

文章编号 1004-924X(XXXX)XX-0001-09

自驱动关节臂坐标测量机轨迹优化

杨洪涛^{1*}, 刘月琪¹, 程晶晶¹, 沈梅¹, 胡毅²

(1. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001;
2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230001)

摘要: 为了提升自驱动关节臂坐标测量机(后简称为测量机)的测量精度与测量效率, 针对其在线测量轨迹优化问题, 提出一种基于粒子群算法的轨迹优化方法。首先, 基于MDH参数法建立测量机正运动学模型, 并利用S形加减法和匀速直线插补法进行混合轨迹规划。其次, 以运行时间和运动平稳性为优化目标, 利用粒子群算法进行轨迹优化。最后, 在MATLAB、ADAMS环境下建立测量机模型进行标准球测量仿真分析, 并基于搭建的测量机样机开展标准球测量实验。研究表明: 采用基于粒子群算法对混合轨迹规划进行优化的方法能够保证测量机在工作时运行平稳, 标准球测量时间由62.91 s减至57.35 s, 标准球测量半径误差由0.057 1 mm降至0.042 3 mm。证实该轨迹优化方法能够有效降低测头振动, 提高测量机在线测量精度和测量效率。

关键词: 自驱动关节臂坐标测量机; 轨迹优化; 粒子群算法; S形加减法

中图分类号: TP721 **文献标识码:** A

Trajectory optimization of self-driven AACMM

YANG Hongtao^{1*}, LIU Yueqi¹, CHENG Jingjing¹, SHEN Mei¹, HU Yi²

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, China;

2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 232001, China)

* Corresponding author, E-mail: lloyd@163.com

Abstract: In order to improve the measurement accuracy and efficiency of self-driven arm articulated coordinate measuring machine (referred to as AACMM), a trajectory optimization method based on particle swarm optimization algorithm (PSO) was proposed to solve the online trajectory optimization problem of AACMM. Firstly, the forward kinematics model of the measuring machine was established based on MDH parameter method, and the mixed trajectory planning was carried out by S-shape addition and subtraction method and uniform linear interpolation method. Secondly, particle swarm optimization was used to optimize the trajectory by taking running time and motion stability as the optimization objectives. Finally, a measuring machine model was established under the environment of MATLAB and ADAMS for the simulation analysis of standard ball measurement, and the standard ball measurement experiment was carried out based on the built measuring machine prototype. The results show that the hybrid trajectory plan-

收稿日期: 2022-04-27; 修订日期: 2022-05-31.

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(No. 202004a07020046); 国家自然科学基金资助项目(No. 51775163)

ning optimization method based on particle swarm optimization algorithm can ensure the smooth operation of the measuring machine, the measuring time of the standard ball is reduced from 62.91s to 57.35s, and the measuring radius error of the standard ball is reduced from 0.0571mm to 0.0423mm. It is proved that the trajectory optimization method can effectively reduce the probe vibration and improve the measurement accuracy and efficiency of the measuring machine.

Key words: self-driven AACMM; trajectory optimization; particle swarm optimization; S-curve

1 引言

现有手动式关节臂测量机(Arm Articulated Coordinate Measuring Machine, AACMM)采用人力拖拽的测量方式,虽然避免了路径规划问题,但存在测量力不可控制、测量位姿与测量路径不可复现等问题^[1-2]。因此提出一种自驱动关节臂坐标测量机^[3-6](后简称为:自驱动关节臂测量机),通过在旋转关节部分引入一体化关节模组,实现自驱动关节臂测量机自驱动控制以及对工件几何特征的自动测量。轨迹规划是自动测量中关键环节,且自驱动关节臂测量机结构与常见工业机械臂结构相似,因此自驱动关节臂测量机也需要进行轨迹规划及优化。

合理的轨迹规划有利于提高机械臂测量机的测量精度和测量效率,决定了机械臂的运动方式和工作性能^[7]。机械臂的轨迹规划^[8-9]一般是在关节空间内和笛卡尔空间内,前者主要有多项式、S形速度曲线等规划方法,后者则大多采用插值点坐标逆解的规划方式。随着对测量效率的要求越来越高,出现了以时间、能量、冲击为目标或多目标的轨迹优化算法。马宇科^[10]等针对两栖机器人的水下轨迹优化问题,通过对比基于GCOP与SQP的轨迹算法,证明了使用SQP算法规划的路径更合理,更有效。Amruta Rout^[11]等为了降低机器人的位置误差,采用一种改进的多目标蚁狮算法进行轨迹优化,显著降低了扭矩率和加加速度,使运行时间大大减少。韩江桂^[12]等针对机械臂运动效率和冲击问题采用灰狼算法进行优化,降低了运动过程中的振动。袁锦涛^[13]等针对工业机器人多目标综合最优轨迹规划问题,采用粒子群算法对五次多项式构造的关

节空间轨迹进行优化,有效降低了工业机器人的冲击振动,实现了时间—能量—冲击的性能最优。王延年^[14]等针对六自由度机器人多目标综合最优轨迹规划问题,采用改进粒子群算法对B样条轨迹规划进行优化,有效降低运行过程中冲击振动,实现了时间性能最优。

本文基于自驱动关节臂测量机的机械结构及上述轨迹规划、轨迹优化的现有研究,提出自驱动关节臂测量机的混合轨迹规划以及基于粒子群算法的多目标测量轨迹优化方法,并通过以标准球为测量对象的仿真实验和实际测量,验证该方法的有效性。

2 自驱动关节臂测量机的结构原理与运动轨迹规划

2.1 自驱动关节臂测量机结构原理

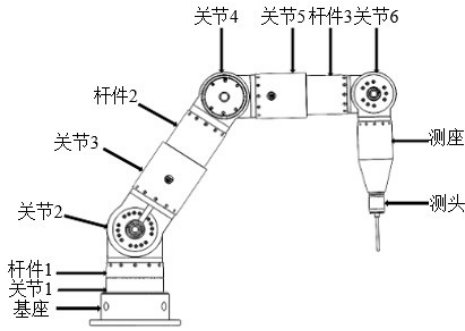
自驱动关节臂测量机的结构主要由6个转动关节、3个连杆以及基座,测座,恒力触发式测头串联组成,如图1(a)所示。为实现在线自动测量,自驱动关节臂测量机采用一体化关节模组,组成部分分别为:驱动电路、伺服电机、谐波减速器、圆光栅等。

为了直观反映自驱动关节臂测量机各个关节之间的运动传递关系,本文基于改进的Denavit-Hartenberg^[15](MDH)参数法建立自驱动关节臂测量机的连杆坐标系以及测量模型,坐标系建立情况如图1(b)所示。

根据MDH模型所得自驱动关节臂测量机参数以及坐标系变换的链式法则,得到相邻坐标系之间的齐次变换矩阵,如式(1)所示。

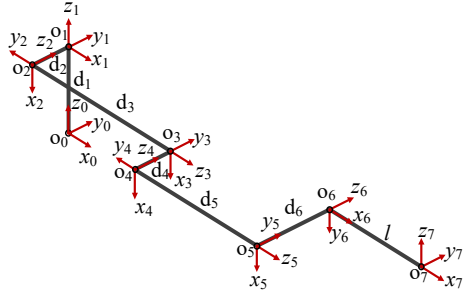
$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i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

式中: α_{i-1} 为 z_{i-1} 沿 x_{i-1} 轴移动到 z_i 轴的距离; a_{i-1} 为 z_{i-1} 轴绕 x_{i-1} 轴旋转到 z_i 轴的角度; d_i 为 x_{i-1} 轴沿 z_i 轴移动到 x_i 轴的距离; θ_i 为 x_{i-1} 轴绕 z_i 轴旋转到 x_i 轴的角度。



(a) 自驱动关节臂坐标测量机结构组成

(a) Structure and composition of self-driven AACMM



(b) 基于MDH法连杆坐标系

(b) Linkage coordinate system based on MDH

图1 自驱动关节臂测量机结构组成及MDH模型

Fig.1 Structure and MDH model of self-driven AACMM

其测量模型为测头到末端坐标系之间所有变换矩阵相乘得到的自驱动关节臂的正运动学方程,如式(2)所示。

$${}^0_7T(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6) = \prod_{i=1}^6 {}^{i-1}_i T(\theta_i) \cdot {}^6_7T, \quad (2)$$

式中, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6$ 为关节角度变量, ${}^0_7T$ 表示测头末端的位姿。

2.2 自驱动关节臂测量机的轨迹规划

根据自驱动关节臂测量机的测量过程提出一种混合轨迹规划方法,且将自驱动关节臂测量

机的测量过程分为定位、测量、回退三个阶段。在定位、回退中选择关节空间内的轨迹规划,测量阶段选用笛卡尔空间内的轨迹规划。

测量阶段无需复杂路径且速度过高会造成测量结果不准确和测杆折断,因此在笛卡尔空间内选择匀速直线轨迹规划,其表达式如式(3)所示。直线插补示意图如图2(a)所示。

$$\begin{cases} x = x_1 + lk \\ y = y_1 + mk \\ z = z_1 + nk \end{cases} \quad (3)$$

由于S形加减速法存在匀速段,并能够提高电机利用率,因此在定位、回退阶段中采用末速度不为0的S形加减速法,其运动参数曲线如图2(b)所示。对图2(b)中速度函数进行积分求解,得运行轨迹的时间函数 $S(t)$,如式(4)所示。

$$S(t) = \begin{cases} S_1(t) & t \in [0, t_1) \\ S_2(t) + S(t_1) & t \in [t_1, t_2) \\ S_3(t) + S(t_2) & t \in [t_2, t_3) \\ S_4(t) + S(t_3) & t \in [t_3, t_4) \\ S_5(t) + S(t_4) & t \in [t_4, t_5) \\ S_6(t) + S(t_5) & t \in [t_5, t_6) \\ S_7(t) + S(t_6) & t \in [t_6, t_7] \end{cases} \quad (4)$$

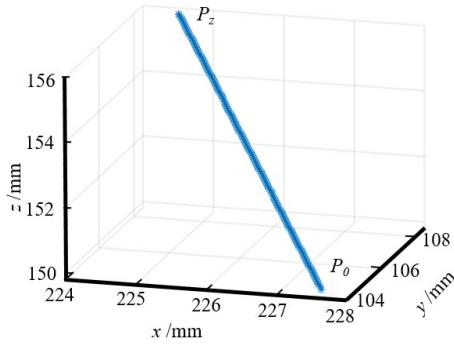
其中, $S_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, 7$) 表示不同阶段运行的轨迹长度。

笛卡尔空间与关节空间之间的速度映射关系如式(5)所示。式中, $\vec{v}$ 为速度矢量, J 为雅可比矩阵, $\dot{\theta}$ 为关节速度向量。

$$\vec{v} = J \times \dot{\theta}. \quad (5)$$

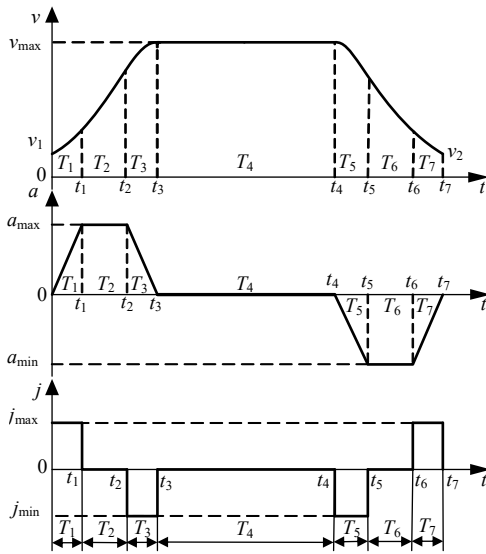
3 基于PSO的运动轨迹优化与仿真

粒子群算法^[16] (particle swarm optimization, PSO) 是一种进化计算的技术,起源于鸟群捕食的行为研究,简单易实现,收敛快且鲁棒性高,仅有两个属性:速度和位置,分别代表移动的快慢和方向。初始值是一个随机粒子,粒子在每一次迭代中,通过跟踪两个极值来更新自己,分别是



(a) 匀速直线插补示意图

(a) Diagram of uniform linear interpolation



(b) S形加减速运动参数曲线图

(b) Acceleration and deceleration parameter S-curve

图2 轨迹规划原理图

Fig. 2 Trajectory planning schematic diagram

粒子本身寻找到的最优解称为个体极值和整个种群目前寻找到的最优解,用 P_{best} , G_{best} 表示,其流程图如图3所示。

3.1 目标函数和约束条件

为了保证自驱动关节臂测量机的测量精度与测量效率,将时间和运动平稳性确定为优化目标,并用脉冲来评价运动平稳性,将多目标优化转为单目标优化,因此本文的优化目标函数如式(6)所示。

$$\begin{cases} H_1 = T \\ H_2 = \sqrt{\frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} j_i^2 dt} \\ H = a_1 b_1 H_1 + a_2 b_2 H_2 \end{cases}, \quad (6)$$

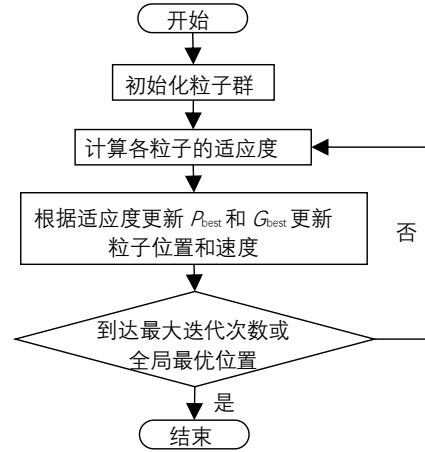


图3 粒子群算法流程

Fig. 3 Flow chart of PSO

式中, H_1 表示各关节的运动总时间, H_2 表示关节的脉冲指标, T_i 和 j_i 分别表示第 i 个关节的运行时间和加加速度。 a_1, a_2 为归一化系数, b_1, b_2 为权重系数。

由于测量段采用匀速直线插补法,对测量时间和运动平稳性影响较小,因此只优化定位段和回退段中的运动学参数即可满足优化要求。即对定位段和回退段内采取的S形加减速参数进行优化。结合自驱动关节臂测量机的关节角度、速度、加速度、加加速度等运动学参数限制,七段S形加减速法轨迹规划的优化约束条件如式(7)所示。

$$\begin{cases} (v_{\max} - v_0) \times j_{\max} \geq a_{\max}^2 \\ (v_{\max} - v_1) \times j_{\max} \geq a_{\max}^2 \\ T_v > 0 \end{cases}, \quad (7)$$

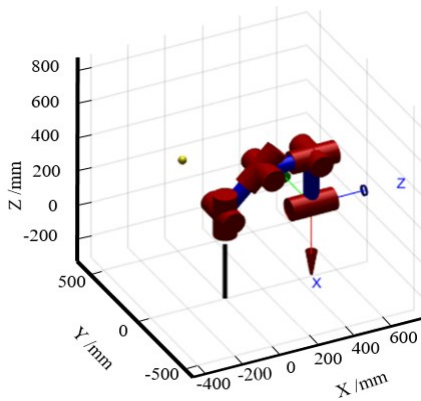
式中, v_0, v_1 代表轨迹规划起点和终点所对应的速度; $v_{\max}, a_{\max}, j_{\max}$ 表示第 i 个关节通过轨迹规划可以达到的速度,加速度,加加速度峰值; $T_v > 0$ 表示整段轨迹规划中匀速段存在。

3.2 标准球测量轨迹仿真

为了验证轨迹优化的可行性,开展测量标准球的仿真分析,利用MATLAB中Robotics Toolbox工具箱创建自驱动关节臂测量机简化模型及一个标准球,其球心坐标为(14.6349mm, 482.8086mm, 221.4312mm),半径为19.0564mm。MATLAB仿真系统如图4(a)所示。为使仿真结果更加贴合测量机实际工作情况,在ADAMS中搭建测量机的虚拟样机与标准球的碰撞

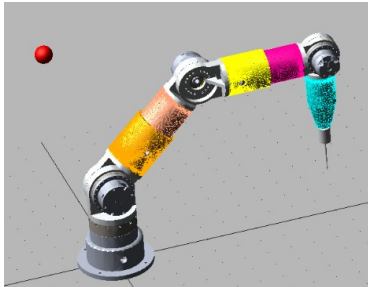
环境,分析存在重力、惯性力、触测力时测量机的定位精度与运动平稳性。该环境中标准球参数与MAT-LAB仿真中一致,ADAMS虚拟样机的仿真环境如图4(b)所示。

需要在标准球表面选取6个测量点拟合完整球体,因此在测量过程中,自驱动关节臂测量机对该标准球体进行6次测量,每次测量后将会得到一个测量点的实际三维坐标,选取的测量点坐标如表1所示。



(a) MATLAB中自驱动关节臂测量机仿真系统

(a) Simulation system of self-driven AACMM in MATLAB



(b) ADAMS中自驱动关节臂测量机仿真系统

(b) Simulation system of self-driven AACMM in ADAMS

图4 自驱动关节臂测量机仿真系统

Fig. 4 Simulation system of self-driven AACMM

测量段的匀速速度设为5 mm/s,将测点按照测量顺序1~6,经过基于粒子群算法的轨迹规划后得到整个标准球测量仿真轨迹如图5所示。

由于测量过程分为定位段、测量段、回退段,因此再引入5个中间点,其坐标分别为(76.56, 447.23, 234.84); (78.68, 526.97, 241.99); (-3.98, 544.40, 231.56); (-64.65,

表1 选取的测量点坐标

Tab. 1 Coordinates of selected measuring points

测量点	理论坐标/mm
1	(14.7056, 463.9782, 218.5050)
2	(33.6478, 481.6944, 222.0770)
3	(14.5926, 500.9540, 227.2527)
4	(-4.4103, 482.8493, 222.0821)
5	(4.1112, 483.0602, 237.3162)
6	(14.6747, 481.7632, 240.4588)

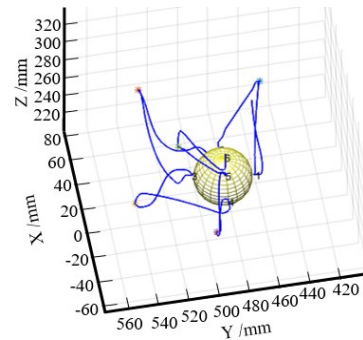


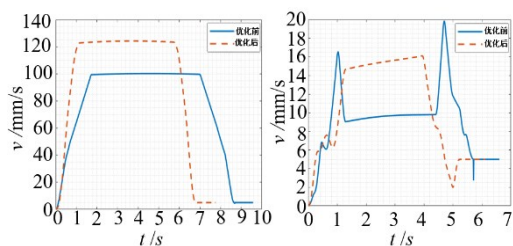
图5 标准球测量仿真轨迹

Fig. 5 Standard ball measurement simulation trajectory

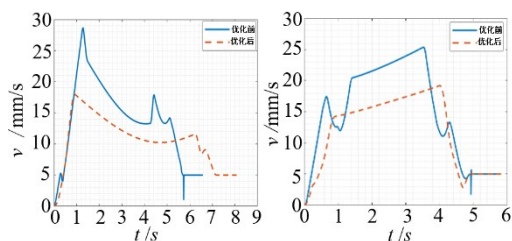
501.35, 271.57); (-1.48, 515.17, 285.03), 单位为mm。将测点过程分为6段,第1段是起始点到测量点1,其余五段是中间点到测量点。当测量过程处于定位阶段时,测量机以先加速、后匀速、再减速的变速方式运动至测量点附近3 mm~5 mm处。之后进入测量阶段,测头以5 mm/s匀速缓慢触测空间中的测量点。测头触测完毕后,测量机测头回退至中间点。

当自驱动关节臂测量机产生振动时,因其串联式结构,误差会逐级放大,传至测头的振动会更明显,影响最终的测量精度。因此选择以测头速度变化来评估自驱动关节臂测量机在标准球测量过程中的平稳性。使用MATLAB对基于粒子群算法的标准球测量优化轨迹进行仿真试验,所得测头速度曲线如图6所示。

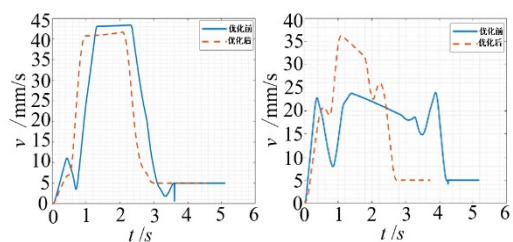
由图6可知,经基于粒子群优化算法轨迹优化后,定位阶段与测量阶段的测头速度变化曲线变化更为平稳,且无明显突变,满足测量机平稳测量的要求。其中,图6速度曲线存在的宏观折线性质,验证了测量机在定位阶段的加速-匀速-减速运动特性和测量阶段的匀速测量特性。但由于建立的刚柔耦合测量机虚拟样机在仿真过



(a) 第1段(左)、第2段(右)优化前后测头速度变化曲线
(a) Curves of probe velocity before and after optimization in sections 1 (L) and 2(R)



(b) 第3段(左)、第4段(右)优化前后测头速度变化曲线
(b) Curves of probe velocity before and after optimization in sections 3(L) and 4(R)



(c) 第5段(左)、第6段(右)优化前后测头速度变化曲线
(c) Curves of probe velocity before and after optimization in sections 5(L) and 6(R)

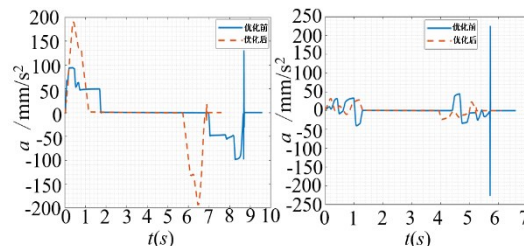
图6 优化前后测头速度变化曲线

Fig. 6 Optimized probe velocity curve

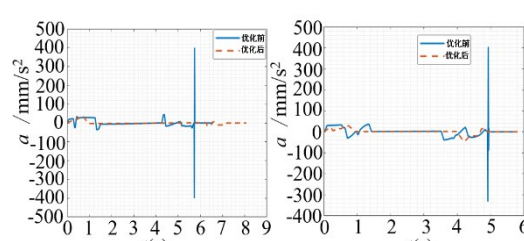
程中,关节臂杆件因不同的空间测量姿态而发生不同的柔性变形,且相邻两个测量点之间的空间距离不同,因此导致测量机测量6个点的速度变化曲线存在差异,且第2~6段优化后的定位阶段速度微观变化与第1段的加速-匀速-减速曲线变化特征存在差异。

为了进一步验证基于粒子群算法的轨迹优化方法对提高测量机平稳运动测量的有效性,根据图6仿真结果,求解并绘制出优化前后的测量机测头加速度变化曲线,如图7所示。

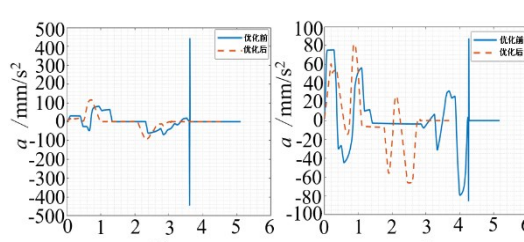
根据图7可知,经基于粒子群优化算法轨迹优化后,定位阶段与测量阶段衔接处的测头加速



(a) 第1段(左)、第2段(右)优化前后测头加速度变化曲线
(a) Curves of probe acceleration before and after optimization in sections 1 (L) and 2(R)



(b) 第3段(左)、第4段(右)优化前后测头加速度变化曲线
(b) Curves of probe acceleration before and after optimization in sections 3(L) and 4(R)



(c) 第5段(左)、第6段(右)优化前后测头加速度变化曲线
(c) Curves of probe acceleration before and after optimization in sections 5(L) and 6(R)

图7 优化前后测头加速度变化曲线

Fig. 7 Optimized probe accelerate curve

度突变情况得到明显改善,有效降低了测量机从定位转向测量过程中的测头振动,提高测量机的在线自动测量精度。

在ADAMS仿真环境中,分别对基于粒子群算法的标准球测量优化轨迹与未优化的测量轨迹进行仿真实验,得到了轨迹优化前后所对应实际测量点坐标以及整个测量过程所用的时间,如表2所示。

利用最小二乘法^[17]将仿真得到的6个实际测量点拟合为球面,拟合得到标准球半径与误差如表3所示。

从仿真结果可知,优化前测量标准球所需的

表2 仿真测量点坐标与所用时间

Tab. 2 Simulation coordinates and measurement time

序号	坐标值/mm	所用时间/s
优化前	1 (14.6984,462.4156,218.4866)	63.534 7
	2 (35.5087,481.5925,222.1372)	
	3 (14.6909,502.4400,227.7834)	
	4 (-6.2118,482.8347,222.1192)	
	5 (3.1989,482.9503,238.5786)	
	6 (14.6779,481.6988,242.7432)	
优化后	1 (14.6984,462.4156,218.4866)	57.886 2
	2 (35.4963,481.7336,221.3947)	
	3 (14.6712,502.0311,227.4194)	
	4 (-6.2245,482.8283,222.1191)	
	5 (3.2024,482.9532,238.5757)	
	6 (14.6561,481.7112,242.3754)	

