

关节臂测量机自驱动精确测量系统^{*}杨洪涛^{1,2} 柯源¹ 沈梅^{1,2} 李天增¹

(1.安徽理工大学机电工程学院 淮南 232000; 2.安徽理工大学矿山智能装备与技术安徽省重点实验室 淮南 232000)

摘要: 针对关节臂测量机的测量系统无法完成如轨迹规划、误差补偿等复杂功能的问题,研制了基于 Unity 平台的关节臂坐标测量机的测量系统。分析了关节臂测量机的功能需求并建立了相应的算法模型,在 Unity 平台上搭建了测量机测量系统,针对测量系统分别设计了虚拟样机显示功能、虚拟机与实际样机同步运动功能、多关节同步轨迹规划功能与误差补偿功能。利用测量系统完成了标准球直径的测量实验,结果表明补偿后的平均误差为 0.015 5 mm。完成了关节臂测量机测量系统功能的集成,为实现测量机自动化测量奠定了基础。

关键词: 关节臂坐标测量机;测控系统;虚拟机;功能集成

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Self-driven precise measurement system of articulated arm measuring machine

Yang Hongtao^{1,2} Ke Yuan¹ Shen Mei^{1,2} Li Tianzeng¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China;

2. Anhui Key Laboratory of Mine Intelligent Equipment and Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the measurement system of the articulated arm measuring machine cannot complete complex functions such as trajectory planning and error compensation, a measurement system for the articulated arm coordinate measuring machine based on the Unity platform was developed. The functional requirements of the articulated arm measuring machine were analyzed and the corresponding algorithm model was established. The measurement system of the measuring machine was built on the Unity platform. For the measurement system, the virtual prototype display function, the synchronous movement function of the virtual machine and the actual prototype, the multi-joint synchronous trajectory planning function and the error compensation function were respectively designed. The measurement system was used to complete the measurement experiment of the standard ball diameter. The results show that the average error after compensation is 0.015 5 mm. The integration of the measurement system functions of the articulated arm measuring machine was completed, laying the foundation for the realization of the automatic measurement of the measuring machine.

Keywords: articulated arm coordinate measuring machine; measurement and control system; virtual machine; function integration

0 引言

关节臂测量机是一种非正交坐标测量设备^[1]。关节臂式测量机相对于三坐标测量机拥有更高的灵活性以及其重量更轻^[2],适合更复杂的场景,例如对汽车的外壳测量时,相较于传统三坐标测量机,能更轻松地完成精确测量的任务。

关节臂测量机是在传统手动拖拽测量的关节臂测量机

上的关节处添加伺服电机与高精度编码器,实现自动测量与轨迹规划的测量机设备^[3],关节臂坐标测量机的旋转关节内部是一体化关节模组,模组中包括伺服电机、谐波减速器、编码器等部件,其相较于传统手动拖拽的关节臂测量机的测量结果具有复现性,对于流水线上相同工件的重复性测量任务,可以实现自动化测量。

由于关节臂测量机的运动关节为一体式关节模组,虽然其本身就具备运动控制、数据采集等功能,但也由于其一

体化的原因,无法完成更加复杂的功能,例如对待测零件模型导入、轨迹规划、误差补偿等功能,且由于其一体式设备,无法对关节模组内部进行修改,因此需要额外设计测量系统,完成在虚拟平台上导入待测模型,自动进行轨迹规划、误差补偿等功能,完成精确测量,实现多功能集成。

由于国内对关节臂测量机的自驱动精确测量系统的研究较少,而关节臂测量机测量系统与机械臂测控系统相似,因此机械臂测控系统的研究现状对关节臂坐标测量机测控系统的研究也具有参照意义。

Yenorkar 等^[4]通过 MALAB 编写 GUI 界面对机械臂指挥和控制,其操作系统使用 AVR 控制器对机械臂中央控制站进行编程,并使用 GUI 界面使机械臂可训练并用户友好。Song 等^[5]提出一种基于物联网的通信系统,该系统以现场总线为架构,可实时监控机械臂的运行,并通过系统接口实时将数据返回给用户。Duan 等^[6]设计并开发了基于数字孪生技术的协作机械臂监控系统,并且提出了一种六维系统架构。该系统是由数字孪生建模和实时数据进行驱动,实现了对协作机械臂装配过程的实时监控,并为智能决策提供支持。刘鑫涛^[7]设计并实现了六轴机械臂 BRDF 测量的测控系统,其使用 LabVIEW 编写上位机软件,对测控系统集成化处理,实现一键测量,并能对数据进行误差分析,完成红外波段 BDRF 分布的三维云图的重构。付强^[8]对 UR10 机械臂进行了研究,使用 C# 搭建上位机调试系统,并基于 Qt+Slicer+VTK 集成了控制机械臂的系统,其上位机平台中能够显示机械臂运动状态,并反馈信息到上位机中。王志华等^[9]针对模块化可重构的机械臂系统进行了上位机软件的设计,其通信方式采用 CAN 总线通信方式,上位机软件使用 C# 语言编写,完成对机械臂运动控制功能的集成。涂孔^[10]针对四自由度工业机器人研制了控制系统,其使用 STM32F407 芯片作为主控芯片,使用 MODBUS 通信协议,用 C 语言编写了对机器人的控制程序。崔晨^[11]针对单臂协作机器人研究并设计了一种控制系统,其选用 STM32F407ZGT6 芯片作为主控芯片,使用 CAN 总线的方式作为通信方式,选取 canfestival 作为通信协议,将 canfestival 移植到 STM32F407ZGT6 主控芯片中并编写控制程序。王凤祥等^[12]针对小型六自由度机械臂搭建了控制系统,搭建了完整的硬件电路模块与上位机控制平台,实现对六自由度机械臂系统精确控制。陈丹惠等^[13]针对模块化人机协作机械臂设计了控制系统,选用一体化关节模块搭建机械臂,采用 CANOPEN 通信协议搭建通信通路,实现了机械臂对物体的精准抓取。

同时,本课题组与合作课题组前期已针对自驱动关节臂测量机的控制开展研究,如占瑜毅等^[14-15]研制出在 LabVIEW 平台上搭建自驱动关节臂坐标测量机测控系统,实现了对测量机的控制与数据采集。杨洪涛等^[16-17]使用 C++ 语言在 Visual Studio 平台上编写了测量机上位机软件,使测控系统与 SQL 数据库连接。后续孙璐瑶等^[18-19]

