

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.004

可灵活配置的四站式拉线编码器机器人测量系统*

张得礼¹, 洪伟松², 潘国威¹, 朱 煜¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国工程物理研究院
机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:针对结构复杂的机器人,在其末端不安装位置传感器情况下分析其动力学性能的问题,研制出了一种可灵活配置的四站式拉线编码器机器人测量系统。提出了一种简单的四站式拉线编码器初始位置校准方法,该方法通过现场简单操作即可使用其粒子群算法迭代解算出4个站点之间的初始位置关系,实现了测量前基站位置的任意安放,提高了系统测量的效率;设计了一种灵活、轻巧的拉线导向结构,实现了拉线编码器的任意方向运动,从而实现了测量系统与机器人运动的随动,在不改变机器人原有结构和动力学特性的情况下,方便地获得了机器人的末端位置信息。研究结果表明:四站式拉线编码器初始位置校准方法计算精度高、速度快;测量系统配置灵活、轻便,测量效率高,测量精度能够满足工程的需要。

关键词:拉线编码器;初始位置校准;坐标变换

中图分类号:TH702;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)11-1249-06

Measurement system of robot based on arbitrary layout for four base stations of cable encoders

ZHANG De-li¹, HONG Wei-song², PAN Guo-wei¹, ZHU Yu¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to solve the problems of analyzing the dynamic performance of robot, whose structure is complex, without position sensors at its end effector, a simple calibration method of the initial location of the four base stations of cable encoders was proposed, simply operate to the cable-encoders, and the location of four base stations can be calculated by the particle swarm iteration algorithm in this method. The arbitrary layout of the base stations was ensured, so as to the efficiency of the measurement system was improved greatly. The arbitrary movement of the cable encoders to all directions can be obtained by the design of a flexible and lightweight cable guide structure, and the motion of the robot can be tracked, so the position of the end effector of the robot was conveniently obtained without changing the original structure and dynamic characteristics of the robot. The research results show that the initial position calibration method of the four base stations is high precision and fast. Measurement system is flexible, lightweight and high efficiency.

Key words: cable actuated position encoder; initial position referencing; coordinate transformation

0 引 言

机器人在各个行业的应用越来越广泛,如今机器人的应用已经由原来的人工示教大量地向离线编程转

变^[1-2]。人工示教是指机器人完成一个任务前,先由技术成熟的工人对要完成的工作进行示范,只要机器人的重复定位精度得到保证,机器人在接下来的重复作业中就能够完成任务。然而人工示教只适合大批量的

收稿日期:2017-06-03

基金项目:江苏省科技支撑计划资助项目(BY2014003-19)

作者简介:张得礼(1973-),男,安徽含山人,副教授,硕士生导师,主要从事数控和运动控制系统方面的研究。E-mail: nuaazdl@126.com

生产,在客户需求更加个性化的背景下,该方式不仅效率低下,而且成本高。离线编程只要通过相应的转换,将产品的数字化模型生成加工代码,机器人按照程序即可完成作业,这种方式避免了人工示教的环节,大大提高了生产效率。要实现机器人的离线编程,机器人的绝对定位精度必须得到保证,而正常机器人出厂时,厂家只给出机器人的重复定位精度指标,并未给出机器人的绝对定位精度指标。通常机器人可以达到较高的重复定位精度,Stäubli 公司生产的 R12 机器人的重复定位精度可以达到 $\pm 0.05\text{ mm}$ 。MOORING B^[3] 提出一台具有较高重复定位精度的机器人可以通过标定方法来提高它的绝对定位精度。一台经过标定的机器人是否能够满足现代生产的需求,需要专门的测量系统来获取它的末端位置信息,为分析机器人性能提供数据依据。