表3 拟合的球体半径与误差

Tab. 3 Fitting the sphere radius and error

	拟合球体半径 r/mm	标准球半径 r_0/mm	误差 δ/mm
优化前	20.721 9	19.056 4	0.165 5
优化后	20.613 0	19.056 4	0.056 8

总时间为 63.534 7 s,优化后总时间为 57.886 2 s,效率提高了 8.890 5%。同时标准球体半径误差由 0.165 5 mm 减少到 0.056 88 mm,测量精度提高了 65.631 4%,使得该优化算法的有效性得到了验证。

4 标准球测量轨迹实验验证

4.1 实验平台搭建

为了验证自驱动关节臂测量机的实际测量效果,搭建了自驱动关节臂测量机实验平台,如图 8 所示,其组成部件有:测头、测量机本体、电气箱、上位机。

其中红宝石测头采用 Renishaw 公司的恒力触发测头,一体化关节模组则采用 INNFOSS 公司的关节模组。电气箱是集成了关节模组驱动与接口电路、测头电路和 NI MYDAQ。上位机软件由 LabVIEW 平台编写搭建,可以通过导入规

划好的路径实现自动测量,并实时显示自驱动关节臂测量机的状态,同时输出测头空间坐标等信息。

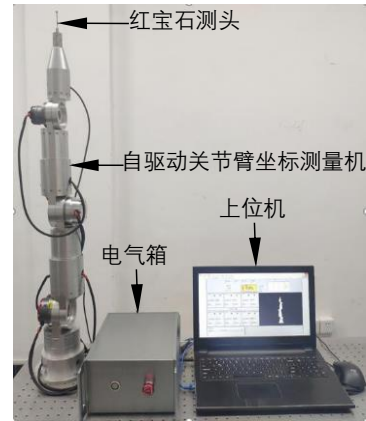


图8 自驱动关节臂测量机实验平台

Fig. 8 Experimental platform of self-drive AACMM

4.2 标准球测量实验及结果

将自驱动关节臂坐标测量机样机固定在工作台上,标准球通过磁性表座固定在剪式升降台上,剪式升降台可调节标准球在空间中的位置。保持实验室温度在 20°左右,并保持标准球的空间位置不变,利用自驱动关节臂测量机测量标准球表面 6 个点的实际坐标,标准球参数、6 个点的理论坐标与仿真实验相同。

将采用传统算法规划的轨迹和利用粒子群算法的优化算法规划的混合轨迹分别导入上位机,测量得到 6 个测量点的实际坐标,再利用最小二乘法把实验测得的 6 个点坐标拟合成球体。重复测量标准球实验 5 次,经数据处理后得标准球测量半径。优化前后所得测量半径和误差如表 4 所示。上位机采样时间为 10 ms,根据采集的角度数据个数计算得到优化前测量机测量标准球耗时 62.91 s,优化后测量机测量标准球耗时 57.35 s。

实验表明:轨迹优化后,标准球半径的平均测量误差由 0.057 1 mm 降至 0.042 3 mm,降幅为 25.9194%,测量时间由 62.91 s 降至 57.35 s,效率提升了 8.838%,验证了该轨迹优化算法的有效性,能够提高自驱动关节臂坐标测量机的自动测量精度。

表4 优化前后所得测量半径和误差

Tab. 4 Measurement results before and after optimization

实验次数	半径/mm		误差/mm	
	优化前	优化后	优化前	优化后
1	19.109 4	19.099 3	0.053 0	0.042 9
2	19.119 7	19.096 4	0.063 3	0.040 0
3	19.114 5	19.097 7	0.058 1	0.041 3
4	19.112 8	19.100 9	0.056 4	0.044 5
5	19.110 9	19.100 1	0.054 5	0.043 7
平均值	19.113 5	19.098 7	0.057 1	0.042 3

5 结 论

本文提出基于粒子群算法的自驱动关节臂

测量机多目标轨迹优化方法,根据时间和运动平稳性综合确定了轨迹优化的目标函数,并通过基于粒子群算法的S形加减速和匀速直线插补法进行混合轨迹规划,实现了运行时间和运动平稳的性能完善。通过实验验证,使用基于粒子群算法的多目标测量轨迹优化方法后,自驱动关节臂测量机测得的标准球半径误差值从0.057 1 mm下降为0.042 3 mm,降低了25.919 4%,测量时间由62.91 s降至57.35 s,提升了8.838%,表明该方法优化效果明显,所提出的基于粒子群算法的轨迹优化方法保证了自驱动关节臂测量机平稳运行,提高了自驱动关节臂测量机的在线测量精度和效率。

