

逆向工程特征参数提取技术研究

刘德平^{1,2}, 刘晓宇², 陈建军¹

(1. 西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071; 2. 郑州大学机电一体化研究所 郑州 450002)

【摘要】逆向工程是从已有实物的测量数据点中提取其特征参数进行模型重建的过程,特征参数的提取是逆向工程的关键技术之一。该文提出了一种新的回转面特征参数提取算法,将蚁群算法应用在逆向工程的特征参数优化过程中,首先建立回转面特征参数提取数学模型,然后运用蚁群算法实现过程优化,从而提取出特征参数,实现回转面图形重建,最后通过实例验证了该算法的有效性,该算法提高了特征参数提取精度和效率,适用于空间任意位置回转面的特征参数提取。

关键词 蚁群算法; 特征提取; 逆向工程; 曲面重构
中图分类号 TH16 **文献标识码** A

Research on Feature Parameters Extraction in Reverse Engineering

LIU De-ping¹, LIU Xiao-yu², and CHEN Jian-jun¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Xi dian University Xi'an 710071; 2. Mechatronics Institute, Zhengzhou University Zhengzhou 450001)

Abstract Reverse engineering is the process of extracting the solid features from the measured point data of the existing parts. The feature extraction based on point cloud is one of the key techniques in reverse engineering. A novel algorithm is proposed for feature recognition of revolving surface. The ant colony algorithm (ACA) is applied in reverse engineering for data processing. Firstly, the mathematic model is established which is suitable for extraction of feature parameter using ACA, and then a parameter optimization using ACA is processed. Finally the feature parameter is extracted and the surface is reconstructed. The new method is proved to be effective and flexible by experiments. The accuracy and efficiency to extract the parameters of revolving surface are improved and this method is suitable for the revolving surface in discretionary 3D-space.

Key words ant colony algorithm; feature extraction; reverse engineering; surface building

扫描数据的曲面模型重建是逆向工程的重要研究内容,通过对样件点云的处理,提取其关键的特征参数,进而进行精确建模是逆向工程的关键技术之一^[1-3]。回转面是常见的规则曲面,其主要的特征参数为轴线和母线。蚁群算法(ant colony algorithms, ACA)是一种新型的模拟进化算法,该算法采用了正反馈并行自催化机制,具有较强的鲁棒性、优良的分布式计算机制、易于与其他方法结合等优点,在解决许多复杂优化问题方面已经展现出其优异的性能和巨大的发展潜力^[4]。本文介绍利用蚁群算法对回转曲面数据点进行特征参数提取的数学模型,以及优化方法和过程,并用实例验证其方法的有效性和实用性。

1 基于ACA特征提取数学模型

回转面的设计由回转轴和母线两个特征参数构

成。在获得了较为精确的回转轴方向和回转轴所经过的点后,就确定了回转面的回转轴。然而在实际的特征参数提取过程中,回转轴的方向会存在一定的误差,如图1所示。

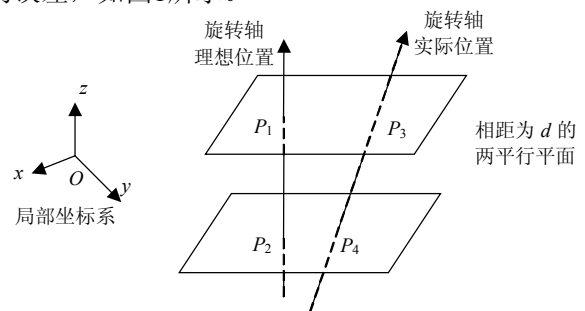


图1 变量搜索空间

当回转轴准确而没有误差时,将点云绕回转轴向经过回转面的平面 π 旋转投影,所有的投影点应形成一条没有宽度的轮廓线,如图2a所示。而当回

收稿日期: 2007-09-19; 修回日期: 2008-01-05

基金项目: 国家863计划(2006AA04Z402); 河南省教育厅自然科学基金(200510459060)

作者简介: 刘德平(1966-),男,博士生,副教授,主要从事逆向工程、先进制造技术等方面的研究

转轴不精确确定时, 投影点则会形成一条具有一定宽度的轮廓线, 其宽度随回转轴的方向和位置误差的增大而增大, 如图2b所示。

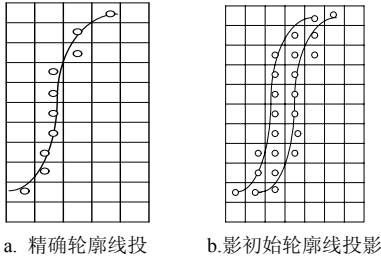


图2 轮廓线投影

所以优化的目标即为轮廓线投影点所构成的区域, 且面积最小:

$$s = f(X) \rightarrow \min$$

式中 s 为投影面积; X 为变量空间。由于投影点是离散的, 没有明确的函数关系, 所以利用微分原理, 将投影区域分为很多小格, 将包含投影点的小格称为有效单元格, 则投影面积即为有效单元格的个数:

$$s = f(X) = F(n) = \sum_{i=1}^n \text{BinCell}[i] \rightarrow \min$$

这样就建立了蚁群算法连续优化问题的数学模型。

确定蚁群算法模型和目标函数后, 设计变量 X , 使其符合蚁群算法中的连续优化问题要求, 完成优化。回转轴从初始位置运动到精确位置, 包括平动和绕点的转动, 其中平动消除位置误差, 转动消除方向误差。如图1所示, 回转轴初始位置由6个变量具体确定 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 。对坐标进行转换, 使初始回转轴平行于 z 坐标轴, 变量空间变成四维, 即:

$$X = [x'_1, y'_1, x'_2, y'_2]$$

约束条件为:

$$x'_1 \in [\min(x'_1), \max(x'_1)], y'_1 \in [\min(y'_1), \max(y'_1)]$$

$$x'_2 \in [\min(x'_2), \max(x'_2)], y'_2 \in [\min(y'_2), \max(y'_2)]$$

式中 x'_i, y'_i 为坐标转换后的数据点。

显然, 上述变量空间较大, 对大量点云进行优化是不经济的, 由于回转面相对回转轴对称, 点云中心点大致落在回转轴上, 所以可对变量空间进行合理压缩:

$$x'_1 \in \left[\frac{\max(x'_1) + \min(x'_1)}{2} - \Delta 1, \frac{\max(x'_1) + \min(x'_1)}{2} + \Delta 1 \right]$$

$$y'_1 \in \left[\frac{\max(y'_1) + \min(y'_1)}{2} - \Delta 2, \frac{\max(y'_1) + \min(y'_1)}{2} + \Delta 2 \right]$$

$$x'_2 \in \left[\frac{\max(x'_2) + \min(x'_2)}{2} - \Delta 1, \frac{\max(x'_2) + \min(x'_2)}{2} + \Delta 1 \right]$$

$$y'_2 \in \left[\frac{\max(y'_2) + \min(y'_2)}{2} - \Delta 2, \frac{\max(y'_2) + \min(y'_2)}{2} + \Delta 2 \right]$$

式中 $\Delta 1, \Delta 2$ 为常数增量, 根据 $\max(x'_i), \min(x'_i), \max(y'_i)$ 和 $\min(y'_i)$ 的值以及两平行平面之间的距离 d 进行设定, 常数增量的值大, 则计算量增大, 但精确度提高。而回转轴的初始轴向矢量按照下述方法进行设定。

(1) 以水平面为初始截面截取点云数据, 利用参考文献[5]提到的极小惯量法求得截面数据的对称轴及其垂线, 并计算出交点 (x_1, y_1, z_1) 。

(2) 采用同样的方法求得另一截面数据的对称轴及其垂线, 并计算出交点 (x_2, y_2, z_2) 。

(3) 矢量 $(x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$ 作为回转轴的初始轴向矢量。

2 蚁群算法优化

目前, 国内外研究者用蚁群算法较好地解决了旅行商问题(TSP)、指派问题(QAP)、调度问题(scheduling problem)等问题, 并成功应用在电信路由优化(network routing)、数据聚类分析、数据分类规则提取^[6-7]等方面, 已经显示出蚁群算法在求解复杂优化问题(特别是离散优化问题)方面的一些优越性, 证明该方法是一种很有发展前景的优化方法。

利用蚁群算法连续优化模型对回转面的特征参数提取进行优化, 把4个变量参数 x'_1, y'_1, x'_2, y'_2 分别 N 等份, 4个变量就成了4级决策问题。设 m 组人工蚂蚁, 每组均有4只(变量空间维数), 各组蚂蚁刚开始随机地位于解空间 X 的 $l_1 \times l_2 \times \dots \times l_4$ 个等分区域的某处, 蚂蚁的状态转移概率:

$$P_{ij} = \tau_{ij} / \sum_{i=1}^N \tau_{ij}$$

假设 τ_{ij} 为第 j 级第 i 个节点的信息量, 其更新方程为:

$$\tau_{ij}^{\text{new}} = (1 - \rho)\tau_{ij}^{\text{old}} + Q/f$$

式中 f 为目标函数值; Q 为一常量, 用于调整 Q/f 的影响因子。函数 $f(X)$ 的寻优问题借助于 m 组蚂蚁在 X 的 $l_1 \times l_2 \times l_3 \times l_4$ 个等分区域间的不断移动, 以及一些区域内的局部随机搜索来完成, 其程序流程图框图如图3所示。