大型机床在制造业的应用促进了测量设备制造精度的不断提高,使得测量技术取得了长足的发展。测量精度的提高对机器人的运用起到至关重要的作用。如今高端的三维测量设备正在被各大航空企业引进,如三坐标测量仪^[4]、激光跟踪仪^[5]、室内 GPS^[6] 等。但是上述设备都存在着限制它们推广应用的缺点,如三坐标测量仪测量速度缓慢,室内 GPS 一经安装就难以再次移动,激光跟踪仪价格高昂。因此一套高效、方便、低成本的测量系统能够在很大程度推动机器人在航空、汽车、电子等行业的应用。

本研究将研制一种可灵活配置的四站式拉线编码器机器人测量系统。

1 测量系统

1.1 四站式拉线编码器机器人测量系统

在上述需求背景下,本研究提出了一种可灵活配置的四站式拉线编码器机器人测量系统,系统共有两个固定装置,如图 1 所示。

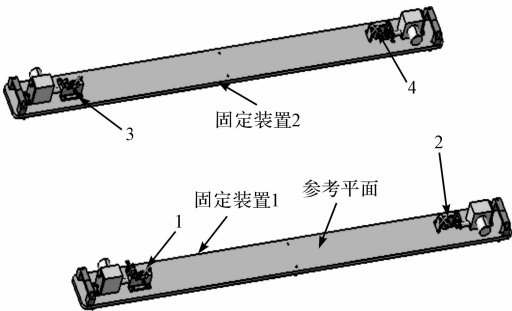


图 1 四站式拉线编码器机器人测量系统

每个固定装置上安装两个站点,作为测量系统的

基站。

4 个站点均布置了拉线编码器作为本系统的距离传感器。系统两个固定装置之间的相对位置并不固定,在测量时可根据车间的工况灵活放置,相比传统的测量设备,本研究提出的测量系统柔性更强。

1.2 系统关键结构特征

该系统是站点可动式的,因此测量前图 1 中两个固定装置的位置关系是未知的,本研究提出通过简单的初始位置校准过程,获得两个固定装置的位置关系。

初始位置校准过程如图 2 所示。

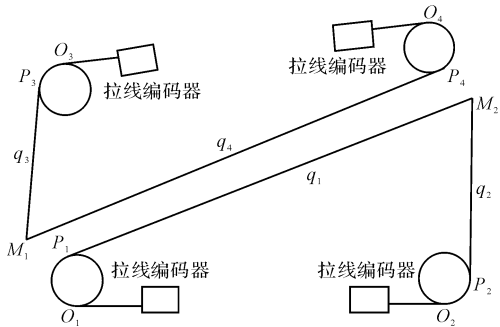


图 2 初始位置校准过程示意图

测量前只需把固定装置上的拉线编码器连接到对面装置上设置的校准点(图 2 中的 M 点),通过 4 个长度关系 q 即可得到两个固定装置之间的位置关系。

作为测量系统的基站,需要该基站存在一个不变的基准点。

拉线导向结构如图 3 所示。

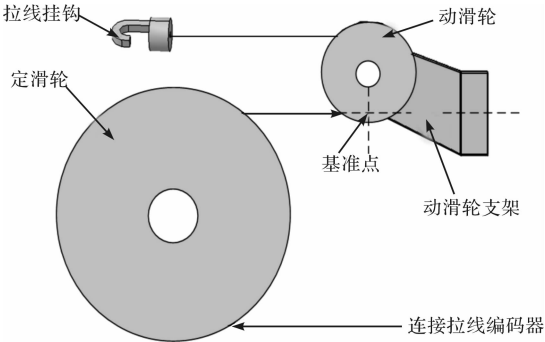


图 3 拉线导向结构

该结构由定滑轮、拉线挂钩、动滑轮、动滑轮支架组成。拉线挂钩实现拉线末端的固定;测量时拉线编码器的挂钩通过定滑轮改变方向,再通过动滑轮引向机器人末端。动滑轮安装在动滑轮转轴对应的圆孔上;动滑轮支架同定滑轮一起安装在对应的固定装置上。拉线经过动滑轮时,动滑轮同时绕着动滑轮轴线与支架轴线旋转,因此不管动滑轮如何运动,该结构都存在一个不变的基准点(图 2 的 O 点)。

