DOI:10.3969/j.issn.1001 -4551.2018.06.021

# 基于激光跟踪仪点位测量的工业机器人位置稳定时间测量与分析*

林家春[1,2],朱敏杰[1,2],李 睿[1,2],李梦玮[3]
(1.北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院,北京 100124;
2.北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心(北京工业大学),北京 100124;
3.工业和信息化部 计算机与微电子发展研究中心(中国软件测评中心),北京 100044)

**摘要**:针对工业机器人在精密加工、装配、测量中稳定到达指定位置的评价问题,对工业机器人位置稳定时间的测量进行了研究。提出了激光跟踪仪点位测量来获取位置稳定时间的方法,利用线性插值法对数据进行了分析和处理,得到了准确位置稳定时间;利用激光跟踪仪在史陶比尔 TX200 工业机器人上分别在 100%、50%、10% 速度下进行了位置稳定时间的测量,并利用线性插值法对数据进行了分析和处理。研究结果表明:工业机器人在 100% 速度下的位置稳定时间为 0.555 7 s,在 50% 速度及以下处于过阻尼状态,不存在位置稳定时间,这对于在精密加工、装配、测量中的工业机器人在不同速度下提高工作准确度和效率方面具有重要作用。

**关键词**:工业机器人;激光跟踪仪;位置稳定时间;线性插值法
**中图分类号**:TP242 **文献标志码**:A **文章编号**:1001 -4551(2018)06 -0653 -05

# Position stabilization time measurement and analysis of industrial robots based on the point position measurement of a laser tracker

LIN Jia-chun[1,2], ZHU Min-jie[1,2], LI Rui[1,2], LI Meng-wei[3]
(1. School of Mechanical Engineering and Applied Electronics, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments (Beijing University of Technology), Beijing 100124, China; 3. Research Center for the Development of Computer and Microelectronics(China Software Evaluation Center), Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100044, China)

**Abstract**: In order to evaluate how quickly an industrial robot can stop at a given position in precision machining, assembling and measurement, the position stabilization time measurement method was investigated. A method using a laser tracker to measure a series of points, and thus to acquire the position stabilization time was proposed. The linear interpolation method was adopted to get an accurate result. The data points for calculating the position stabilization time of a TX200 industrial robot from Stäubli was measured using a laser tracker under the 100%, 50% and 10% of the robot full speed. Then the results of position stabilization time were got using the proposed data processing method. The results show that the position stabilization time of the robot tested under 100% of its full speed is 0.555 7 s. When the speed of the robot is under 50% of its full speed, no stabilization time exits for the robot is working under damping state. This point is of vital importance in promoting the accuracy and efficiency of a robot in precision machining, assembling and measurement.

**Key words**: industrial robot; laser tracker; position stabilization time; linear interpolation

**收稿日期**:2018 -01 -31
**基金项目**:北京市科技计划项目(Z161100001516003)
**作者简介**:林家春(1978 -),男,四川南充人,博士,副教授,主要从事精密测量技术与仪器方面的研究。E-mail: linjc@bjut.edu.cn

## 0 引 言

近年来,我国工业机器人产业发展迅速,2015 年我国工业机器人销售 6.7 万台,连续四年世界第一[1]。运动性能是工业机器人的关键指标,机器人运动性能测试具有巨大的市场需求。

国标中提供了工业机器人位置稳定时间测试标准[2],目前有多种测试方法,比如拉线式位移传感器测试法[3]、相机跟踪测试法[4]、超声波测试法[5]、激光跟踪仪测试法等[6-7]。美国 Dynalog 公司通过将拉线式位移传感器挂接到机器人末端,通过位移的变化计算出位置稳定时间值,但精度低;加拿大 NDI 公司和尼康公司采用相机跟踪测试法,通过双目视觉记录图像数据,通过特征点的识别分析从而计算位置稳定时间,由于存在视觉误差和识别误差,导致该方法精度较低,分析数据量大;Leica 绝对激光跟踪仪利用激光进行精确的测量和检测,其测量范围可以包容直径达 160 m 的球形测量空间,通过跟踪一个带镜面的小球来测得物体的三维坐标,具有测量精度高、范围大和携带方便等特点,在国家机器人评定中心和各省级质检计量单位对机器人性能测试系统中应用较多。

