

文章编号 1004-924X(2014)06-1606-07

评定二次曲面轮廓度误差的角度分割逼近法

王宇春^{1,2}, 孙和义¹, 唐文彦^{1*}, 姜重然², 田思庆²

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 佳木斯大学, 黑龙江 佳木斯 154007)

摘要:提出一种基于角度分割逼近算法和粒子群算法计算二次曲面轮廓度误差的最小区域评定方法来准确评定任意位姿的二次曲面轮廓度误差。首先,给出了能够实现角度分割逼近算法的两条前提假设;基于假设,给出了更合理的算法网格布局递推公式。根据曲面轮廓度误差的定义建立了误差评定的精确模型。然后,采用角度分割逼近法求取测点到拟合二次曲面轮廓的距离;通过粒子群算法,以所有的点与二次曲面距离中的最大值为适应度值拟合出二次曲面一般方程,并实现被测轮廓与理论轮廓位置的匹配。最后,采用上述方法对某抛物面天线进行了评定,并与参数分割法、SMX-Insight 和最小二乘法进行比较。实验结果显示:该方法测得的天线轮廓度误差为 0.659 8 mm,比其它方法准确。结论表明:基于角度分割算法能够更有效地评定任意位姿二次曲面轮廓度误差,计算准确、迅速,而且无需确定待分割区域。

关键词:二次曲面;曲面轮廓度误差;角度分割法逼近;最小区域法

中图分类号: TB92; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142206.1606

Angle subdivision approach algorithm for conicoid profile error evaluation

WANG Yu-chun^{1,2}, SUN He-yi¹, TANG Wen-yan^{1*}, JIANG Chong-ran², TIAN Si-qing²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 15001, China;

2. Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

* Corresponding author, E-mail: tangwy@hit.edu.cn

Abstract: A method based on angle subdivision approach algorithm and Particle Swarm Optimization (PSO) was proposed to evaluate conicoid profile error accurately in any position and orientation with the requirement of the minimal zone. Two hypotheses were proposed to realize the angle subdivision approach algorithm. According to the hypotheses, a recursion formula for more reasonable girdding was given. Then, an accurate evaluating model was established according to the definition of conicoid profile error. The angle subdivision approach algorithm was adopted to calculate the distance between measurement points and fitting quadric surface. The position between measured profile and theoretical profile was matched through fitting the general quadric surface equation. A paraboloid antenna was evaluated by the above method in an experiment, and the results were compared with those of parameter subdivision approach algorithm, SMX-Insight and Least Square Method (LSM). Experimental results indicate that the profile error is 0.659 8 mm more accurate than that of other methods. The re-

收稿日期:2013-08-13;修订日期:2013-10-21.

基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究项目(No. 12531711);工信部技术基础“十二五”科研项目;黑龙江省教育厅课题资助项目(No. 12511556)

sults show that angle subdivision approach algorithm is more efficient in conicoid profile error evaluation and its calculation is accurate, rapid, and no need to find the division area.

Key words: quadric surface; conicoid profile error; angle subdivision approach algorithm; least zone method

1 引言

工程中二次曲面拥有特殊意义,如雷达、光学器件等,其测量评定技术也非常重要。在二次曲面,对平面、圆柱面轮廓度的评定已有明确的标准和方法^[1];对球面、锥面等也有大量研究,但对抛物面、双曲面等轮廓度的评定,仍然存在困难。根据 GB/T 1182 和 ISO 1101 的规定,最小条件是评定线、面轮廓度误差的基本原则^[2],其相应评定模型是非线性的求解难题。以往的研究有采用最小二乘线性简化模型逼近最小区域精确模型的,也有将待测二次曲面固定在测量坐标系的标准位置后进行测量评定的,但这些方法都是近似和有局限性的。

本文依据最小条件,采用角度分割法求取测点到空间二次曲面的距离,并以其极大最小值为目标函数,采用粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)算法带约束条件直接拟合空间二次曲面方程,表达其在测量坐标系下的最佳匹配,完成最小区域精确评定模型。约束条件由面型先验条件给出,如待测件是焦距已知的旋转抛物面等等。