2 初始位置校准算法

2.1 测量机构 DH 模型的建立

测量必须设定参考坐标系,如图 4 所示。

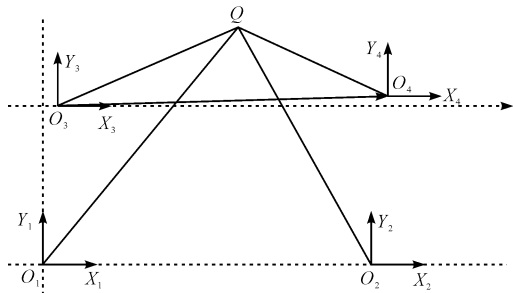


图 4 测量系统坐标系

设站点 1 为参考坐标系,站点 2 通过固定装置与站点 1 固连,其坐标系与站点 1 之间的关系可以通过一个常量的齐次变换矩阵来表示;站点 3、站点 4 的结构与站点 1、2 的保持一致,因此要确定各个站点之间的位置关系,只要再确定站点 3 与站点 1 的关系即可,该过程等价于站点 1 坐标系(参考坐标系)如何变换到站点 3 坐标系。

结合图 2 定义参考坐标系:原点为站点 1 的基准点 O_1 , X 轴方向从站点 1 基准点 O_1 指向站点 2 基准点 O_2 , Y 轴处在站点 1、2、3 基准点 (O_1, O_2, O_3) 构成的平面上并指向站点 3, 因此一旦测量结构放置在地面上,测量机构的参考坐标系也就确定了,站点 2 的坐标系方向与参考坐标系的一致,原点为站点 2 的基准点 O_2 , 通过参考坐标系沿 X 轴平移固定距离 O_1O_2 得到。站点 3 坐标系与固定装置 2 的放置位置相关,确定站点 3 的位置只要得到参考坐标系与站点 3 坐标系之间的变换矩阵即可。

DH 模型使用 4 个变量表示机器人各个关节之间的坐标关系^[7]。本研究将 DH 模型推广到测量系统站点之间的坐标变换。由于实施测量时两个固定装置的位置应尽量平行,测量结构的布局与机器人平行关节的模型类似,本研究在 MDH(修正的 DH 模型)上进行改进^[8]。在此规定站点 3 坐标系的原点为站点 3 的基准点 O_3 , X 轴的方向从站点 3 指向站点 4 的基准点 O_4 , 站点 3 的 Y 轴方向位于参考坐标系 XY 平面上,当站点 3 坐标系 X 轴与 Y 轴都确定之后, Z 轴也随之确定;同理站点 4 坐标系方向与站点 3 的保持一致,原点与它的基准点 O_4 重合,它的坐标系也可以由站点 3 通过平移变换得到。

站点坐标系定义如图 5 所示。

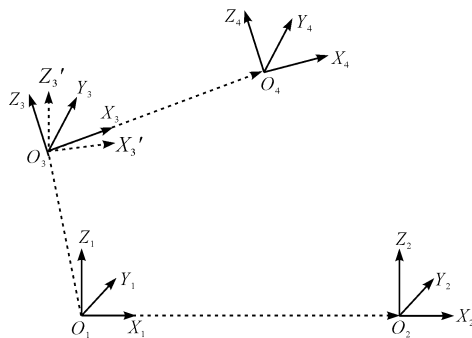


图 5 站点坐标系定义

图 5 直观地表达出 4 个站点之间的坐标关系。不妨设参考坐标系为 T_1 , 站点 1 基准点 O_1 与站点 2 基准点 O_2 的距离为 a , 则站点 2 的坐标系 T_2 为:

