

文章编号 1004-924X(2014)10-2725-08

基于坐标测量机的自由曲面检测采样策略

温秀兰*, 王东霞, 朱晓春, 赵艺兵

(南京工程学院 自动化学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 为了实现自由曲面快速精确的检测和评定, 研究了检测过程涉及的采样策略。提出采用随机 Hamersley 采样、简单随机采样和列系统采样 3 种方法设置自由曲面上的测量点。采用拟粒子群算法优化变换参数, 实现被测曲面与设计曲面之间的定位, 采用曲面细分法搜索设计模型上与被测点距离最近点以计算自由曲面轮廓度误差。为了对基于坐标测量机(CMM)在不同采样策略下的检测结果进行比较, 采用非均匀有理 B 样条生成零件设计模型, 选择相同的加工工艺在不同的加工中心加工多个零件得到粗糙度不同的自由曲面。最后, 使用 CMM 在所设计的采样策略下实测零件, 用提出的方法计算零件的轮廓度误差, 并与 CMM 内置软件的计算结果进行比较。实验结果显示: 选择随机 Hamersley 采样法和中等采样点数的采样策略检测效果最佳, 不仅测量精度高, 而且耗时少、成本低。应用提出的方法计算自由曲面轮廓度误差时, 其精度比由 CMM 内置软件计算结果高 10%~22%, 表明提出的方法适用于自由曲面零件轮廓度误差的快速精确检测与评定。

关键词: 自由曲面检测; 采样策略; 随机 Hamersley 采样; 采样大小; 坐标测量机

中图分类号: TP391; TH72 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142210.2725

Sampling strategy for free-form surface inspection by using coordinate measuring machines

WEN Xiu-lan*, WANG Dong-xia, ZHU Xiao-chun, ZHAO Yi-bing

(College of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

* Corresponding author, E-mail: zdhxwxl@njit.edu.cn

Abstract: To inspect and evaluate free-form surface(FFS) parts rapidly and precisely, the sampling strategies involved in inspecting processing were researched. Three kinds of sampling methods, randomized Hamersley sampling, simple random sampling and aligned systematic sampling were proposed to specify a set of measuring points and a quasi particle swarm optimization searching was used to optimize the transformation parameters to implement the localization between measured FFS and designed FFS. Then, the surface subdivision method was taken to find the closest points on the design model corresponding to measured points to calculate the profile errors of the FFS. In order to compare the results of different sampling strategies, design models for parts were generated by non-uniform rational basis spline and some parts were manufactured on different machining centers to obtain the surfaces of different roughnesses based on the same processing technology. Finally, these parts were measured

收稿日期: 2013-11-27; 修订日期: 2014-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51075198); 江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2010479); 江苏省“333 人才工程”和“六大人才高峰”项目

on a Coordinate Measuring Machine(CMM) by setting different sampling strategies and the profile errors were calculated by the proposed method and CMMs software, respectively. The experiments results verify that the best sampling strategy for FFS inspection is the randomized Hammersley sampling method and a medium size. It has the merits of higher precision, lower cost and less time. Moreover, the evaluation precision of FFS profile error computed by the proposed method is higher 10%—22% than that by CMM software. These results show that the proposed method is suitable for the profile error inspection of FFS parts rapidly and precisely.

Key words: free-form surface inspection; sampling strategy; randomized Hammersley sampling; sampling size; coordinate measuring machine

1 引言

随着先进制造及精密检测技术飞速发展,自由曲面在汽车、航空等行业应用愈加广泛,由此对其检测及形状误差的高精度测量和符合公差标准的评定也提出了更高的要求,即不仅要求检测精度高还要耗时少且成本低。目前,坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)作为一种通用性强、自动化程度高的高精度测量系统在先进制造技术与科学研究中有着广泛应用^[1-2]。坐标测量机工作时首先将各种几何元素的测量转化为这些几何元素上一些点集坐标位置的测量。在测得这些点的坐标位置后,再由软件按一定的评定准则算出这些几何元素的尺寸、形状、相对位置等。这一工作原理使三坐标测量机具有很大的通用性与柔性。坐标测量机的精度不仅取决于标尺精度,结构精度、测针等硬件设备,还与其所使用的软件及选定的采样策略密切相关^[3]。也就是说,如果坐标测量机已给定,则检测精度、时间及成本主要取决于采样策略。采样策略对被测参数的测量不确定度有很大影响,为此已有学者致力于采样策略研究,提出了一些采样技术^[4-9]。