本文将采用 Lecia 激光跟踪仪连续测量模式对工业机器人进行位置稳定时间性能指标测试,采用线性插值法对数据进行分析和处理,以得到准确位置稳定时间值。

## 1 激光跟踪仪点位测量工业机器人位置稳定时间原理和方法

位置稳定时间是用于衡量机器人停止在实到位姿快慢程度的性能。工业机器人位置稳定时间图如图 1 所示(图中虚线表示机器人处于过阻尼状态)。

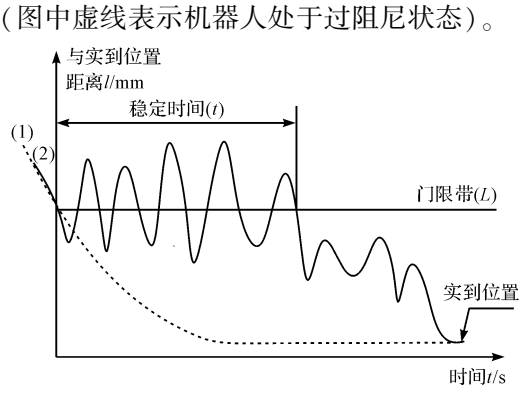



图 1 位置稳定时间

激光跟踪仪测量系统主要由激光跟踪仪、控制器、计算机及测量软件构成。跟踪仪和控制器完成测量及数据的发送接收,计算机和测量软件完成对激光跟踪仪的操作控制和数据处理,其工作模式有单点测量模式、稳定点测量模式、双面测量模式、空间扫描测量模式以及连续测量模式等。本文采用连续测量模式(指在接收到测量指令后按照设定的采样频率等间隔采集一系列的点,直到接收到停止测量指令后测量停止),采样频率设置为 $f=100$ Hz,则采样间隔为 0.01 s。

位置稳定时间测量方法如下:假设工业机器人理论位值转换到激光跟踪仪坐标系下的坐标位置为 $P_0(x,y,z)$,在机器人向目标位置 $P_0$ 接近的过程中,从某个时刻开始利用激光跟踪仪对工业机器人的实际坐标进行采样,共测得 $n$ 个点,记为 $P_i(x_i,y_i,z_i)(i=1,2\cdots n)$,那么在激光跟踪仪坐标系下,激光跟踪仪测得的位置坐标与工业机器人理论位置的距离为:

$$l_i=\sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2+(z_i-z)^2}\quad(i=1,2\cdots n)\tag{1}$$

式中:$x_i,y_i,z_i$— 激光跟踪仪测得点的三维坐标;$x,y,z$— 理论点的三维坐标。

设门限带为 $L$,测得的实际位置坐标中存在顺序的两个实际坐标位置 $P_a$ 和 $P_b$,其中 $a<b$。当 $i\leqslant a$ 时,所有位置点满足 $l_i\geqslant L$;当 $i\geqslant b$ 时,所有位置点满足 $l_i\leqslant L$,则位置稳定时间为:

$$t=\frac{b-a}{f}\tag{2}$$

式中:$a,b$— 激光跟踪仪测得的点;$f$— 激光跟踪仪采样频率。

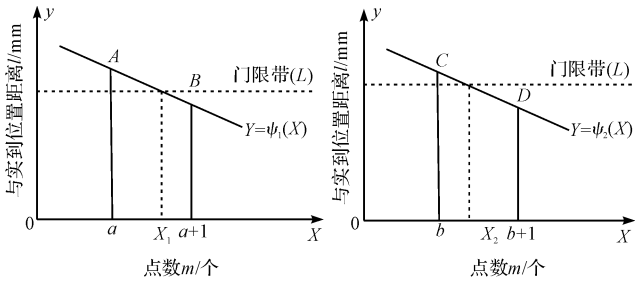
当 $P_a$ 和 $P_b$ 的位置刚好位于门限带之上时,位置稳定时间的计算不存在误差。但实际采样过程中,$P_a$ 和 $P_b$ 的位置一般不会刚好位于门限带之上,这时就需要用线性差值的方法估算该时间点。第一次进入的时间点用 $P_{a-1}$ 和 $P_a$ 确定,最后一次出门限带的时间用 $P_b$ 和 $P_{b+1}$ 确定。

## 2 数据处理和分析

为了精确地获得位置稳定时间值,本研究采用线性插值法对数据进行处理和分析[8]。线性插值图如图 2 所示。

设函数 $y=f(x)$ 在位置点 $P_a,P_{a+1}$ 上的值分别为 $y_0,y_1$,经过 $A,B$ 两点的直线为:

$$y=\varphi_1(x)=a_0-a_1x\tag{3}$$




(a) 第一次进入门限带　　(b) 最后一次出门限带

图 2　线性插值图

式中:$\varphi_1(x)$— 直线 $AB$ 方程函数。

满足:

$$\varphi_1(P_a) = y_0, \varphi_1(P_{a+1}) = y_1 \tag{4}$$

式中:$y_0$—$AB$ 直线在 $P_a$ 点的值;$y_1$—$AB$ 直线在 $P_{a+1}$ 点的值。

$$y = \varphi_1(x) = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{P_{a+1} - P_a}(x - P_a) \tag{5}$$