在 Unity3D 平台上进一步开发测控系统,增加看虚拟交互的功能,使人机交互体验更好。

对于关节臂测量机的自驱动精确测量系统的研究,其精度保障体系是一个多技术层面深度融合的复杂问题,远不止于控制系统本身。在测量不确定度的评定与理论层面,陈文浩等^[20]系统回顾了从 GUM、蒙特卡洛方法到贝叶斯推断、灰色评定及神经网络间接评定法等测量不确定度评定方法的新进展;在多传感器测量系统的标定层面,李欣飞等^[21]研制了基于多线激光传感器的旋转扫描系统,采用了分步标定策略与动态偏心误差修正方法,实现了火车轮等大型回转体工件的高精度在线测量;在测量系统自身的精度溯源层面,蒋欣怡等^[22]设计了基于拉线传感器的位姿测量系统,通过误差拟合降低了传感器测量误差,并利用参数辨识方法优化了系统结构参数,将系统平均位姿精度提升至 0.216 mm 和 0.055°;在智能算法对系统性能的提升层面,李春东等^[23]将 BP 神经网络算法与 PID 控制相结合,设计了自适应控制器,并应用于饲料粉碎机驱动电机控制,使系统对阶跃信号的响应超调减小,抗干扰能力增强。

国内外机械臂的测控系统研究对关节臂坐标测量机的测控系统研究而言,由于其工作目的往往不同,因此在测控系统上的要求往往也不相同,关节臂测量机所要求的误差补偿功能、轨迹规划功能、高精度测量功能往往都无法在机械臂测控系统上得到体现。本文将设计一种关节臂坐标测量机精确测量测控系统,该系统将运动控制、虚拟模型建立、轨迹规划与误差补偿功能集成在虚拟平台上,实现完整的自动测量功能。

1 测控系统硬件平台搭建

1.1 关节臂坐标测量机结构组成

关节臂坐标测量机整体结构如图 1 所示。关节臂坐标测量机的结构组成包括基座、3 个旋转关节、3 个摆动关节、连杆与测头部分。关节部分共分为 3 个部分:肩部、肘部、腕部。每个部分包括一个旋转关节和一个摆动关节。关节模组的个数与型号分别为 3 个 QDD Pro PR60-100-80、一个 QDD Pro PR60-100-90、两个 QDD Pro NE30-100-70。其测头模块由测头 LP2 install 型号安装座、FS2i 测座、LP2 测头与测针组成。

驱动关节臂坐标测量机由电气箱与 PC 端连接,测量机 6 个关节模组串联后连接到电气箱,由于关节模组的通信接口为 CAN 通信,但为了实现在线测量,需将 CAN 通信转换为以太网通信。上位机用网线在局域网中与电气箱连接,从而实现上位机与关节模组的通信功能。

测头触发信号由 DAQ 采集卡采集,经由电气箱内部传输至上位机平台中。

电气箱内部主要由电源装置,负责使 CAN 通信转换为以太网通信的 ECB 与 HUB 装置,DAQ 数据采集卡,电路控制板以及急停装置,具体如图 2 所示。

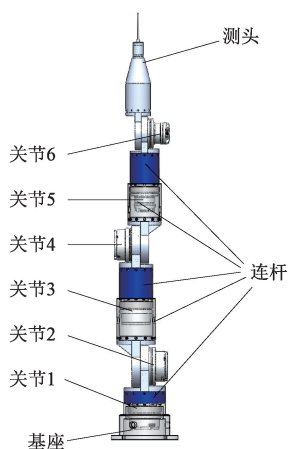


图 1 关节臂坐标测量机

Fig. 1 Articulated arm coordinate measuring machine

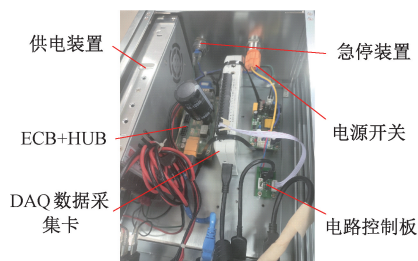


图 2 电气箱内部硬件结构

Fig. 2 The internal hardware structure of the electrical box

1.2 测量机测控系统功能需求分析

关节臂坐标测量机为非正交式测量机,其测量的目标为待测点的空间坐标,测量原理是通过关节旋转使测头接触待测点,记录此时各关节旋转角度,通过正运动学计算测量机末端测头与待测点接触时测头在以测量机为基础下的空间坐标,即待测点在以测量机为基础下的空间坐标,通过测量多个待测点的空间坐标,拟合得到待测物的长度、直径、角度等精确数值。

测量步骤如下:1)手动控制测量机,使得测头接触待测点,得到此时各关节角度,正运动学求得待测点坐标,此时坐标为粗测坐标;2)根据待测点坐标,做运动规划,使测量机以最优姿态且各关节以平滑且同步的方式转动的情况下运动,使测头接触待测点坐标;3)当测量机测头接触待测点时,记录此时各关节数据,代入误差补偿模型,计算得到待测点精确坐标。具体流程如图 3 所示。

为了实现关节臂坐标测量机的自动在线测量与运动状态监控,本文研究的关节臂坐标测量机测控系统主要目标是在虚拟平台上对测量机的运动控制上增加测量机虚拟模型导入与待测模型生成、轨迹规划与误差补偿功能,实现完整测量过程。

综合以上考虑,本文测控系统功能需求如图 4 所示,具

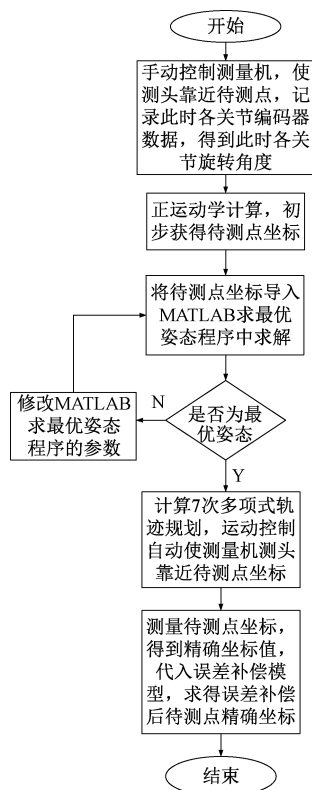


图 3 关节臂坐标测量机工作流程

Fig. 3 Work process of the articulated arm coordinate measuring machine

体要求如下:1)建立运动控制模块,实现信息的通信与反馈;2)在虚拟平台上显示虚拟测量机模型与虚拟待测物模型;3)实现自动轨迹规划功能;4)将得到的数据实时进行误差补偿。