2 二次曲面轮廓度误差的定义

用最小区域法评定二次曲面轮廓度误差,是指包容被测轮廓的理论二次曲面轮廓的等距面轮廓

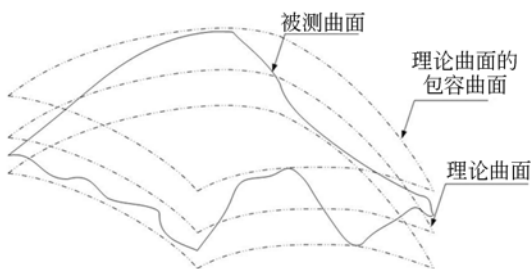


图1 二次曲面轮廓度误差示意图

Fig.1 Illustration of conicoid profile error

的最小距离,实质是一个非线性最优化问题,如图1所示。

根据形状误差的定义分别给出了极差最小、极大值最小、极小值最大的数学模型^[3-4]:

$$\min[\max(F(U, X)) - \min(F(U, X))], \quad (1)$$

$$\min[\max(F(U, X))], \quad (2)$$

$$\max[\min(F(U, X))], \quad (3)$$

式中: U 为理想要素参数集合, X 为实际要素参数集合。文中实验采用极大值最小原理建立满足最小条件的二次曲面轮廓形状误差评定数学模型:

$$\text{error}(V) = \min\{2\max\{d_i \mid i=1, \dots, n\}\}, \quad (4)$$

式中: d_i 为实测点到理论轮廓的距离,用来评定模型的目标要素; V 为理想要素参数集合。

3 点到二次曲面距离的求取

3.1 点到二次曲面距离的通常算法

最小区域精确评定模型的首要问题是求空间点与二次曲面距离,主要方式如下:设笛卡尔坐标系下空间二次曲面 Γ 的一般方程如式(5)所示,系数不全为零:

$$F(x, y, z) = a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^3 + 2a_{12}xy + 2a_{23}yz + 2a_{13}zx + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0 \quad (5)$$

方法一:方程直接求解。通过空间点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 到式(1)表达的二次曲面 Γ 距离是该点到二次曲面投影点 $P(x, y, z)$ 距离的定义,有如下方程:

$$\begin{cases} \frac{x - x_i}{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14}} = \frac{z - z_i}{a_{13}x + a_{23}y + a_{33}z + a_{34}} \\ \frac{y - y_i}{a_{12}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{24}} = \frac{z - z_i}{a_{13}x + a_{23}y + a_{33}z + a_{34}} \\ F(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

则空间点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 到二次曲面的距离为:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}. \quad (7)$$

该方法其他表述的原理大致相同。但式(6)求解 Jacobi 矩阵复杂;难以赋予大量需计算的测量点初值,所以工程实现难度很大,多只用于理论表达。

方法二:利用二次曲面几何性质^[5-8]。该方法可有效地减小计算难度,但其几何性质的特性使其无法在任意位姿二次曲面上通用。

方法三:参数方程的分割逼近法^[9-10]。该方法可以求点到复杂曲面的距离。首先给出空间曲面参数方程;确定测量点对应的参数区域,再逐次分割逼近求取测点到复杂曲面的距离。该方法快速、准确,但二次曲面为任意位姿时,算法比较复杂,主要是确认各分割区域和计算点面距比较复杂。

3.2 角度分割逼近算法原理

空间直角坐标系下,设直线 L 的方程为:

$$\begin{cases} x = x_0 + tX \\ y = y_0 + tY, (-\infty < t < \infty), \text{若它与式(5)的} \\ z = z_0 + tZ \end{cases}$$

次曲面 Γ 相交,则交点 $P(x, y, z)$ 所对应的参数 t 满足式(8):

$$\begin{aligned} &\phi(X, Y, Z) t^2 + 2[F_1(x_0, y_0, z_0) \cdot X + \\ &F_2(x_0, y_0, z_0) \cdot Y + F_3(x_0, y_0, z_0) \cdot Z] \cdot t + \\ &F(x_0, y_0, z_0) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} \phi(X, Y, Z) &= a_{11} X^2 + a_{22} Y^2 + a_{33} Z^2 + \\ &2 a_{12} XY + 2 a_{23} YZ + 2 a_{13} XZ, \\ F_1(x_0, y_0, z_0) &= a_{11} x_0 + a_{12} y_0 + a_{13} z_0 + a_{14}, \\ F_2(x_0, y_0, z_0) &= a_{12} x_0 + a_{22} y_0 + a_{23} z_0 + a_{24}, \\ F_3(x_0, y_0, z_0) &= a_{13} x_0 + a_{23} y_0 + a_{33} z_0 + a_{34}. \end{aligned}$$

