

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.06.024

机器人直线运动位置轨迹精度评估方法研究*

郭 军,王炳荣

(北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心,北京 100124)

摘要:针对国家标准 GB/T 12642-2013《工业机器人性能规范及其试验方法》中没有规定计算位置轨迹准确度时构造多少正交平面和应该放置它们的位置问题,以及测量点与实际点的映射等问题,采用激光跟踪系统,对史陶比尔 TX200 工业机器人在 10% 负载、10% 运动速度下直线运动轨迹位置误差进行了测量计算。据此提出了 3 种直线轨迹位置误差计算方法,用于评价工业机器人直线运动轨迹位置精度性能,并对后期机器人位置误差补偿提供了有效的理论依据。研究结果表明:3 种方法都可以比较精确地对直线运动位置误差进行计算评估。

关键词:直线轨迹位置;激光跟踪;位置精度;误差评估

中图分类号:TP242

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)06-0724-05

Method for estimating the position accuracy of linear motion of robot

GUO Jun, WANG Bing-rong

(School of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at the national standard GB / T 12642-2013 "industrial robot performance specifications and test methods", there is no provision for how to construct the orthogonal planes and the position where they should be placed when calculating the accuracy of the positional trajectory and mapping of measurement points to actual points, etc., the linear trajectory position error of the industrial robot Stäubli TX200 under 10% load and 10% moving speed was measured and calculated by using the laser tracking system. Three calculation methods for linear trajectory position error were proposed to evaluate the positional accuracy of the linear motion trajectory of the robot, and a theoretical basis for the position error compensation of the late robot was provided. The results indicate that the three methods can calculate and evaluate the linear position error accurately.

Key words: linear track position; laser tracking; position accuracy; error evaluation

0 引 言

随着我国工业机器人产业的发展,对机器人轨迹控制精度提出了更高的要求^[1]。

对工业机器人性能特征的研究测量具有非常重要的价值。这些性能标准由国家和国际工业标准定义,也描述了评估它们的方法。然而,将这些标准和方法直接应用于任何机器人可能导致机器人精确度的错误

识别。李志杰等^[2]应用严密的数学理论和最小二乘误差理论,推导出了用于评价机器人直线运动轨迹成形精度的空间最小二乘直线的通用求解方法。该方法具有求解精度高、算法简便、通用性较强的优点;蔡广宇等^[3]提出了空间直线拟合的方法对机器人直线轨迹进行了拟合,通过分析误差分布情况为机器人的位姿误差补偿及精度优化设计提供了依据;瑞典 Selspot 公司生产的双摄像机测试系统采用了“替代”求解方

收稿日期:2019-04-22

基金项目:北京市科技计划项目(Z161100001516003)

作者简介:郭军(1993-),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事精密测量技术与仪器方面的研究。E-mail:gj18800131278@163.com

法,该方法原理是在对机器人进行多次重复测量时,选用其任意一次运动轨迹上的两点所确定的空间直线来代替所要求的空间最小二乘直线;陈凯强等^[4]提出了一种基于 NURBS 曲线的插值方法和插补的原理,通过 MATLAB 仿真对该方法进行了测试,显著降低了插值误差和计算量;JOHNEN B 等^[5]提出了动态时间扭曲(DTW)作为工业机器人运动分析的方法,提出了 DTW 算法的一种新变体,它允许内插轨迹点的映射,而不会显著增加计算复杂度。

本文采用激光跟踪仪连续测量模式对工业机器人进行直线位置准确度指标测试^[6],对机器人直线运动轨迹精度进行评估。

1 位置轨迹准确度测量方法与原理

国家标准 GB/T 12642—2013《工业机器人性能规范及其试验方法》规定,位置轨迹准确度是指指令轨迹上 m 个位置与 n 次测量的集群中心点之间的最大偏差^[8]。

轨迹准确度如图 1 所示。

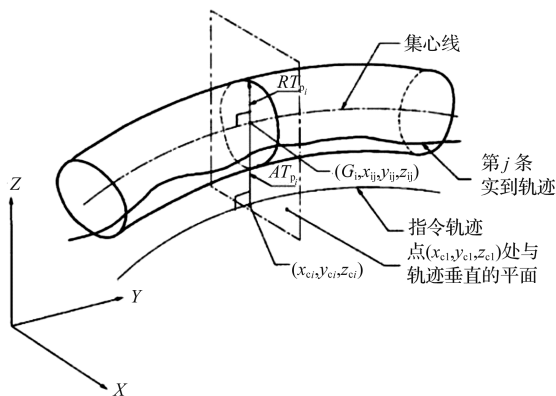


图1 GB/T 12642—2013 规定轨迹准确度

位置轨迹准确度的计算方法如下:

$$AT_p = \max_{i=1,2,\dots,m} \sqrt{(\bar{x}_i - x_{ci})^2 + (\bar{y}_i - y_{ci})^2 + (\bar{z}_i - z_{ci})^2} \quad (1)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad \bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \bar{z}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (2)$$