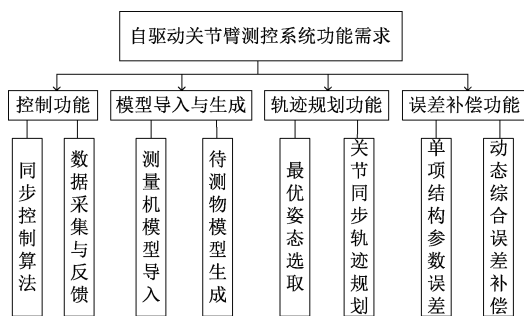


图 4 测控系统需求

Fig. 4 The requirements of the control and measurement system

2 测控系统的设计

2.1 待测点坐标抓取

为了实现测量机对待测点坐标的抓取,本文采用经典DH(Denavit-Hartenberg)参数法建立测量机的正运动学模型,其中 DH 建模原理如图 5 所示。

根据 DH 模型,建立理想下相邻关节之间的坐标系转

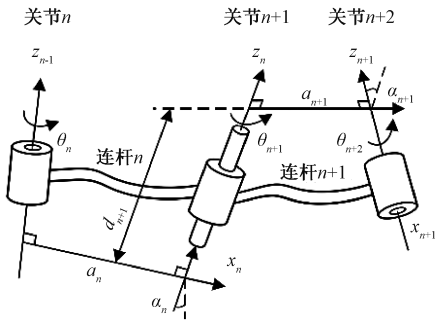


图 5 DH 参数建模原理

Fig. 5 The principle of DH parameter modeling

换矩阵如式(1), 计算相邻坐标系之间的坐标转换。

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1}d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据坐标转换原理, 建立关节臂坐标测量机各旋转关节部位的局部坐标系, 并以基座为基础建立关节臂坐标测量机的运动传递关系如图 6 所示。

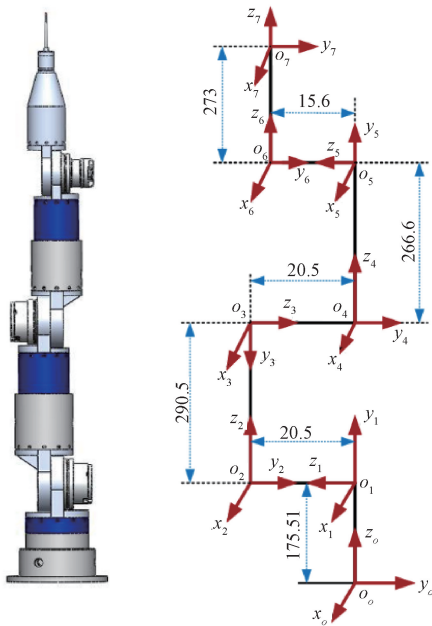


图 6 关节臂运动关系传递

Fig. 6 Joint arm motion relationship transmission

由此可得以测头为基础的空间坐标系相对于测量机基座为基础的空间坐标系的转换矩阵如式(2)所示。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & x \\ n_y & o_y & a_y & y \\ n_z & o_z & a_z & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot {}^2\mathbf{T}_3 \cdot {}^3\mathbf{T}_4 \cdot {}^4\mathbf{T}_5 \cdot {}^5\mathbf{T}_6 \cdot {}^6\mathbf{T}_7 \cdot \mathbf{T} =$$

$$\prod_{i=1}^7 \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1}d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由此可通过运动传递关系, 计算测头在以基座为基础的三维空间坐标系下的空间坐标。

根据关节模组、测头、关节臂连杆等关键尺寸, 确定了关节臂坐标测量机理想测量模型的结构参数值, 如表 1 所示。

表 1 DH 模型结构参数

Table 1 Parameters of the DH model structure

关节 i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}/mm	$\theta_i/(^{\circ})$	d_i/mm
1	0	0	0	175.51
2	90	0	0	20.50
3	-90	0	0	290.50
4	90	0	0	-20.50
5	-90	0	0	266.60
6	90	0	0	15.60
测头	-90	0	0	286.69

其中, α_{i-1} 为扭转角, a_{i-1} 为连杆长度, θ_i 为关节转角, d_i 为偏置。

当需要抓期待测点坐标时, 控制测量机的关节旋转, 使测头靠近待测点, 当测头与待测点接触时, 根据转换矩阵与待测点与测头触碰时各关节旋转角度, 可计算得到待测点坐标 (x, y, z) 。

2.2 轨迹规划算法

关节臂测量机在 2.1 节的 DH 模型下提取到待测点坐标后, 根据初始状态与待测点坐标做轨迹规划。轨迹规划分为两个阶段: 定位阶段与测量阶段。定位阶段为测量机测头快速靠近待测点, 运动至距离待测点 3~5 mm 处。测量阶段为测头缓慢接触待测点坐标, 使测头接触待测工件表面待测点。

1) 最优测量姿态选择

关节臂测量机在测量目标点时, 由于其本身的静态误差, 不同的姿态往往会有不同大小的误差, 因此选择一个合适的姿态进行测量极其重要。

本测控系统的关节臂测量机求逆解的方式为牛顿下山法, 其主要的迭代公式为:

$$\Delta\theta = \lambda \times \mathbf{J}^+ (x_d - f(\theta^k)) \quad (3)$$

其中, $\Delta\theta$ 为每次迭代各关节角度增加的角度, λ 为迭代步长, $\mathbf{J}^+$ 为雅各比矩阵的伪逆矩阵, x_d 为目标坐标值, $f(\theta^k)$ 为正运动学求解。

虽然牛顿下山法可通过更改 λ 的值从而改变每次逆解的结果, 但由于其迭代的收敛性, 在不改变各关节初始角度的情况下, 不同 λ 逆解出来的 6 个关节的角度形成的测量

机姿态区别不显著,因此在此迭代公式上增加一个零空间扰动,其公式如式(4)所示。

$$\alpha \times (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \boldsymbol{\eta} \quad (4)$$

其中, α 为扰动步长因子, $\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}$ 为零空间投影矩阵, $\boldsymbol{\eta}$ 为扰动方向向量。完整的迭代公式如式(5)所示。

$$\theta^{k+1} = \theta^k + \lambda \mathbf{J}^+ (x_d - f(\theta^k)) + \alpha (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \boldsymbol{\eta} \quad (5)$$

虽然增加此扰动因素,可以在求逆解的迭代过程中发现更多的有显著区别的位姿,但由于关节臂坐标测量机的精度要求,往往添加扰动后的求逆解的迭代无法收敛到精度要求区域之内。因此,在限制迭代次数后,得到的不同的逆解姿态作为初始姿态,再次不添加零空间扰动的牛顿下山法迭代,获得精确解。