$\mathbf{n}(X, Y, Z)$ 是过点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 的直线 L 的单位方向矢量; $|t|$ 等于其对应的 P_0 与交点 P 的距离 d_{PP_0} 。令 $\xi = F_1 \cdot X + F_2 \cdot Y + F_3 \cdot Z, \Delta = 4\xi^2 - 4 \cdot \phi \cdot F = 0$, 则解 t 及点到曲面距离 d_{PP_0} 的情况如下:

$$t = \begin{cases} -F/2\xi & \phi = 0 \\ -\xi/\phi & \phi \neq 0, \Delta = 0 \\ (-2\xi \pm \sqrt{\Delta})/2\phi & \phi \neq 0, \Delta \neq 0 \\ \text{无解} & \Delta < 0 \end{cases}, \quad (9)$$

t 值为正表示 $P_0 P$ 与 \mathbf{n} 方向一致,为负则表

示两者方向相反; t 有两解时,由曲面轮廓度误差定义可知,其模最小值则为 d_{PP_0} ; t 无解表示 L 和 Γ 无交点。通过 t 的正负,算法亦可以表达 P 与 Γ 的位置关系。当 d_{PP_0} 存在且模最小时,其即是点 P_0 到二次曲面 Γ 的距离 d_0 ,

$$d_0 = \min(d_{PP_0}). \quad (10)$$

角度分割算法中,各参数的定义如图 2 所示。

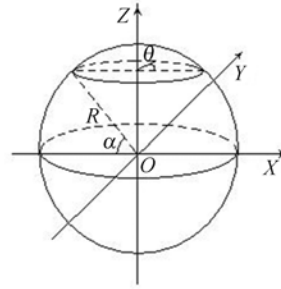


图 2 算法中各参数示意图

Fig. 2 Definition of parameters in algorithm

由图 2 可知, $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$ 为 \mathbf{n} 与 xoy 平面的夹角; $\theta \in [0, 2\pi]$ 为 \mathbf{n} 在 xoy 平面上投影与 x 轴正方向的夹角;根据单位方向矢量的性质,并参见式(11),将 d_0 转化为 (α, θ) 的函数。所以通过逐次分割 (α, θ) 可无限逼近点 P_0 到二次曲面 Γ 的距离 d_0 。

$$\begin{cases} X = \cos \alpha \cdot \cos \theta \\ Y = \cos \alpha \cdot \sin \theta. \\ Z = \sin \alpha \end{cases} \quad (11)$$

3.3 角度分割逼近算法步骤

(1) 首先按式(8)建立函数 $d_{PP_0}(\alpha, \theta)$;

(2) 对区间 $[\alpha_0, \alpha_m], [\theta_0, \theta_n]$ 进行分割,有关其分割原则的分析见后。设沿 (α, θ) 方向分别分成 m 和 n 份,则形成 $(m+1) \times (n+1)$ 个网格点;

(3) 求出测点 P_0 到网格点 P_i 的距离 $d_{P_i P_0}$,找出其中最小距离对应的网格点 $P_{\min}(\alpha_{\min}, \theta_{\min})$,则测点在理论曲面所对应的垂足应在如下分割区域内:

$$\begin{aligned} \alpha & [\alpha_{\min} - (\alpha_m - \alpha_0)/m, \alpha_{\min} + (\alpha_m - \alpha_0)/m] \\ \theta & [\theta_{\min} - (\theta_n - \theta_0)/n, \theta_{\min} + (\theta_n - \theta_0)/n] \end{aligned} \quad (12)$$

(4) 将式(12)的区域沿 α, θ 方向继续分割,再分别求出测点 P_0 到新网格点的距离,重复(3)过程;

