

文章编号 1004-924X(2012)04-0835-08

改进遗传算法与拟随机序列结合 评定自由曲线轮廓度误差

温秀兰*, 赵艺兵, 王东霞, 朱晓春, 曹未丰
(南京工程学院 自动化学院, 江苏 南京 211167)

摘要:为了高效率、高精度检测自由曲线和曲面零件并计算轮廓度误差,提出将改进遗传算法与拟随机序列结合来评定自由曲线轮廓度误差。首先,针对自由曲线因没有已知的解析表达式而常用离散点表示其轮廓的特点,采用非均匀有理B样条(NURBS)来表示自由曲线,并用改进遗传算法优化重建自由曲线;然后,应用拟随机 Halton 序列均匀产生参数值精确计算点到曲线最短距离。阐述了自由曲线重建时控制顶点及目标函数值的计算方法,确立了改进遗传算法重建自由曲线及采用拟随机序列生成参数值求解点到曲线最短距离的具体步骤。最后,针对仿真实例计算并实测零件曲线轮廓度误差。结果显示,自由曲线轮廓度误差评定精度高于99%,表明提出的方法算法简单、计算速度快、精度高,适于在工程计量中推广应用。

关键词:自由曲线;轮廓度误差;改进遗传算法;拟随机序列

中图分类号:TH161;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122004.0835

Evaluating freeform curve profile error based on improved genetic algorithm and quasi random sequence

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

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

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

Abstract: An evaluating method of freeform curve profile errors based on the Improved Genetic Algorithm(IGA) and quasi random sequence was proposed to inspect freeform curves and surface parts and to compute their profile errors efficiently and precisely. Firstly, according to the characteristics that the freeform curve was expressed by discrete points rather than an analytic function, the Non-uniform Rational B-spline (NURBS) was used to express the free curve and the IGA was proposed to reconstruct it. Then, the quasi random sequence was taken to generate parameter values uniformly and to calculate the shortest distance from a point to a reconstructed curve exactly. Furthermore, The computation methods of the control vertex and objective function value were described when freeform curve was reconstructed and the detailed steps were established for reconstructing the free curve and computing the shortest distance from the point to the curve based on the IGA and quasi random sequence. Finally, the curve profile errors of a simulation example and practical parts were calculated and meas-

收稿日期:2011-10-20;修订日期:2011-12-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075198);江苏省自然科学基金资助项目(BK2010479);江苏省“333人才工程”资助项目;江苏省“六大人才高峰”资助项目;南京工程学院创新基金资助项目(CKJ2011004)

ured. The results verify that the evaluation precision of freeform curve profile error is higher than 99%. The proposed method has the advantages of simple algorithm, rapid computation and high accuracy and it can be applied in engineering metrology.

Key words: freeform curve; profile error; Improved Genetic Algorithm(IGA); quasi random sequence

1 引言

近年来,自由曲线、曲面零件在航空航天、汽车、模具等工业中的应用越来越广泛,能否对自由曲线、曲面零件进行高效率、高精度的检测和误差计算,直接关系到产品的质量和使用寿命^[1-2]。

自由曲线曲面是一种较难定义和加工的几何元素,没有统一的解析表达式,需要根据已知离散数据点通过样条函数重建其理论轮廓。对自由曲面进行数字化,即用离散的采样点提取曲面的原始形状信息,是对自由曲面零件进行设计、制造和检测的关键环节,而自由曲线轮廓度误差评定是数字化检测的主要项目,近年来不少学者致力于自由曲线误差评定研究,并取得了一定效果^[3-6]。文献[3]提出使用对应特征点法与一维搜索法相结合来实现被测曲线与理论曲线之间的自适应性调整,分离并消除了位置误差对轮廓度误差评定的影响,通过应用坐标系自适应调整方法对一椭圆进行线轮廓度误差评定,与已知轮廓度相比较其计算误差为 0.001 1 mm;文献[4]研究了采用三次样条函数拟合被测物体的轮廓曲线,用逐次逼近思想来评定平面自由曲线的轮廓度误差,针对四分之一圆弧的误差评定显示,经多次循环迭代后得到的轮廓度误差与由自适应法和未进行坐标系调整时得到的轮廓度误差相比有了明显减小,验证了所提出方法对一段圆弧进行误差评定能达到较高精度,但是文献未给出对自由曲线轮廓度误差评定结果;文献[5]提出采用遗传算法实现测量基准与设计基准的偏差修正,采用规范积累弦长参数化法计算节点矢量,将控制顶点权值均设定为 1,即用三次均匀有理 B 样条插值反算控制点建立理论轮廓曲线的数学模型,通过对涡轮动叶片某截面曲线轮廓度误差评定,结果证实当设定测量点到理论曲线上对应点模拟误差为 0.661 6 mm 时,采用提出方法求得的误差最大值为 0.677 5 mm,即精度达到 97%;针对微小型平

