

文章编号 1004-924X(2017)06-1486-08

用蚁群算法求解关节式坐标测量机的最佳测量区

胡 毅*, 江 超*, 黄 炜, 胡鹏浩

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:本文提出了一种求解最佳测量区的方法,以进一步提高关节式坐标测量机的测量精度。首先,根据关节式坐标测量机的测量模型,建立了基于圆编码器测角误差的关节式坐标测量机误差模型。利用蒙特卡洛理论得到 6 个关节转角的随机数,采用数值法仿真分析测量机的测量空间。然后将包含测量空间的一立方体区域等间隔切割成 343 个小立方体区域,采用蚁群算法确定每个小区域由于圆编码器误差所引起的最大测量误差。最后,通过比较找到其中最大测量误差最小的区域,即为最佳测量区。研究表明,对于所研究的关节式坐标测量机,各个小区域的最大误差为 0.069 9~0.189 6 mm,其中最小值为 0.069 9 mm 的区域为 $-100 \text{ mm} \leq x \leq 100 \text{ mm}$, $-100 \text{ mm} \leq y \leq 100 \text{ mm}$, $400 \text{ mm} \leq z \leq 600 \text{ mm}$ 。采用本文方法确定的最佳测量区在测量空间内为一个立方体区域,故在最佳测量区进行较高精度的测量具有实用性和可操作性。

关键词:关节式坐标测量机;蚁群算法;最佳测量区

中图分类号:TH721 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172506.1486

Optimal measurement area of articulated coordinate measuring machine calculated by ant colony algorithm

HU Yi*, JIANG Chao*, HUANG Wei, HU Peng-hao

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: huyi@hfut.edu.cn, chaojiangcj@163.com

Abstract: A method to solve the optimal measurement zone was proposed to improve the measurement accuracy of the articulated coordinate measuring machine. According to the measurement model of the articulated coordinate measuring machine, the error model of the articulated coordinate measuring machine was established on the basis of angle measurement error of the circle grating encoder. 6 random numbers of the articulation rotation angle could be obtained by taking advantages of Monte Carlo theory; and the measurement space of the measuring machine could be simulated by using the numerical method. Then, the cube region which include measurement space were divided into 343 small cube regions and the ant colony algorithm was used to determine the maximum measuring error of each region caused by the error of the circle grating encoder. Finally, minimum region of the maximum measuring error was found and as the optimal measurement zone by comparison. The result of the research is

收稿日期:2016-11-28;修订日期:2017-03-14.

基金项目:安徽省自然科学基金(No. J2014AKZR0032);国家自然科学基金项目(No. 51475133)

shown that in terms of the researched articulated coordinate measuring machine, the scope of the maximum error for each small region is from 0.069 9 mm to 0.189 6 mm. Among them the region of the minimum value which is 0.069 9 mm is $-100 \text{ mm} \leq x \leq 100 \text{ mm}$, $-100 \text{ mm} \leq y \leq 100 \text{ mm}$, $400 \text{ mm} \leq z \leq 600 \text{ mm}$. The optimal measurement zone determined by proposed method is a cube region within the measurement space, which make it have the practicability and operability to conduct higher-accuracy measurement in the optimal measurement zone.

Key words: Articulated coordinate measuring machine; ant colony algorithm; the optimal measurement zone

1 引言

关节式坐标测量机(AACMM)机械结构简单,测量范围广^[1],可以用于一些测量环境较为复杂的场合。由于 AACMM 的机械结构属于串联,圆编码器分度误差等由于放大作用传递到测头时,导致其测量精度较低,所以提高测量机精度已成为的一个关键问题。王文等利用模拟退火算法对圆编码器的偏心参数进行辨识和修正,修正后测量机的重复精度得到了一定程度的提高^[2]。崔亚军等提出在测量过程中对光栅编码器进行归零位以及使第一级臂位于误差最小处进行测量以实现较高精度的测量^[3]。黄奎等利用局部指数积建立了 AACMM 的运动学模型,通过分析各种运动学参数对测量误差的影响,发现长度类运动学参数不会引起测量误差的放大或缩小,而角度类参数对测量误差的影响十分严重^[4]。