参考文献:

- [1] 王森. 关节臂式坐标测量机误差建模与补偿研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
WANG S. *Study on Error Modeling and Compensation of the Articulated Arm Coordinate Measuring Machine*[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [2] FAHIM S R, SARKER Y, SARKER S K. Modeling and development of a five DoF vision based remote operated robotic arm with transmission control protocol[J]. *SN Applied Sciences*, 2020, 2(7): 1-10.
- [3] 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 Y Y, HU Y, HU P H, *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. (in Chinese)
- [4] 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(8): 2021-2029.
HU Y, HUANG W, HU P H, *et al.* Design of modular articulation in self-driven AACMM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8): 2021-2029. (in Chinese)
- [5] YANG H T, SHEN M, ZHANG M Y, *et al.* Erratum: Structural design and performance analysis of a self-driven articulated arm coordinate measuring machine (2022 Meas. Sci. Technol. 33 035005) [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(6): 069501.
- [6] 杨洪涛, 程晶晶, 杨鹏, 等. 自驱动关节臂测量机结构设计与仿真分析[J]. *现代制造工程*, 2022(1): 36-43.
YANG H T, CHENG J J, YANG P, *et al.* Structural design and simulation analysis of self-driving articulated arm measuring machine[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2022(1): 36-43. (in Chinese)
- [7] 李黎, 尚俊云, 冯艳丽, 等. 关节型工业机器人轨迹规划研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(5): 36-50.
LI L, SHANG J Y, FENG Y L, *et al.* Research of trajectory planning for articulated industrial robot: a review [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(5): 36-50. (in Chinese)
- [8] 周乐天. 工业机器人轨迹规划及插补算法的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
ZHOU L /Y) T. *Research on Trajectory Planning and Interpolation Algorithm for Industrial Robot* [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] WANG H, WANG H, HUANG J H, *et al.* Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematical constraints based on high-order polynomial curve [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 139: 284-293.
- [10] 马宇科, 郑亮, 胡高凯, 等. 两栖球形机器人的路

- 径规划策略[J]. 光学精密工程, 2020, 28(8): 1733-1742.
- MA Y K, ZHENG L, HU G K, *et al.* Path planning strategy of amphibious spherical robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(8): 1733-1742. (in Chinese)
- [11] ROUT A, MAHANTA G B, BBVL D, *et al.* Kinematic and dynamic optimal trajectory planning of industrial robot using improved multi-objective ant lion optimizer[J]. *Journal of the Institution of Engineers (India) : Series C*, 2020, 101(3): 559-569.
- [12] 韩江桂, 伍哲, 孙云岭, 等. 基于灰狼算法的机器人多关节综合运动轨迹优化[J]. 海军工程大学学报, 2020, 32(3): 90-95.
- HAN J G, WU ZH, SUN Y L, *et al.* Trajectory optimization of integrated movement for multi-joint robot based on gray wolf algorithm[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2020, 32(3): 90-95. (in Chinese)
- [13] 袁锦涛, 刘军, 邹树梁. 基于粒子群算法的工业机器人多目标最优轨迹规划[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(5): 73-79, 93.
- YUAN J T, LIU J, ZOU SH L. Multi objective optimal trajectory planning of industrial robot based on particle swarm optimization [J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2021(5): 73-79, 93. (in Chinese)
- [14] 王延年, 向秋丽. 基于改进粒子群优化算法的六自由度机器人轨迹优化算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(1): 49-53.
- WANG Y N, XIANG Q L. Trajectory of 6-DOF robot based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2020, 39(1): 49-53. (in Chinese)
- [15] 于连栋, 曹家铭, 赵会宁, 等. 关节臂式坐标测量机的运动学建模[J]. 光学精密工程, 2021, 29(11): 2603-2612.
- YU L D, CAO J M, ZHAO H N, *et al.* Kinematics model of articulated arm measuring machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(11): 2603-2612. (in Chinese)
- [16] POLI R, KENNEDY J, BLACKWELL T. Particle swarm optimization [J]. *Swarm Intelligence*, 2007, 1(1): 33-57.
- [17] XU W, CHEN W, LIANG Y J. Feasibility study on the least square method for fitting non-Gaussian noise data [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 492: 1917-1930.