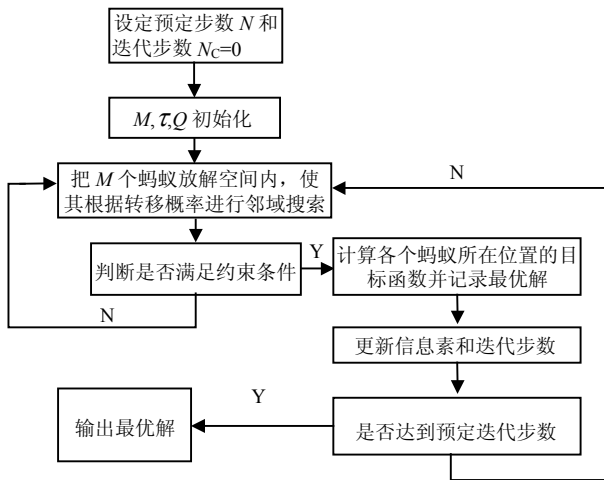


图3 程序流程框图

3 求解实例

实例 1 一回转体实测有序点云数据如图4所示。已知其回转轴方向平行于Z坐标轴，优化目标是找到回转轴的精确位置。优化参数为过原点水平面上的点(x,y,0)。蚁群算法参数x和y的优化过程如图5所示。

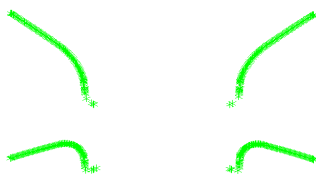
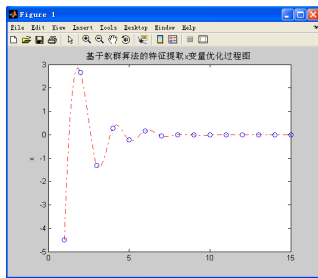
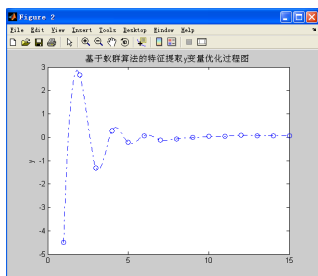


图4 回转体点云



a. $x=-0.011\ 388$



b. $y=0.023\ 771$

图5 参数蚁群优化过程图

仿真参数设置为：蚂蚁个数 $M=40$ ；迭代次数

$N_c=100$ ，等分 $N=10$ ， $Q=100\ 000$ ；初始 $\tau=1$ ；挥发因子 $\rho=0.2$ 。

优化结果为： $x=-0.011\ 388$ 和 $y=0.023\ 771$ ，与实际值 $x=0$ 和 $y=0$ 相比，可以满足设计要求。

实例 2 一回转面点云数据如图6所示，轴向矢量(1,1,1)经过坐标原点。

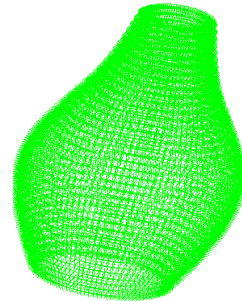
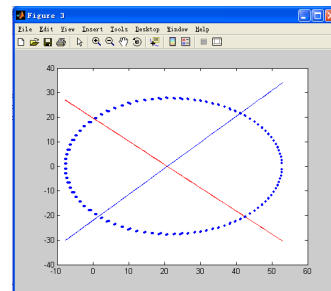
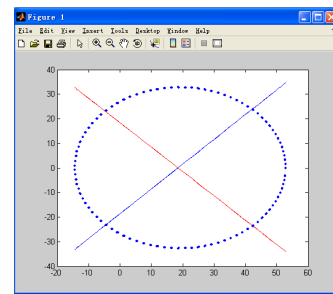


图6 回转面点云数据

用相距为10的上下两个水平面所截得的截面数据如图7所示。采用极小惯量法求出各截面的对称轴及其垂线。图7a为上平面截面数据点的对称轴及其垂线；图7b为下平面截面数据点的对称轴及其垂线。