(5) 设定阈值判断点 P_0 到曲面 Γ 的距离 d_0 。

是否达到给定精度,是则结束计算,否则转到步骤(2),继续分割,直到满足终止条件;

按上述步骤不断缩小搜索区域,最后求得测点到曲面的最小距离和其对应的单位方向向量 n 。

3.4 算法可行性分析

设二次曲面 Γ 外一点 P_0 ; 与 P_0 相关的参数分割网格 $(u_j, v_j) (j=1, \dots, m; j=1, \dots, n)$ 在 Γ 上映射形成分割网络 $P_{i,j} (i=1, \dots, m; j=1, \dots, n)$; 函数 $d_{P_0 P_{i,j}}(u, v)$ 表示 P_0 与 $P_{i,j}$ 的距离。 P_{extre} 是二次曲面 Γ 上距离 P_0 最小的点,那么 $d_{P_0 P_{\text{extre}}}(u, v)$ 为点 P_0 与二次曲面 Γ 的距离。分割逼近法的实现基于以下两条假设:

假设一:如果在参数分割网格点 (u_i, v_j) 中, $(u_{\text{min}}, v_{\text{min}})$ 是包围极值点 P_{extre} 对应参数 $(u_{\text{extre}}, v_{\text{extre}})$ 的参数网格分割点中函数值最小的对应点,那么其函数值 $d_{P_0 P_{\text{min}, \text{min}}}(u_{\text{min}}, v_{\text{min}})$ 是所有分割点 $P_{i,j}$ 对应的函数值 $d_{P_0 P_{i,j}}$ 的最小值点。

假设二:如果参数分割网格点 $(u_{\text{min}}, v_{\text{min}})$ 的函数值 $d_{P_0 P_{\text{min}, \text{min}}}(u_{\text{min}}, v_{\text{min}})$ 是所有分割点 $P_{i,j}$ 的函数值 $d_{P_0 P_{i,j}}$ 的最小值点,那么在参数分割网格点 (u_i, v_j) 中, $(u_{\text{min}}, v_{\text{min}})$ 必是包围极值点 P_{extre} 对应参数 $(u_{\text{extre}}, v_{\text{extre}})$ 的参数网格分割点。

参数网格分割需满足如下假设:一、 $d_{P_0 P}(u, v)$ 在定义域内连续,拥有有限个极值点;最值点 $(u_{\text{extre}}, v_{\text{extre}})$ 处存在邻域 $\delta(u_{\text{extre}}, v_{\text{extre}})$, 使函数 $d_{P_0 P}(u, v)$ 连续单谷;二、参数分割网格足够细致,保证假设一成立;三、尽力使参数分割网络 (u_i, v_j) 映射到二次曲面 Γ 上网络 $P_{i,j}$ 均匀、正交。

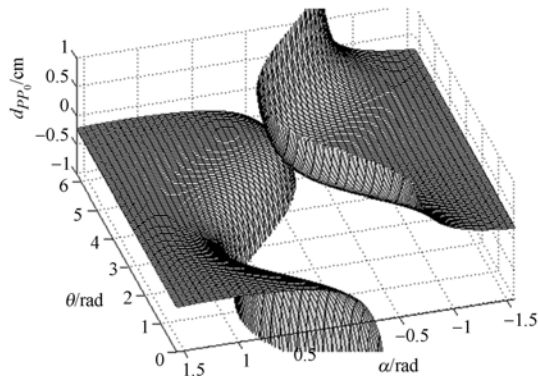


图 3 $d_{PP_0}(\alpha, \theta)$ 函数图

Fig. 3 Function graph of $d_{PP_0}(\alpha, \theta)$

图 3 为与焦距为 25 cm 的旋转抛物面距离 2 mm 的点 P_0 到面上点 P 的距离 $d_{PP_0}(\alpha, \theta)$ 的函数图,由图 3 可知,小偏差假设下,即点到理论曲面偏差较小, $d_{PP_0}(\alpha, \theta)$ 在定义域内连续,拥有有限个极值点;最值点 $(\alpha_{\text{extre}}, \theta_{\text{extre}})$ 处存在邻域 $\delta(\alpha_{\text{extre}}, \theta_{\text{extre}})$ 连续单谷;因此 (α, θ) 分割网络足够细致,可以保证假设成立。

3.5 网格分割方法分析

为保证二次曲面 Γ 上的网格均匀和正交,且由式(11)可知, $dZ/d\alpha$ 与 α 不是线性关系,因此不能简单均匀地分割 (α, θ) 。初次分割网格方法的分析如下:

如图 2 所示,半径为 R 的球:

\therefore 对 α 的分割值 $\Delta\alpha$ 对应的球弧长 $\widehat{l}_\alpha = R \cdot \Delta\alpha$; α 角处,对 θ 的分割值 $\Delta\theta$ 所对应的球弧长 $\widehat{l}_\theta = R \cdot \sin \alpha \cdot \Delta\theta$; 根据假设应保证, $\widehat{l}_\theta = \widehat{l}_\alpha$;

$$\Delta\alpha = \sin \alpha \cdot \Delta\theta. \quad (13)$$

\therefore α 分割递推公式在 $\alpha \in [0, \pi/2]$ 部分如下:

$$\begin{cases} \Delta\alpha(1) = \widehat{l}_\theta / R = \widehat{l}_\alpha / R = \Delta\theta \cdot \cos[\alpha(1)] \\ \alpha(2) = \alpha(1) + \Delta\alpha(1) \\ \dots\dots \\ \Delta\alpha(n) = \Delta\theta \cdot \cos[\alpha(n)] \\ \alpha(n+1) = \alpha(n) + \Delta\alpha(n) \end{cases}, \quad (14)$$

兼顾计算量,初次分割时, $\Delta\theta$ 取值为 $\pi/45 \sim \pi/35$ 。由式(14)可知, $\lim_{\alpha(n) \rightarrow \pi/2} \Delta\alpha(n) = 0$, 即 $\alpha(n)$ 接近 $\pi/2$ 时, $\Delta\alpha$ 会很小,故需设立阈值,原则是兼顾精度和计算量。同理可得 $\alpha \in [-\pi/2, 0]$ 部分。第一次分割后可采取正常均匀分割。图 4 为随 α 角变化的 $\Delta\alpha$ 取值变化图,基本符合式(13)的要求。

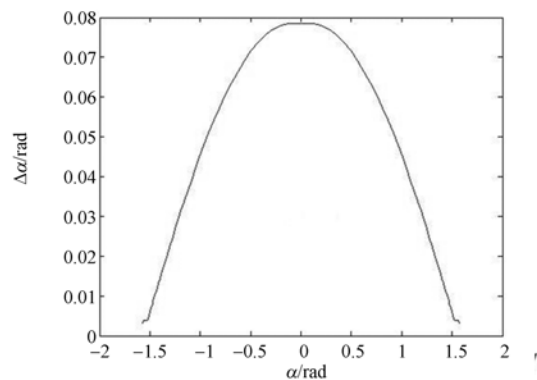


图 4 $\Delta\alpha$ 随角 α 的取值变化图

Fig. 4 $\Delta\alpha$ varies with α

4 粒子群算法拟合曲面方程并配准

空间二次曲面 Γ 的一般方程为式(1), 设 z 项的系数为 1, 其他 9 项的系数线性无关。拟合的实质是通过测量点求解参数向量 \mathbf{U} , 即无约束非线性优化问题。通过拟合方程的二次型特征值可知曲面类型。如有先验条件, 则为有约束的非线性优化问题。对于任意位姿或测量坐标系与标准二次曲面方程设计坐标系的基准不一致而产生的两坐标系间的位置误差^[6], 必须首先解决位姿配准问题。方法通常是求解使被测轮廓与理论轮廓位置相匹配的旋转平移矩阵或参数^[6], 以尽量去除位置误差的影响。本文通过拟合形式如式(5)的一般方程, 用于表达其在测量坐标系下的最佳匹配位置, 解决位姿配准问题, 从而完成最小区域精确评定模型。

文中采用式(4)的模型, 利用 PSO 算法优化求解, 对式(5)参数向量 \mathbf{U} 进行优化, 使其符合最小条件^[11-13]。相比其他优化方法, PSO 算法具有无交叉和变异、有记忆性、参数少、结构简单、实数编码、收敛较快等优点。PSO 算法思想源于对鸟群捕食的行为。 d 个待优化参数可抽象为 d 维搜索空间中第 i 个粒子的位置 $\mathbf{X}^i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d})$, 并为其赋予速度 $\mathbf{v}^i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d})$ 。将优化问题的目标函数抽象为适应值(fitness), 并得出个体最优位置 (p_{best}), 群体最优位置 (g_{best})。通过两个最优位置, 粒子可以根据如下公式来更新速度和位置:

$$v_{i,j}(t+1) = \omega v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2 r_2 [p_{g,j} - x_{i,j}(t)], \quad (15)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), \quad (16)$$

$$j=1, 2, \dots, d$$

式中: t 为迭代次数; r 为 0~1 间的随机数; 学习因子 c_1, c_2 取 2; 惯性权重 ω 取 0.5, 步骤如下:

(1) 初始化种群中各微粒的位置和速度;

(2) 评价每个微粒的适应度, 将当前各微粒的位置和适应值存储在各微粒的 p_{best} 中, 将所有 p_{best} 中适应值最优个体的位置和适应值存储于 g_{best} 中;

(3) 用式(15)、(16)更新粒子的速度和位移;

(4) 对每个微粒的适应值与其经历的最好位置比较, 如果更好, 则将其作为当前的最好位置 p_{best} ;

(5) 比较当前 p_{best} 和 g_{best} 的值, 更新 g_{best} ;

(6) 若满足停止条件(预设的运算精度), 搜索停止, 输出结果, 否则返回(3)继续搜索。

5 实验研究

本文实验采用 FAROarm 臂式三坐标仪标准版, 室温下对固定于光学平台某位姿的小型家用卫星抛物面天线采点测量。根据实验, 待测曲面上相同梯度变化下的测量点数和总测量点数对测量结果有影响。但测量点数大于基本要求(即待测参数数)的 4~5 倍对实验结果影响不大。因此根据经验, 实验取 36 个均匀分布于待测天线的测

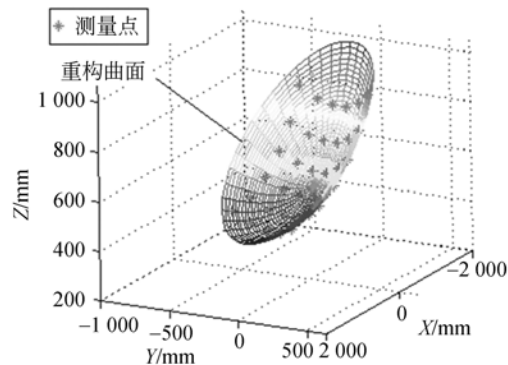


图 5 测量点和重构旋转抛物面

Fig. 5 Measured points and reconstructed rotating paraboloid

量点。由文中方法拟合一般方程如式(17)所示, 测点与重构的二次曲面如图 5 所示。因目前尚无成熟的针对任意位姿抛物面的商用软件, 故分别采用参数分割法^[5]与本算法计算测头经半径补偿后的测点到拟合曲面的距离, 如表 1 所示。

$$-0.000452x^2 - 0.000457y^2 - 0.000228z^2 - 0.000220xy - 0.000381yz + 0.000390zx + 0.610225x + 0.001433y + z - 734.584641 = 0 \quad (17)$$

整理后得到其标准方程为:

$$x^2 + y^2 = 4 \times 442.648z. \quad (18)$$

表1 实验中测点数据及其到二次曲面最短距离

Tab. 1 Measured point values and the shortest distance from the point to quadric surface in the experiment(mm)

No	X	Y	Z	距离/角度距离/参数	
				分割法	分割法
1	478.928 8	-433.366 0	479.038 1	0.117 8	0.117 8
2	350.610 9	-337.272 1	534.712 0	0.058 2	0.058 2
3	235.352 5	-253.188 5	611.751 0	0.136 8	0.136 8
4	132.161 5	-180.305 5	709.880 9	0.305 8	0.305 8
5	41.488 4	-119.563 7	830.491 9	0.213 6	0.213 7
6	36.602 5	-71.672 8	972.928 1	0.006 1	0.006 3
7	552.876 8	-284.495 0	447.707 3	0.200 1	0.200 1
8	424.657 5	-187.827 2	502.886 9	0.082 3	0.082 3
9	309.750 0	-103.430 5	579.798 9	0.213 1	0.213 1
10	205.884 9	-31.035 0	678.623 8	0.029 5	0.029 5
11	115.792 7	29.302 3	798.479 7	0.084 0	0.084 1
12	37.885 7	77.851 3	940.724 9	0.282 1	0.282 4
13	639.089 5	-147.322 4	437.292 0	0.063 5	0.063 5
14	511.369 7	-50.625 8	492.761 0	0.104 1	0.104 1
15	395.708 0	33.477 5	569.455 9	0.004 3	0.004 3
16	292.282 8	106.177 0	667.918 3	0.292 6	0.292 6
17	202.069 8	166.831 7	788.115 8	0.157 2	0.157 3
18	123.909 6	215.168 3	930.648 9	0.058 9	0.059 2
19	737.667 4	-21.977 6	448.472 4	0.302 1	0.302 1
20	610.321 8	74.683 3	504.072 3	0.034 0	0.034 0
21	494.220 5	159.029 6	580.651 9	0.329 9	0.329 9
22	391.331 7	231.684 9	679.361 1	0.213 2	0.213 2
23	301.216 2	291.757 7	799.669 2	0.285 8	0.285 8
24	223.050 3	340.335 2	941.561 8	0.023 1	0.023 1
25	849.553 9	90.819 5	481.599 2	0.015 1	0.015 2
26	721.557 8	187.851 0	536.668 4	0.329 9	0.329 9
27	606.061 6	272.209 9	614.165 4	0.284 8	0.284 8
28	502.999 2	344.878 3	712.964 9	0.329 9	0.329 9
29	412.134 6	405.373 6	832.779 2	0.177 8	0.177 9
30	334.168 9	453.822 4	974.810 5	0.329 9	0.330 2
31	973.453 3	192.235 2	536.365 2	0.039 2	0.039 4
32	845.184 2	288.756 3	591.723 9	0.111 5	0.111 6
33	730.105 1	373.621 1	668.809 0	0.075 1	0.075 1
34	627.206 1	446.090 1	766.938 0	0.193 7	0.193 7
35	536.624 0	506.324 3	887.497 0	0.067 9	0.068 0
36	458.519 3	554.400 6	1029.266 8	0.006 4	0.006 7

由表1可知,两种算法的结果基本一致,但由于参数分割法对分割区域的要求,使得某些位置

参考文献:

[1] 刘巽尔. 形状和位置公差原理与应用[M]. 北京:机

械工业出版社,1999.

的点面距离无法在区域分割结束前达到要求,而大于理论值。表中第26点距离最大,根据式(4)模型可知,旋转抛物面误差为 $\text{error}=2 \times 0.3299 = 0.6598 \text{ mm}$ 。

使天线主轴坐标系与测量坐标系一致或接近以满足SMX-Insight的测量要求,在其它实验相同的情况条件下,分别采用文章方法、商用软件SMX-Insight、最小二乘法得到天线焦距和按此求得的轮廓度误差,对比结果如表2所示。

表2 标准位置抛物面焦距和轮廓度误差

Tab. 2 Focal length and profile error of

paraboloid at standard position (mm)

方法	本文算法	SMX-Insight	近似最小二乘
焦距	442.648	440.373	427.760 0
误差	0.659 8	0.764 5	0.844 5

由表2可知,本文算法的误差值最小。因为角度分割算法能够精确计算点到二次曲面距离,所以本方法符合最小条件,相比最小二乘法和SMX-Insight,能够更好地完成任意位姿二次曲面轮廓度的评定。

6 结 论

本文根据二次曲面轮廓度误差的定义,结合角度分割法和PSO算法,提出可针对任意位姿满足最小条件的最小区域精确评定方法。实验表明,在目前商业软件对任意位姿的二次曲面轮廓度尚无成熟评定方法的条件下,该方法模型是一种有益的探索。本文求得的轮廓度误差为0.6598 mm,明显小于目前的最小二乘相似模型得出的误差0.8445 mm和SMX-Insight的结果0.7645 mm,更符合最小条件;其在小偏差假设下可精确求出点到任意位置二次曲面的距离,无需设定对应区域;具有精度高,鲁棒性好,相对其他迭代法速度较快的优点。本文方法对采用三坐标法评定任意位姿的二次曲面提供了一种可行方法,具有一定的参考价值。

械工业出版社,1999.

LIU S E. *Form and Position Tolerance: Principles and Application*[M]. Beijing, Machinery Industry

- Press, 1999. (in Chinese)
- [2] 任同群,赵悦含,龚春忠,等. 自由曲面测量的三维散乱点云无约束配准[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5):1234-1243.
REN T Q, ZHAO Y H, GONG CH ZH, *et al.*. Unconstrained registration of 3-D scattered point clouds for free-form shape measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1234-1243. (in Chinese)
- [3] 罗钧,王强,付丽. 改进蜂群算法在平面度误差评定中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2):422-430.
LUO J, WANG Q, FU L. Application of modified artificial bee colony algorithm to flatness error evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):422-430. (in Chinese)
- [4] CHANGCAI C, RENSHENG C, DONG Y, *et al.*. Research on the minimum zone cylindricity evaluation based on genetic algorithms[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 16(2):167-170.
- [5] 崔长彩,黄富贵,张认成,等. 粒子群优化算法及其在圆柱度误差评定中的应用[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2):256-260.
CUI CH C, HUANG F G, ZHANG R CH, *et al.*. Research on cylindricity evaluation based on the Particle Swarm Optimization(PSO)[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):256-260. (in Chinese)
- [6] 廖平,喻寿益. 基于归一化实数编码遗传算法的圆锥度误差计算[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(3):395-398.
LIAO P, YU SH Y. Calculating of cone error based on genetic algorithms with canonicity real number encoding [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(3):395-398. (in Chinese)
- [7] 罗钧,王强,付丽. 改进蜂群算法在平面度误差评定中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2):422-429.
LUO J, WANG Q, FU L. Application of modified artificial bee colony algorithm to flatness error evaluation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):422-429. (in Chinese)
- [8] 雷贤聊,李飞,涂鲜萍,等. 评定平面度误差的几何搜索逼近算法[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5):1312-1316.
LEI X Q, LI F, TU X P, *et al.*. Geometry searching approximation algorithm for flatness evaluation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1312-1316. (in Chinese)
- [9] 温秀兰,赵艺兵,王东霞,等. 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[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4):835-842.
WEN X L, ZHAO Y B, WANG D X, *et al.*. Evaluating freeform curve profile error based on improved genetic algorithm and quasi random sequence[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):835-842. (in Chinese)
- [10] 廖平. 基于粒子群算法和分割逼近法的复杂曲面轮廓度误差计算[J]. 中国机械工程, 2010, 21(2):201-205.
LIAO P. Calculation of complex surface profile errors based on hybrid particle swarm optimization algorithm [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 21(2):201-205. (in Chinese)
- [11] 廖平. 基于遗传算法的椭球面形状误差精确计算[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(4):780-785.
LIAO P. Calculation of elliptic sphere form error based on genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(4):780-785. (in Chinese)
- [12] 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:自然科学版, 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)
- [13] 郭慧,潘家祯. 基于微粒群算法的叶片曲面形状误差评定[J]. 华东理工大学学报:自然科学版, 2008, 34(5):769-772.
GUO H, PAN J ZH. Form error evaluation of cured blade surface based on particle swarm optimization [J]. *Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2008, 34(5):769-772. (in Chinese)

作者简介:



王宇春(1979—),男,辽宁辽阳人,博士研究生,2001年于黑龙江科技大学获得学士学位,2007年于燕山大学获得硕士学位,主要从事生物医学仪器和精密测量方面的研究。E-mail: ydwan-yuchun@aliyun.com



唐文彦(1958—),男,黑龙江阿城人,教授,博士生导师,1982年、1984年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,1992年在德国获得博士学位,主要从事光电信息及光电检测技术方面的研究。E-mail: tangwy@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)