式中: x_{ci}, y_{ci}, z_{ci} —每个测试点的理论位置坐标; x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} —第 j 条实到轨迹与第 i 个正交平面交点的坐标。

根据指令轨迹形状与试验速度,笔者沿指令轨迹选择一些计算点及相应的正交平面。

但是标准中没有规定应该构造多少正交平面以及应该放置它们的位置,所以给轨迹的精度评估带来了一定的不确定性。本文采用以下 3 种方法对直线轨迹位置准确度进行近似计算。

当采样频率较慢、采样点数较少时,采用三次样条

插值方法,对测量数据进行处理,可模拟计算出更多实际点的位置,得到更准确的实际轨迹位置:

(1) 采用点到直线距离近似计算直线轨迹位置误差。假设机器人在实际执行直线路径任务过程中,起点为 $P_0(x_0, y_0, z_0)$, 终点为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 每个时刻到达的位置为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$, 可以通过激光跟踪仪测量得到该位置坐标值。

以该位置在理论直线路径上的垂足点 $P_{0i}(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})$ 作为机器人实际执行直线路径任务过程中每个时刻的理论位置,则 $|P_i P_{0i}|$ 为该点近似轨迹位置误差,点到直线距离计算轨迹准确度如图 2 所示。

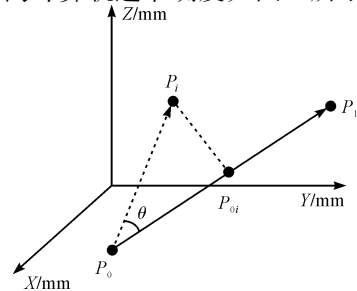


图2 点到直线距离计算轨迹准确度

理论直线方程如下:

$$\frac{x - x_0}{m} = \frac{y - y_0}{n} = \frac{z - z_0}{p} = t \quad (3)$$

式中: m, n, p —直线的一组方向数。

$$\begin{aligned} m &= x_1 - x_0 \\ n &= y_1 - y_0 \\ p &= z_1 - z_0 \end{aligned} \quad (4)$$

转换成参数方程为:

$$\begin{aligned} x_{0i} &= mt_i + x_0 \\ y_{0i} &= nt_i + y_0 \\ z_{0i} &= pt_i + z_0 \end{aligned} \quad (5)$$

由于 $P_i P_{0i} \perp \overrightarrow{P_0 P_1}$, $\overrightarrow{P_i P_{0i}} \cdot \overrightarrow{P_0 P_1} = 0$, 如下式所示:

$$\begin{aligned} m(x_i - x_{0i}) + n(y_i - y_{0i}) + p(z_i - z_{0i}) &= 0 \\ m(x_i - mt_i - x_0) + n(y_i - nt_i - y_0) + \\ p(z_i - pt_i - z_0) &= 0 \end{aligned}$$

$$t_i = \frac{m(x_i - x_0) + n(y_i - y_0) + p(z_i - z_0)}{m^2 + n^2 + p^2} \quad (6)$$

每个测量点在理论直线上对应的位置由下式计算:

$$\begin{aligned} x_{0i} &= m \frac{m(x_i - x_0) + n(y_i - y_0) + p(z_i - z_0)}{m^2 + n^2 + p^2} + x_0 \\ y_{0i} &= n \frac{m(x_i - x_0) + n(y_i - y_0) + p(z_i - z_0)}{m^2 + n^2 + p^2} + y_0 \\ z_{0i} &= p \frac{m(x_i - x_0) + n(y_i - y_0) + p(z_i - z_0)}{m^2 + n^2 + p^2} + z_0 \end{aligned} \quad (7)$$

则点到直线距离即位置轨迹误差为:

$$|P_i P_{0i}| = \sqrt{(x_i - x_{0i})^2 + (y_i - y_{0i})^2 + (z_i - z_{0i})^2} = \sqrt{\left(x_i - m \frac{m(x_i - x_0) + n(y_i - y_0) + p(z_i - z_0)}{m^2 + n^2 + p^2} - x_0\right)^2 + \left(y_i - n \frac{m(x_i - x_0) + n(y_i - y_0) + p(z_i - z_0)}{m^2 + n^2 + p^2} - y_0\right)^2 + \left(z_i - p \frac{m(x_i - x_0) + n(y_i - y_0) + p(z_i - z_0)}{m^2 + n^2 + p^2} - z_0\right)^2} \quad (8)$$