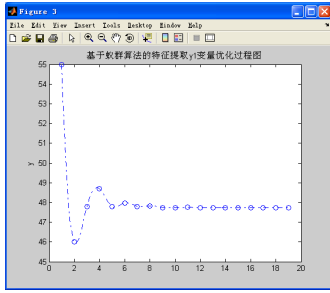
a. 上截面对称轴及其垂线



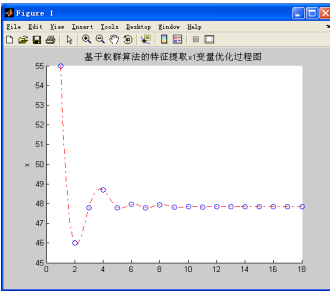
b. 下截面对称轴及其垂线

图7 两个相距为d平行截面数据点对称轴和垂线

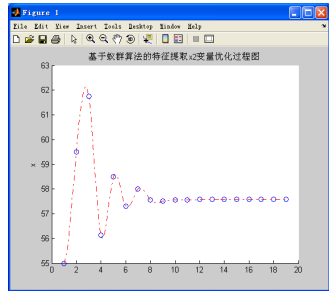
求出的上下两个对称轴和其垂线的交点 (x_1,y_1) 和 (x_2,y_2) 的优化结果如图8所示。其中，图8a为上截面交点的x坐标优化结果， $x=47.789$ ；图8b为上截面交点的y坐标优化结果， $y=47.753$ ；图8c为下截面交点的x坐标优化结果， $x=57.684$ ；图8d为下截面交点的y坐标优化结果， $y=57.800$ 。图9为用回转轴的平面截取回转面所求得母线数据。



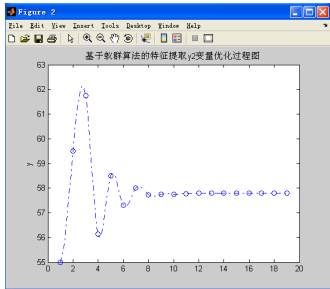
a. 上截面交点 $x=47.789$



b. 上截面交点 $y=47.753$



c. 下截面交点 $x=57.684$



d. 下截面交点 $y=57.800$

图8 对称轴与其垂线的交点坐标优化过程

用回转轴的平面截取回转面所求得的母线数据如图9所示。

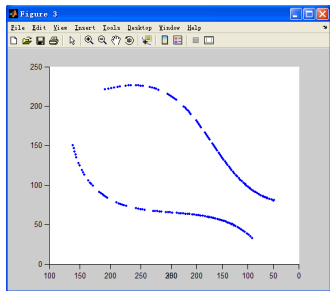


图9 提取的母线数据

设置与实例1相同的仿真参数, 优化结果为 $p_1(47.789,47.753,47.760)$ 和 $p_2(57.684,57.800,57.760)$, 可以求出回转轴轴向矢量为 $(9.895,10.047,10.000)$, 正则化结果为 $(0.9895,1.0470,1)$, 相对 $(1,1,1)$ 满足误差要求。在提取出数据点对称轴和截面数据后, 则可以实现曲面模型重构。在特征数据提取前, 需要对于测量得到的点云数据应用最小距离法实现数据点云的精简和平滑, 利于特征数据优化和曲面模型重构^[8-9]。

4 结束语

本文针对逆向工程中回转面特征提取的实际问题, 以蚁群算法为数学工具, 给出了一种提取其特征参数的新方法, 建立了适合蚁群算法的数学模型, 实现了特征参数的优化, 并用实例验证了该方法的正确性。将群智能理论应用在逆向工程之中将是群智能发展的重要研究内容, 本文只是将蚁群算法思想引用到逆向工程之中, 其在逆向工程数据处理和曲面重构方面更广泛的应用(如将蚁群算法应用于曲线或曲面的光顺处理)还将进一步研究。

参 考 文 献

- [1] TSAI M J, HWUNG J H, LU Tien-FU. Recognition of quadratic surface of revolution using a robotic vision system[J]. Robotics and Computer-Integrated manufacturing, 2006, 22(2): 134-143.
- [2] RUAN J K, KE Y L, FAN S Q, et al. Research on rapid repairing techniques for auto panel dies[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 69-72.
- [3] 侯学智, 杨平, 赵云松. CCD图像的轮廓特征点提取算法[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(4): 446-448.
- [4] 何定润, 刘晓云, 陈东义. 基于可穿戴计算机电源管理的蚁群算法[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(2): 271-274.
- [5] 龚建伟, 黄文宇, 陆际联. 轴对称曲线对称轴的数值计算方法[J]. 计量技术, 2001, 6: 3-5.
- [6] 高尚, 孙玲芳, 侯志远, 等. 基于多样信息素的蚁群算法[J]. 计算机科学, 2006, 33(10): 160-162.
- [7] 段海滨. 蚁群算法: 理论和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] LIU DE-ping, CHEN Jian-jun, SHANGGUAN Jian-lin. A study on data reduction in reverse engineering[C]//ITIC, 2006. Hangzhou, China: IET, 2006: 84-85.
- [9] LIU De-ping, SHANGGUAN Jian-lin, CHEN Jian-jun. A study on data pre-processing in reverse engineering[C]//ICMT'2006. Chongqing, China: Science Press, 2006: 1428-1432.

编辑 熊思亮