2) 关节同步轨迹规划

在得到 6 个关节的目标角度后,如何运动使得 6 个关节同步运行到目标角度,是测量机轨迹规划中的重点。

一般情况下,关节臂轨迹规划使用基础的梯形轨迹规划,该方法计算简单,运动控制时操作便捷,其运动轨迹如图 7 所示。

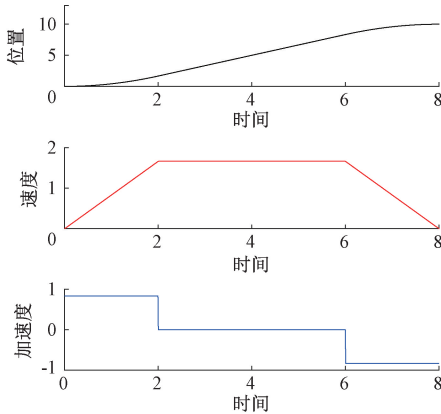


图 7 梯形轨迹规划位置、速度和加速度曲线

Fig. 7 Trapezoidal trajectory planning position, velocity and acceleration curves

但在关节臂测量机运动控制中,该轨迹规划会造成关节加速度突变的情况,会对电机产生较大的冲击,对测量精度也会造成无法预料的影响,因此需要使用一种关节加速度缓慢变化,关节运动速度变化更加平缓的轨迹规划方式。

本文所设计的测控系统使用的关节空间轨迹规划为 7 次多项式轨迹规划,该方法可以使关节运动速度更为平缓,相较于梯形轨迹规划加速度突变,其加速度变化更为平缓,加速度突变产生的震动冲击载荷更小,对测量精度的影响也更小,其运动轨迹如图 8 所示。

7 次多项式轨迹规划就是 $s(\tau)$ 相对于时间变化满足 7 次多项式变化,其表达式如式(6)所示。

$$s(\tau) = a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + a_3\tau^3 + a_4\tau^4 + a_5\tau^5 + a_6\tau^6 + a_7\tau^7 \quad (6)$$

其中, s 为转动的角度, $0 \leq s \leq 1$, τ 为归一化时间变量,

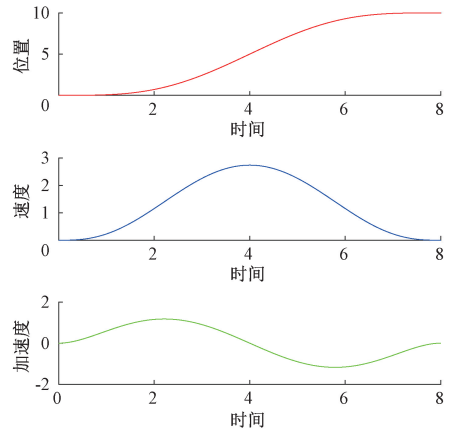


图 8 7 次多项式轨迹规划位置、速度和加速度曲线

Fig. 8 Seventh-order polynomial trajectory planning position, velocity and acceleration curves

$0 \leq \tau \leq 1$, $\tau = t/T$, T 为总时间,这样对于任意时间 T 都可以使用同样的 $s(\tau)$ 函数。而关节转动速度、转动加速度、转动加加速度与时间的关系式为 $s(\tau)$ 函数的 1~3 阶导的函数。求得系数如式(7)所示。

$$\begin{aligned} a_0 &= 0, a_1 = 0, a_2 = 0, a_3 = 0, \\ a_4 &= 35, a_5 = -84, a_6 = 70, a_7 = -20 \end{aligned} \quad (7)$$

运动方程式如式(8)所示。

$$\begin{cases} s(\tau) = 35\tau^4 - 84\tau^5 + 70\tau^6 - 20\tau^7 \\ s'(\tau) = 140\tau^3 - 420\tau^4 + 420\tau^5 - 140\tau^6 \\ s''(\tau) = 420\tau^2 - 1680\tau^3 + 2100\tau^4 - 840\tau^5 \\ s'''(\tau) = 840\tau - 5040\tau^2 + 8400\tau^3 - 4200\tau^4 \end{cases} \quad (8)$$

3) 直线插补轨迹规划

根据 2.2 节中最优测量姿态选择和关节同步轨迹规划可以得到关节臂测量机迅速靠近待测点的运动轨迹,关节臂测头靠近待测点,在离待测点 3~5 mm 处停止运动,之后使用直线插补算法,使测量机的测头匀速缓慢接近待测点直至接触,其原理如图 9 所示。

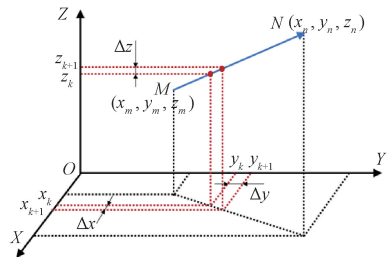


图 9 直线插补算法原理

Fig. 9 Schematic diagram of linear interpolation algorithm

测量机测头从 $M(x_m, y_m, z_m)$ 点运动到 $N(x_n, y_n, z_n)$ 点,设速度为 v_m ,则各个插补点的坐标公式为:

$$x_{k+1} = x_k + \frac{v_m \sqrt{(x_n - x_m)^2}}{\sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2 + (z_n - z_m)^2}} \quad (9)$$

$$y_{k+1} = y_k + \frac{v_m \sqrt{(y_n - y_m)^2}}{\sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2 + (z_n - z_m)^2}} \quad (10)$$

$$z_{k+1} = z_k + \frac{v_m \sqrt{(z_n - z_m)^2}}{\sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2 + (z_n - z_m)^2}} \quad (11)$$

其中, k 为插补点数。根据测头坐标逆解求各关节瞬时关节角度,使测量机测头匀速运动至目标点,完成最后的测量工作。

表 2 关节臂误差

Table 2 Joint arm error

连杆长度参数误差 δa_i	关节偏置参数误差 δd_i	关节扭转角度误差 $\delta \alpha_i$	关节转角参数误差 $\delta \theta_i$
杆长制造误差 δa_{im}	关节偏置制造误差 δd_{im}	关节扭转角制造误差 $\delta \alpha_{im}$	关节转角扭转变形误差 $\delta \theta_{ir}$
杆长安装误差 δa_{is}	关节偏置安装误差 δd_{is}	关节扭转角安装误差 $\delta \alpha_{is}$	关节转角驱动测角误差 $\delta \theta_{id}$
杆长弯曲误差 δa_{ib}	关节偏置弯曲变形误差 δd_{ib}	关节扭转角弯曲变形误差 $\delta \alpha_{ib}$	—