(2) 假设机器人在实际执行直线路径任务过程中,起点为 $P_0(x_0, y_0, z_0)$, 终点为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, 通过激光跟踪仪测量每个时刻到达的位置得到该位置坐标值。

利用三次样条插值方法对测量数据进行计算, 将 x 作为自变量, 将 y, z 看成 x 的函数, $y = y(x), z = z(x)$, 实际轨迹插值点记为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$, 利用分段线性插值方法对理论轨迹直线进行计算。

同样, 将 x 作为自变量, 将 y, z 看成 x 的函数, 理论直线轨迹插值点记为 $P_{0i}(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})$, 与实际轨迹插值点数一一对应, 近似计算直线轨迹位置误差, 如图 3 所示。

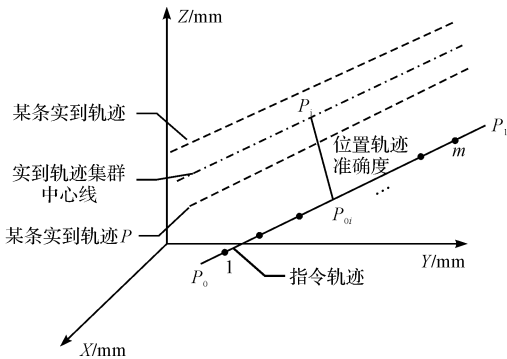


图 3 利用插值方法计算轨迹准确度

理论直线方程如下:

$$\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} = \frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{z - z_0}{z_1 - z_0} \quad (9)$$

将理论直线进行线性插值, 等间距分成 m 段, 则每两点之间的差值如下:

$$\begin{aligned} d_x &= \frac{\sqrt{(x_1 - x_0)^2}}{m} \\ d_y &= \frac{\sqrt{(y_1 - y_0)^2}}{n} \\ d_z &= \frac{\sqrt{(z_1 - z_0)^2}}{p} \end{aligned} \quad (10)$$

则插值计算后理论直线上的点如下:

$$P_{0i} = P_0(x_0, y_0, z_0) + (d_x, d_y, d_z)i =$$

$$(x_0 + d_x i, y_0 + d_y i, z_0 + d_z i) \quad (11)$$

轨迹位置误差为:

$$\begin{aligned} |P_i P_{0i}| &= |(x_0 + d_x i, y_0 + d_y i, z_0 + d_z i) - (x_i, y_i, z_i)| = \\ &= |(x_0 - x_i + d_x i, y_0 - y_i + d_y i, z_0 - z_i + d_z i)| = \\ &= \sqrt{(x_0 - x_i + d_x i)^2 + (y_0 - y_i + d_y i)^2 + (z_0 - z_i + d_z i)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

(3) 利用速度时间关系求解每个时刻对应理论位置点。假设机器人在实际执行直线路径任务过程中, 起点为 $P_0(x_0, y_0, z_0)$, 终点为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 每个时刻到达的位置为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$, 可以通过激光跟踪仪测量得到该位置坐标值。

利用速度时间关系计算轨迹准确度如图 4 所示。

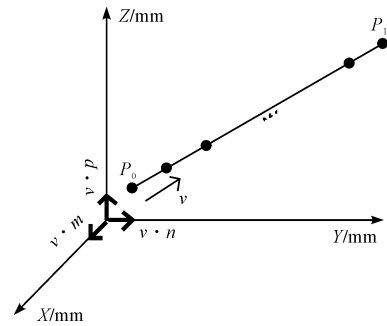


图 4 利用速度时间关系计算轨迹准确度

理论直线方程为:

$$\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} = \frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{z - z_0}{z_1 - z_0} \quad (13)$$

理论直线方向单位向量为 (m, n, p) , 可由下式计算:

$$\begin{aligned} m &= \frac{x_1 - x_0}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}} \\ n &= \frac{y_1 - y_0}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}} \\ p &= \frac{z_1 - z_0}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}} \end{aligned} \quad (14)$$