$$T_2 = T_1 \cdot \text{Trans}(a, 0, 0) \quad (1)$$

式中: $\text{Trans}(a, 0, 0)$ —沿着 X 轴平移 a 距离。

由于 Y_1 轴与 Y_3 轴共面, 将参考坐标系绕 Z_1 旋转 α 角一定可以使得 Y_1 轴、 Y_3 轴平行, 然后沿着旋转后的 X_1 轴平移距离 d_1 使得 Y_1 轴、 Y_3 轴共线; 再将变换后的坐标系沿着 Y_1 (Y_3) 轴平移距离 d_2 就可以使该坐标系与站点 3 坐标系 T_3 的原点 O_3 重合; 最后再绕 Y_1 (Y_3) 轴旋转 β 角使得 X_1 轴、 X_3 轴共线即可得到 T_3 :

$$T_3 = R(Z_1, \alpha) \text{Trans}(d_1, 0, 0) \text{Trans}(0, d_2, 0) R(Y_1, \beta) \quad (2)$$

式中: $\text{Trans}()$ —平移矩阵, 物理意义同式(1); $R(U, \alpha)$ —绕 U 轴旋转 α 角的旋转矩阵; α, d_1, d_2, β —第 2 个固定装置的放置位置有关, 为测量机构初始位置校准需要求解的未知量。

参照站点 2 可得站点 4 的坐标系 T_4 为:

$$T_4 = T_3 \text{Trans}(a, 0, 0) \quad (3)$$

式中: a —结构固有的常量参数。

至此就得到了站点 2、3、4 与站点 1 (参考坐标系) 之间的关系。

2.2 DH 模型参数求解

初始位置校准的过程如图 6 所示。

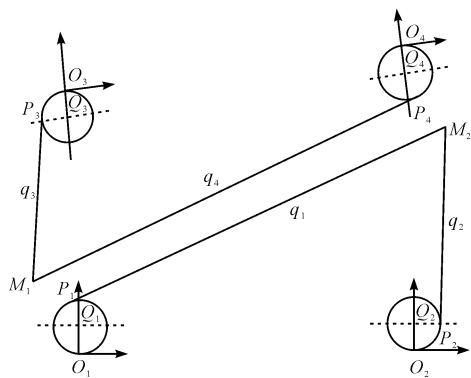


图 6 初始位置校准过程

测量前站点 1 与站点 2 的拉线末端引到站点 4 校准点 M_2 , 站点 3 与站点 4 的拉线末端引到站点 1 校准点 M_1 , 通过测量得到的 4 个长度 q_1, q_2, q_3, q_4 , 反解得到 α, d_1, d_2, β 。

通常测量会在机器人使用的车间进行, 车间地面不可能完全处于一个平面, 因此也就无法保证测量机构四个站点处于同一平面上。车间地面平整度要求一般为 2 m 长度范围内上下偏差不超过 4 mm。本研究的测量机构两个站点之间的距离不超过 1.5 m, 在车间平整度要求下, 把 q_4 投影到前 3 个站点构成的平面上, 其误差不超过 ± 0.003 mm, 在工程运用中该误差几乎可以忽略不计。

将站点 4 投影到平面上相当于忽略 β 角对站点 4 坐标系 Z 坐标的影响, 此时可以先求解前 3 个未知量 α, d_1, d_2 , 求出它们之后, 站点 3 的基准点 O_3 , 站点 4 基准点 O_4 的坐标也就得到了, 此时可以通过前 3 个站点反解被测点坐标, 然后根据站点 4 采集到的长度数据求解出 β 角。

先讨论 α, d_1, d_2 的求解, 将站点 4 投影到前 3 个站点基准点 (O_1, O_2, O_3) 构成的平面上。 O_1, O_2, O_3, O_4 为四个站点坐标系的原点, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 为滑轮的圆心, P_1, P_2, P_3, P_4 为各个站点拉线与滑轮的上切点, q_1, q_2, q_3, q_4 为各个站点采集到的长度数据, M_1 为站点 1 上的校准点, M_2 为站点 4 上的校准点。