Lee 等人将 Hammersley 序列和分层采样相结合,提出了基于特征的采样方法用于检测旋转零件,实验验证了该方法鲁棒性强且精度高^[4]。Kim and Raman 设定了 4 种采样方法和 5 种采样大小用于对平板平面度误差测量^[5]。Bader 提出了采用智能采样方法确定零件的最小采样点数用于零件的直线度和平面度检测^[6]。董玉德等人提出了三角平面 Halton 点采样方法用于坐标测量

机检测平面零件,实验结果证明:基于 Halton 采样法比随机方法具有更好的均匀性^[7]。Raghu-nandan 和 Rao 采用 Hammersley 序列确定采样点位置,研究了三种不同表面粗糙度参数 R_a 下采样大小与平面度误差之间的关系^[8]。Colosimo 等人研究了在给定的采样大小下通过选择测点的最佳位置计算圆度误差及其测量不确定度^[9]的方法。上述关于采样策略的研究,多是在对回转零件、平面等简单几何零件开展的。

随着计算机辅助设计/制造(CAD/CAM)和计算机数控(CNC)技术的发展,关于自由曲面建模和加工的研究已较为成熟^[10-11]。由于自由曲面的复杂性和非有理对称性,对自由曲面零件进行快速精确的检测仍然是个难题,一些学者开始致力于该方面的研究。文献[12]研究了基于形状特征的自由曲面采样策略,对由伪随机数模拟产生的曲面进行了实验研究。还有许多研究者提出了采用神经网络、遗传算法(GA),粒子群算法(PSO)、拟粒子群算法(QPSO)等智能计算求解定位问题^[14-18]。文献[19]提出用迭代最近点法解三维变换矩阵;文献[20]证实了采用迭代最近点法搜索参数空间可能包含许多最小值;文献[21]提出了一种基于质心 Voronoi 结构的采样方法,通过仿真实验验证了该方法的有效性;文献[22]提出了基于 STL 模型的离散数据点提取算法,将已知 CAD 模型的自由曲面采样转化为多组自由曲线采样问题,提出了一种基于均分样条质量的自由曲线采样方法,并通过仿真实验证实了算法的可行性。

总结现有的自由曲面检测方法,发现它们多是在给定的采样方法和采样大小下研究定位问题

和最近点搜索问题,虽然有少数学者对自由曲面采样策略开展了研究,但实验验证还只停留在仿真阶段,而关于不同采样策略对自由曲面零件实际检测效果的影响及如何获得自由曲面最优采样策略的研究还未见报道。本文针对自由曲面的特点,提出了多种采样策略用于自由曲面检测,使用坐标测量机设定不同采样方法和采样大小对多个自由曲面零件实测,采用拟粒子群优化算法实现曲面定位并用曲面细分法搜索最近点计算轮廓度误差。最后对不同方法计算结果进行比较,得出了自由曲面检测最优采样策略。

2 自由曲面检测采样策略

使用坐标测量机检测零件时,不仅要求所测离散点能够提供被测零件足够的信息以确定几何元素的尺寸、形状或相对位置,同时还应使检测时间少、成本低,因此选择合理的采样策略尤为重要。采样策略包括采样方法和采样大小(测点数目),本文提出的采样方法有随机 Hammersley 采样法,简单随机采样法和列系统采样法。

2.1 随机 Hammersley 采样 (Randomized Hammersley Sampling, RHS)