将测量数据进行等间距分段, 对每段直线进行相同的分析处理, 采样频率为 $t = 0.01$ s, 可根据下式求出每两点之间速度:

$$v_i = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}}{t} \quad (15)$$

将分段内的速度值进行最小二乘法拟合, 即:

$$v = v_0 + at \quad (16)$$

式中: v_0 —初始速度; a —加速度; t —运动时间。

将其近似看成沿理论直线方向的运动速度, 据此由下式求出分段内每个时刻在理论直线上对应位置为

$P_{0i}(x_{0i},y_{0i},z_{0i}):$

$$\begin{aligned}x_{0(i+1)} &= x_{0i} + vtm \\ y_{0(i+1)} &= y_{0i} + vtn \\ z_{0(i+1)} &= z_{0i} + vtp\end{aligned}\tag{17}$$

轨迹位置误差如下:

$|P_iP_{0i}|=|(x_{0i}+vtm-x_i,y_{0i}+vtn-y_i,z_{0i}+vtp-z_i)|=$

$$\sqrt{(x_{0i}+vtm-x_i)^2+(y_{0i}+vtn-y_i)^2+(z_{0i}+vtp-z_i)^2}\tag{18}$$

2 实验及结果分析

2.1 测试条件

首先笔者对工业机器人进行必要的校准操作;设定测试的环境温度为 20 ℃,试验温度应保持在 ± 2 ℃

之内,并将实验装置置于试验环境中 24 h^[9-11]。

该实验所要测试的直线为点 P2 ~ P4。实验在 10% 额定负载(10 kg)、10% 速度下进行测试,循环次数为 10 次,最终结果为 10 次循环的平均值。

2.2 实验结果

实验计算数值以激光跟踪仪为坐标系,P2 点在激光跟踪仪坐标系下的理论值为(4 823.453 181 mm,-3 317.412 862 mm,1 163.644 51 mm),P4 点在激光跟踪仪坐标系下的理论值为(5 017.637 83 mm,-3 689.241 917 mm,743.126 406 3 mm),激光跟踪仪采样频率为 100 Hz,即 $t=0.01\text{ s}$ 测一个点。