令站点 3 相对于参考坐标系的变换矩阵为 T_A , 站点 2 相对于参考坐标系的变换矩阵为 T_B , 则站点 2 坐标 V 与站点 1 的关系为:

$$V_{21} = T_B V_{22} \quad (4)$$

下标代表了站点和相应的坐标系, 如 V_{21} 代表站点 2 坐标在坐标系 1 (即参考坐标系) 的大小。

站点 3 与站点 1 的关系为:

$$V_{31} = T_A V_{33} \quad (5)$$

站点 4 与站点 1 的关系为:

$$V_{41} = T_A T_B V_{44} = T_A V_{43} \quad (6)$$

初始校准模型需要建立起变换矩阵与获取到的长度数据之间的数学关系, 已知 $O_1 O_2$ 的长度为 a , 首先初始化各个站点基准点 $O_1(0, 0), O_2(a, 0)$, 根据式 (5) 与式 (6) 可得站点 3 与站点 4 基准点的值:

$$O_3 = T_A O_1, O_4 = T_A T_B O_1 = T_A O_2 \quad (7)$$

对于滑轮的圆心, 站点 1 与站点 2 可初始化为 $Q_1(0, r), Q_2(a, r)$, 站点 3 与站点 4 滑轮的朝向不同, 其圆心点在坐标系 3 中为 $Q_{33}(0, -r), Q_{43}(a, -r)$, 同理可得它们在参考坐标系中的大小:

$$Q_3 = T_A Q_{33}, Q_4 = T_A T_B Q_{33} = T_A Q_{43} \quad (8)$$

校准点 1 位于站点 1 的某一位置, 可直接初始化为 $M_1(x_m, y_m)$, 在第 2 个固定装置上的校准点 M_2 在坐标系 3 的大小为 $M_{23}(x_n, y_n)$, 根据式 (5) 可得校准点 M_2 在参考坐标中的大小:

$$M_2 = T_A M_{23} \quad (9)$$

由于上述几何模型将站点 4 投影到前 3 个站点构成的平面上, 之后将两个校准点 M 当作圆外一点, 已知圆心 O 与动滑轮半径 r , 可计算各个站点滑轮上切点的坐标 P_1, P_2, P_3, P_4 。

一旦测量机构在地面上放置好, 不管在什么情况下, 滑轮的下切点 (站点基准点 M) 始终保持不变, 求出上切点 P 坐标之后, 即可计算拉线弧长在动滑轮上的包络角度:

$$\cos \theta_i = \frac{\overrightarrow{Q_i O_i} \cdot \overrightarrow{Q_i P_i}}{r^2} \quad (10)$$

式中: i (从 1 到 4) 代表了各个站点。

包络角求解之后, 即可建立起各个站点采集到的长度 q_i 与包络角 θ_i , 滑轮上切点 P_i 之间的关系:

$$\begin{cases} q_1 = |\overrightarrow{P_1 M_2}| + \theta_1 r \\ q_2 = |\overrightarrow{P_2 M_2}| + \theta_2 r \\ q_3 = |\overrightarrow{P_3 M_1}| + \theta_3 r \\ q_4 = |\overrightarrow{P_4 M_1}| + \theta_4 r \end{cases} \quad (11)$$

式 (11) 中有 4 个方程, 3 个未知数, 显然能求得 α, d_1, d_2 。不过各个方程都为超越方程, 传统的方法无法求解, 构造式 (12) 的目标函数, 采用粒子群算法^[9], 即可完成求解:

$$f(\alpha, d_1, d_2) = (q_1 - |\overrightarrow{P_1 M_2}| - \theta_1 r)^2 + (q_2 - |\overrightarrow{P_2 M_2}| - \theta_2 r)^2 + (q_3 - |\overrightarrow{P_3 M_1}| - \theta_3 r)^2 + (q_4 - |\overrightarrow{P_4 M_1}| - \theta_4 r)^2 \quad (12)$$