对空间一点进行测量时,AACMM 可以多种姿态进行测量,不同姿态下 6 个圆编码器的测角误差有不同组合,故该点的测量误差存在最大误差和最小误差。由此推广至整个测量空间,即不同位置处的误差变化是具有一定规律且是连续的,故在整个测量空间内存在一个最大测量误差最小的区域即最佳测量区^[5]。尚平等研究也发现在整个测量空间内,存在误差较大的密集区域和误差较小的最佳测量区^[6]。郑大腾等运用支持向量机理论得到以单点测量为目标的最佳测量区和以空间距离测量为目标的最佳测量区模型^[7],但该方法的实用性不强,且模型是以大量的实测数据为基础建立的,其测量误差不包含圆编码器测角误差。秦自瑞采用仿真分析方法得出测量机上圆编码器误差导致的测量误差具有一定的抵偿性

的结论,并给出了测量误差较小时 6 个圆编码器的角度使用范围^[8]。但由于测量机采用的是手工测量方式,测量姿态具有随机性,因此该方法并不实用。为了使低精度的 AACMM 达到较高的测量精度,本文通过调研 AACMM 的研究现状,提出一种较实用的求取最佳测量区的方法。该方法根据 AACMM 的结构参数分析确定其测量空间,将测量机测量空间等间隔分割成若干个小立方区域,在已知 AACMM 各圆编码器误差特性的前提下,采用改进的蚁群算法求出各个小区域的最大测量误差(剔除位于测量空间外的立方体区域),其中误差最小的区域即为最佳测量区。

2 基于圆编码器测角误差的 AACMM 误差模型及测量空间

2.1 基于圆编码器测角误差的 AACMM 误差模型

AACMM 机械结构如图 1 所示。

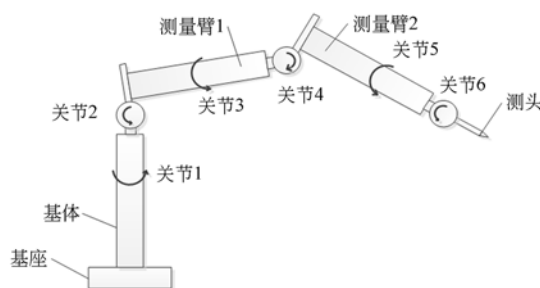


图 1 关节式坐标测量机示意图

Fig. 1 Schematic of AACMM

利用 D-H 方法建立的 AACMM 的测量方程^[9]为:

$$p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^5 \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & l_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & l_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_6 s\theta_6 s\alpha_6 + l_6 c\theta_6 \\ -l_6 c\theta_6 s\alpha_6 + l_6 s\theta_6 \\ l_6 c\alpha_6 + d_6 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中用 s 表示 \sin , c 表示 \cos , l_i 为杆件的长度即两个相邻关节旋转轴线间的最短的距离; θ_i 为各关节实际转动量(即安装在各关节中的圆编码器的输出); d_i 为关节偏置量(即相邻杆长线在关节上截取的距离); α_i 为相邻关节轴线的扭转角度; l 为测量机测头长度。

由式(1)可知, AACMM 的机械结构参数一共有 25 项, 除关节变量 θ_i 外的其余 19 项参数标称值如表 1 所示。由于受到机械结构的限制, 关节变量 θ_i 的取值并不全部在 $0 \sim 2\pi$ 之间, 实际取值范围如表 2 所示。

表 1 关节式坐标测量机结构参数标称值

Tab. 1 Nominal values of structural parameters of AACMM

序号	参数			
	$\alpha_i/(\circ)$	l_i/mm	d_i/mm	l/mm
1	-90	0.000	295.000	100.000
2	90	75.000	0.000	
3	-90	0.000	270.000	
4	90	75.000	0.000	
5	-90	0.000	215.000	
6	90	0.000	0.000	

表 2 关节变量取值范围

Tab. 2 Value ranges of joint variable

关节变量	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
取值范围	$0 \sim 2\pi$	$-\pi/4 \sim 5\pi/4$	$0 \sim 2\pi$	$-\pi/4 \sim 5\pi/4$	$0 \sim 2\pi$	$-\pi/4 \sim 5\pi/4$
/rad						