式中:$P_a$—$a$ 处的位置点;$P_{a+1}$—$a+1$ 处的位置点。

$$\varphi_1(x) = \frac{x - P_{a+1}}{P_a - P_{a+1}}y_0 + \frac{x - P_a}{P_{a+1} - P_a}y_1 \tag{6}$$

本研究令 $\varphi_1(x)$ 等于设定的门限带值,求出工业机器人第一次进入门限带的位置点 $x_1$。同理,利用插值方法求出机器人第一次超出门限带的位置点 $x_2$,该点由 $P_b$ 和 $P_{b+1}$ 确定,那么工业机器人的位置稳定时间为第一次超出门限带的时间与第一次进入门限带的时间之差。位置稳定时间为:

$$T = \frac{x_2 - x_1}{f} \tag{7}$$

式中:$x_1$— 第一次进入门限带时求得的位置点;$x_2$— 最后一次出门限带时求得的位置点;$f$— 激光跟踪仪采样频率。

# 3　实　验

## 3.1　机器人测试前提条件

试验之前,工业机器人应装配完毕,所有必要的校准操作应圆满完成,测试的环境温度为 20 ℃。试验温度应保持在 ±2 ℃之内。试验之前应对工业机器人进行适当的预热,并将其置于试验环境中 24 h[9-10]。

## 3.2　测试机器人简介

实验采用史陶比尔 TX200 工业机器人如图 3 所示。它采用 CSC8 HP 控制器,可重复精度为 ±0.06 mm,机身自重为 1 000 kg,工作行程可达到 2 194 mm,额定负载为 100 kg,最大负载为 130 kg。

图 3　史陶比尔 TX200 工业机器人

## 3.3　测试平面和测试点的选取

根据国家标准 GB/T 12642-2013《工业机器人性能规范及其试验方法》的规定,该实验选取测试平面为边长 500 mm 的正方形,即选取测试四边体为长方体。在机器人基础坐标系下,各指令位置坐标(单位:mm)分别为 $P_1$(1 187.180 0, 0, 812.820 0);$P_2$(1 363.958 4, 250.000 0, 989.598 4);$P_3$(1 363.958 4, −250.000 0, 989.598 4);$P_4$(1 010.401 6, −250.000 0, 636.041 6);$P_5$(1 010.401 6, 250.000 0, 636.041 6)。在 Matlab 中经过验证,这 5 个点是共面的。该实验所要测试的点为 $P_1$点。

## 3.4　获取实验数据

试验现场图形如图 4 所示。

图 4　现场实验图形

该实验在 10% 额定负载(10 kg),100%,50%,10% 速度下进行测试,环境温度为 20 ℃左右,循环次数为 3 次,最终结果为 3 次循环的平均值,工业机器人的运动轨迹为 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_1$。测试 $P_1$ 点稳定所需要的时间。

实验过程中,激光跟踪仪靶镜座固定于工业机器人机械接口的末端中心位置,在示教器中手动输入 5 个点位置,通过 VAL3 语言编程,使工业机器人按照预定的轨迹连续运动,激光跟踪仪采用连续测量的模式采集 $P_1$ 点到达稳定时的一系列的点,获取实验数据[11]。

该实验所采用的门限带值为实验所用工业机器人位置重复性值 0.018 mm,所有参与计算的数值均以激光跟踪仪为坐标系,$P_1$ 点在工业机器人基础坐标系下的理论值(1 187.180 0,0,812.820 0)转化为激光跟踪仪坐标系下的理论值为(3 833.933 9, -251.205 9, 325.889 7)。实验共进行 3 次测试,每次测量取 200 个采样点。100% 速度下单次循环部分测量空间点如表 1 所示。

**表 1 100% 速度下单次循环测量空间点**

| 测量点 | $x$/mm | $y$/mm | $z$/mm |
|---|---|---|---|
| 1 | 3 833.760 2 | -251.172 0 | 326.045 4 |
| 2 | 3 833.805 2 | -251.194 9 | 326.050 3 |
| 3 | 3 833.841 4 | -251.195 9 | 326.054 3 |
| 4 | 3 833.865 0 | -251.184 7 | 326.053 0 |
| 5 | 3 833.880 8 | -251.164 4 | 326.037 1 |
| 6 | 3 833.890 1 | -251.137 4 | 326.026 8 |
| 7 | 3 833.896 1 | -251.104 5 | 326.025 5 |
| 8 | 3 833.899 9 | -251.083 8 | 326.026 3 |
| 9 | 3 833.898 0 | -251.080 1 | 326.031 7 |
| 10 | 3 833.890 5 | -251.092 8 | 326.032 5 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 199 | 3 833.936 6 | -251.199 1 | 325.888 5 |
| 200 | 3 833.935 6 | -251.201 2 | 325.887 5 |

### 3.5 实验结果与分析

本次实验采样频率为 100 Hz,即 0.01 s 测一个点,根据位置稳定时间的定义,位置稳定时间为机器人第一次进入门限带的瞬间到不再超出门限带的瞬间所经历的时间。100% 速度下 3 次循环位置稳定时间如图 5 所示(横轴代表点数,纵轴表示与实到位置的距离)。

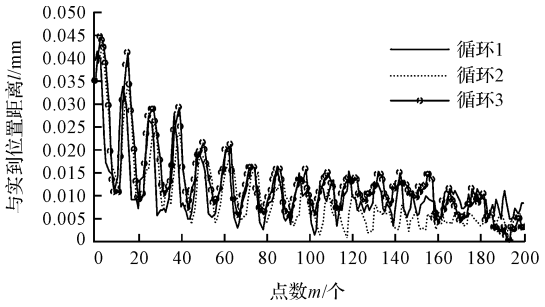



图 5 100% 速度下 3 次循环位置稳定时间

当阻尼系数 $\xi>1$ 时的解为一对互异实根时,此时振动系统为过阻尼状态[12-13]。50% 和 10% 速度下的 3 次循环分别如图(6,7)所示。

通过分析,在该两种情况下工业机器人处于过阻尼状态,不存在位置稳定时间。

本研究通过线性插值法得到工业机器人 100% 速度下第一次进入门限带的时间点,中间点所用时间,最后一次超出门限带的时间点,3 部分时间之和为位置稳定时间,3 次循环得到的位置稳定时间如表 2 所示。

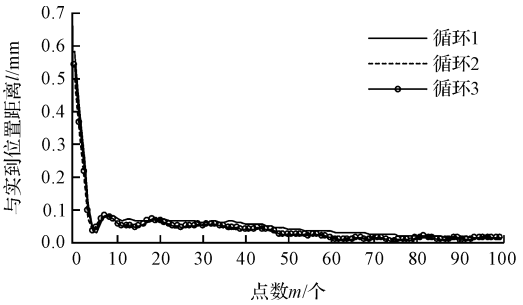



图 6 50% 速度下 3 次循环位置稳定时间

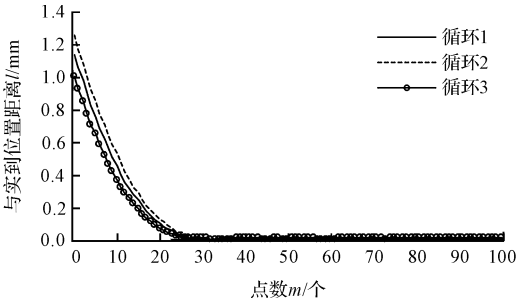



图 7 10% 速度下 3 次循环位置稳定时间

**表 2 位置稳定时间**

| | 循环 1 | 循环 2 | 循环 3 |
|---|---|---|---|
| 第一次进入门限带的时间 $t_1$/s | 0.058 6 | 0.081 7 | 0.082 3 |
| 最后一次出门限带的时间 $t_2$/s | 0.612 1 | 0.632 3 | 0.645 3 |
| 位置稳定时间 $t$/s | 0.553 5 | 0.550 6 | 0.563 0 |

3 次循环的标准差为 0.003 1,平均值为 0.555 7 s。

## 4 结束语

本文采用激光跟踪系统的点位测试方法对工业机器人位置稳定时间进行测量,通过线性插值法分析和处理获得准确位置稳定时间值。该方法可行有效并且准确度高,工业机器人在 100% 速度下的位置稳定时间为 0.555 7 s,在 50% 和 10% 速度下处于过阻尼状态,不存在位置稳定时间,这对于高精细作业中的工业机器人在不同速度下提高工作准确度和效率具有重要作用。

在下一阶段,本研究将通过改变机器人的速度来确定机器人恰好处于过阻尼状态下的速度临界值,进一步提高机器人在精密加工、装配测量等作业中的效率和准确度。

**参考文献(References):**

[1] 贺惠农,黄连生. 工业机器人整机性能测试进展[J]. 中国计量大学学报,2017,28(2):134-140.

[2] GB/T12642-2013. 工业机器人性能规范及其试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
[3] 罗振军,孙思嘉. 基于拉线位移传感器的机器人标定应用研究[J]. 航空制造技术,2017,528(9):43-49.
[4] 王宝磊,贾庆伟,张敬良. 一种基于单目相机机器视觉的工业机器人性能检测系统[P]. 中国:106826922,2017-06-13.
[5] 翟国富,刘茂恺. 一种实时高精度的机器人用超声波测距处理方法[J]. 应用声学,1996,15(1):35-38.
[6] 于海莲,夏仰球,杨川贵. 激光跟踪仪测量工业机器人位置距离准确度的不确定度研究[J]. 机床与液压,2017,45(11):48-50.
[7] TEOH P L, SHIRINZADEH B, FOONG C W, et al. The measurement uncertainties in the Laser interferometry-based sensin g and tracking technique[J]. **Measurement**,2002,32(2):135-150.
[8] 丁　泉,李　帅. 智能变电站重采样应用研究及其线性插值法误差分析[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(23):132-136.
[9] 王智源,朱　刚. 测定工业机器人位置特性的误差不确定度分析[J]. 电子测量技术,2016,39(9):8-11.
[10] 付京逊. 机器人学[M]. 北京:中国科学技术出版社,1989.
[11] LIGHTCAP C, HAMNER S, SCHMITZ T, et al. Improved po-sitioning accuracy of the PA10-6CE robot with geometric and flexibility calibration[J]. **IEEE Transactions on Robotics**,2008,24(2):452-456.
[12] 徐忠岳. 阻尼振动与受迫振动定量演示仪[J]. 教学仪器与实验,2012,10(2):39-42.
[13] 刘长江. 建筑膜结构非线性振动及其预张力测量理论和试验研究[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2012.

[**编辑**:李　辉]

**本文引用格式**:
林家春,朱敏杰,李　睿,等. 基于激光跟踪仪点位测量的工业机器人位置稳定时间测量与分析[J]. 机电工程,2018,35(6):653 - 657.
LIN Jia-chun, ZHU Min-jie, LI Rui, et al. Position stabilization time measurement and analysis of industrial robots based on the point position measurement of a laser tracker[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(6):653 - 657.　《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

(上接第 648 页)

## 参考文献(References):

[1] 秦严严,王　昊,王　炜,等. 自适应巡航控制车辆跟驰模型综述[J]. 交通运输工程学报,2017,17(3):121-130.
[2] RUBIN D, AROGETI S A. Vehicle yaw stability control usin g active limited-slip differential via model predictive control methods[J]. **Vehicle System Dynamics**,2015,53(1):1-16.
[3] 胡满江,徐　彪,秦洪懋,等. 基于 MPC 的多车纵向协同避撞算法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2017,57(8):1-17.
[4] BASRAH M S, SIAMPIS E, VELENIS E, et al. Wheel slip control with torque blending usin g linear and nonlinear model predictive control[J]. **Vehicle System Dynamics**,2017(1):1-21.
[5] MESBAH A. Stochastic model predictive control: an overview and perspectives for future research[J]. **IEEE Control Systems**,2016,36(6):30-44.
[6] SUN C, HU X, MOURA S J, et al. Velocity predictors for predictive energy management in hybrid electric vehicles[J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**,2015,23(3):1197-1204.
[7] 罗莉华. 车辆自适应巡航系统的控制策略研究[M]. 上海:上海交通大学出版社,2013.
[8] RAJAMANI R. Vehicle Dynamics and Control[M]. New York: Springer US,2006.
[9] 孙荣恒. 应用数理统计[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2014.
[10] 邹　涛,丁宝苍,张端. 模型预测控制工程应用导论[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
[11] KOUVARITAKIS B, CANNON M, MUÑOZ-CARPINTERO D. Efficient prediction strategies for disturbance compensation in stochastic MPC[J]. **International Journal of Systems Science**,2013,44(7):1344-1353.
[12] LUO Li-hua, LIU Hong, LI Ping, et al. Model predictive control for adaptive cruise control with multi-objectives: comfort, fuel-economy, safety and car-following[J]. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**,2010,11(3):191-201.
[13] YI K, CHUNG J. Nonlinear brake control for vehicle CW/CA systems[J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**,2002,6(1):17-25.
[14] 孙　涛,夏　维,李道飞. 基于模型预测控制的协同式自适应巡航控制系统[J]. 中国机械工程,2017,28(4):486-491.

[**编辑**:李　辉]