将站点 4 投影到平面上忽略了 β 角的影响, 而 β 角也对站点 4 的位置产生影响, 其中对站点 4 基准点 (x, y) 坐标的影响几乎可以忽略不计, 且 β 角是用来使坐标系 3 绕 Y 轴旋转的, 因此 β 角本身对站点 3 的基准点 O_3 是没有影响的。通过 α, d_1, d_2 可以求出站点 1、2、3 准确的基准点位置, 然后只利用前三站数据求得被测点的坐标, 再根据被测点坐标与站点 4 采集的数据反解 β 角。

具体过程为移动机器人末端使采集到的 4 路数据长度尽量达到拉线编码器的量程, 保证 β 角对末端的影响最大。通过前 3 站的数据即可求得被测点的坐标 $P(x, y, z)$, 注意到此时 3 个基准点共面, 系数矩阵退化为奇异矩阵, 直接通过联立方程去求解坐标 $P(x, y, z)$ 即可。同时可根据式 (13) 得到站点 4 基准点 O_4 到被测点的长度 l_4 , 站点 4 基准点 O_4 坐标为:

$$\boldsymbol{O}_{41}(x_4,y_4,z_4)=\boldsymbol{T}_A\boldsymbol{R}(Y_1,\beta)\boldsymbol{O}_{43}\tag{13}$$

最终可得 l_4 的表达式:

$$(x_4-x)^2+(y_4-y)^2+(z_4-z)^2=l_4^2\tag{14}$$

其中, (x,y,z) 、 l_4 已知, (x_4,y_4,z_4) 只跟 β 角有关,很容易求得 β 角大小。

3 实验验证

在论述测量算法初始位置校准模型的过程中,本研究将校准的过程分为两部分:先校准 α 、 d_1 、 d_2 ,然后校准 β 值。在车间平整度要求下的 β 值对校准点 M 与站点基准点 O 之间的距离影响非常小。因此,本研究第一个过程中建立的数学模型不考虑 β 值的影响。已知坐标系3的变换矩阵中的 α 、 d_1 、 d_2 、 β 。各参数数值如表1所示。

表 1 理论 α 、 d_1 、 d_2 、 β 值

d_1/mm	d_2/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	$\beta/(\text{^\circ})$
20	1 000	0. 2	- 0. 03
- 30	980	- 0. 25	0. 02
20	1 000	0. 2	- 0. 11

在 β 作用下,站点4上的校准点 M_2 与参考坐标系 XY 平面并不共面,因此在获取站点4校准点 M_2 到站点1,站点2的长度时需要将参考坐标系统 X 轴旋转至 XY 平面与站点4校准点 M_2 共面,记为 $O_NX_NY_NZ_N$;同理在获取站点3、站点4到站点1校准点 M_1 的长度距离时,需要将站点3的坐标系统 X 轴旋转到 XY 平面与站点1校准点 M_1 共面,记为 $O_MX_MY_MZ_M$ 。站点1与站点2基准点 O_1 O_2 之间的距离为 a ,滑轮半径为 r ,显然在 $O_NX_NY_NZ_N$ 坐标系中,站点1与站点2的基准点、滑轮圆心点的坐标分别为 $\boldsymbol{O}_1(0,0)$ 、 $\boldsymbol{O}_2(a,0)$ 、 $\boldsymbol{Q}_1(0,r)$ 、 $\boldsymbol{Q}_2(a,r)$ 。同理在 $O_MX_MY_MZ_M$ 中,站点3与站点4基准点与动滑轮圆心点的坐标为 $\boldsymbol{Q}_3(0,0)$ 、 $\boldsymbol{Q}_4(a,0)$ 、 $\boldsymbol{Q}_3(0,-r)$ 、 $\boldsymbol{Q}_4(a,-r)$ 。根据基本的坐标变换可以求出2个校准点在 $O_MX_MY_MZ_M$ 与 $O_NX_NY_NZ_N$ 的坐标值。