对于已标定的 AACMM, 式(1)中除 θ_i 外, 其它参数皆为定值, 测头坐标由圆编码器测得的 6 个关节变量所决定, 故可以确定圆编码器分度误

$$p^* = \begin{bmatrix} x_p^* + \Delta x \\ y_p^* + \Delta y \\ z_p^* + \Delta z \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^5 \begin{bmatrix} c(\theta_i + e_i(\theta_i)) & -s(\theta_i + e_i(\theta_i)) c\alpha_i & s(\theta_i + e_i(\theta_i)) s\alpha_i & l_i c(\theta_i + e_i(\theta_i)) \\ s(\theta_i + e_i(\theta_i)) & c(\theta_i + e_i(\theta_i)) c\alpha_i & -c(\theta_i + e_i(\theta_i)) s\alpha_i & l_i s(\theta_i + e_i(\theta_i)) \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_6 s(\theta_6 + e_6(\theta_6)) s\alpha_6 + l_6 c(\theta_6 + e_6(\theta_6)) \\ -l_6 c(\theta_6 + e_6(\theta_6)) s\alpha_6 + l_6 s(\theta_6 + e_6(\theta_6)) \\ l_6 c\alpha_6 + d_6 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

差是导致测量机测量误差的主要原因之一。

圆编码器误差可通过标定方法获得, 其误差分布曲线为符合狄利克雷条件的以 2π 为周期的类正弦曲线, 可将其误差分布曲线设为三阶傅里叶级数:

$$e_i(\theta_i) = a_i + b_i \cos \theta_i + c_i \sin \theta_i + d_i \cos 2\theta_i + e_i \sin 2\theta_i + f_i \cos 3\theta_i + g_i \sin 3\theta_i, \quad (2)$$

其中 $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。对安装于一 AACMM 的 6 个圆编码器进行标定, 并用式(2)拟合得到误差特性方程, 绘制出的误差特性曲线如图 2(彩图见期刊电子版)所示。

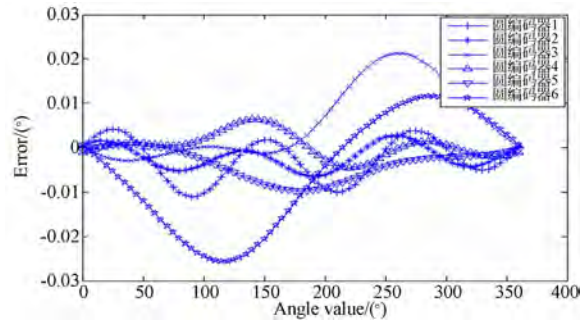


图 2 圆编码器误差特性曲线

Fig. 2 Error characteristic curves of circular encoder

为了便于后面的计算, 将式(1)展开, 记为:

$$\begin{cases} x = f_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \\ y = f_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \\ z = f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \end{cases}, \quad (3)$$

以下均用 f_i 代替 $f_i(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$ (其中 $i=1, 2, 3$)。

考虑到圆编码器的测量误差, 关节实际转角记为 $\theta_i + e_i(\theta_i)$, 将其代入式(1)中, 得到带有关节转角误差的坐标公式:

将式(4)展开,得到 x^* 、 y^* 、 z^* 关于 θ_i 的函数,记为:

$$\begin{cases} x^* = f_1^*(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \\ y^* = f_2^*(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \\ z^* = f_3^*(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \end{cases} \quad (5)$$

以下均用 f_i^* 代替 $f_i^*(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$ (其中 $i=1,2,3$)。

则由于圆编码器误差导致的测量误差为:

$$E(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = |\mathbf{p} - \mathbf{p}^*| = \sqrt{(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2 + (z - z^*)^2} = \sqrt{(f_1 - f_1^*)^2 + (f_2 - f_2^*)^2 + (f_3 - f_3^*)^2} \quad (6)$$

2.2 AACMM 测量空间

AACMM 的测量空间是指末端测头所能达到的测量位置的集合,该集合代表了其的可测量范围^[10],测量机的测量空间可用仿真的方法确定。首先,利用蒙特卡洛理论得到 6 个关节转角的随机数,然后采用数值法生成测量机的测量空间^[11]。对于表 1 和表 2 所给定的 AACMM 的结构参数,用 Matlab 仿真分析测量机的测量空间,三维图形如图 3 所示。由仿真结果可知,本坐标测量机的测量空间为一个完整的球体,内部无空腔,且测头可达的范围为:

$$\begin{aligned} x_{\min} &= -6.06286 \times 10^2 \text{ mm}, x_{\max} = 6.05847 \times 10^2 \text{ mm} \\ y_{\min} &= -6.05503 \times 10^2 \text{ mm}, y_{\max} = 6.07493 \times 10^2 \text{ mm} \\ z_{\min} &= -3.12345 \times 10^2 \text{ mm}, z_{\max} = 9.02439 \times 10^2 \text{ mm} \end{aligned}$$

虽然 x, y, z 的取值上下界并不是真值,但已经基本接近真值,对后续问题的分析没有影响。

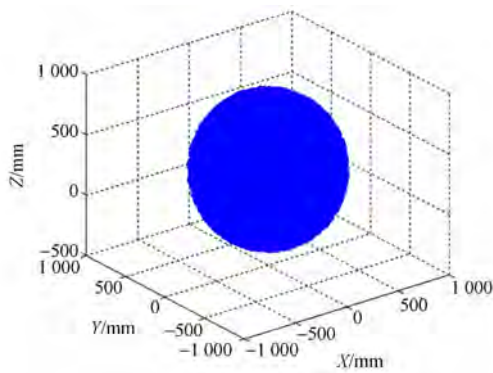


图 3 X、Y、Z 三维仿真图形

Fig. 3 3D simulation figure

3 求解最佳测量区的蚁群算法

为了得到便于操作的最佳测量区,将包含上一节得到的测量空间的立方体 ($-700 \text{ mm} \leq x \leq 700 \text{ mm}, -700 \text{ mm} \leq y \leq 700 \text{ mm}, -400 \text{ mm} \leq z \leq 1000 \text{ mm}$) 等间隔分割为 343 个小区域(每个小区域为 200^3 mm^3)。对某一个小区域寻找最大测量误差的过程中,不断改变 6 个圆编码器角度,即使用了大量的 6 个圆编码器角度的组合,比较得到该区域的最大测量误差。依次确定 343 个小区域的最大测量误差,最后通过比较确定最大误差值最小的小区域,其即为最佳测量区。

3.1 寻找最佳测量区算法的建模

由圆编码器引起的测量误差用公式(6)求取,而对于分割后的每一个小区域,求取最大误差的模型如下所示:

$$\begin{cases} \max E(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = \\ \sqrt{(f_1 - f_1^*)^2 + (f_2 - f_2^*)^2 + (f_3 - f_3^*)^2} \\ \text{s. t } \theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \\ xlb_j \leq f_1 \leq xub_j \\ ylb_j \leq f_2 \leq yub_j \\ zlb_j \leq f_3 \leq zub_j \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中 $j(j=1, 2, 3, \dots, 343)$ 为待寻优区域编号, xub_j, xlb_j 为待寻优区域 x 轴方向的上下界, yub_j, ylb_j 为待寻优区域 y 轴方向的上下界, zub_j, zlb_j 为待寻优区域 z 轴方向的上下界。

为了便于分析,在目标函数 $E(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6)$ 前加一负号,令 $E^*(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6) = -E(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6)$,由此将寻找目标函数 E 的最大值转换为寻找 E^* 的最小值。 E^* 的值小于等于 0,其值越小,其绝对值越大,测量误差越大。转化后的形式如下:

$$\begin{cases} \min E^*(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = \\ -\sqrt{(f_1 - f_1^*)^2 + (f_2 - f_2^*)^2 + (f_3 - f_3^*)^2} \\ \text{s. t } \theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \\ xlb_j \leq f_1 \leq xub_j \\ ylb_j \leq f_2 \leq yub_j \\ zlb_j \leq f_3 \leq zub_j \end{cases} \quad (8)$$

显然,式(8)是一个带约束的优化问题。处理

这类问题的一个经典方法是罚函数法。罚函数法有外罚函数法、内点法和乘子法 3 种^[12]。本文采用外罚函数法进行处理。根据约束条件的特征,将其变成一种外罚函数,并将其添加到目标函数中。记可行域为:

$$D = \{ \theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max} (i=1, 2, \dots, 6) | f_1 - xlb_j \geq 0, xub_j - f_1 \geq 0, f_2 - ylb_j \geq 0, yub_j - f_2 \geq 0, f_3 - zlb_j \geq 0, zub_j - f_3 \geq 0 \}$$

