,控制关节每旋转 1° 记录光栅的读数,共旋转60次,取平均值即为关节每旋转 1° 对应光栅读数的变化量,由此可以建立关节转角与光栅读数的关系,其他

关节光栅标定的方法相同。需要说明的是,上述方法并不能精确标定光栅,其目的就是为了建立光栅反馈数值与角度的对应关系。标定的精度对误差的补偿没有影响,因为采样点误差的采集和验证点误差的补偿均在相同标定的光栅反馈下进行。

直接修正各个关节的位置到目标值会使过程中的末端位置无法预测,可能会造成机器人末端与工装发生干涉,所以本文先将目标位置发送给机器人;机器人到位后,通过建立的误差估计模型估计出机器人在当前位姿下的定位误差;然后通过误差映射模型将笛卡尔空间的位置误差转换成前3个关节的角度误差;最终通过关节的反馈将误差补偿掉。此外,考虑到一个周期 T 的修正量过大会导致机器人严重振动,本文将关节的反馈补偿分为粗补偿和精补偿两个阶段。

粗补偿时给每个关节 $0.003^\circ/T$ 的修正量,当检测到关节的目标值与实际值相差小于 0.01° 时,自动进

入精补偿的阶段,精补偿采用的PD控制模型,经过参数整定后,比例系数 $k_p=0.05$,微分系数 $k_d=0.05$,通过试验发现,当各个关节的比例和微分系数相同时,关节的闭环反馈能达到一个满足要求的定位精度,为了控制方便,将各关节的比例和微分设定相同。随机选择一个目标姿态下关节的闭环反馈如图4所示。

图4中 A_1 、 A_2 和 A_3 分别为机器人第1、第2和第3关节,可以看出,时间为1s的时候,各个关节趋于稳定并且稳态误差小于 0.0005° 。

3 基于关节反馈的精度补偿

本试验在机器人的运动范围 $500\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 800\text{mm}$ 的立方体空间中且机器人末端姿态 $A, B, C \in (-15^\circ, 15^\circ)$ 的区域内,随机生成200个采样点和100个验证点,200个采样点用于生成机器人的误差估计模型,100个验证点用于验证补偿方法的有效性。本文通过激光跟踪仪测得无补偿、误差相似性补偿和基于关节反馈的误差相似性补偿这3种情况下机器人的定位误差,如图5所示。试验数据统计如表1所示,绝对定位误差为误差范数。从试验数据中可以得到采用基于关节反馈的补偿方法后,验证点的位置误差得到有效的改善,其中验证点的平均误差为 0.077mm ,最大误差为 0.167mm ,相比于无补偿和基于误差相似度的补偿模型,最大误差分别降低了85.16%和56.28%,可以证明基于关节反馈的误差补偿方法是有效的。

结论

(1) 通过光栅反馈可以使关节达到一个很高的重复定位精度,分析关节角度误差时,误差源得到了简化。关节的角度误差只与光栅的标定误差和温度有关,温度使光栅发生热胀冷缩。

(2) 在机器人的关节处加光栅的方法能有效提高机器人的绝对定



图2 机器人关节光栅的安装
Fig.2 Installation of robot joint grating



图3 激光跟踪仪和靶球的相对位置
Fig.3 Laser tracker and SMR (Spherically Mounted Reflector)

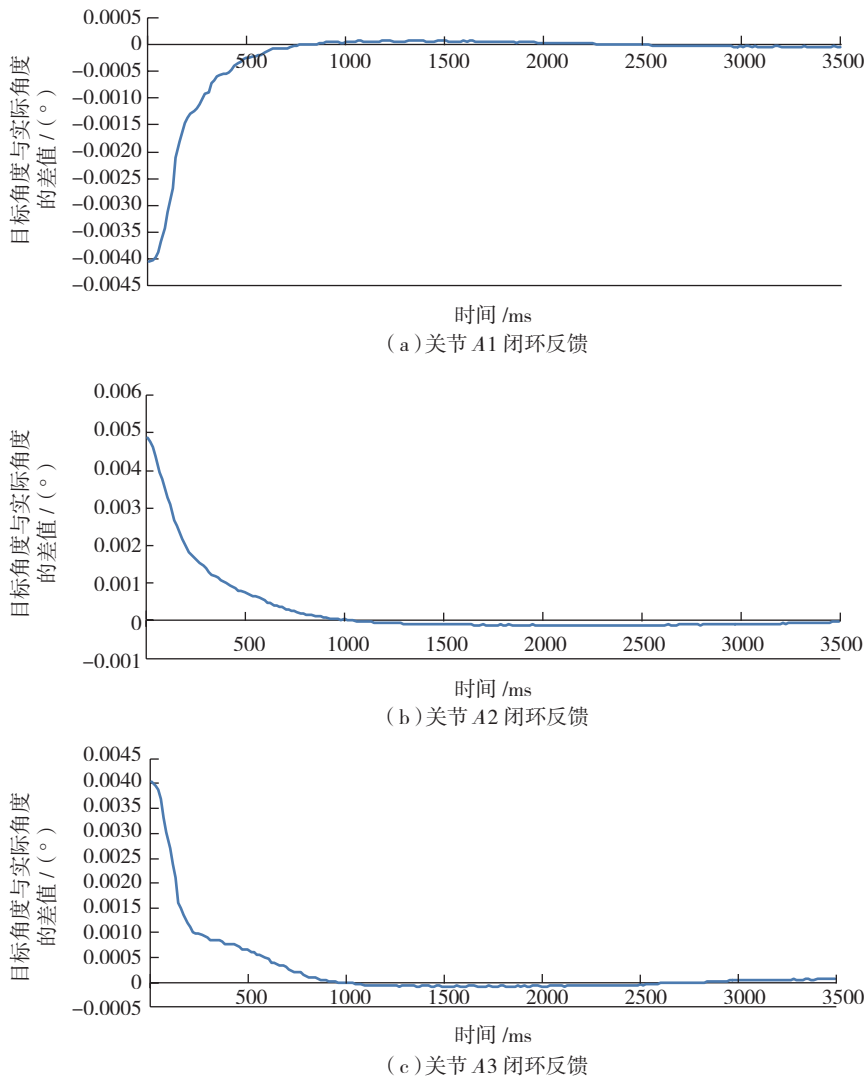


图4 关节的闭环反馈

Fig.4 Closed-loop feedback of joints

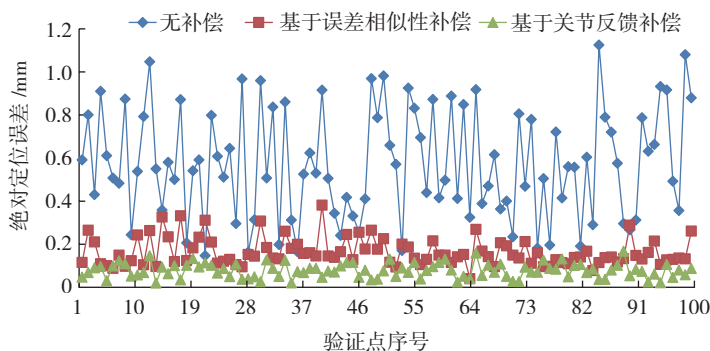


图5 绝对定位误差折线图

Fig.5 Line chart of absolute position error

表1 试验数据统计

类型	无补偿	基于误差相似度的补偿	基于关节反馈的补偿
误差范围/mm	[0.147,1.125]	[0.040,0.382]	[0.020,0.167]
平均值/mm	0.572	0.164	0.077

位精度。对于 KUKA KR210 机器人,最大的绝对定位误差能降到 0.2mm 以下。

(3) 机器人是强耦合、非线性的系统,用单一的 PD 参数无法控制关节达到一个稳定的稳态误差,对关节在不同姿态下的控制还需要深入的研究。

(4) 在讨论关节反馈下,位置误差在关节空间具有相似性时,对机器人的奇异位姿和构型还没有做深入的研究。此外,本文只有前 3 关节安装有光栅,无法消除机器人后 3 个关节定位误差的影响,使得机器人的定位精度无法进一步提高。

参考文献

[1] TIAN W, ZHOU Z, LIAO W. Analysis and investigation of a rivet feeding tube in an aircraft automatic drilling and riveting system[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(5-8): 973-983.

[2] 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.

[3] RATHJEN S, RICHARDSON C. High path accuracy, high process force articulated robot[C]// SAE 2013 AeroTech Congress and Exhibition. Montreal: SAE International, 2013: 2291-2295.

[4] 彭商贤,方浩天,张平. 装配机器人高精度定位补偿系统[J]. 机器人, 1992, 14(3): 11-16.

PENG Shangxian, FANG Haotian, ZHANG Ping. High precision system with positioning compensation for assembly robot[J]. Robot, 1992, 14(3): 11-16.

[5] VEITSCHEGGER W K, WU C H. Robot calibration and compensation[J]. IEEE Journal on Robotics & Automation, 1988, 4(6): 643-656.

[6] JUDD R P, KNASINSKI A B. A technique to calibrate industrial robots with experimental verification[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1990, 6(1): 20-30.

[7] RENDERS J M, ROSSIGNOL E, BECQUET M, et al. Kinematic calibration and geometrical parameter identification for robots[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, (下转第 72 页)