根据零件制造安装误差模型与关节臂连杆动态弯曲变形误差模型,建立的关节臂坐标测量机的各项结构参数误差模型如式(12)所示。

$$\begin{cases} \delta a_i = \delta a_{im} + \delta a_{is} + \delta a_{ib} \\ \delta d_i = \delta d_{im} + \delta d_{is} + \delta d_{ib} \\ \delta \alpha_i = \delta \alpha_{im} + \delta \alpha_{is} + \delta \alpha_{ib} \\ \delta \theta_i = \delta \theta_{ir} + \delta \theta_{id} + \delta \theta_{ic} \end{cases} \quad (12)$$

2.3 误差补偿算法

关节臂坐标测量机在进行测量时会出现误差,误差来源主要有零件加工制造误差、零部件安装误差、连杆动态弯曲变形误差、关节动态扭转变形误差、关节模组驱动误差。因此,为了降低测量机测量时的误差,提高测量时的定位与测量精度,在测控系统中需要加入误差补偿功能,对测量结果做误差补偿。

根据测量机误差来源,总结得到各项误差如表 2 所示,其中 i 为关节序号, i 为 1~6。

根据各项误差模型,建立关节臂坐标测量机的实际测量模型如式(13)所示。而多因素影响下关节臂坐标测量机的动态综合测量误差补偿模型如式(14)所示。

$$P^* = \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^7 T^*(\theta_i + \delta \theta_i, \alpha_i + \delta \alpha_i, a_i + \delta a_i, d_i + \delta d_i) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^7 \begin{bmatrix} \cos(\theta_i + \delta \theta_i) & -\sin(\theta_i + \delta \theta_i)\cos(\alpha_i + \delta \alpha_i) & \sin(\theta_i + \delta \theta_i)\cos(\alpha_i + \delta \alpha_i) & (\alpha_i + \delta \alpha_i)\cos(\theta_i + \delta \theta_i) \\ \sin(\theta_i + \delta \theta_i) & \cos(\theta_i + \delta \theta_i)\cos(\alpha_i + \delta \alpha_i) & -\cos(\theta_i + \delta \theta_i)\cos(\alpha_i + \delta \alpha_i) & (\alpha_i + \delta \alpha_i)\sin(\theta_i + \delta \theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i + \delta \alpha_i) & \cos(\alpha_i + \delta \alpha_i) & d_i + \delta d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$P^* - P = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \left(\prod_{i=1}^7 T^*(\theta_i + \delta \theta_i, \alpha_i + \delta \alpha_i, a_i + \delta a_i, d_i + \delta d_i) - \prod_{i=1}^7 T(\theta_i, \alpha_i, a_i, d_i) \right) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \left(\prod_{i=1}^7 \begin{bmatrix} \cos(\theta_i + \delta \theta_i) & -\sin(\theta_i + \delta \theta_i)\cos(\alpha_i + \delta \alpha_i) & \sin(\theta_i + \delta \theta_i)\cos(\alpha_i + \delta \alpha_i) & (\alpha_i + \delta \alpha_i)\cos(\theta_i + \delta \theta_i) \\ \sin(\theta_i + \delta \theta_i) & \cos(\theta_i + \delta \theta_i)\cos(\alpha_i + \delta \alpha_i) & -\cos(\theta_i + \delta \theta_i)\cos(\alpha_i + \delta \alpha_i) & (\alpha_i + \delta \alpha_i)\sin(\theta_i + \delta \theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i + \delta \alpha_i) & \cos(\alpha_i + \delta \alpha_i) & d_i + \delta d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \prod_{i=1}^7 \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.4 误差补偿模型验证

为验证误差补偿模型性能,开展关节臂测量机定位误

差实验。实验装置如图 10 所示。在测量空间中设定 3 个坐标点,使用激光跟踪仪获取其空间坐标作为基准,并计

算相邻点间的距离(L_1, L_2, L_3)。同时,利用关节臂测量机分别基于理想 DH 模型与误差补偿后 DH 模型测量相同点位的坐标并计算距离。测量结果如表 3 所示。



图 10 定位误差实验装置
Fig. 10 Positioning error experiment setup

表 3 不同测量方式下空间距离对比

Table 3 Comparison of spatial distances under different measurement methods (mm)				
测量方式	距离 L_1	距离 L_2	距离 L_3	平均误差
激光跟踪仪	144.767 1	437.506 2	428.550 5	
理想 DH 模型	149.972 0	439.697 8	430.964 6	3.270 2
误差补偿后 DH 模型	144.969 0	437.758 6	428.782 7	0.228 9

由表 3 可知,加入误差补偿模型后,定位精度提升约 93%,能有效的提高关节臂测量机定位精度,减少测量误差。

2.5 软件平台的搭建

本文所设计的测控系统需要实现虚拟样机与测量机实际样机同步运动,展现动画效果。而 Unity 作为目前主流的跨平台实时渲染引擎,能够实时进行 3D 渲染,且 Unity 可无缝对接以太网、管道、Modbus 等多种工业通信协议,支持调用 MATLAB、Python 等科学工具,因此选择以 Unity 平台为工具。

1) 测量机模型导入与待测模型的生成

将关节臂坐标测量机的 SolidWorks 三维模型导入 Unity 平台中,建立父子关系^[15],将所有零件构建成一个整体。

在虚拟平台的显示界面中,除了测量机模型的显示,待测物模型的显示也是本次测控系统设计的目标之一。其中待测物模型的生成最重要的步骤是实时将现实中待测物模型与测量机的相对空间位置映射到虚拟平台中。

为解决这一问题,本文采取的解决方案为先通过实体测量机手动定位待测物在以关节臂坐标测量机为基础下的空间坐标,然后通过虚拟平台中坐标与现实以关节臂坐标测量机为基础下的空间坐标系的比例,计算得到待测物

模型在虚拟平台中的空间坐标,通过脚本将待测物模型生成在该坐标下。

其中待测物模型多为提前设定好的模型,在 Unity 平台中提前制作。本文所选择的模型为标准球模型,在 Asset(资源)中提前制作一个任意大小的球体作为 Prefab(预制体),虚拟平台在得到现实中待测物的定位坐标后,使用 Instantiate 函数将该预制体实例化,并改变其 Transform 组件中空间坐标的数据,使现实测量机与待测物的坐标关系映射到虚拟平台中待测物模型与虚拟样机的坐标关系中。建立后的虚拟模型如图 11 所示。