在表1中,3组不同变换矩阵参数下,站点1、4校准点 M 在 $O_MX_MY_MZ_M$ 与 $O_NX_NY_NZ_N$ 的坐标值如表2所示。

表 2 校准点坐标值

站点 4 校准点坐标值	站点 1 校准点坐标值
(1 040. 061 72,983. 562 53)	(- 43. 420 59, - 979. 854 40)
(989. 902 96,955. 549 68)	(14. 188 68, - 959. 947 22)
(1 040. 061 72,983. 562 53)	(- 43. 420 51, - 979. 854 41)

然后即可根据式(11)获得在 α 、 d_1 、 d_2 、 β 作用下,4个拉线编码器应获得的长度值,进而将式(12)代入粒子群算法求解出校准的 α 、 d_1 、 d_2 ,结果如表3所示。

表 3 初始位置(d_1 、 d_2 、 α) 校准结果

计算 d_1/mm	计算 d_2/mm	计算 $\alpha/(\text{^\circ})$
19. 999 9	1 000. 000 0	0. 200 0
- 30. 000 0	980. 000 0	- 0. 250 0
19. 998 1	1 000. 000 1	0. 200 1

从验证结果可以看到,不考虑 β 值的影响,对求解出来的 α 、 d_1 、 d_2 值大小的影响非常小,在车间地面平整度比较好的情况下,校准(α 、 d_1 、 d_2)时忽略 β 值,对校准参数造成的误差小于0. 000 1 mm,角度值的准确性达到小数点后4位;即使车间平整度精度最差,达到 $0. 11^\circ(4/2\ 000\ \text{rad})$,站点3基准点 O_3 坐标值的最大误差也只有0. 001 9 mm, α 的误差只有 $0. 000\ 1^\circ$,因此忽略 β 角计算出来的 α 、 d_1 、 d_2 是具有可信度的。

得到 α 、 d_1 、 d_2 之后,应该对 β 角进行校准,可以直接根据已知条件(α 、 d_1 、 d_2 、 β)值求出被测点到站点4基准点 O_4 的长度,其中被测点坐标可由前3个站点的数据求解出来,基准点坐标是 β 角的函数,显然可以计算出 β 角的大小。具体操作过程为人工将机器人末端拉到测量系统工作空间内任意一点,通过前3个站点测得的长度反解得到被测点的坐标,进而根据站点4获得的长度数据获得 β 角的大小。为了分析比较算法的准确性,本研究用被测点的理论位置(750. 11,400. 34,800. 55),通过该理论位置点去获得4个站点在测量过程中得到的长度,在已经求得的 α 、 d_1 、 d_2 参数前提下,去计算坐标求解模型的被测点位置,再根据式(14)去计算 β 角。

β 角求解过程中得到的被测点坐标值及最终求得的 β 角,求解结果如表4所示。

表 4 初始位置 β 角求解结果

计算 x/mm	计算 y/mm	计算 z/mm	β/deg
750. 11	400. 341 4	800. 549 4	- 0. 109 9
750. 11	400. 340 1	800. 550 0	- 0. 030 0
750. 11	400. 340 0	800. 550 0	0. 020 0

验证结果表明通过前3个站点去求解被测点的坐标,在地面平整度最差的情况下,其误差为0. 001 4 mm; β 角在地面平整度较好的情况下几乎不受影响,在车间平整度最差的情况下,其误差也只有 $0. 000\ 1^\circ$,影响也可以忽略不计。

以上通过系统仿真,在忽略系统制造误差的假设前提下,笔者对本研究提出的初始位置校准算法进行了初步验证。下面将通过实验对该测量系统的测量精度进行验证。

机器人的重复定位精度已经可以达到 $\pm 0. 05\ \text{mm}$,因此让机器人先后从同一起点运动到同一结束点,可以认为每次运动两点之间的距离是一样的。本研究的