构造罚函数:

$$\tilde{P}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = [\min(0, f_1 - xlb_j)]^2 + [\min(0, xub_j - f_1)]^2 + [\min(0, f_2 - ylb_j)]^2 + [\min(0, yub_j - f_2)]^2 + [\min(0, f_3 - zlb_j)]^2 + [\min(0, zub_j - f_3)]^2, \quad (9)$$

和目标增广函数:

$$P(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \sigma) = E^*(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) + \sigma \tilde{P}(x), \quad (10)$$

其中 σ 是罚因子。当 $\theta_i (i=1, 2, 3, 4, 5, 6) \in D$ 即根据 $(\theta_1, \dots, \theta_6)$ 计算得出的测头坐标位于待寻优的区域内时,则罚函数 $\tilde{P}(\theta_1, \dots, \theta_6) = 0, P(\theta_1, \dots, \theta_6, \sigma) = E^*(\theta_1, \dots, \theta_6)$, 其绝对值为这 6 个圆编码器角度组合下的测量误差值,目标函数不受额外惩罚。当 $\theta_i \notin D$, 即根据 $(\theta_1, \dots, \theta_6)$ 计算得出的测头坐标位于待寻优的区域外时, $P(\theta_1, \dots, \theta_6, \sigma) > E^*(\theta_1, \dots, \theta_6)$, 则目标函数受额外惩罚。 σ 越大,惩罚越重。这样一般约束优化问题的求解就转化成求解一系列无约束优化问题。据此,式(8)的无约束优化形式如下:

$$\begin{cases} \min P(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \sigma) = \\ - \sqrt{(f_1 - f_1^*)^2 + (f_2 - f_2^*)^2 + (f_3 - f_3^*)^2} + \\ [\min(0, f_1 - xlb_j)]^2 + [\min(0, xub_j - f_1)]^2 + \\ [\min(0, f_2 - ylb_j)]^2 + [\min(0, yub_j - f_2)]^2 + \\ [\min(0, f_3 - zlb_j)]^2 + [\min(0, zub_j - f_3)]^2 \\ s. t \theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max} (i=1, 2, \dots, 6) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)即为寻找每个小区域最大误差模型,然后对所得寻优结果进行对比,找到最佳测量区。然而在 343 个小区域中必然有一些小立方体区域位于测量空间以外,此时,无论如何改变 6 个关节转角,测头都不可能到达该区域,此时惩罚函数 $\tilde{P}(\theta_1, \dots, \theta_6)$ 的数值就会特别大,导致目标增广函数 $P(\theta_1, \dots, \theta_6, \sigma)$ 也特别大,与实际误差大小明显不符。因此,在最终的计算结果中要剔除

这些区域。

3.2 求区域内最大测量误差的蚁群算法

作为一种随机搜索算法,蚁群算法与其他仿生进化算法类似,都是在群体进化过程中寻求最优解^[13-14]。蚁群算法的优点表现在以下几个方面:较强的鲁棒性、分布式计算、正反馈机制、全局优化^[15]。由于本文需要优化的目标函数较为复杂,传统算法很容易陷入局部极小值点,而蚁群算法全局优化性能较强,有利于发现更好的解。

显然,式(11)是一个函数优化问题,其与用蚁群算法求解旅行商问题(TSP)不同,故本文将求解 TSP 的蚁群算法改为求解函数优化问题。在小区域内寻找最大测量误差,即寻找目标函数 $P(\theta_1, \dots, \theta_6, \sigma)$ 的最小值,在待寻优区域的可行域 D 内任意选一组 6 个圆编码器角度组合 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$, 有 $P(\theta_1, \dots, \theta_6, \sigma) > P_{\min}$ 成立。本文提出的确定区域内最大测量误差的蚁群算法,参见图 4。

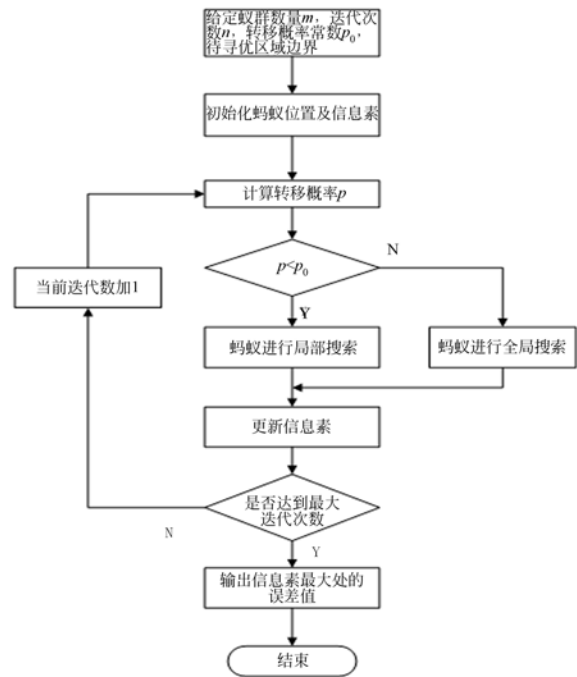


图 4 蚁群算法流程图

Fig. 4 Flow chart of ant colony algorithm

步骤如下:

(1) 设定蚂蚁个数 m , 最大循环迭代次数 n , 转移概率常数 p_0 , 信息素挥发系数 ρ , 以及待寻优区域的边界 $xl b_j, xub_j, ylb_j, yub_j, zlb_j, zub_j$ 。初始化蚂蚁位置及信息素, 蚂蚁位置表征 6 个圆编

码器角度组合,信息素反映的是测量误差的大小。将 m 只蚂蚁随机分布在解空间中,一共得到 m 组 6 个圆编码器角度组合。初始位置分布用式(12)来计算。

$$\theta_i = \theta_{\min} + (\theta_{\max} - \theta_{\min})rand \quad (i=1,2,3,4,5,6). \quad (12)$$

蚂蚁所在的位置决定了目标函数的值,目标函数的值与待寻优的问题共同决定了蚂蚁 i 的初始信息素大小,其计算公式为:

$$\Delta t(i) = ka^{-P(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \sigma)}, \quad (13)$$

式中 a, k 均为大于零的数。对于求取极小值问题,可令 $a > 1$ 。目标函数值 $P(\theta_1, \dots, \theta_6, \sigma)$ 越小,则在该位置处的信息素越多。

由于对目标函数 $P(\theta_1, \dots, \theta_6, \sigma)$ 进行最小值寻优,故取 $a = e(e = 2.718 28\dots)$ 。若 6 个圆编码器角度组合导致测头坐标在待寻优区域外,则信息素为 0,若在区域内,则信息素与测量误差的大小成正比。

(2)记录当前迭代次数中信息素最大处的测量误差,并分别计算每一个蚂蚁的转移概率:

$$p(count, i) = (t(i) - t(best)) / t(best), \quad (14)$$

式中 $count$ 为迭代次数, $t(i)$ 为蚂蚁 i 处的信息素, $t(best)$ 为本次迭代中蚂蚁在最优解处的信息素。

若转移概率小于转移概率常数 p_0 ,即该测点处的最大测量误差接近上个循环中所有位置处的最大测量误差,则在该测点附近进行搜索,期望得到更好的解,否则,必须按照初始设定蚂蚁位置的方法重新分配蚂蚁的位置。

(3)本次所有蚂蚁移动完成后,根据信息素的累积与挥发效应,对每只蚂蚁位置处的信息素按照一定的规律进行更新,按式(15)进行计算:

$$t(i) = \rho \times t(i) + \Delta t(i), \quad (15)$$

式中 ρ 为信息素挥发系数, $0 < \rho < 1$ 。

(4)判断是否达到最大循环迭代次数,如果否,则跳转到第(3)步。如果是,则退出循环,输出该区域内信息素最大处的误差值,即为最大测量误差。

3.3 仿真结果

取蚁群数量 $m = 300$,信息素挥发系数 $\rho = 0.8$,迭代次数 $n = 400$,惩罚因子 $\sigma = 1\ 000$,转移概率常数为 $p_0 = 0.2$,对 $-700\text{ mm} \leq x \leq 700\text{ mm}$, $-700\text{ mm} \leq y \leq 700\text{ mm}$, $-400\text{ mm} \leq z \leq 1$

000 mm 这个立方体空间(包含测量空间),从 x, y, z 三个方向分别以 200 mm 为间隔进行分割,得到 343 个小立方体区域。基于图 2 所示的圆编码器误差特征曲线,在分割后的所有小立方体区域内寻找最大测量误差,运行程序,剔除不在测量空间内的数据,得到 209 组数据,表 3 为其中的 20 组数据,每一组数据代表一个小立方体区域的坐标范围及最大测量误差。

表 3 最大误差值及对应区域范围

Tab. 3 The maximum error and corresponding range (mm)

序号	1	2	3	4	5
x 轴坐标范围	-500~-300	-500~-300	-500~-300	-500~-300	-500~-300
y 轴坐标范围	-300~-100	-300~-100	-300~-100	-300~-100	-100~100
z 轴坐标范围	0~200	200~400	400~600	600~800	-400~-200
最大误差	0.146 3	0.189 6	0.131 7	0.112 1	0.082 6
序号	6	7	8	9	10
x 轴坐标范围	-100~100	-100~100	-100~100	-100~100	-100~100
y 轴坐标范围	-100~100	-100~100	-100~100	-100~100	-100~100
z 轴坐标范围	-400~-200	-200~0	0~200	200~400	400~600
最大误差	0.096 6	0.089 1	0.087 9	0.076 5	0.069 9
序号	11	12	13	14	15
x 轴坐标范围	100~300	100~300	100~300	100~300	100~300
y 轴坐标范围	-500~-300	-500~-300	-300~-100	-300~-100	-300~-100
z 轴坐标范围	400~600	600~800	-400~-200	-200~0	0~200
最大误差	0.127 6	0.109 6	0.136 7	0.123 7	0.168 3
序号	16	17	18	19	20
x 轴坐标范围	300~500	300~500	300~500	300~500	300~500
y 轴坐标范围	-300~-100	-300~-100	-100~100	-100~100	-100~100
z 轴坐标范围	400~600	600~800	-400~-200	-200~0	0~200
最大误差	0.147 1	0.142 0	0.126 7	0.121 9	0.140 9

综合分析所得数据可知,各个小区域内的最大误差的变化范围为 $0.0699\text{ mm}\sim 0.1896\text{ mm}$ 。其中最大误差中最小值为 0.0699 的区域为 $-100\text{ mm}\leq x\leq 100\text{ mm}$, $-100\text{ mm}\leq y\leq 100\text{ mm}$, $400\text{ mm}\leq z\leq 600\text{ mm}$ 。该区域位于测量空间中较靠近球心的位置,若将测量工件放在此立体空间内进行测量,则能得到较高精度的测量结果。

4 结 论

由于 AACMM 的串联式结构导致其测量误差较大,而在很多实际应用场合中,其测量是在小

范围内进行的。因此,本文提出了一种基于蚁群算法求解最佳测量区的方法。首先将测量机的测量空间等几何间距分割成一系列的小区域,建立了区域内寻找最大测量误差的寻优模型,然后将求解最短路径的蚁群算法改进为适合所建模型的求解函数优化的算法。该方法确定的最佳测量区为一个小的立方体空间,便于使用 AACMM 在最佳测量区内测量,在不增加硬件制造成本的基础上,可得到高于测量机精度的测量结果。更进一步的,减小分隔的间距值,在这些更小的区域中进行寻优确定最佳测量区,对小的被测对象在此区域测量可达到更高精度。

参考文献:

- [1] 高贯斌,王文,林铿,等.应用改进模拟退火算法实现关节臂式坐标测量机的参数辨识[J].光学精密工程,2009,17(10):2499-2505.
GAO G B, WANG W, LIN K, et al.. Parameter identification based on modified annealing algorithm for articulated arm CMMs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(10):2499-2505. (in Chinese)
- [2] 王文,高贯斌,林铿,等.关节臂式坐标测量机角度传感器偏心参数辨识[J].光学精密工程,2010,18(1):135-141.
WANG W, GAO G B, LIN K, et al.. Eccentricity parameter identification of angle sensors for articulated arm CMMs[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):135-141. (in Chinese)
- [3] 崔亚军,陈青山,祝连庆,等.关节式坐标测量机初始位姿对误差影响研究[J].工具技术,2012,46(7):76-79.
CUI Y J, CHEN Q SH, ZHU L Q, et al.. Study on error of initial position of multi-joint coordinate measuring machine[J]. *Tool Engineering*, 2012,46(7):76-79. (in Chinese)
- [4] 黄奎,莫健华,钟凯,等.柔性关节臂式测量机的误差仿真分析[J].北京科技大学学报,2010,32(10):1346-1352.
HUANG K, MO J H, ZHONG K, et al.. Simulation of error analysis for flexible articulated arm coordinate measuring machines[J]. *Journal of University of Science and Technology of Beijing*, 2010,32(10):1346-1352. (in Chinese)
- [5] 郑大腾.柔性坐标测量机空间误差模型及最佳测量区研究[D].合肥:合肥工业大学,2010.
ZHEN D T. *Research on spatial error model and optimal measurement area of flexible coordinate measuring machine*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] 尚平,费业泰.柔性关节式坐标测量机误差源分析与建模[J].工具技术,2009,43(8):95-98.
SHANG P, FEI Y T. Error source analysis and modeling of flexible joint coordinate measuring machine[J]. *Tool Engineering*, 2009, 43(8):95-98. (in Chinese)
- [7] 郑大腾,吴全玉.支持向量机的关节坐标测量机最佳测量区研究[J].电子测量与仪器学报,2011,25(12):1025-1029.
ZHENG D T, WU Q Y. Research on optimal measurement area of joint coordinate measuring machine with support vector machine[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2011, 25(12): 1025-1029. (in Chinese)
- [8] 秦自瑞.圆分度误差匹配技术在柔性关节臂最佳测量区优化中的应用研究[D].合肥:合肥工业大学,2012.
QIN Z R. *Application and research of matching techniques of circular indexing error on optimal measurement areas of FCMM*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] 高贯斌,王文,林铿,等.关节臂式坐标测量机误差仿真系统建模与分析[J].计算机集成制造系统,2009,15(8):1534-1540.
GAO G B, WANG W, LIN K, et al.. Error-simulation system modeling and error analyzing of an articulated arm coordinate Measuring machine [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2009, 15(8): 1534-1540. (in Chinese)

- [10] 周爱国,周飞,吕刚,等. 关节臂式坐标测量机的运动学与工作空间分析[J]. 机械传动, 2015(1): 48-51.
ZHOU A G, ZHOU F, LV G, *et al.*. Kinematics and workspace analysis for articulated arm coordinate measuring machine[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2015(1): 48-51. (in Chinese)
- [11] 郑大腾, 费业泰. 基于 MonteCarlo 理论的柔性坐标测量机测量空间分析[J]. 计量学报, 2010, 31(4): 294-298.
ZHENG D T, FEI Y T. Measurement space analysis of flexible coordinate measuring machine based on MonteCarlo theory[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2010, 31(4): 294-298. (in Chinese)
- [12] 王宜举, 修乃华. 非线性最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
WANG Y J, XIU N H. *Nonlinear Optimization Theory and Method* [M]. Beijing: science press, 2012. (in Chinese)
- [13] 吴华锋, 陈信强, 毛奇凤, 等. 基于自然选择策略的蚁群算法求解 TSP 问题[J]. 通信学报, 2013(4): 165-170.
WU H F, CHEN X Q, MAO Q H, *et al.*. Improved ant colony algorithm based on natural selection strategy for sloving TSP problem[J]. *Journal on Communication*, 2013 (4): 165-170. (in Chinese)
- [14] 毕军, 付梦印, 张宇河. 一种改进的蚁群算法求解最短路径问题[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(3): 107-109.
BI J, FU M Y, ZHANG Y H. An improved ant colony algorithm for the shortest path problem[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(3): 107-109. (in Chinese)
- [15] 龚雨兵, 陈志远, 杨世模. 改进蚁群优化组合法在长缝光谱仪结构优化中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 713-719.
GONG Y B, CHEN ZH Y, YANG SH M. Application of combined optimization design based on improved ACO to structural optimization of long slit spectrograph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 713-719. (in Chinese)

作者简介:



胡毅(1961—),女,江西龙南人,博士,副教授,1983年于华中工学院获得学士学位,1988年、2011年于合肥工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事测试技术与仪器的研究。E-mail: huyi@hfut.edu.cn



江超(1992—),男,安徽池州人,硕士研究生,2010年于华侨大学获得学士学位,主要研究方向为现在精度理论及其应用。E-mail: chaojiangcj@163.com