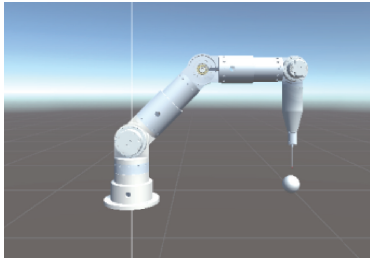


图 11 关节臂坐标测量机与待测球体在 Unity 中模型
Fig. 11 Articulated arm coordinate measuring machine and the model of the object to be measured in Unity

2) 通信系统的建立

在 Unity 平台环境下,使用 Visual Studio 中 .net 框架下编写脚本,使用 Socket 套接字建立 Ethernet 通信模块,实现对关节模组的实时在线通信,内容包括控制电机运动状态与运动参数并读取编码器数据。其通信格式为 16 进制通信,协议格式如表 4 所示。

表 4 以太网通信协议

Table 4 Ethernet communication protocol (B)	
协议字段	长度
帧头	1
设备地址	1
指令符	1
数据位数	2
数据内容	N
CRC 校验码	1
帧尾	1

在 Unity 中编写运动控制脚本,将 6 个包含关节模组中电机转动信息的命令发送至关节模组中,从而实现同时对 6 个关节进行运动控制。

虚拟机模型实时模仿实体机运动状态的核心是通过脚本程序以 50 次/s 的固定频率,对编码器所记录的旋转角度数据进行读取操作。在获取到旋转角度数据后,使用 Unity Engine 中的 Quaternion 函数,将这些角度信息映射至虚拟机的旋转关节。通过这种映射机制,虚拟机的旋转关节能够精确地按照与实体机中电机相同的方向和角度

进行旋转。从宏观层面来看,这种高频次的数 据读取与实时映射操作,使得虚拟机模型能够呈现出 50 fps 的流畅动画效果,从而高度逼真地模拟出实体机的运动状态。

测量机在测头接触到待测物体后的实时反馈是极其重要的。测头触发信号由 DAQ 采集卡采集,在 Visual Studio 中的 .NET Framework 框架下导入 NI 公司的 DAQmx 与 Common 两个 .dll 文件,实现在 .NET 环境下读取 DAQ 采集卡信号。编写控制台程序,实现自动读取 DAQ 采集卡信号,将读取到的信号以单向管道通信的方式传递到 Unity 平台中的上位机程序,从而实现对触发信号的检测。

在 MATLAB 中建立测量机正运动学模型,以 function 函数的形式导出为在 .NET 框架下的 .dll 文件,在 Visual Studio 编写控制台程序,使其输入 6 个关节角度,得到测头坐标系的转换矩阵,从而获得测头坐标。该控制台程序与 Unity 上位机程序建立双向管道通信,接收来自上位机程序读取到的 6 个关节角度值,将计算得到的侧头坐标反馈回上位机程序,通信系统整体结构如图 12 所示。

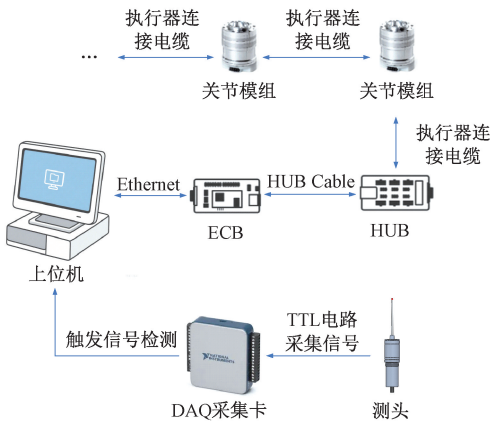


图 12 通信系统

Fig. 12 Communication system

3) 测控系统功能集成

本文所设计的关节臂坐标测量机测控系统的轨迹规划与误差补偿功能使用 MATLAB 编写,将写好的程序内嵌到 Unity 平台中,使在上位机软件中自动进行轨迹规划与误差补偿,整体上位机软件结构如图 13 所示,上位机软件界面如图 14 所示。



图 13 上位机软件结构

Fig. 13 Upper-level machine software structure

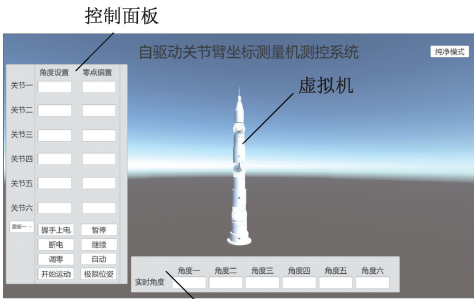


图 14 上位机软件界面

Fig. 14 Upper-level computer software interface

3 实验验证

3.1 实验装置搭建

为验证测控系统可行性,设计标准球测量实验与标准环规测量实验。测控系统实验装置如图 15 所示,标准球直径为 38.112 8 mm。在实验平台中,计算机与电气箱通过以太网通信与 DAQ 连接,电气箱连接总电源、驱动、网口、测头与 DAQ,控制整体关节臂坐标测量机的运动,并实时采集测头触发信号。

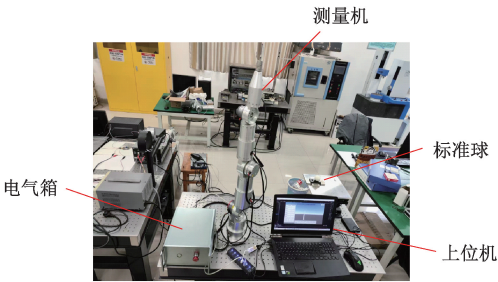


图 15 标准球测量实验装置

Fig. 15 Standard ball measurement experimental setup

3.2 待测点坐标抓取实验

对标准球直径测量首先抓取得测点坐标,人工输入各关节角度使测头靠近待测点,在测头与标准球待测点接触时,自动记录此时各关节角度与待测点在以关节臂坐标测量机为基础的空间坐标系下的坐标。选 4 个标准球待测点抓取,并将抓取到的球模型映射到上位机软件中。待测点住区得到的坐标如表 5 所示。

表 5 待测点坐标抓取	
Table 5 Coordinate acquisition of the test point (mm)	
待测点	待测点坐标(x,y,z)
1	(-614.662,54.038,250.676)
2	(-585.688,35.581,247.230)
3	(-608.307,13.257,247.450)
4	(-604.582,37.245,268.774)

3.3 最优姿态选取及多关节同步仿真

根据 2.1 节的算法获得的 4 个点的最优姿态,选取其中关节 2 转动较小的高姿态为最终的测量姿态。最终计

算得到测量 4 个待测点空间坐标的最优姿态下的关节旋转角度如表 6 所示。

对最优姿态下做多关节同步规划仿真,验证轨迹规划

表 6 最终测量姿态
Table 6 Final measurement of posture (°)

待测点	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	43.940	39.822	-59.582	83.902	-26.735	5.634
2	38.093	25.145	-42.244	88.030	-45.281	13.398
3	47.873	37.431	-57.856	84.374	-25.562	8.618
4	45.259	33.999	-56.766	83.310	-24.229	10.550

的可行性,在 MATLAB 上打开应嵌入上位机软件中的七次多项式轨迹规划的程序,选择第 1 个姿态的数据输入,验证轨迹规划的可行性,结果如图 16 所示,6 个关节同步启动且同步停止,验证了关节同步控制轨迹规划的可行性。

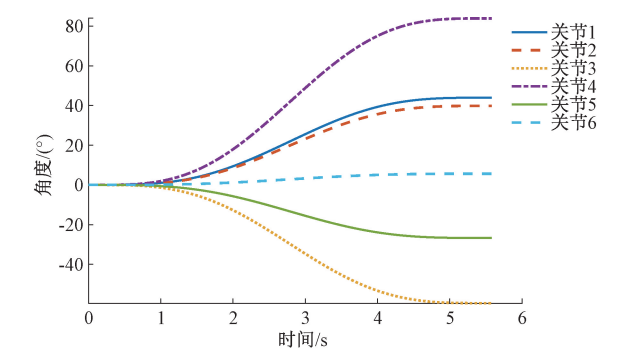


图 16 关节同步规划仿真

Fig. 16 Joint synchronization planning simulation

3.4 最优姿态下测量实验及误差补偿

在上位机软件中设定好最优姿态各关节角度后使关节臂坐标测量机按照轨迹规划后的运动轨迹运动,使测头接触待测点,重复测量 10 次,并对测量数据进行误差补偿,测得待测点坐标,拟合出球的直径。实验平台如图 17 所示。测得数据如表 7 所示。

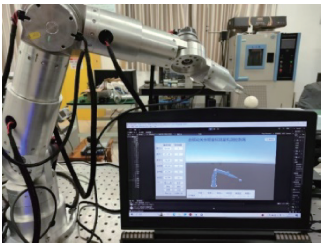


图 17 标准球测量实验

Fig. 17 Standard ball measurement experiment

根据测量结果可知,测量该球的平均误差为 0.015 5 mm。

3.5 标准环规测量实验

为进一步验证测控系统可行性,检验对复杂工件测量的准确性,进行对标准环规做测量实验,与前文所述标准

表 7 标准球拟合直径
Table 7 Standard ball fitting diameter (mm)

次数	拟合出的标准球直径	误差
1	38.098 7	-0.014 1
2	38.125 3	0.012 5
3	38.123 4	0.010 6
4	38.116 7	0.003 9
5	38.104 5	-0.008 3
6	38.107 6	-0.005 2
7	38.128 9	0.016 1
8	38.101 2	-0.011 6
9	38.129 8	0.017 0
10	38.132 1	0.019 3
平均	38.128 3	0.015 5

球测量实验测量球体外表面不同,该实验测量环规内圆直径。实验装置如图 18 所示,标准环规内圆直径为 30.001 mm。

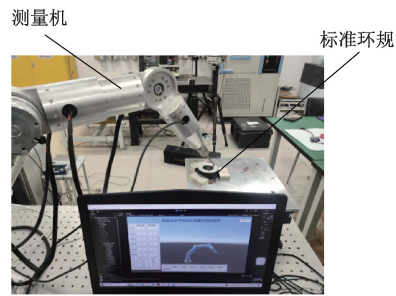


图 18 标准环规测量实验

Fig. 18 Standard ring gauge measurement experiment

与测量标准球步骤相同,抓取得测点坐标后确定测量姿态,对该姿态做轨迹规划,在确定运动轨迹后对待测点坐标进行测量并对测量数据做误差补偿。测量点选取标准环规端面 6 个点与内圆表面不同高度 15 个点。通过测量端面上的 6 个点拟合出端面所在平面,将测得的内圆 15 个点投影到拟合的端面平面,最后将这 15 个投影过后的点拟合出圆,即测得标准环规内圆直径与圆度。重复测量 3 次,拟合出标准环规内圆直径与圆度如表 8 所示。

表 8 标准环规内圆拟合直径与圆度

Table 8 Standard ring gauge inner circle fitting diameter and roundness (mm)

组别	最大拟合直径	最小拟合直径	拟合圆实际直径	直径误差	圆度	直径误差平均值	圆度平均值
第 1 组	30.035 7	30.016 5	30.026 1	0.025 1	0.009 6		
第 2 组	30.048 3	30.025 9	30.037 1	0.036 1	0.021 2	0.030 8	0.015 2
第 3 组	30.041 9	30.022 5	30.032 2	0.031 2	0.014 7		

其中圆度计算方法为最大拟合圆半径与最小拟合圆半径的差值。根据测量结果得到,测量该环规内圆直径平均误差为 0.030 8 mm,平均圆度为 0.015 2 mm。

4 结 论

本文针对关节臂坐标测量机测控系统进行研究,分析阐述了关节臂坐标测量机的结构组成与工作原理,并在此基础上分析了测量机的测控系统的功能需求,从而设计了关节臂坐标测量机的测控系统。将关节臂坐标测量机的 SolidWorks 模型导入到 Unity 平台中作虚拟样机,通过以太网通信实时监测实体样机的运动状态并反馈到软件平台中,使软件平台中的虚拟样机与实际样机同步运动,实现在线对关节臂坐标测量机运动情况的监测。通过建立关节臂坐标测量机的测控系统,将实际样机本身无法完成的轨迹规划与误差补偿等功能集成到软件平台中,并实现自动对待测物体的准确测量。通过实验验证本文研制的测控系统的可行性,选择了以第 2 关节转动较小最优姿态作轨迹规划,完成了 6 个关节同时启停的仿真验证。最后,测量机对标准球直径测量结果平均误差为 0.015 5 mm,对标准环规内圆直径测量误差为 0.036 1 mm,圆度平均误差为 0.021 2 mm,保证了关节臂坐标测量机的精密性。

本文设计的测控系统还存在需要改进的地方:抓取待测点坐标时仍需手动抓取,无法自动抓取,后续在进行关节臂坐标测量机测控系统的研究时,考虑加入传感器,自动抓取待测点坐标功能。误差补偿模型未加入温度补偿模块,在温度变化较大的情况下,误差补偿模型可能无法满足较高的精度要求。

参考文献

[1] Feng X G, Zhu J Q, Zhang J Y. The length error compensation method of articulated arm coordinate measuring machine [J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(10): 105106.