实验方案如下:首先令机器人从某一起点运动到终点,同时记录机器人在起点与终点的运行参数,使用激光跟踪仪测量起点与终点之间的距离;然后让机器人再次重复原先的运动,即从第一次的起点运动到终点。使用本测量系统去获取起点与终点的坐标,并计算两点之间的距离,通过比较与激光跟踪仪获得的数据间接验证该测量系统的精度,测量现场如图 7 所示。

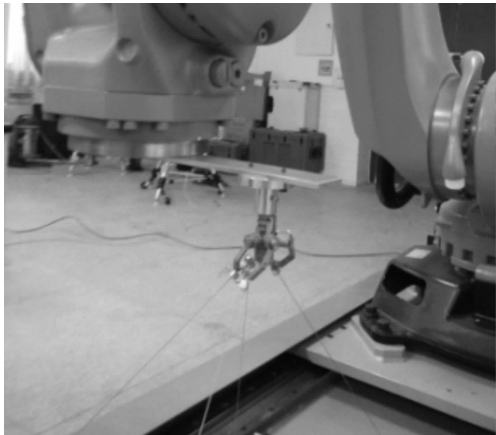


图 7 测量实验现场

本次实验中,机器人进行 5 次不同的运动,通过多次实验减少系统偶然误差的影响,实验结果如表 5 所示。

表 5 测量系统实验数据

激光跟踪仪 获取长度/mm	该测量系统 获取长度/mm	误差/mm
100. 127	100. 376	0. 249
99. 869	100. 127	0. 258
100. 204	99. 984	-0. 22
250. 231	249. 942	-0. 289
250. 247	250. 509	0. 262

由表中数据可得,该测量系统的测量精度约为 $\pm 0.29\text{ mm}$,这与激光跟踪仪的精度 0.2 mm 还有一定的差距。

4 结束语

机器人的动力学特性分析在制造和使用过程中都非常重要。本研究在不改变原有机器的结构和其末端不安装额外传感器的情况下,利用轻便的拉线编码器,采用四站测量法,实现了机器人运动数据的采集和

动态特性的分析。所设计的多自由轻型运动机构能够很好保证机器人在运动过程中不出现缠绕,且不改变机器人的动力学特性;所提出的四站拉线编码器初始位置校准方法,可以实现四站编码器的初始位置任意摆放,降低了对测量环境的要求,减少了测量系统前期的准备工作,提高了测量效率。

为了进一步提高测量精度,下一步还需要重点研究系统误差补偿方法,建立系统机械结构误差补偿模型和拉线受力变形等因素引起的动力学误差补偿模型。

参考文献(References):

[1] 张爱红,张秋菊. 机器人示教编程方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2003(4):47-49.

[2] ERDÖS G, KARDOS C, KEMÉNY Z, et al. Process planning and offline programming for robotic remote laser welding systems[J]. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**,2015(1):1-20.

[3] MOORING B W, ROTH Z S, DRIELS M R. Fundamentals of manipulator calibration[M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.

[4] SANTOLARIA J, MAJARENA A C, SAMPER D, et al. Articulated arm coordinate measuring machine calibration by laser tracker multilateration[J]. **The scientific world journal**,2014(2):681853.

[5] BOB B P D. How laser trackers work[M]. **Chico: Quality Digest**,2009.

[6] MAISANO D A, JAMSHIDI J, FRANCESCHINI F, et al. Indoor GPS: system functionality and initial performance evaluation[J]. **International Journal of Manufacturing Research**,2008,3(3):335-349.

[7] DENAVIT J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices[J]. **Trans. of the ASME. Journal of Applied Mechanics**,1955,22(1):215-221.

[8] HAYATI S, MIRMIRANI M. Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators[J]. **Journal of Robotic Systems**,1985,2(4):397-413.

[9] GANDOMI A H, YUN G J, YANG X, et al. Chaos-enhanced accelerated particle swarm optimization[J]. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, 2013,18(2):327-340.

[编辑:李 辉]

本文引用格式: