

一种有向投影的测量数据刀具轨迹生成技术

韩有昂, 张英杰, 喻明让

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为解决实物反求工程中零件加工精度和效率低的问题, 提出了一种适合于测量数据的有向投影算法, 并用于刀具轨迹的生成. 按照投影原理, 通过一个迭代过程不断地更新交点附近的邻近点集, 再利用最小二乘法建立近似平面来计算其与投影线的交点, 直至达到要求的误差精度. 研究了基于参考曲面的刀具轨迹生成机理, 先构造参考面并确定采样点, 然后将其沿着投影方向映射到偏置点云上, 再采用三次 B 样条曲线插值法生成刀具轨迹. 实验表明, 该方法可以有效地避免曲面重建, 并且计算稳定、操作简单, 从而提高了实物反求的效率和精度.

关键词: 刀具轨迹; 反求工程; 最小二乘法; 投影

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)09-0011-04

Tool Path Generation from Measured Data by Direct Projection

HAN You'ang, ZHANG Yingjie, YU Mingrang

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the low accuracy and efficiency in reverse engineering, a new approach is proposed to generate tool path from the measured data by direct projection. Following the principle of projection algorithm, an iterative process is defined to continuously update the neighboring points, then an approximate plane fitted with least squares method is created for calculating the intersection of the object and the projection ray. The procedure is repeated until the required accuracy is met. The tool path generation technique based on the reference surfaces is discussed. A reference surface is created for the input point cloud, the sampling points on tool paths are defined and projected on the offset of the point cloud, and cubic B-spline is chosen to interpolate the projecting points to generate a tool path. The experiments show that the proposed strategy avoids the surface reconstruction and improves the effectiveness and accuracy with stable computation and simple operation.

Keywords: tool path; reverse engineering; least squares; projection

反求工程与数控加工结合的新产品研发包括概念设计、零件的数字化、几何建模、刀具轨迹及加工, 而几何建模耗时多和误差累积是制约反求工程应用的瓶颈. 为了避免这个困惑, 近年来研究人员提出了直接由点云计算刀具轨迹的方法. Lin 等人^[1]首先采用 Z-map 模型生成数控加工轨迹, Park 等人^[2]构造了点序列曲线模型, 但这 2 种方法只适用于规则

数据点. Feng 等人^[3]构建了投影刀位网格法, 并评估了加工误差. 吴世雄等人^[4]构建层切网、分层进行粗加工, 将精加工通过构建三角曲面生成. Zhang 等人^[5]对点云构建了 MLS(Moving Least Squares)曲面, 生成了曲率自适应的三轴刀具轨迹.

点到点云的投影算法研究主要有两类: ①查找给定点的邻近点集, 构建局部曲面, 将该点投影到曲

面上来获得投影点, Levin^[6]提出基于移动最小二乘曲面来提取投影点, Alexa 等人^[7]提出采用多项式逼近局部区域内的点集获得投影点的方法; ②对邻近点集进行插值求出投影点, 不需要构建曲面. Azariadis^[8]提出了沿着投影方向对点集的点进行加权插值, 并计算出投影点的方法. Liu 等人^[9]提出了最小二乘优化的点到点云投影的算法, 且不需要给定投影方向. Zhang 等人^[10]提出了水平集演化的思想, 通过曲线演化不断更新投影点的位置, 但对复杂轮廓的处理还需要借助求精过程.

由于测量数据本身有误差, 为了提高投影精度, 本文提出了一种新的有向投影方法, 在投影过程中不断计算邻近点集, 并更新投影点, 直至满足精度要求获得投影点, 从而提高了测量数据处理的精度. 将该投影方法应用于刀具轨迹的生成中, 生成数控加工刀位文件, 并通过加工验证了本文算法.

1 一种新的有向投影方法

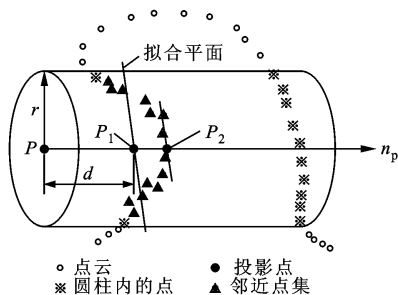
将投影映射过程看成是计算投影线与曲面的交点, 在求解过程中不断更新邻近点集、构建最小二乘拟合平面、计算交点, 直至满足精度要求获得投影点. 具体步骤结合图 1 如下.

步骤 1 定义给定点 $P = (P_x, P_y, P_z)$ 和投影方向 $\mathbf{n}_p = (n_{px}, n_{py}, n_{pz})$, 在 c_n 中查找到投影线的距离小于 r 的所有点(图 1 中圆柱内的点).

步骤 2 定义权函数阈值 α_0 , 计算每一点的权函数 α_i , 并删除 $\alpha_i < \alpha_0$ 的点, 得到邻近点集 S_1 . 如果 S_1 中的点数小于 3, 则迭代终止.

步骤 3 将 S_1 拟合最小二乘平面, 并计算它与投影线的交点, 得到投影点 P_1 .

步骤 4 计算当前得到的投影点与给定点间的距离 d , 如果 d 小于给定的误差值 ϵ (设为 0.01), 则迭代终止; 否则, 将当前得到的投影点作为新的给定点 P , 重复步骤 2~步骤 4.



P : 给定投影点; r : 圆柱半径; $\mathbf{n}_p$: 投影方向; P_1 : 第 1 次获得的投影点; d : 给定点与投影点的距离; P_2 : 投影点

图 1 有向投影算法示意图

步骤 5 以最后一次迭代求出的投影点作为所求的投影点 P_1 .

1.1 确定邻近点集

α_i 表示邻近点集中的点 P_i 对计算投影点的影响, 当 P_i 接近 P 时, α_i 越大, 反之越小. 考虑距离和投影方向后, 令

$$\alpha_i = \frac{1}{1 + \|P_i - P\|^2 \| (P_i - P) \mathbf{n}_p \|^2} \quad (1)$$

计算每个点的 α_i , 保存在权函数数组 $\alpha \in \mathbf{R}^n$. 定义权函数阈值 α_0 , α_0 随着迭代次数 k 的变化而变化. 令

$$\alpha_0 = \begin{cases} \alpha_m + \frac{\alpha_a - \alpha_m}{10 - k}, & k < 9 \\ \alpha_m + \frac{\alpha_a - \alpha_m}{2}, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: α_a 、 α_m 分别为权函数数组中的最大值和平均值. 在投影过程中, 如果某点的权函数值小于权函数阈值, 则将该点删除. 由于邻近点集数量的不断减少, 因此不仅减少了计算时间, 且提高了投影精度.

1.2 构造最小二乘拟合平面

当前的邻近点集为 S_1 , 其中心点为 O , 即

$$S_1 = \{P_i = (x_i, y_i, z_i) \mid i = 1, 2, \dots, N\} \quad (3)$$

$$O = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (4)$$

式中: N 为点集中点的总数目. 由 S_1 中的点构造对应的最小二乘拟合平面, 离中心点越远的点对拟合平面的影响越小, 反之越大. 引入距离修正系数

$$\omega_i = e^{-d_i^2/d_m^2} \quad (5)$$

式中: d_i 为 P_i 到 O 之间的距离; d_m 为 S_1 内的点到 O 的最大距离.

拟合平面的法向量 $\mathbf{n}$ 可通过求解误差 E 最小时得到

$$E = \sum_{i=1}^N \|(P_i - O) \cdot \mathbf{n}\| \omega_i \quad (6)$$

构造的协方差矩阵如下

$$\mathbf{C} = \sum_{i=1}^N (P_i - O)(P_i - O)^T \omega_i \quad (7)$$

采用逆迭代法求解出该矩阵的特征值, 其最小特征值对应的特征向量就是最小二乘拟合平面的法向量. 实验结果如图 2 所示, 将给定点投影到雕塑头像点云后得到投影点.