面零件,文献[6]给出了基于图像的轮廓度测量与评定方法,实例证明最小极偏差评定方法较最小二乘评定方法精度提高了 4%~12.6%。

上述方法多就如何减小理论曲线与被测曲线存在的位置偏差进行了深入研究并提供了可借鉴的方法;但是并未考虑由离散数据点通过样条函数拟合理论轮廓时,其理论曲线拟合精度与样条函数次数、节点矢量值、控制顶点个数、位置及其权值大小等有关,由离散数据点重建理论轮廓本身属于复杂的非线性优化问题^[7]。当自由曲线曲面零件测量数据与设计模型匹配后,重建理论轮廓和求解测量点到理论轮廓最短距离成为自由曲线轮廓度误差评定的 2 个关键问题,其求解精度直接关系到轮廓度误差评定的准确性。因此,近年来如何快速精确求解点到曲线最短距离逐渐受到研究者的重视。文献[8]将计算点到参数曲线最短距离转化为方程组求解问题,采用区间牛顿法求解点到隐式曲线距离;文献[9]提出了用三次参数样条曲线拟合复杂曲线,采用分割逼近算法计算点到复杂平面曲线最小距离;文献[10]针对空间参数曲线提出了基于几何特征的快速迭代法、基于最优化方法的黄金分割法与二次迭代法的组合法以及格点法 3 种算法,计算了点到参数曲线的最小距离。由此可见上述方法多在研究点到参数曲线的最短距离。

本文针对自由曲线轮廓度误差评定关键问题,提出用非均匀有理 B 样条表示自由曲线,用改进遗传算法优化重建自由曲线理论轮廓,通过拟随机 Halton 序列产生参数值精确求解点到自由曲线理论轮廓的最短距离,最终实现了自由曲线轮廓度误差评定。

2 自由曲线轮廓度误差

根据 GB/T1182-1996 中定义,线轮廓度误差的公差带是包络一系列直径为公差值 t 的圆的 2 包络面间的区域,诸圆的圆心位于具有理论正确

尺寸的几何形状的曲线上。计算自由曲线轮廓度误差需要首先由已知离散点重建理论轮廓曲线,再计算所有测量点 $A_k(k=0,1,\dots,V,V$ 为测点数目)到理论轮廓曲线的最小距离 δ_k ,找出最小距离 δ_k 中的最大值,则自由曲线轮廓度误差最小区域解 f 等于该最大值的 2 倍,即

$$f=2\max(\delta_k) . \quad (1)$$

3 自由曲线理论轮廓的重建

3.1 自由曲线的表示

由于自由曲线曲面没有统一的解析表达式,需要根据已知离散数据点通过样条函数依据一定规则重建其理论轮廓。考虑到非均匀有理 B 样条(NURBS)不仅可以用统一的表达式同时精确表示自由曲线、曲面和标准的解析形体,还能精确表示一般的 B 样条曲线、Bezier 曲线,而且曲线、曲面的形状既可借助调整控制顶点,又可通过改变权因子来修改,具有较大灵活性,因此自由曲线 $P(t)$ 采用 NURBS 来表示^[11],即:

$$P(t) = \frac{\sum_{i=0}^n Q_i \omega_i N_{i,k}(t)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(t)} = \sum_{i=0}^n R_{i,k}(t) Q_i, \quad (2)$$

记 $R_{i,k}(t) = \frac{\omega_i N_{i,k}(t)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(t)}$,其中 Q_i 为控制