二维空间上的 Hammersley 点 (r_i, v_i) 由式 (1) 产生^[23]:

$$\begin{aligned} r_i &= i/N \\ v_i &= \sum_{j=0}^{k-1} \left[\left\lfloor \frac{i}{2^j} \right\rfloor \bmod 2 \right] \times 2^{-j-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $0 \leq r_i, v_i \leq 1, i \in I = \{0, \dots, N-1\}$, N 为采样点数目, $k = \lceil \log_2 N \rceil$ 表示大于或等于 $\log_2 N$ 的最小整数, $\lfloor i/2^j \rfloor$ 表示小于或等于 $(i/2^j)$ 的最大整数,图 1 所示为采样点数 N 等于 36 时 Hammersley 点分布图。

考虑到 Hammersely 序列属于系统分布采样,随机产生 Hammersely 序列的初始点可以减少测量时的系统误差,因此采用随机 Hammersley 序列产生采样点 (r'_i, v'_i) ^[4]:

$$\begin{aligned} r'_i &= (i/N + r_{\text{base}}) \bmod 1 \\ v'_i &= \left[\sum_{j=0}^{k-1} \left[\left\lfloor \frac{i}{2^j} \right\rfloor \bmod 2 \right] \times 2^{-j-1} + v_{\text{base}} \right] \bmod 1, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: r_{base} 和 v_{base} 为 $[0, 1]$ 之间的两个随机数。

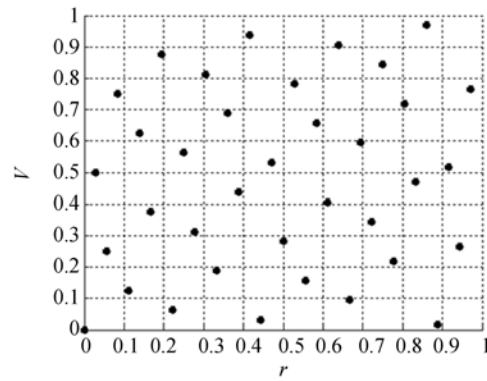


图 1 Hammersley 采样点

Fig. 1 Hammersley sampling points

2.2 简单随机采样 (Simple Random Sampling, SRS)

简单随机采样属于一种概率型采样序列,通过均匀分布产生随机数以确保所有点以等概率被选中^[24],采样点为 36 的简单随机采样序列分布如图 2 所示。

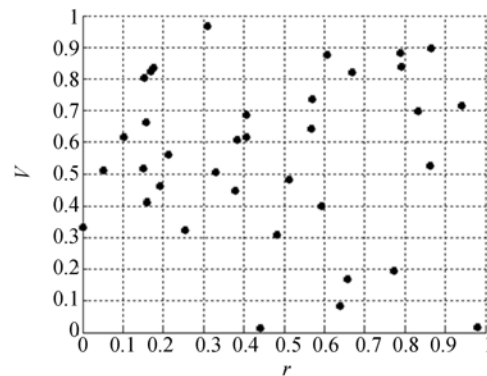


图 2 简单随机采样点

Fig. 2 Simple random sampling points

2.3 列系统采样 (Aligned Systematic Sampling, ASS)

列系统采样属于均匀采样。假设采样点分布为 m 行 n 列,行间隔为 l ,列间隔为 k ,则采样点数为 mn 。为避免捕捉到加工时所产生的系统误差,起始点坐标 (i, j) 随机产生。设 $i \leq l, j \leq k$,则所选中的行和列分别为 $i, i+l, i+2l, \dots, i+(m-1)l$ 和 $j, j+k, j+2k, \dots, j+(n-1)k$,而 mn 个采样点的位置由所选中的 m 行 n 列交叉产生确定。当 $m=6, n=6, l=0.16, k=0.15, i=0.12, j=0.13$ 时,列系统采样点分布如图 3 所示。