2 基于参考曲面的刀具轨迹生成算法

考虑球头刀具的结构和走刀特点, 提出了一种

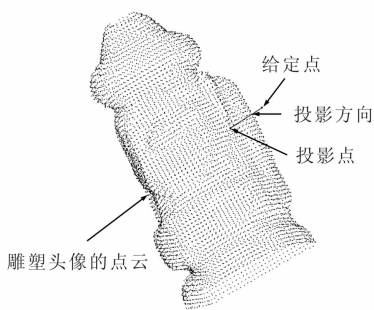


图 2 雕塑头像的有向投影实验

在偏置的点云上生成刀具轨迹的方法.首先生成偏置的点云,采用平面法^[11]点云的法向量,将点云中的每个点根据法向量和球头刀半径进行偏置,并对局部干涉进行处理.对于每个偏置点在原点云上搜索 k 个最近的点(文中取 $k=30$),并拟合最小二乘曲面,计算该点到曲面的距离,如果小于偏置距离,表明该点处存在干涉,则删除该点生成偏置的点云.结合参考曲面在偏置点云上生成数控加工的刀具轨迹,其具体步骤如下.

步骤 1 根据刀具半径将点云中的每一点沿其法向量方向等距偏置,为了便于规划刀具路径,根据点云的形状构造出具有简单几何形状参考曲面,如 2 维平面、2.5 维回转曲面或球面.其中,2 维平面主要用于非封闭的点云曲面,而回转曲面和球面则适用于点云表示的封闭曲面或实体对象.

步骤 2 确定刀具的走刀方式,在参考曲面上以网格的方式设计走刀轨迹,初步确定该轨迹上的采样点和投影方向.网格点的间隔按照等间距进行选取,其间隔大小可以根据曲面曲率的变化和刀具轨迹的精度进行适当调整.

步骤 3 将点云数据按照走刀轨迹进行合适的分层处理,计算每一层上的采样点到该层距离小于给定值的点获得带状点云,并只需向其对应的带状点云进行有向投影,即可得到投影点.

步骤 4 根据刀具的走刀方式,将同一层面的投影点采用反求控制点三次 B 样条曲线插值,计算物体表面的刀具轨迹曲线.

步骤 5 按照给定的刀具半径和允许误差,以最大允许偏差和近似弧长相等作为计算的依据,来计算曲线上的刀位点位置,从而得到刀位轨迹.

3 案例研究

采用 VC++ 和 OpenGL 开发的点云数据处理软件,对提出的算法进行了测试分析,如图 3 所示,

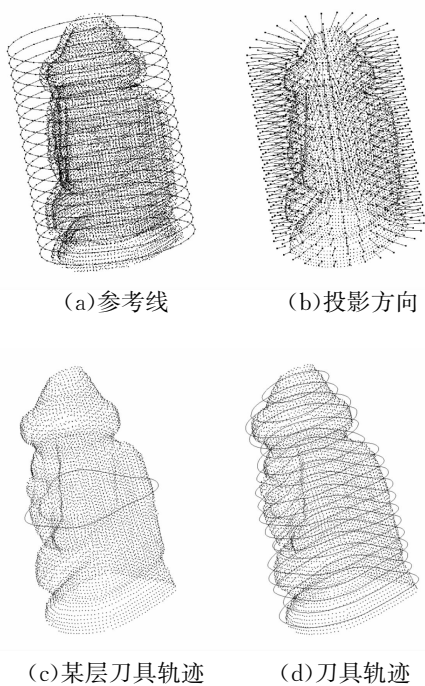


图 3 雕塑头像的实验结果

头像雕塑点云的总个数为 7 364,分层数目为 18,每一层上均匀分布 30 个参考点.

实验材料采用直径为 90 mm、长度为 220 mm 的尼龙棒,棒料右端 30 mm 的部分装夹在三爪卡盘内,左端加工部分的长度为 145 mm.实验刀具采用半径为 10 mm 的球头刀(高速钢),实验机床是五轴联动机床,加工时使用切削液,共 3 次下刀切削,走刀行距为 2 mm,实验结果如图 4 所示.从图中可以



(a)加工过程



(b)加工结果

图 4 雕塑头像的实验加工

看出,刀具的加工轨迹分布均匀合理,加工质量较好,从而验证了本文算法的正确性.

4 结 论

本文提出的有向投影算法是一种适合于散乱数据的高精度投影映射方法,通过不断更新投影点,直至满足精度要求.将该算法结合定义参考曲面应用于测量数据的刀具轨迹生成中,不仅避免了传统反求工程中复杂繁琐的曲面重建过程,而且避免了误差累积问题,从而提高了数据处理的精度,实现了零件的快速反求.

参考文献:

- [1] LIN A C, LIU H T. Automatic generation of NC cutter path from massive data points [J]. *Computer-Aided Design*, 1998, 30(1): 77-90.
- [2] PARK S C, CHUNG Y C. Tool-path generation from measured data [J]. *Computer-Aided Design*, 2003, 35(5): 467-475.
- [3] FENG H Y, TENG Z J. Iso-planar linear NC tool path generation from discrete measured data points [J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(1): 55-64.
- [4] 吴世雄, 王文, 陈子辰. 测点数据生成刀具路径研究 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(8): 1704-1709.
WU Shixiong, WANG Wen, CHEN Zichen. Study on tool path generation from measured data [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(8): 1704-1709.
- [5] ZHANG Dongdong, YANG Pinghai, QIAN Xiaoping. Adaptive NC path generation from massive point data with bounded error [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(1): 1-13.
- [6] LEVIN D. Mesh-independent surface interpolation [C]//*Geometric Modeling for Scientific Visualization*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2003:37-49.
- [7] ALEXA M, BEHR J, COHEN-OR D, et al. Computing and rendering point set surfaces [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2003, 9(1):3-15.
- [8] AZARIADIS P. Parameterization of clouds of unorganized points using dynamic base surfaces [J]. *Computer-Aided Design*, 2004, 36(7): 607-623.

- [9] LIU Y S, PAUL J C, YONG J H, et al. Automatic least-squares projection of points onto point clouds with applications in reverse engineering [J]. *Computer-Aided Design*, 2006, 38(12): 1251-1263.
- [10] ZHANG Y J, GE L L. A robust and efficient method for direct projection on point-sampled surfaces [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, 11(1): 145-155.
- [11] 贺美芳, 周来水, 神会存. 散乱点云数据的曲率估算及应用 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(4): 515-519.
HE Meifang, ZHOU Laishui, SHEN Huicun. Curvature estimation of scattered-point cloud data and application [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, 37(4): 515-519.

[本刊相关文献链接]

- 应用激光跟踪仪的数控机床几何精度检测. *西安交通大学学报*, 2011, 45(3): 85-90.
- 柔性测量臂运动学建模及参数标定方法. *西安交通大学学报*, 2010, 44(8): 122-126.
- 一种开阔自由凹曲面五坐标加工多点刀位算法. *西安交通大学学报*, 2010, 44(9): 69-73.
- 利用运行状态信息的机床刀具可靠性预测方法. *西安交通大学学报*, 2010, 44(9): 74-77.
- 螺杆压缩机设计理论与关键技术的研究和开发. *西安交通大学学报*, 2007, 41(7): 755-763.
- 组合测量设备不确定度的实验研究. *西安交通大学学报*, 2011, 45(5): 84-89.
- 高精度摄像机标定模板的设计及识别算法. *西安交通大学学报*, 2011, 45(4): 82-85.
- 面向命题投影时序逻辑的安全协议模型检测. *西安交通大学学报*, 2010, 44(8): 30-35.
- 利用投影时序逻辑的多内核进程调度建模与验证. *西安交通大学学报*, 2010, 44(3): 52-57.
- 面向投影时序逻辑的 Web 服务模型检测. *西安交通大学学报*, 2009, 43(4): 39-43.
- 透视投影下的镜面反射表面形状恢复新算法. *西安交通大学学报*, 2009, 43(2): 6-9.
- CT 模体投影解析计算及其在射束硬化校正中的应用. *西安交通大学学报*, 2008, 42(6): 664-668.
- 基于扩展投影时序逻辑的组合 Web 服务描述与验证. *西安交通大学学报*, 2007, 41(10): 1155-1159.

(编辑 管咏梅)