顶点($i=0,1,2,\dots,n$), ω_i 是与控制顶点 Q_i 对应的权值, $t=(t_0, t_1, \dots, t_S)$ 为数据参数值矢量, $S+1$ 为参数值矢量中元素的个数, $N_{i,k}(t)$ 为 k 次规范 B 样条基函数,其值与节点矢量 U 和参数值矢量 t 有关,可由德布尔-考克斯递推公式得到:

$$\begin{cases} N_{i,0}(t) = \begin{cases} 1, & u_i \leq t < u_{i+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \\ N_{i,k}(t) = \frac{t-u_i}{u_{i+k}-u_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{u_{i+k+1}-t}{u_{i+k+1}-u_{i+1}}, & (3) \\ N_{i+1,k-1}(t), & k \geq 1 \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{cases}$$

其中节点矢量 U 为:

$$U = \underbrace{[u_0, u_1, \dots, u_k]}_{k+1}, u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, u_i, \underbrace{[u_{i+1}, \dots, u_{n+k+1}]}_{k+1} = \underbrace{[a, a, \dots, a]}_{k+1}, u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, u_n, \underbrace{[b, b, \dots, b]}_{k+1},$$

通常 a 取 0, b 取 1, $u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, u_n$ 称为内节点。

可见,自由曲线形状与节点矢量 U 、参数值矢量 t 、控制顶点数目 $n+1$ 、控制顶点位置 Q_i 及其权值大小 ω_i 密切相关。

3.2 控制顶点确定

为求解控制顶点,将式(2)重写为:

$$\begin{pmatrix} P(t_0) \\ P(t_1) \\ \vdots \\ P(t_S) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{0,k}(t_0) & R_{1,k}(t_0) & \cdots & R_{n,k}(t_0) \\ R_{0,k}(t_1) & R_{1,k}(t_1) & \cdots & R_{n,k}(t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{0,k}(t_S) & R_{1,k}(t_S) & \cdots & R_{n,k}(t_S) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_n \end{pmatrix} .$$

上式用矢量形式表示为:

$$P = RQ . \quad (4)$$

当数据参数值、节点矢量和控制顶点的权值已知时,矩阵 R 即可确定;考虑到 R 不是方阵,其逆矩阵不存在。为求解控制顶点矢量 Q ,式(4)两边同乘 $R^T, R^T R$ 为一方阵,则 NURBS 曲线的控制顶点矢量 Q 便可以通过最小二乘法来计算求得,即:

$$Q = (R^T R)^{-1} R^T P . \quad (5)$$

3.3 自由曲线重建

3.3.1 自由曲线重建的目标函数值

因为自由曲线为光滑曲线,其重建即是寻求与已知离散数据点 $H_j(x_j, y_j)(j=0,1,\dots,S)$ 最接近的 NURBS 曲线 $P(t)$,这里定义参数值 t_j 对应的重建曲线上点 $P(t_j)$ 与数据点 H_j 间的欧氏距离的平均值作为目标函数,即:

$$f = \frac{\sum_{j=0}^S |P(t_j) - H_j|}{S+1} = \frac{\sum_{j=0}^S \left| \frac{\sum_{i=0}^n Q_i \omega_i N_{i,k}(t_j)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(t_j)} - H_j \right|}{S+1} . \quad (6)$$

该目标函数是参数值矢量 t 、节点矢量 U 及控制顶点权值 $W=(\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_n)$ 的函数。

3.3.2 改进遗传算法实现自由曲线重建

由式(6)可知自由曲线重建转化为下述最小化问题:

$$f = \min f(\mathbf{X}) = \min f(t, U, W) , \quad (7)$$

式(7)中 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_p)$ 为待优化变量,在遗传算法中称其为个体, p 为待优化变量的个数。这里 $\mathbf{X}=(t, U, W)$ 。求解式(6)最小值属于复杂的非线性优化问题,遗传算法在求解复杂非线性

优化问题时具有独到之处。针对多数遗传算法运算过程中使用轮盘赌选择方式,需要根据经验事先确定交叉、变异概率^[5],算法收敛速度慢、鲁棒性差。本文采用改进遗传算法进行优化,实现自由曲线重建^[12],算法设计如下:

采用实数编码,每一个基因代表一个优化变量,所有变量对应的基因依次连在一起构成该实数编码的染色体;为保持群体多样性,算法实现时采用基于代沟最小的代选择模型,算法流程如下:
step1. 随机产生 Φ 个初始群体;
step2. 从群体中任意选取 2 个个体 $\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2$ 作为父代;
step3. 考虑到自由曲线重建时待优化的变量彼此独立,2 个父代个体 $\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2$ 采用 BLX- α 混合交叉策略产生 n_c 个子代个体 \mathbf{X}^c ,即子代矢量 \mathbf{X}^c 的每个元素 x_i^c 的值根据均匀分布从区间 $[x_i^1, x_i^2]$ 中随机选取,其中:

$$\begin{aligned} x_i^1 &= \min(x_i^1, x_i^2) - \alpha r_i \\ x_i^2 &= \max(x_i^1, x_i^2) + \alpha r_i, \\ r_i &= |x_i^1 - x_i^2| \end{aligned} \quad (8)$$

x_i^1, x_i^2 分别是 $\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2$ 的第 i 个元素, α 是一个正数,实验中取 $\alpha=0.1$;

step4. 从父代 $\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2$ 和 n_c 个子代个体中选择目标值最小的 2 个个体替换原来的 2 个父代 $\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2$;

step5. 判断是否满足终止条件,若未满足,则转 step 2。

在使用改进遗传算法实现自由曲线重建时,终止条件通常设定为算法的最大进化代数或连续若干代目标函数值不再减小,若满足设定条件则算法结束。

4 基于拟随机序列求解点到自由曲线的最短距离

4.1 点到自由曲线最短距离的数学模型

当通过改进遗传算法完成自由曲线 $P(t)$ 重建后,欲求测点 $A_k(x_k, y_k)$ ($k=0, 1, \dots, V, V$ 为测点数目)到曲线 $P(t)$ 最短距离,关键是确定参数值 t_i ($i=1, 2, \dots, M$),使其对应的重建自由曲线

上点 $P(x(t_i), y(t_i))$ 与测点 $A_k(x_k, y_k)$ 间距离 μ_{ki} 为最小,该最小值即为点到自由曲线最短距离 δ_k 。因此点到自由曲线最短距离数学模型表示为:

$$\delta_k = \min(\mu_{ki}) = \min(\sqrt{[x_k - x(t_i)]^2 + [y_k - y(t_i)]^2}). \quad (9)$$

4.2 拟随机 Halton 序列

拟随机数序列能够均匀地充满采样空间,使计算结果稳定可靠,因此已被成功应用于数值积分、随机优化等多个领域^[13-14]。常用的拟随机序列有 Van der Corput 序列、Halton 序列、Faure 序列、Sobol 序列。本文采用拟随机 Halton 序列在参数采样区间产生参数值 t_i ($i=1, 2, \dots, M$), M 通常取较大的值使 t_i 均匀地充满采样区间。

Halton 序列^[15]:

设 b 为基数,某一整数 $k, k \geq 0$ 可以用基数 b 表示为:

$$k = d_j b^j + d_{j-1} b^{j-1} + \dots + d_1 b + d_0, \quad (10)$$

其中 $d_i \in \{0, 1, \dots, b-1\}, i=0, 1, \dots, j$ 。定义基数 b 逆函数 $\phi_b(k)$ 为:

$$\phi_b(k) = d_0/b^0 + d_1/b^1 + \dots + d_j/b^{j+1}. \quad (11)$$

注意对于每一个整数 $k \geq 0, \phi_b(k) \in [0, 1]$ 。

Halton 序列中的第 k 个元素由式(11)求得。如果取 b_1, \dots, b_d 共 d 个不同的基数,则可得长度为 l 的 d 维 Halton 序列 $\{x_1, \dots, x_l\}$, 其中序列的第 k 个元素为: $\mathbf{X}_k = [\phi_{b_1}(k-1), \dots, \phi_{b_d}(k-1)]^T, k=1, \dots, l$ 。

4.3 算法实现

MATLAB 具备卓越的数值计算能力,它的基本数据单位是矩阵,用 MATLAB 编写生成拟随机 Halton 序列的函数文件(funHalton.m)和点到自由曲线的最短距离程序非常方便,采用拟随机序列生成参数值求解点到自由曲线的最短距离步骤如下:

step1. 设定参数值数目 M 、参数值采样区间及测点 A_k 距重建曲线最短距离初始值 δ_k^0 , 设定代数 $g=1$;

step2. 在设定的参数采样区间调用 funHalton.m 产生 M 个参数值;

step3. 计算测点 A_k 到各参数值 t_i ($i=1, 2, \dots, M$) 所对应重建自由曲线上点 $P(x(t_i), y(t_i))$ 的距离

μ_k^g ;

step4. 找出 A_k 到自由曲线最短距离 δ_k^g , 即 $\delta_k^g = \min(\mu_k^g) (i=1, 2, \dots, M)$;

step5. 判断 $|\delta_k^{g-1} - \delta_k^g|$ 是否满足计算精度要求, 若不满足则置 $M=2 * M, g=g+1$ 转 step2;

step6. 输出测点 $A_k(x_k, y_k)$ 到自由曲线最短距离 δ_k 。

5 实验与结果

5.1 仿真实例

为了验证算法的有效性, 对于曲线 $y = \sin(x)$, 在区间 $x \in [0, 4.6]$ 每间隔 0.1 取一个值, 共取 47 个离散值生成理论离散点作为实验数据。设定种群规模和子代种群规模均为 20, 终止条件为最大进化代数 50, NURBS 曲线次数取 3, 控制顶点数取 5, 经改进遗传算法重建曲线其目标函数优化过程见图 1。由图 1 可见当进化代数为 40 代时, 目标函数值为 0.012 1, 证实了所重建曲线的高精度。

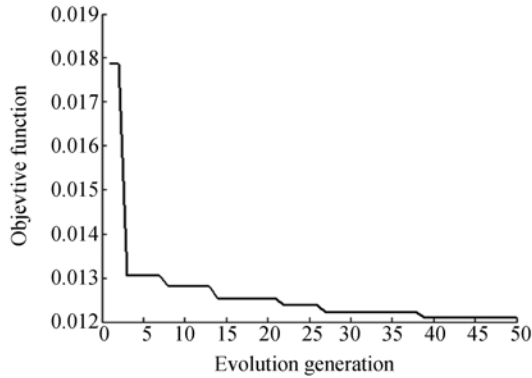


图 1 目标函数优化过程

Fig. 1 Optimization process of objective function

求得控制顶点坐标为 $[(0, 0), (0.057 9, 0.020 6), (4.312 8, 5.365 6), (1.911 2, -0.077 0), (4.605 6, -1.026 1)]$, 权值为 $\mathbf{W} = [0.876 2, 1.417 9, 0.356 6, 0.896 8, 1.259 7]$, 节点矢量 $\mathbf{U} = [0, 0, 0, 0, 0, 0.025 1, 1.000 0, 1.000 0, 1.000 0, 1.000 0, 1.000 0]$, 图 2 为重建后的曲线图。采用拟随机序列产生不同数目参数值计算点 $O(\pi/2, 3)$ 到重建曲线的最短距离, 计算结果见表 1 所示, 由表可见当参数数目为 50 时, 点到曲线最短距离与理论值误差仅为 0.83%, 随着参

数数目增加其误差值会逐步减小, 证实了所提出方法能够快速精确求解点到曲线的最短距离。

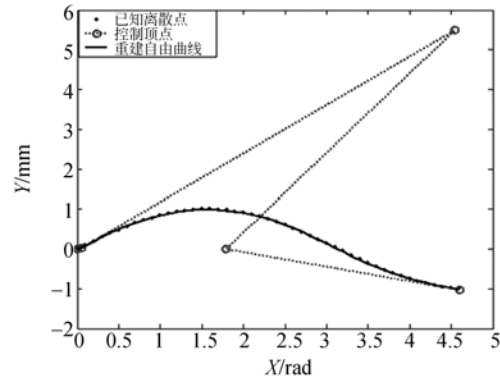


图 2 重建曲线

Fig. 2 Reconstructed curve

表 1 仿真实例中点到曲线最短距离

Tab. 1 The shortest distance from point to curve of simulation example

参数值数目 M	理论值	本文计算值	误差
50	2	2.016 5	0.83%
100	2	2.012 6	0.63%
400	2	2.012 4	0.62%

5.2 实测零件

图 3 为采用 PLITZ Hitech LV-800 加工中心加工一零件实物图, 该零件截面轮廓 AB 段为一自由曲线, 其线轮廓度公差为 0.15 mm。

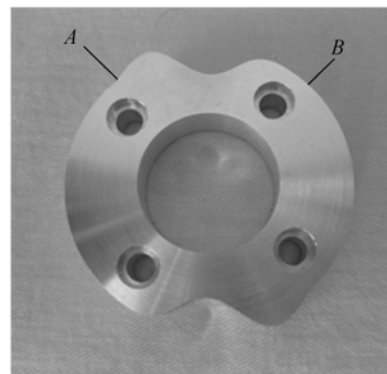


图 3 零件实物图

Fig. 3 Figure of parts

采用安装 Renishaw PH10T 自动测头的 NC454 三坐标测量仪, 对零件 AB 曲线段进行测量, 测得数据如表 2 所示。该仪器量程为 400 mm × 500 mm × 400 mm, 最大允许示值误差为

MPPE_E: $2.1 + 3.3L/1\ 000$ (μm), L : mm, 处于良好的工作状态, 测量时实验室环境温度控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, 湿度恒定, 因此可以忽略环境对测量不确定度影响。选取零件截面轮廓自由曲线 AB 段上 6 个点进行重复性误差实验, 求得 6 个点重复性误差最大值为 $0.056\ \mu\text{m}$, 该值为测量不确定度的主要影响因素, 对实测数据结果影响不大。

表 2 实测数据

Tab. 2 Practical measurement data (mm)

No	X	Y	No	X	Y
1	0.000 9	0.001	22	13.125 4	-0.020 9
2	0.625 2	0.746 3	23	13.750 7	-0.357 8
3	1.250 8	1.470 2	24	14.375 4	-0.620 0
4	1.874 9	2.150 4	25	14.999 6	-0.801 8
5	2.500 6	2.766 9	26	15.624 4	-0.901 1
6	3.125 2	3.302 2	27	16.249 6	-0.919 9
7	3.750 8	3.741 7	28	16.874 3	-0.863 5
8	4.374 4	4.074 2	29	17.499 8	-0.740 7
9	5.000 9	4.292 3	30	18.125 7	-0.563 4
10	5.624 8	4.392 9	31	18.750 0	-0.345 7
11	6.249 1	4.376 9	32	19.375 6	-0.103 8
12	6.875 6	4.249 3	33	20.000 6	0.145 4
13	7.499 3	4.018 8	34	20.624 7	0.384 5
14	8.124 4	3.697 6	35	21.249 7	0.596 4
15	8.749 5	3.301 1	36	21.875 5	0.765 5
16	9.374 0	2.846 5	37	22.500 7	0.877 9
17	9.999 9	2.353 0	38	23.124 7	0.922 2
18	10.624 9	1.840 3	39	23.750 1	0.890 2
19	11.250 7	1.328 3	40	24.375 4	0.776 9
20	11.874 4	0.836 1	41	25.000 6	0.581 4
21	12.500 7	0.381 2	42	25.625 9	0.306 1

设定 NURBS 曲线次数为 4, 控制顶点数取 6, 采用改进遗传算法由已知离散数据重建理论轮廓, 求得控制顶点坐标为 $[(0.002\ 5, 0.003\ 2), (0.005\ 0, -0.191\ 7), (13.038\ 1, 20.820\ 6), (15.419\ 3, -19.715\ 1), (9.412\ 7, 5.645\ 4), (24.923\ 1, 0.652\ 8)]$, 权值为 $\mathbf{W} = [1.289\ 7, 1.682\ 2, 0.653\ 0, 0.450\ 2, 0.336\ 3, 0.884\ 1]$, 节点矢量 $\mathbf{U} = [0, 0, 0, 0, 0, 0.050\ 4, 1.000\ 0, 1.000\ 0, 1.000\ 0, 1.000\ 0, 1.000\ 0]$, 重建后的曲线 AB 如图 4 所示, 由图可见, 重建曲线能够很好地逼近已知离散数据点。

基于拟随机序列计算每一测点到重建自由曲线的最短距离, 计算值列于表 3, 由表可见所有测

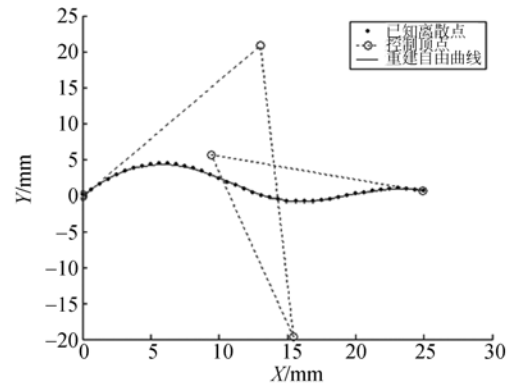


图 4 实测零件的重建自由曲线

Fig. 4 Reconstructed free-form curve of practical parts

点到重建自由曲线最短距离的最大值为 $0.074\ 6\ \text{mm}$, 则曲线的轮廓度误差为 $0.149\ 2\ \text{mm}$ 。

表 3 测点到重建自由曲线的最短距离

Tab. 3 The shortest distance from measured point to reconstructed curve (mm)

No	最短距离 δ_k	No	δ_k	No	δ_k
1	0.025 8	15	0.036 3	29	0.055 2
2	0.041 3	16	0.015 9	30	0.051 3
3	0.047 6	17	0.002 8	31	0.043 0
4	0.044 2	18	0.007 0	32	0.030 6
5	0.030 9	19	0.011 5	33	0.014 7
6	0.006 9	20	0.011 8	34	0.004 7
7	0.029 6	21	0.010 6	35	0.025 0
8	0.074 6	22	0.008 4	36	0.044 1
9	0.017 5	23	0.007 7	37	0.057 6
10	0.043 6	24	0.011 1	38	0.060 7
11	0.045 6	25	0.020 1	39	0.049 8
12	0.026 3	26	0.034 0	40	0.024 5
13	0.005 3	27	0.046 6	41	0.011 9
14	0.063 4	28	0.053 9	42	0.052 9

6 结 论

提出了高效率、高精度检测自由曲线和计算轮廓度误差的方法。考虑到自由曲线曲面没有统一的解析表达式, 在进行轮廓度误差评定时, 首先需要根据已知离散数据点通过样条函数依据一定规则重建其理论轮廓, 本文提出了用非均匀有理 B 样条表示自由曲线, 应用改进遗传算法优化重建自由曲线, 基于拟随机 Halton 序列均匀产生参数值精确计算点到曲线最短距离的自由曲线轮廓

度误差评定新方法,给出了用改进遗传算法重建自由曲线及采用拟随机序列生成参数值求解点到曲线最短距离的具体步骤。实验结果证明:自由

曲线轮廓度误差评定精度高于99%。提出方法不仅算法简单,计算速度快,而且评定轮廓度误差精度高,适于在工程计量中推广应用。

参考文献:

- [1] XU Y, JIANG J, Li Z X. Cyclic optimization for localization in freeform surface inspection[J]. *International Journal of Production Research*, 2011,49(2):361-374
- [2] CERARDI A, MENEGHELLO A, SAVIO G. Form errors estimation in free-form 2D and 3D geometries [C]. *International Conference on Innovative Methods in Product Design, Venice, Italy*,2011;550-555.
- [3] 张琳,郭俊杰,姜瑞,等. 自由曲线轮廓度误差评定中的坐标系自适应调整[J]. *仪器仪表学报*,2002,23(2):115-117.
ZHANG L, GUO J J, JIANG R, *et al.*. Self-adapt adjustment of coordinate system in evaluation of freeform curve profile[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002,23(2):115-117. (in Chinese)
- [4] 杨密,李平,卢春霞,等. 逐次逼近法评定自由曲线的轮廓度误差[J]. *西安工业学院学报*,2006,26(1):33-35.
YANG M, LI P, LU CH X, *et al.*. An approaching method to evaluate profile error of free curve[J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2006, 26(1):33-35. (in Chinese)
- [5] 郭慧,马永有,潘家祯. 基于遗传算法的复杂平面曲线轮廓度误差评定[J]. *华东理工大学学报*,2007,33(6):888-892.
GUO H, MA Y Y, PAN J ZH. Error evaluation on planar free form curve profile based on genetic algorithm[J]. *Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007,33(6):888-892. (in Chinese)
- [6] 王仲,操晶晶,张立昆,等. 基于图像的轮廓度测量与评定[J]. *光学精密工程*,2009,17(2):395-401.
WANG ZH, CAO J J, ZHANG L K, *et al.*. Measurement and evaluation for profile tolerance based on images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):395-401. (in Chinese)
- [7] AKEMI G, ANDRES I, JAIME P P. Iterative two-step genetic-algorithm-based method for efficient polynomial B-spline surface reconstruction[J]. *Information Sciences*, 2012,182(1):56-76 (Available online 8 October 2010).
- [8] 钱春. 基于区间牛顿法的点到参数曲线最小距离的计算方法[J]. *机电工程*, 2010, 27(1):82-84.
QIAN CH. Computing method for the minimum distance from a point to a parametric curve based on the interval Newton method[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2010,27(1):82-84. (in Chinese)
- [9] 廖平. 分割逼近法快速求解点到复杂平面曲线最小距离[J]. *计算机工程与应用*, 2009,45(10):163-164.
LIAO P. Fast calculating minimum distance between point and complex curve with subdivision approximating, algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009,45(10):163-164. (in Chinese)
- [10] 伍丽峰,陈岳坪,谌炎辉,等. 求点到空间参数曲线最小距离的几种算法[J]. *机械设计与制造*,2011,9:15-17.
WU L F, CHEN Y P, CHEN Y H, *et al.*. Algorithms on calculating minimum distance between point and spatial parametric curves[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011, 9:15-17. (in Chinese)
- [11] 赵昱,穆国旺,王拉柱. 非均匀有理B样条[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
ZHAO G, MU G W, WANG L ZH. *The NURBS BOOK* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [12] WEN X L, XIA Q G, ZHAO Y B. An effective genetic algorithm for circularity error unified evaluation [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006,46(11):1770-1777.
- [13] LEI G. Adaptive random search in quasi-Monte Carlo methods for global optimization [J]. *Computers Mathematics Application*,2002,43(6):747-754.
- [14] MAARANEN H, MIETTINEN K. Quasi-random initial population for genetic algorithms [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2004, 47(12):1885-1895.
- [15] WOLFGANG J. Quasi-Monte Carlo sampling to improve the efficiency of Monte Carlo EM[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2005, 48(4):685-701.

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,2001年于东南大学获得博士学位,现为南京工程学院自动化学院副院长,主要研究方向为智能计算、逆向工程、精密计量技术。E-mail:zdhxwzl@njit.edu.cn



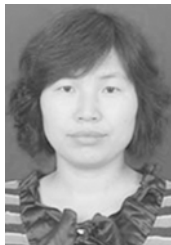
朱晓春(1963—),男,江苏溧阳人,教授,1986年,1989年于华东工学院分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为数控技术、机械自动化。E-mail:zhuxc@njit.edu.cn



赵艺兵(1966—),男,内蒙古呼和浩特市人,高级实验师,1988年于太原理工大学获得学士学位,主要从事数控技术、逆向工程方面的研究。E-mail:zdhxzyb@njit.edu.cn



曹未丰(1982—),女,江苏盐城人,实验师,2004年于苏州大学获得学士学位,2008年于南京邮电大学获得硕士学位,主要研究方向为模式识别与智能系统、图像处理。E-mail:zdhxcwf@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。E-mail:zdhxwdx@njit.edu.cn

● 下期预告

超大视场头盔显示光学系统设计

卢海平^{1,2},刘伟奇¹,康玉思¹,魏忠伦¹,冯睿¹,付瀚毅^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了满足头盔显示器对大视场、小畸变、高分辨率以及轻量化的苛刻要求,设计了大视场头盔显示器的目视光学系统。该系统采用 4×3 阵列式排列,由12组视场角都为 $33^\circ \times 24^\circ$ 的高质量成像目镜系统拼接成单眼目视光学系统,实现了系统的大视场设计。每个单元目镜只采用一片透镜以使系统轻量化。透镜一面采用二元光学衍射面,利用其特殊色散特性校正目镜系统色差,另一面采用非球面来校正目镜光学系统的初、高级单色像差,实现高成像质量;使用高亮度、高分辨率的OLED微显示器作为图像源。设计结果表明:单眼目视光学系统水平视场达到 120° ,垂直视场为 60° ,角分辨率为 $43 \text{ pixel}/(^\circ)$;单个目镜系统传递函数在 40 lp/mm 处,轴上视场高于0.62,全视场高于0.1;系统畸变小于3%;系统的双目视场为 $160^\circ \times 60^\circ$,双目重叠视场为 $80^\circ \times 60^\circ$,系统重量约为 31.2 g 。系统设计满足头盔显示光学系统的成像要求,实现了系统的轻量化、低成本、批量化的设计要求,并且实现了超大视场。