直线轨迹位置误差的 3 种计算方法结果如图 5 所示。

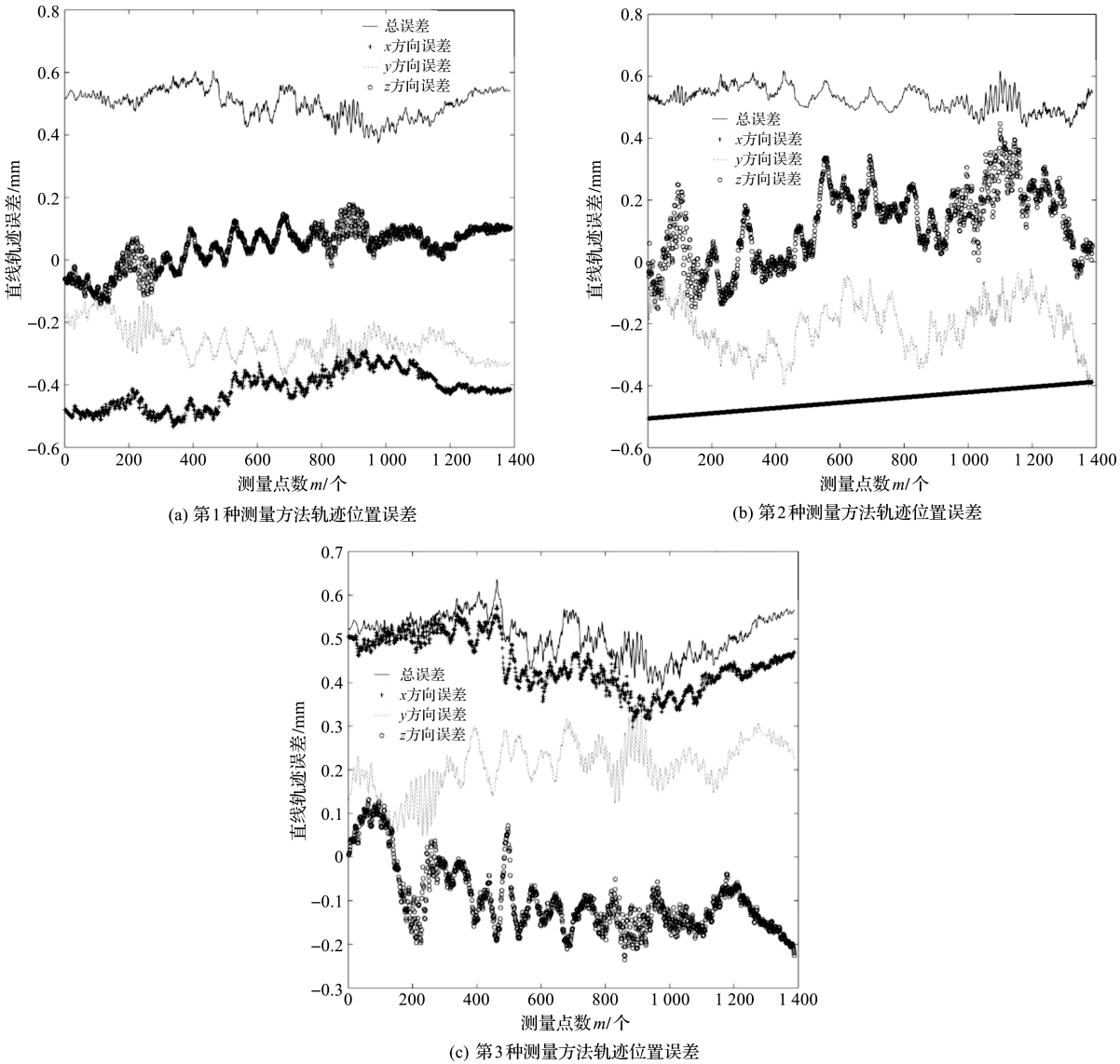


图5 3种测量方法直线轨迹误差测量

图 5(b)中,第 2 种测量方法将 x 作为自变量, y 、 z 作为 x 的函数,所以 x 方向的误差结果为一 条直线。

3 种测量方法的误差最大值、平均值、标准差如表 1 所示。

表 1 3 种测量方法的误差最大值、平均值、标准差

测量方法	轨迹误差最大值	平均值	标准差
	/mm	/mm	/mm
第 1 种测量方法	0.605 1	0.501 4	0.045 7
第 2 种测量方法	0.618 2	0.525 6	0.035 8
第 3 种测量方法	0.636 0	0.510 1	0.045 9

2.3 结果分析

由表 1 可看出,轨迹误差最大值最小为 0.605 1 mm,轨迹误差最大值最大为 0.636 0 mm;平均值最小为 0.501 4 mm,平均值最大为 0.525 6 mm;标准差最大为 0.045 9 mm,标准差最小为 0.035 8 mm,3 种计算方法各有优缺点。

从图 5 中可以看出,3 种计算方法整体上误差值变化有相同的趋势,误差变化幅度相似, x 方向误差值比较大, z 方向误差值比较小;3 种计算方法都可以比较精准地对工业机器人直线轨迹位置误差进行评估,可为机器人位置误差补偿提供理论依据。

3 结束语

本文采用激光跟踪系统对工业机器人直线轨迹误差进行了测量,通过最小二乘法 and 样条、线性插值法等 3 种计算方式对测量数据进行了计算。3 种方法都解决了国家标准中没有规定的应该构造多少正交平面以及应该放置它们的位置等问题。

此外,3 种计算方法都很好地对机器人直线轨迹位置误差进行了评估,对机器人的轨迹误差补偿提供了理论依据。

参考文献 (References):

[1] 周 济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程,2015,26(17):2273-2284.

[2] 李志杰,邓喜军,蔡鹤皋. 机器人直线运动轨迹成形精度的评价[J]. 计量学报,1996,17(3):229-231.

[3] 蔡广宇,崔士林. 弧焊机器人直线轨迹精度测试研究[J]. 计算机工程与应用,2010,46(1):48-50.

[4] ZHAO L, CHEN K Q, ZHANG Z Z. The research of high-precision interpolation for complex trajectory of SCARA robot based on NURBS[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering. Hefei:Applied Mechanics and Materials, 2011.

[5] JOHNEN B, KUHLINKOETTER B. A dynamic time warping algorithm for industrial robot motion analysis[C]. Proceedings of the 50th Annual Conference on Information Science and Systems. New York:Princeton University, 2016.

[6] SLAMANI M, NUBIOLA A, BONEV I. Assessment of the positioning performance of an industrial robot[J]. **Industrial Robot**, 2012,39(1):57-68.

[7] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 7 版. 北京:机械工业出版社,2015.

[8] 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.

[9] 王智源,朱 刚. 测定工业机器人位置特性的误差 uncertainty 分析[J]. 电子测量技术,2016,39(9):8-11.

[10] 陈光明,黄 旋. 基于高压水射流的船体清洗机器人关键技术分析[J]. 流体机械,2019,47(9):56-62.

[11] 付京逊. 机器人学[M]. 北京:中国科学技术出版社,1989.

[编辑:李 辉]

本文引用格式: