

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104488

自驱动关节臂坐标测量机测控系统*

占瑜毅^{1,2} 胡 毅¹ 胡鹏浩¹ 叶 兵³ 汪仕铭³

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 合肥 230009; 2. 海宁奕斯伟集成电路设计有限公司 嘉兴 314499;
3. 合肥工业大学 电子科学与应用物理学院 合肥 230009)

摘 要:为了使关节臂坐标测量机满足在线、自动批量和智能测量的需求,提出研究自驱动关节臂坐标测量机,研究了其测控系统。系统以计算机作为控制器,与6个驱动关节及触发测量电路等组建硬件系统,软件采用状态机与事件结构相结合的结构框架设计,实现自驱动关节臂坐标测量机的运动控制和规划路径采样点自动数据采集。搭建实验系统对测量机进行测试实验,实验结果表明,在测控系统支持下自驱动关节臂坐标测量机运行平稳,测量机测量小尺寸球的重复性误差为0.038 mm、测量较大尺寸量块的重复性误差为0.192 mm ($k=2$)。测控系统的研究为自驱动关节臂坐标测量机标定技术、误差分析及应用研究奠定了基础。

关键词: 自驱动关节臂坐标测量机; 关节模组; 测量与控制; 状态机

中图分类号: TH721 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Measurement and control system of self-driven articulated arm coordinate measuring machine

Zhan Yuyi^{1,2} Hu Yi¹ Hu Penghao¹ Ye Bing³ Wang Shiming³

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Haining ESW IC Design Co., Ltd, Jiaxing 314499, China;
3. School of Electronic Science and Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract:In order to meet the needs of online, automatic and intelligent measurement of the articulated arm coordinate measuring machine (AACMM), a self-driven AACMM is proposed and its measurement and control system is studied in this paper. The hardware system uses the computer as the controller, and is built with six driving joints and trigger measurement circuit. The software is designed with the structural framework of state machine and event structure. The motion control and the automatic measurement of sampling points in the planning path of the self-driven AACMM are realized. The test results show that the measuring machine runs smoothly with the support of the measurement and control system, and the self-driven AACMM can achieve a repeatability of 0.038 mm for the small size ball and 0.192 mm ($k=2$) for the larger size gauge block. The study on the measurement and control system in this paper lays a foundation for the calibration technology, error analysis and application research of the self-actuated articular arm coordinate measuring machine. .

Keywords: self-driven articulated arm coordinate measuring machine; joint module; measurement and control system; state machine

0 引 言

关节臂坐标测量机以其便携性、测量空间宽、成本低等特点在大型装备、航空、汽车等工业领域得到了广泛的

应用^[1-4]。关节臂坐标测量机是一种典型的非正交坐标测量机,其关节内的圆编码器测量关节转动角度,通过单片机或FPGA对各圆编码器等数据进行数据采集,并借助上位机实现坐标测量^[5-6]。关节臂坐标测量机采用手动拖拽测量方式,该方法存在测量力不可控、测量姿态随机、

采样点不均匀、重复性和稳定性差等问题^[7]。为了满足在线、自动批量测量的需求,提出研究自驱动关节臂坐标测量机^[8-11]。自驱动关节臂坐标测量机在关节中增加了电机驱动环节,并引入了恒力触发测头,通过轨迹规划使之可以实现自动测量。文献[8-9]设计的自驱动关节构型由圆编码器、直流电机、谐波减速器和精密轴系组成,并以此为基础设计了自驱动关节臂坐标测量机模型。该驱动关节直接用圆编码器测量输出轴角度,具有较高的测角精度,但关节体积较大,还需进一步小型化研究提高集成度才能实际使用。参考国内外较著名的轻型柔性关节机器人的驱动部分,它们的关节普遍采用直流电机和超声波电机等驱动,采用行星齿轮减速器、谐波减速器降低转速。随着机器人的广泛应用,关节模块化成为研究热点并应用其中^[12-16],也出现了集成关节模组产品,如科尔摩根、INNFOs、泰科等。集成关节模组主要由直流电机、谐波减速器、角编码器及嵌入式电路系统等组成,具有集成度高、重复定位精度高、体积小等特点。将集成关节模组引入自驱动关节臂坐标测量机,并制作样机,本文研究其测控系统,控制测量机运动,完成基本的测量。

1 测控系统硬件设计

从角度测量的分辨率、精度及性价比等方面综合考虑,自驱动关节臂坐标测量机内部的驱动关节选用 INNFOs 集成关节模组,它主要由无刷伺服电机、谐波减速器、多圈绝对值式磁栅编码器及驱动器等组成。根据关节模组在测量机中的安装位置,选择了 3 种直径分别为 70、80、90 mm 的关节模组来适应不同的扭矩与负载,减速比均为 101:1,角分辨率为 20 bit,精度为 1 角分,关节模组与控制器之间通信采用 CAN 总线接口。自驱动关节臂坐标测量机直接使用计算机作为主控制器,通过以太网转 CAN 控制器(ethernet to CAN board, ECB)控制测量机的运动和测量,ECB 起到了以太网和 CAN 通信相互转换的网桥作用,其主控芯片采用 32 bit STM32F429 MCU。STM32F429 基于 ARM Cortex-M4 内核,其运行频率最高可达 180 MHz,带有单周期 DSP 乘法器等,也常被用作机器人的控制器^[17]。

自驱动关节臂坐标测量机的测头选用雷尼绍 LP2 恒力触发测头,搭配 FS2i 基座,在测针触碰测量点的作用力达到阈值时,测座上的固态继电器(SSR)会发生状态变化,为开关量信号。为使该信号作为测量的触发信号,设计了开关量转 TTL 信号电路,如图 1 所示,电路中使用高速光电隔离器件,可防止测量机机体感应信号对内部电路的干扰。TTL 触发信号通过数据采集卡接到计算机,触发后续测量工作。

6 个关节模组通过 CAN 总线串联至 HUB,驱动电源

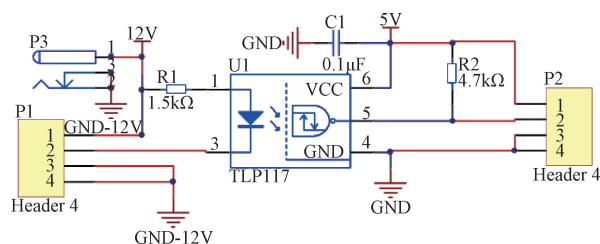


图 1 触发信号转换电路

Fig. 1 Trigger signal conversion circuit

也连接到 HUB 上,HUB 在转发指令的同时也为各关节模组供电,测控系统组成框图如图 2 所示。自驱动关节臂坐标测量机样机及测控系统如图 3 所示。

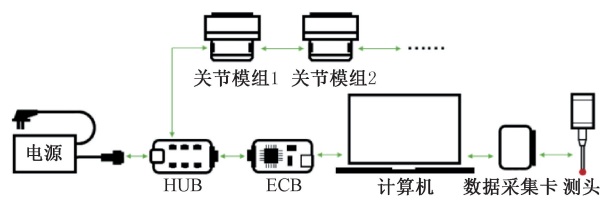


图 2 测控系统组成框图

Fig. 2 Block diagram of measurement and control system

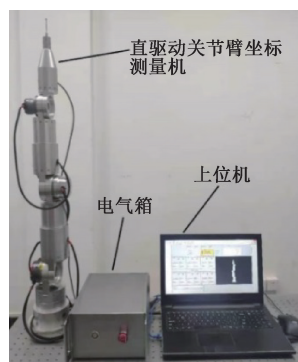


图 3 自驱动关节臂坐标测量机系统

Fig. 3 The self-driven AACMM system

2 测控系统软件设计

测控系统软件需具有对关节模块运动控制和角度测量、测量机的路径规划及测量等功能,软件功能框图如图 4 所示,软件在 LabVIEW 平台上开发。

2.1 关节运动控制模块程序

对关节模组的测控是本软件系统的基础。计算机通过以太网和各关节模组进行通信,建立连接前,需要固定作为主机的计算机的本地 IP 地址,而关节模组作为从机的 IP 地址由 ECB 固定。以太网通信协议分为物理层、数据链路层和用户层。物理层的电气接口标准为 Ethernet,IEEE 802.3-2002 标准、100 M 全双工通信;数据

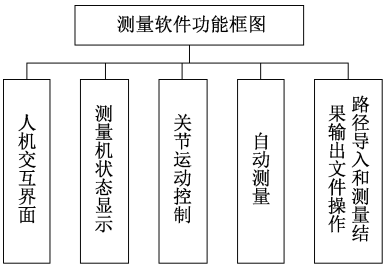


图 4 测控系统软件功能框图

Fig. 4 Function block diagram of measurement and control system software

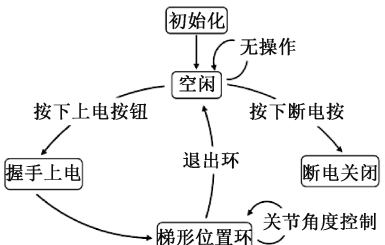


图 5 关节运动控制状态图

Fig. 5 Joint motion control state diagram

链路层规定了数据帧的具体格式,主机与从机采用相同的数据格式,数据中的每个字段使用 16 进制表示;用户层定义了从机与计算机通信的命令接口。计算机收发数据格式按数据链路层通信协议,如表 1 所示。

表 1 通信协议数据帧格式

Table 1 Communication protocol data frame format

帧头	设备地址	指令符	数据位数	数据内容	CRC 校验码	帧尾
1 byte	1 byte	1 byte	2 byte	N byte	2 byte	1 byte
0xEE	0x01~0xFF	0x00~0xFF	0x0000~0xFFFF	具体数据	数据校验码	0xED

指令符指定了对关节模组所要进行的操作,有握手、与各关节模组通信网建立、上电以及对各关节模组控制模式等设置和数据采集等,随后是操作所对应的两个字数据,如果是驱动关节转动或读取角度的数据,这些数据通常不是整数。关节内采用的处理器一般是一个定点处理器,若直接使用 float 等类型数据进行浮点运算会使得编译器生成大量代码来完成一段看似简单的浮点运算,这会显著加长程序的执行时间,且其占用的资源量也会成倍地增加。为了使小数和定点数转换快速高效,这里“数据内容”采用 IQ24 格式,表示为电机转动圈数范围为-128~127.999 999 940 圈,已知谐波减速器减速比为 101:1,因此人机交互中驱动关节转动设置或关节变量显示与“数据内容”间需换算得到。

考虑程序需配合多场景实验需求,关节运动控制模块程序即主程序的结构采用了状态机加事件结构的程序框架,保证了动态顺序的执行和触发测量的及时响应,设计的状态机如图 5 所示。在状态机中,定义了枚举常量来表示初始化、空闲、握手、上电、断电关闭和梯形位置环状态变量,每一个状态对应条件结构一个分支,根据前面板命令和测量机的动作动态控制程序走向,关节运动控制模块软件相关的前面板截图如图 6 所示。

程序初始化,并与各关节建立网络通信及上电后,默认转至梯形位置环状态,在此状态下可以通过人机交互



图 6 前面板关节运动控制部分截图

Fig. 6 Screenshot of joint motion control section of the front panel

对各关节模组进行控制,对测量机的运动控制和测量的实现均在这一分支进行。

自驱动关节臂坐标测量机进行自动测量需事先进行路径规划,根据测量任务,规划测量机行走路线及测量时的姿态,设置若干中间点、测量点。然后测量机按规划路径以固定姿态进行测量。从程序控制角度,此部分程序采用了事件结构,用于及时响应前面板按钮控制事件、测头触发测量事件及中间点用户事件等。其中,执行按钮事件分支会驱动各关节转到规划的角度位置。为实现连续路径点的移动,为中间点创建一用户事件,在关节运动到中间的目标点位置时引发进入该用户事件分支,驱动各关节转动到下一目标点。

从关节运动的平稳性角度,关节模组运动使用了梯形曲线进行轨迹规划。梯形曲线模式下的关节角度和速度曲线如图 7 所示。按照加、减、匀速过程可将梯形曲线分为 $0 \sim t_1$ 、 $t_1 \sim t_2$ 、 $t_2 \sim t_f$ 三段,由速度曲线知

$$t_1 = t_f - t_2 = \frac{v_m}{a} \tag{1}$$

梯形曲线角度与时间关系式可用分段函数表示为:

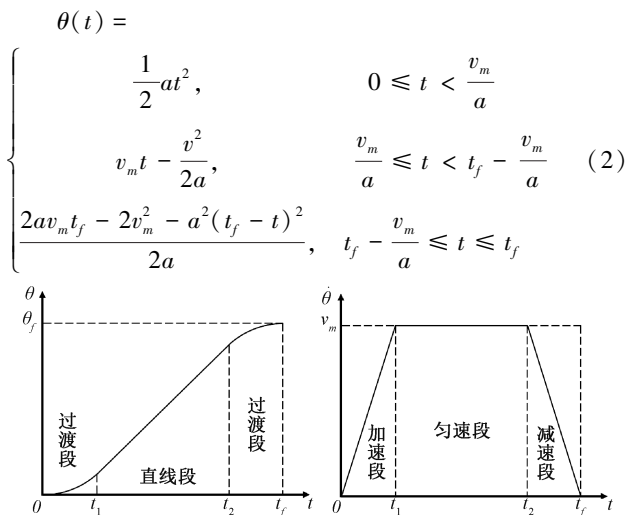


图 7 梯形曲线位置及速度理论曲线

Fig. 7 Position and velocity theory curve of trapezoidal curve

梯形曲线模式下关节运行速度连续,但加速度的不连续易带来振动。通过实验,并借助于测量机状态反馈程序的反馈数据,合理选择了最大速度 v_m 和 a ,避免这一状况发生。

2.2 测头触发测量模块程序

控制自驱动关节臂坐标测量机运动的过程中,程序会实时读取各关节变量并显示,而最关键的是采样点的测量数据,即空间坐标。当测量机测头触碰被测物时产生作用力达到其阈值时,将产生下降沿触发信号。系统感知触发信号时,立即锁存当前各关节模组角度值,基于 D-H 法建立运动学模型^[18-19],计算得到触发时刻的测头坐标系在基座坐标系下的位姿矩阵,为:

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & x_p \\ n_y & o_y & a_y & y_p \\ n_z & o_z & a_z & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^6 \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & l_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & l_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: l_i 为连杆长度,表示相邻两关节转动轴公垂线的长度; α_i 为连杆扭角,表示相邻两关节轴线的夹角,绕 x_i 轴旋转; d_i 为关节偏置,表示相邻两关节之间的距离即相邻 x 轴之间的距离; θ_i 为关节变量,表示相邻坐标系 x 轴之

间的夹角,绕 z_{i-1} 轴旋转; l 为测头杆长度; (x_p, y_p, z_p) 为测头的空间坐标。

为了实现多测点自动数据采集,设置了文件导入和输出功能。规划好的路径点以 Excel 文件形式保存,由程序从文件中依次读取,作为驱动各关节的控制目标;触发测量时采集的关节变量保存到另一个 Excel 文件中,采用这样的文件格式便于 MATLAB 等软件对数据作后续处理。程序流程如图 8 所示。

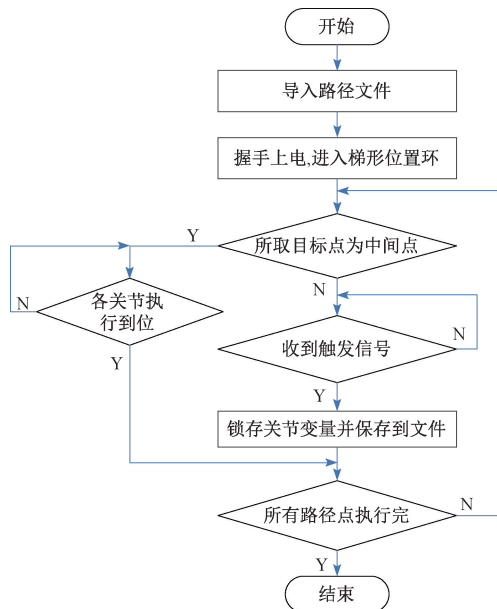


图 8 自动测量程序流程

Fig. 8 Flow chart of automatic measurement program

2.3 测量机状态反馈模块程序

在自驱动关节臂坐标测量机运行过程中,其状态信息不仅体现人机交互的友好,还为测量机操作者提供重要参考信息,便于判断操作。此模块中主要提供三项状态反馈:测头末端位姿实时显示,虚拟样机实时姿态显示,关节速度与位置曲线显示等。

测头末端位姿以位姿矩阵形式显示,由实时采集的关节变量代入式(3)计算得到。为了方便测量机的调试,程序中设计了测量机虚拟样机,实现姿态的实时显示。虚拟样机的设计需先将 SOLIDWORKS 中三维模型零部件导出成 wrf 格式文件,获取详细的零件体中心位置及零件间的坐标变换关系,接着在 LabVIEW 中对 wrf 格式零件装配,装配从基座部件开始,新的连接部件按与前一层的部件坐标变换关系做旋转、平移变换到其理论配合位置。旋转变换遵循右手定则确定正负,平移变换的正负同样取决前一层的坐标系方向。当测量机工作时,系统实时获取测量机当前 6 个关节变量,输入给虚拟样机子程序,可得到实时的机身姿态显示,如图 9 所示。为了分析测量机运动状况,程序也获取了各关节速度和角

度,并以曲线显示(图略)。

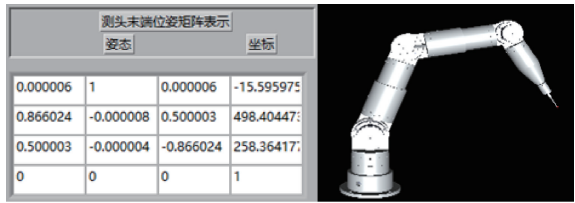


图 9 前面板测量机状态反馈部分截图
Fig. 9 Screenshot of self-driven AACMM feedback section of the front panel

3 实验

3.1 标定实验

在式(3)给出的测量方程中,除关节变量以外,其余参数为测量机的结构参数,由于加工和装配等原因,测量机的结构参数异于设计值,在用测量模型计算空间坐标时会带来测量误差,需通过标定技术辨识结构参数误差^[18]。标定实验采用 API Tracker 3 激光跟踪仪作为基准测量工具,激光跟踪仪 10 m 内绝对测距精度为 15 μm,分辨率为 1 μm。在测量机测杆上附着法兰盘和磁铁吸附激光跟踪仪实心靶球,通过人机交互界面控制自驱动关节臂坐标测量机带动靶球运动接近采样点,并采集关节变量,激光跟踪仪测量靶球中心坐标,实验系统如图 10 所示。在标定空间内均匀设置 124 个采样点,其中 84 个点用于测量机结构参数标定训练,40 点用于验证。



图 10 标定实验
Fig. 10 Calibration experiment

通过距离误差模型及优化算法辨识得到结构参数误差并对其进行修正,结果如表 2 所示。分别采用标定前后的结构参数对 40 个采样点构成的 20 组距离根据测量模型进行计算,并计算其与激光跟踪仪测量的标准距离的误差,结果如图 11 所示。经补偿后,以最大距离误差绝对值来看,从 13.895 降低到了 0.300 mm,减少了约 97.8%。后续测量用到测量模型,其中的结构参数为修正后的结果。

3.2 测量实验

为验证自驱动关节臂坐标测量机测控系统的可行性,设计了标准球和量块测量实验。

表 2 修正后测量机结构参数

Table 2 Structure parameter of the self-driven AACMM after calibration

关节	关节转角/ (°)	连杆间距离/ mm	连杆长度/mm	连杆扭角/(°)
1	0.000 8	175.510 0	0.398 8	90.017 8
2	-0.556 5	20.567 8	-0.289 3	-89.993 1
3	-0.051 2	290.792 1	0.273 1	-90.012 0
4	-0.198 1	20.687 0	-1.759 4	90.097 8
5	0.040 2	266.862 0	0.584 6	90.020 1
6	-0.073 4	15.591 7	-0.020 3	-90.030 3

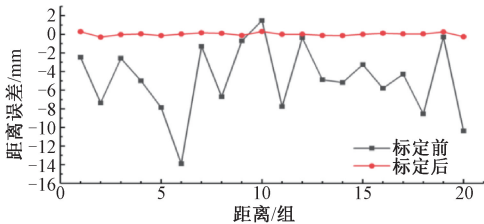


图 11 测试点标定前后距离误差对比
Fig. 11 Comparison diagram of distance error of test points before and after calibration

测量标准球实验如图 12 所示,被测标准球半径为 25.431 mm。在球面上均匀选取 12 个采样点,将规划的测量路径保存为 Excel 文件。导入该文件,自驱动关节臂坐标测量机自动测得 12 个球面点的空间坐标,利用 LabVIEW 提供的拟合球函数拟合出球的半径。由于测量机上的测头为直径为 5 mm 的红宝石球,需要对测量结果加以修正。对标准球重复测量 10 次,拟合得到球体半径及误差如表 3 所示。标准差用式(4)计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - X)^2}{n - 1}}$$

(4)



图 12 标准球测量实验
Fig. 12 Standard spherical measurement experiment

由表 3 可知,测量机测量该球的平均误差为-0.007 6 mm。

选用长度为 400 mm 的 0 级量块作为被测对象,搭建

实验平台如图 13 所示。测量机在量块一个端面上测量若干点,将这些点拟合成平面,在另一端面测量并求出该点到拟合平面距离,为量块长度。同样用人机交互界面控制测量机来规划路径,并保存于文件中,测量机按此路径自动采集测量点数据。

表 3 标准球测量结果
Table 3 Standard ball measurement results

次数	r/mm	r-2.5/mm	误差/mm	标准差/mm
1	27.921 5	25.421 5	-0.009 5	
2	27.933 6	25.433 6	0.002 6	
3	27.937 0	25.437 0	0.006 0	
4	27.892 1	25.392 1	-0.038 9	
5	27.954 0	25.454 0	0.023 0	
6	27.919 8	25.419 8	-0.011 2	
7	27.914 2	25.414 2	-0.016 8	
8	27.907 1	25.407 1	-0.023 9	
9	27.944 2	25.444 2	0.013 2	
10	27.9106	25.410 6	-0.020 4	
平均	27.923 4	25.423 4	-0.007 6	0.018 8

实验中平面的拟合使用最小二乘法。平面方程一般表达式为:

$Ax + By + Cz + D = 0 \quad C \neq 0$ (5)

将平面方程改写为:

$z = a_0x + a_1y + a_2$

其中:

$a_0 = -\frac{A}{C}, a_1 = -\frac{B}{C}, a_2 = -\frac{D}{C}$ (6)

求 n 个点(x_i, y_i, z_i), $i = 0, 1, \cdots, n-1 (n \geq 3)$ 拟合的平面,则要使 n 个点到拟合平面距离最小,即:

$S = \sum_{i=0}^{n-1} (a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)^2$ (7)

满足式(8)。

$\frac{\partial S}{\partial a_j} = 0 \quad j = 0, 1, 2$ (8)

联合式(5)~(8),可推得:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{n-1} x_i^2 & \sum_{i=0}^{n-1} x_i y_i & \sum_{i=0}^{n-1} x_i \\ \sum_{i=0}^{n-1} x_i y_i & \sum_{i=0}^{n-1} y_i^2 & \sum_{i=0}^{n-1} y_i \\ \sum_{i=0}^{n-1} x_i & \sum_{i=0}^{n-1} y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{n-1} x_i z_i \\ \sum_{i=0}^{n-1} y_i z_i \\ \sum_{i=0}^{n-1} z_i \end{bmatrix}$$
 (9)

本文实验用于拟合平面的点有 8 个,将测量数据代入式(9),可解得 a_0, a_1, a_2 ,假设一个不为 0 的常量 C ,根据式(6),即可得到 A, B, C, D 的一个解。量块另一端测量点的坐标为(x_0, y_0, z_0),该点到该平面的距离为量块的测量长度。

$$d = \frac{|Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$
 (10)

对量块测量 10 次并拟合得到量块长度,测量结果如表 4 所示(需修正测头红宝石球半径)。

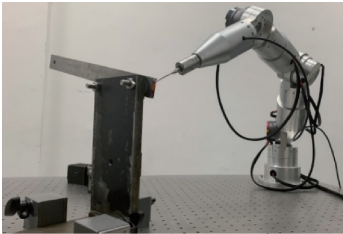


图 13 长度测量实验
Fig. 13 Length measurement experiment

表 4 长度测量结果
Table 4 Length measurement results

次数	d/mm	d-5/mm	误差/mm	标准差/mm
1	405.040	400.040	0.040	
2	405.255	400.255	0.255	
3	405.008	400.008	0.008	
4	405.185	400.185	0.185	
5	405.056	400.056	0.056	
6	405.021	400.021	0.021	
7	405.211	400.211	0.211	
8	405.192	400.192	0.192	
9	405.064	400.064	0.064	
10	405.227	400.227	0.227	
平均	405.126	400.126	0.126	0.096

自驱动关节臂坐标测量机的重复性误差采用标准差计算,置信系数取 $k = 2$,重复性误差为 2σ ,可得自驱动关节臂坐标测量机测量较小尺寸球的重复性误差为 0.038 mm,测量较大尺寸量块的重复性误差为 0.192 mm。

4 结 论

本文以自主设计的自驱动关节臂坐标测量机为核心,设计了一套测量机的测控系统。经过实验,本测控系统运行稳定,可以单关节、多关节运动控制,借助于文件操作,可以按规划路径自动完成测量点数据采集,及数据文件输出,程序结构也便于后续嵌入数据处理功能。本文研究保障了测量机标定、误差源分析、建模与修正、轨迹规划等研究正常展开,通过测量机精度理论和相关技术的研究,进一步提高测量机的测量精度。

参考文献

[1] 于连栋, 赵会宁. 关节类坐标测量机关键技术及进展[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1179-1888.

- YU L D, ZHAO H N. Key technologies and advances of articulated coordinate measuring machines [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (8): 1179-1888.
- [2] 王诚鑫, 王巍, 周星宇, 等. 一种基于激光跟踪仪与关节臂测量机的大尺寸工件组合测量方法[J]. 应用激光, 2020, 40(3): 131-134.
- WANG CH G, WANG W, ZHOU X G, et al. Combined measuring method for large components based on laser tracker and articulated arm measuring machine [J]. Applied Laser, 2020, 40(3): 131-134.
- [3] 吴宇, 胡鹤鸣, 杨卓, 等. 基于关节臂的超声测流装置几何参数精测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 90-98.
- WU Y, HU H M, YANG ZH, et al. Research on precise measurement method of geometric parameter of ultrasonic flow measurement device based on AACMM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 90-98.
- [4] 程航, 陈靖芯, 孙会明, 等. 基于关节臂测量机的钣金件曲面逆向建模研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2017, 55(2): 41-44.
- CHENG H, CHEN J X, SUN H M, et al. Reverse modeling of car sheetmetal surfaces based on ROMER absolute arm measuring machine [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2017, 55(2): 41-44.
- [5] 郭丽峰, 张国雄, 郑志翔, 等. 关节臂式坐标测量机数据采集系统的研制[J]. 中国机械工程, 2007(7): 829-833.
- GUO L F, ZHANG G X, ZHENG Z X, et al. Development of the data acquisition system for articulated arm CMM [J]. China Mechanical Engineering, 2007(7): 829-833.
- [6] 于连栋, 鲁思颖, 张伟, 等. 平行双关节坐标测量机连杆微变形测量系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(11): 1621-1629.
- YU L D, LU S Y, ZHANG W, et al. Measuring system of micro-deformation of parallel double-joint coordinate measuring machine linkage [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(11): 1621-1629.
- [7] CUESTA E, MANTARAS D A, LUQUE P, et al. Dynamic deformations in coordinate measuring arms using virtual simulation [J]. International Journal of Simulation Modelling, 2015, 14: 609-620.
- [8] 胡毅, 黄炜, 胡鹏浩, 等. 自驱动关节臂坐标测量机模块化关节设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(08): 2021-2029.
- HU Y, HUANG W, HU P H, et al. Design of modular articulation in self-driven AACMM [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 2021-2029.
- [9] HU Y, HUANG W, HU P H, et al. Design and validation of a self-driven joint model for articulated arm coordinate measuring machines [J]. Applied Sciences, 2019(9): 3151.
- [10] 余越, 胡毅, 胡鹏浩, 等. 自驱动关节臂坐标测量机臂杆变形静态误差预测模型[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 39-48.
- YU Y, HU Y, HU P H, et al. Static error prediction model of linkage deformation of self-driven articulated arm coordinate measuring machine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 39-48.
- [11] 杨洪涛, 江磊, 刘润泽, 等. 自驱动关节臂坐标测量机误差分析与结构优化设计[J]. 煤矿机械, 2020, 41(3): 117-119.
- YANG H T, JIANG L, LIU R Z, et al. Error analysis and structural optimum design of self-driven AACMM [J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(3): 117-119.
- [12] 熊根良. 具有柔性关节的轻型机械臂控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- XIONG G L. Research on control of light weight robot with flexible joints [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [13] HIRZINGER G, BUTTERFASS J, GREBENSTEIN M, et al. Space robotics-driver for a new mechatronic generation of light-weight arms and multifingered hands [C]. 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2001: 1160-1168.
- [14] 李国涛. 轻型机械臂模块化柔顺关节研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LI G T. Research on modular compliant joint of light weight robotic arm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [15] 刘荣耀. 协作机器人关节模组系统的设计与驱动控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- LIU R Y. Design and research on drive control of cooperative robot joint module system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [16] TAO Z H, ZHANG T, QI M Z, et al. Research and implementation of a new 6-dof light-weight robot [C]. Iop Conference, 2017, 69(1), 012131.
- [17] 刘云楷, 邵昌尧, 李杰, 等. 智能安防机器人控制系统设计与研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(4): 25-29.
- LIU Y K, SHAO CH Y, LI J, et al. Design and research

- of the master controller of intelligent security robot [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42 (4): 25-29.
- [18] DUPUIS J, HOLST C, KUHLMANN H. Improving the kinematic calibration of a coordinate measuring arm using configuration analysis [J]. Precision Engineering, 2017, 50: 171-182.
- [19] 徐可欣, 张方, 蒋祺, 等. 六轴机器人奇异点及运动学算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(9): 49-54.
- XU K X, ZHANG F, JIANG Q, et al. Research on singularity and kinematics algorithm of 6axis robot [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(9): 49-54.

作者简介



占瑜毅, 2018 年于合肥工业大学获得学士学位, 2021 年于合肥工业大学获得硕士学位, 现为海宁奕斯伟集成电路设计有限公司数字 IC 设计工程师, 主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail: 2018170026@mail.hfut.edu.cn

Zhan Yuyi received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2018, M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2021, respectively. Now he is a digital IC design engineer at Haining ESWIN IC Design Co, Ltd. His main research interests include coordinate measurement technology and intellectualization of measurement instruments.



胡毅(通信作者), 1983 年于华中工学院(现华中科技大学)获得学士学位, 1988 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2011 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学副教授, 主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail: huyi@hfut.edu.cn

Hu Yi(Corresponding author) received her B. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1983, received her M. Sc. and Ph. D. degrees from Hefei University of Technology in 1988 and 2011, respectively. Now, she is an associate professor at Hefei University of Technology. Her main research interests include coordinate measurement technology and intellectualization of measurement instruments.