[2] Girija M, Vinod K, Mukesh J, et al. Measurement uncertainty assessment of articulated arm coordinate measuring machine for length measurement errors using Monte Carlo simulation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(9/10): 5903-5916.

[3] 马晓春, 沈梅, 胡婷婷, 等. 自驱动关节臂测量机多电机同步控制系统[J]. 机械设计与制造, 2024(9):

279-283.

Ma Xiaochun, Shen Mei, Hu Tingting, et al. Multi-motor synchronous control system for self-driving articulated arm measuring machine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(9): 279-283.

[4] Yenorkar R, Chaskar U M. GUI based pick and place robotic arm for multipurpose industrial applications[C]// 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems(ICICCS), 2018: 200-203.

[5] Sung W, Hsiao S. Intelligent measurement and monitoring by integrating fieldbus and robotic arm[J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2022, 34(3): 1737-1753.

[6] Duan J G, Gong X R, Zhang Q L, et al. A digital twin-driven monitoring framework for dual-robot collaborative manipulation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(9/10): 4579-4599.

[7] 刘鑫涛. 基于六轴机械臂的双向反射分布函数测控系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023:67-75.

Liu Xintao. Design of the bidirectional reflection distribution function measurement system based on the six-axis mechanical arm [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023:67-75.

[8] 付强. 一种机械臂的非线性控制[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019:60-66.

Fu Qiang. Nonlinear control for a kind of manipulator[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019:60-66.

[9] 王志华, 高文斌. 模块化可重构机械臂上位机软件设计[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(8): 109-110.

Wang Zhihua, Gao Wenbin. Software design of upper computer for modular reconfigurable manipulator[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020, 56(8): 109-110.

[10] 涂孔. 四自由度工业机器人运动学分析及控制系统研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017:33-45.

Tu Kong. Kinematics analysis and control system research on a 4-DOF industrial robot[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017:33-45.

[11] 崔晨. 单臂协作机器人控制系统的设计与研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019:25-62,65.

- Cui Chen. Research and design of one-arm collaborative robot control system [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019: 25-62,65.
- [12] 王凤祥, 张志杰, 陈昊泽. 六自由度机械臂系统设计与控制方式研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(4): 1-8.
- Wang Fengxiang, Zhang Zhijie, Chen Haoze. Design of 6-DOF manipulator system and research on control method [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(4): 1-8.
- [13] 陈丹惠, 张志华, 陈慧娟, 等. 模块化人机协作机械臂控制系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(12): 178-181.
- Chen Danhui, Zhang Zhihua, Chen Huijuan, et al. Modular collaborative robotic arm control system design [J]. Automation & Instrumentation, 2023(12): 178-181.
- [14] 占瑜毅, 胡毅, 胡鹏浩, 等. 自驱动关节臂坐标测量机测控系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 93-100.
- Zhan Yuyi, Hu Yi, Hu Penghao, et al. Measurement and control system of self-driven articulated arm coordinate measuring machine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12): 93-100.
- [15] 占瑜毅. 自驱动关节臂坐标测量机关节模组误差补偿及系统控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021: 17-24.
- Zhan Yuyi. Research on error compensation of joint module and system control of self-driven AACMM[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021: 17-24.
- [16] 杨洪涛, 张梦遥, 沈梅, 等. 自驱动关节臂坐标测量机上位机测控系统软件设计与仿真[J]. 工具技术, 2022, 56(3): 104-108.
- Yang Hongtao, Zhang Mengyao, Shen Mei, et al. Software design and simulation of host computer measurement and control system for self-driving articulated arm coordinate measuring machine [J]. Tool Engineering, 2022, 56(3): 104-108.
- [17] 张梦遥. 自驱动关节臂坐标测量机测控软件开发[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022: 36-48.
- Zhang Mengyao. Development of measurement and control software for self-driven articulated arm coordinate measuring machine [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022: 36-48.
- [18] 孙璐瑶. 自驱动关节臂坐标测量机测控虚拟交互平台研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024: 53-61.
- Sun Luyao. Research on virtual interaction platform for measurement and control of self-driven articulated arm coordinate measuring machine [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2024: 53-61.
- [19] 杨洪涛, 孙璐瑶, 沈梅. 自驱动关节臂坐标测量机可视化监控平台设计与仿真[J]. 工具技术, 2024, 58(5): 156-160.
- Yang Hongtao, Sun Luyao, Shen Mei. Design and simulation of visual monitoring platform of self-driven articulated arm coordinate measuring machine [J]. Tool Engineering, 2024, 58(5): 156-160.
- [20] 陈文浩, 丁垠冶, 宋仁成, 等. 测量不确定度评定方法新进展: 从统计方法到神经网络间接评定法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(11): 1-19.
- Chen Wenhao, Ding Yinye, Song Rencheng, et al. Advances in measurement uncertainty evaluation: From statistical methods to neural network indirect evaluation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(11): 1-19.
- [21] 李欣飞, 鄢然, 夏磊, 等. 线激光火车轮测量系统标定及误差修正方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(6): 71-82.
- Li Xinfei, Yan Ran, Xia Lei, et al. Calibration and error correction method for a line laser train wheel measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(6): 71-82.
- [22] 蒋欣怡, 乔贵方, 聂新港, 等. 基于拉线传感器的位姿测量及精度补偿方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(5): 59-66.
- Jiang Xinyi, Qiao Guifang, Nie Xingang, et al. Research on the pose measurement and accuracy compensation method based on draw-wire sensors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(5): 59-66.
- [23] 李春东, 张上旺, 汪飞, 等. 基于 BP 神经网络算法的粉碎机自适应控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(4): 188-194.
- Li Chundong, Zhang Shangwang, Wang Fei, et al. Design of adaptive control system for hammer mill based on BP network algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(4): 188-194.

作者简介

杨洪涛, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密检测技术、现代精密理论与应用。

E-mail: lloid@163.com

柯源, 硕士研究生, 主要研究方向为自驱动关节臂测控系统。

E-mail: keyuaner2000@163.com

沈梅(通信作者), 博士, 讲师, 主要研究方向为精密测试技术与仪器。

E-mail: MeiSally@163.com