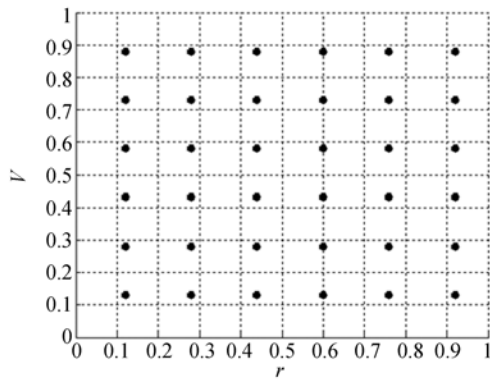


图 3 列系统采样点

Fig. 3 Aligned systematic sampling points

2.4 采样大小

采样大小的选择受零件加工过程、公差规范、误差评定方法、被测结果置信水平等诸多因素影响,合理地选择采样大小是个复杂的过程^[25]。这里将采样大小设定为低、中和高三种情况,分别设定采样点为 49,81 和 121。

3 自由曲面轮廓度误差计算

3.1 基于拟粒子群优化算法的自由曲面定位

自由曲面设计模型采用非均匀有理 B 样条

(NURBS)通过参数 u 和 v 来定义,公式如下^[26]:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{ij} \omega_{ij} M_{i,p}(u) M_{j,q}(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \omega_{ij} M_{i,p}(u) M_{j,q}(v)} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{ij} R_{i,p,j,q}(u, v) \quad (3)$$

$$R_{i,p,j,q}(u, v) = \frac{\omega_{ij} M_{i,p}(u) M_{j,q}(v)}{\sum_{r=0}^n \sum_{s=0}^m \omega_{rs} M_{r,p}(u) M_{s,q}(v)} \quad (4)$$

其中: P_{ij} 为控制点, ω_{ij} 为权值, $M_{i,p}(u)$ 和 $M_{j,q}(v)$ 分别为沿 u 和 v 方向次数为 p 和 q 的规范 B 样条基函数, $n+1$ 和 $m+1$ 分别为沿 x 和 y 方向的控制点数目。

在使用坐标测量机检测基于 NURBS 设计模型引导的实际零件时,零件设计模型定义在设计坐标系,而被测数据定义在测量坐标系,被测表面和设计模型之间关系可由转换矩阵 T 来表示^[18, 27]:

$$T(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z) = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & t_x \\ \cos \beta \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & t_y \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: α, β 和 γ 分别为被测曲面绕 x, y 和 z 轴的旋转量, t_x, t_y 和 t_z 分别为被测曲面沿着 x, y 和 z 轴方向的平移量。自由曲面定位目的是使被测曲面和设计曲面尽可能接近,因此目标函数 g 定义为设计模型上各点与被测模型上对应点的距离和为最小:

$$g(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z) = \min \left(\sum_{i=1}^N |Tq_i - p_i| \right) \quad (6)$$

式中: $p_i = [x_i, y_i, z_i, 1]^T$ 为 NURBS 设计模型上的点, $q_i = [x''_i, y''_i, z''_i, 1]^T$ 为被测模型上点, $i = 1, 2, \dots, N$ 。由式(6)可知,实现被测曲面与设计

模型间定位则转换为搜索 $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ 值,以使目标函数 $g(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ 为最小。

拟粒子群优化算法(QPSO)通过使用拟随机 Halton 序列产生 Q 个粒子,每一粒子有 d 个未知参数,采用 QPSO 实现自由曲面定位时, QPSO 将参数 $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ 近似为 1 个粒子,通过采用浓缩因子法不断修改粒子的速度及位置并计算粒子的目标函数值来寻找最佳粒子,当搜索到最小目标函数值 $g(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ 时,对应粒子即为最佳粒子,则完成了被测曲面与设计模型之间的定位,其流程如图 4 所示。

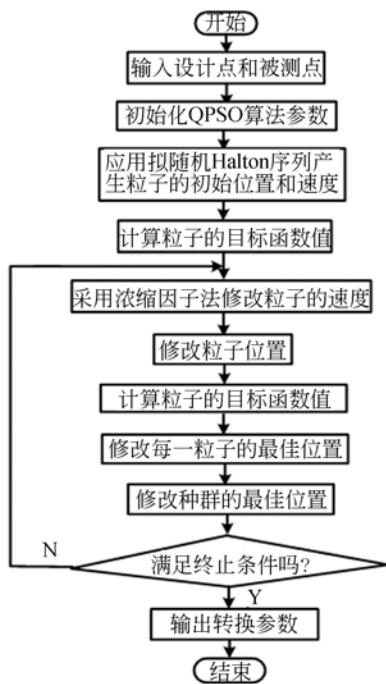


图 4 基于 QPSO 的自由曲面定位流程图

Fig. 4 Flow of free-form localization based on QPSO

3.2 曲面细分法搜索最近点

曲面细分法通过在 NURBS 设计模型上逐步缩小参数 u 和 v 所设定的范围来搜索与被测点距离最近的设计点,其流程如下:

- (1) 设定参数 u 和 v 的初始范围 $u \in [0, 1]$, $v \in [0, 1]$, 即参数 u 和 v 的区间宽度 w 均为 1;
- (2) 输入被测点 q_i ;
- (3) 将参数 u 和 v 的区间宽度 w 等分为 n 个小间隔, 则间隔宽度 δ 等于 w/n ;
- (4) 在参数 u 和 v 设定的初始范围内搜索与被测点 q_i 距离最近的设计点 p'_i , 设与被测点距离最近的设计点参数值为 (u_0, v_0) ;
- (5) 将曲面的每一小间隔细分为 n 等分, 则新的间隔宽度 δ 等于 δ/n ;
- (6) 在已缩小的范围内搜索与被测点距离最近的设计点 p'_i , 得到新的设计点参数值 (u_0, v_0) ;
- (7) 如果在连续两次曲面细分找到的最近点非常接近, 满足预先设定的精度要求, 则算法停止, 否则返回步骤(5)。

3.3 自由曲面轮廓度误差

为了比较不同采样策略的检测结果, 采用峰谷轮廓误差 (E_{pv}) 计算自由曲面的轮廓度误差。假设 $p'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ 是在设计模型上搜索到的与

被测点 $q_i(x''_i, y''_i, z''_i)$ 对应的距离最近的点, 则 q_i 与 p'_i 之间距离为:

$$d_i = \pm \sqrt{(x'_i - x''_i)^2 + (y'_i - y''_i)^2 + (z'_i - z''_i)^2} \quad (7)$$

E_{pv} 定义为 d_i 最大正值 (d_p) 与最小负值 (d_v) 之差:

$$E_{pv} = d_p - d_v \quad (8)$$

4 实验与结果

采用 NURBS 设计 A, B, C 和 D 4 种模型, 选用相同加工工艺在 PLITZ Hitech LV-800 加工中心加工零件 A 和 B, 在 XH7157 加工中心加工零件 C 和 D, 4 个零件的横截面均设计成 $72 \text{ mm} \times 72 \text{ mm}$ 。为避免零件加工时边缘误差对测量结果的影响, 取测量面积约为 $64 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$ 。采用图 5 三维表面轮廓仪 Talysurf CCI 测量零件粗糙度, 测得粗糙度参数值 R_a 值见表 1。用安装 Renishaw MH20i 测头的 NC454 坐标测量机设定简单随机采样、随机 Hamersley 采样和列系统采样 3 种方法检测零件, 采样大小均取为 81, 在 3 种采样方法下每一零件各测量 20 次, 应用 MATLAB 6.5 编写基于 QPSO 和曲面细分法计

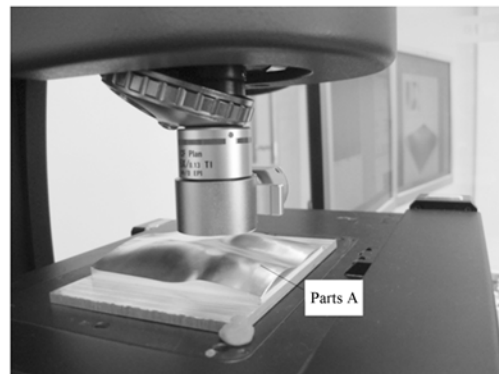


图 5 粗糙度检测

Fig. 5 Roughness inspection

表 1 零件粗糙度

Tab. 1 Part roughness

零件	加工中心	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
A	PLITZ Hitech LV-800	1.82
B		1.96
C	XH7157	5.45
D		5.61

算峰谷轮廓误差(E_{pv})程序, 20 次峰谷轮廓误差的平均值(\bar{E}_{pv})和标准差(σ)如表 2 所示。

为了比较不同采样方法的结果, 同时使用安装有 PH10M+SP25M 扫描测头的 NC564 坐标测量机检测零件, 表 3 为零件 B 的部分测量数据, 由 NC564 的 Rational DMIS CAD++ 软件计算结果也列于表 2。由表 2 可见, 对于不同的粗糙度表面, 随机 Hamersley 采样法的峰谷轮廓误差平均值与 NC564 扫描采样的结果最接近, 其

峰谷轮廓误差的标准差最小, 而简单随机采样轮廓误差标准差最大, 约为前者的 6 倍, 表明随机 Hamersley 采样法的稳定性最好。原因在于随机 Hamersley 采样序列在给定的采样大小下能够提供更多信息, 而简单随机采样点随机性大, 不能排除存在大面积未采样的可能性。由此可见, 与简单随机采样和列系统采样相比较, 随机 Hamersley 采样法采样点分布均匀, 提供信息可靠, 更适宜于对自由曲面的检测。

表 2 不同采样方法计算的轮廓度误差

Tab. 2 Profile errors based on different sampling methods (mm)

零件	随机 Hamersley 采样		简单随机采样		列系统采样		NC564 扫描采样
	平均值 \bar{E}_{pv}	标准差 σ	平均值 \bar{E}_{pv}	标准差 σ	平均值 \bar{E}_{pv}	标准差 σ	轮廓度误差 E_{pv}
A	0.581 2	0.012 9	0.555 6	0.067 2	0.580 4	0.042 1	0.638 7
B	0.535 6	0.011 7	0.528 0	0.059 3	0.536 0	0.040 1	0.593 6
C	0.660 3	0.011 2	0.654 7	0.079 3	0.651 8	0.038 2	0.695 0
D	0.770 2	0.013 1	0.690 4	0.081 2	0.768 2	0.040 5	0.811 9

表 3 零件 B 的部分测量数据

Tab. 3 Part of measurement data of parts B (mm)

No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z
1	-34.549 1	-30.624 0	-8.605 4	11	-34.686 0	18.919 0	-7.193 5	21	-31.054 7	0.577 9	-6.338 4
2	-34.536 7	-25.736 0	-7.626 3	12	-34.680 7	23.911 1	-7.080 9	22	-31.009 6	-4.527 1	-6.283 0
3	-34.551 8	-20.827 1	-6.927 0	13	-34.733 3	28.909 4	-7.149 1	23	-30.860 5	-9.526 5	-5.764 8
4	-34.497 0	-15.961 8	-6.458 4	14	-34.601 5	33.914 8	-6.943 9	24	-30.895 0	-14.435 2	-5.487 2
5	-34.518 9	-11.094 8	-6.681 0	15	-31.105 5	30.481 0	-5.718 3	25	-30.944 4	-19.311 1	-5.792 5
6	-34.666 8	-6.213 0	-7.639 7	16	-31.117 4	25.493 9	-5.464 7	26	-30.940 0	-24.200 3	-6.470 8
7	-34.6632	-1.107 9	-8.039 4	17	-31.050 5	20.517 9	-5.402 5	27	-30.894 5	-29.082 7	-7.420 2
8	-34.699 4	3.965 8	-7.895 1	18	-31.040 5	15.537 6	-5.483 4	28	-30.929 6	-33.919 4	-8.595 1
9	-34.678 2	8.945 7	-7.529 1	19	-31.030 6	10.557 8	-5.632 0	29	-27.264 2	-30.864 4	-7.138 2
10	-34.673 8	13.930 4	-7.325 4	20	-31.072 0	5.596 6	-5.989 1	30	-27.267 9	-26.010 4	-6.051 4

采样点数越多, 检测时间越长、成本越高, 因此选择合适的采样点数至关重要。本文研究了在随机 Hammersley 采样法下采样大小对轮廓度误差的影响。采样大小分别设定为 49, 81 和 121 时, 采用 NC454 CMM 对零件进行 20 次测量, 计算了零件的峰谷轮廓度误差平均值, 表 4 给出零件 A 的峰谷轮廓度误差平均值, 为便于比较, 由 NC454 CMM 软件计算的峰谷轮廓度误差也列于表 4 中。当采样大小为 81 和 121 时, 峰谷轮廓度误差平均值比较接近, 而采样大小为 49 时其计算结果与采样大小为 121 时差异较大, 说明对自由曲面

检测时, 当采样大小为 49 时, 不能提供足够的表面轮廓信息, 如果同时兼顾检测精度、时间和成本, 则采样大小设定为 81 效果最佳。

另外, 对相同的采样点, 本文方法计算得到的轮廓度误差小于由 NC454 坐标测量机软件给出的计算结果, 其原因是 NC454 软件采用的是迭代算法, 对初值很敏感, 容易陷入局部最小。大量实例证实选择随机 Hammersley 采样序列, 由本文提出方法计算的自由曲面轮廓度误差评定精度比坐标测量机软件计算结果精度高 10%~22%。

表 4 零件 A 轮廓度误差平均值(\bar{E}_{pv})Tab. 4 Mean(\bar{E}_{pv}) of part A (mm)

采样方法	采样大小		
	49	81	121
本文方法	0.551 7	0.581 2	0.583 1
CMM 计算结果	0.629 4	0.643 2	0.646 9

5 结 论

为了能够快速高效检测自由曲面及精确计算轮廓度误差,提出了采用随机 Hammersley 采样、简单随机采样和列系统采样多种方法设置自由曲面上的测量点,基于拟粒子群优化算法搜索变换参数实现了被测曲面与设计曲面的精确定位并基于曲面细分法搜索与被测点距离最近的设计曲面

参考文献:

- [1] 李松原,胡鹏浩. 并联坐标测量机结构优化[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2852-2859.
LI S Y, HU P H. Structure optimization of parallel CMM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2852-2859. (in Chinese)
- [2] 石照耀,张宇,张白. 三坐标机测量齿轮齿廓的不确定度评价[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 766-771.
SHI ZH Y, ZHANG Y, ZHANG B. Uncertainty evaluation of CMM measurement for gear profile[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 766-771. (in Chinese)
- [3] RAMASWAMI H, ACHARYA S B, KOVVUR Y, et al.. A multivariate statistical analysis of sampling uncertainties in geometric and dimensional errors for circular features [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2006, 25(2): 78-93.
- [4] LEE G, MOU J, SHEN Y. Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1997, 37(7): 917-934.
- [5] KIM WS, RAMAN S. On the selection of flatness measurement points in coordinate measuring machine inspection [J]. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 2000, 40(3): 427-443.
- [6] BADAR MA, RAMAN S, PULAT PS, et al.. Experimental analysis of search-based selection of sample points for straightness and flatness estima-

tion[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2005, 127(1): 96-103.

[7] 董玉德,汪玉玺,刘达新,等. 三角平面 Halton 点采样策略及其性能分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(8): 1063-1068.
DONG Y D, WANG Y X, LIU D X, et al.. Halton points sampling strategy and performance analysis for triangle plane [J]. *Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(8): 1063-1068. (in Chinese)

[8] RAGHUNANDAN R, RAO P V. Selection of sampling points for accurate evaluation of flatness error using coordinate measuring machine [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 202(1-3): 240-245.

[9] COLOSIMO B M, GUTIERREZ M E, MORONI G, et al.. A tolerance interval based criterion for optimizing discrete point sampling strategies [J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(4): 745-754.

[10] WANG X C, YU Y. An approach to interference-free cutter position for five-axis free-form surface side finishing milling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 123(1): 191-196.

[11] XU R F, CHEN ZH T, CHEN W Y. Tool positioning algorithm based on smooth tool paths for 5-axis machining of sculptured surfaces [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(5): 851-858.

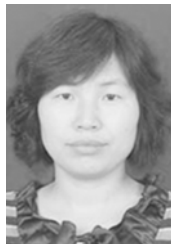
[12] 陈满意,刘玉慧. 基于形状特征的自由曲面采样算法的研究[J]. 机械设计与制造, 2011, 3: 190-192.
CHEN M Y, LIU Y H. Research on sampling strategy for free-form surfaces based on shape features [J]. *Machinery Design & Manufacture*,

- 2011, 3:190-192. (in Chinese)
- [13] LI Y, GU P H. Automatic localization and comparison for free-form surface inspection[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2006, 25(4):251-268.
- [14] BALASUBRAMANIAN S, GU P. A neural network approach to localization of parts with complex surfaces for precision inspection [C]//*Proceeding of 1995 ASME Computers in Engineering Conference, Boston, America, September 17-20, 1992*: 1025-1031.
- [15] 王东善,李明,卓军. 一种自由曲面轮廓度误差评定方法[J]. *机械设计与制造*, 2004, 1:64-66.
WANG D SH, LI M, ZHUO J. An evaluation method of free-form profile error[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2004, 1: 64-66. (in Chinese)
- [16] 廖平,喻寿益. 基于遗传算法的复杂曲面形状误差计算[J]. *机械科学与技术*, 2004, 23(1):46-49.
LIAO P, YU SH Y. Calculating of complex surface form error based on genetic algorithm with canonicity real number encoding[J]. *Mechanical science and technology*, 2004, 23(1):46-49.
- [17] 郭慧,林大钧. 基于微粒群算法的复杂曲面轮廓度误差计算[J]. *东华大学学报*. 2008, 34(3): 274-277.
GUO H, LIN D J. Profile error computation of complicated surface based on particle swarm optimization [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2008, 34(3):274 - 277. (in Chinese)
- [18] 杜建军,高栋,孔令豹,等. 光学自由曲面误差评定中匹配方法的研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1):133-138.
DU J J, GAO D, KONG L B, et al.. Study of matching methods for error evaluation of optical free-form surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):133-138. (in Chinese)
- [19] ZHANG Z. Iterative point matching for registration of freeform curves and surfaces [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(2): 119-152.
- [20] CAMPELL R J, FLYNN P J. A survey of free-form object representation and recognition techniques [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 81(1): 166-210.
- [21] 宋占杰,张美,何改云,等. 基于质心 Voronoi 结构的自由曲面采样策略[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2012, 42 :2-8.
SONG ZH J, ZHANG M, HE G Y, et al.. Sculptured surface point distribution strategy based on centroidal voronoi tessellation[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2012, 42 :2-8. (in Chinese)
- [22] 何改云,贾红洋. 基于 CAD 模型的自由曲面自适应采样策略[J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(10):835-840.
HE G Y, JIA H Y. Adaptive sampling strategy for free-form surface based on CAD model, *Journal of Electronic Measurement and Instrument [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(10):835-840 (in Chinese)
- [23] BALAKRISHNA P, RAMAN S. An integrated approach for the estimation of spherical form tolerance [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2006, 25(3):172-183.
- [24] [http://en.wikipedia.org/wiki/Sampling_\(statistics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Sampling_(statistics))[OL].
- [25] ZHANG Y F, NEE A, FUH J, et al.. A neural network approach to determining optimal inspection sampling size for CMM [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1996, 9(3): 161-169.
- [26] LES P, WAYNE T. *The NURBS book (Second Edition)* [M]. New York: Springer-Verlag, 2010.
- [27] CHEUNG C F, LI HF, KONG L B, et al.. Measuring ultra-precision freeform surfaces using a robust form characterization method[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(1): 488-494.

作者简介:



温秀兰(1966—),女,内蒙古丰镇人,教授,1988年于南京理工大学获得学士学位,1991年于中北大学获得硕士学位,2004年于东南大学获得博士学位,主要研究方向为智能计算、逆向工程、精密计量技术。E-mail: zdhxwxl@njit.edu.cn



王东霞(1973—),女,河南南阳人,博士研究生,讲师,1997年、2003年于山东科技大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为精密计量技术、进化计算。E-mail: zdhxwdx@njit.edu.cn