

基于散乱点云数据的五轴数控加工刀轨生成算法*

孙殿柱 崔传辉 康新才 王超

(山东理工大学机械工程学院, 淄博 255091)

【摘要】 提出一种基于散乱点云数据的五轴数控加工刀轨生成算法,该算法根据点云数据的型面特征规划驱动刀轨,基于点云数据的动态索引获取瞬时加工区域,计算瞬时加工区域中数据点对应刀位点集,选取刀轴正向最高点作为当前刀位驱动点对应的无干涉刀位点,检测相邻刀位点间的极限加工误差并采用二分插值法控制刀轨精度,最终生成满足精度要求的五轴数控加工刀轨,实例证明该算法刀具适用范围广,可对各种复杂型面的产品点云数据生成高质量的五轴数控加工刀轨。

关键词: 散乱点云 五轴数控加工 刀轨规划

中图分类号: TP391.73; TG659 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)05-0226-04

Algorithm Generating Five-axis NC Tool-path for Unorganized Point Cloud

Sun Dianzhu Cui Chuanhui Kang Xincai Wang Chao

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China)

Abstract

An useful generation algorithm of five-axis NC tool-path was proposed, which contained the following steps: first, the cutter-location driver points were marked out based on the shape of point cloud; second, the instantaneous process area was obtained based on the dynamic index of point cloud data; third, the corresponding cutter-location point of each point in the instantaneous process area was obtained and then the cutter location point which has the highest position in the axis direction as the current cutter location point was selected; forth, the limit error was verified according to the adjacent cutter location points, and the precision of tool-path was controlled by the binary interpolation; ultimately, the NC tool-path was generated which met the accuracy requirements. Examples demonstrated that the algorithm can be used for many kinds of tools and can generate the high-quality five-axis NC tool-path for complex data model of unorganized point cloud.

Key words Unorganized point cloud, Five-axis NC, Tool-path planning

引言

三维激光扫描技术可快速获取产品模型的高精度散乱点云数据^[1]。基于点云数据进行产品加工,可避免曲面重建的繁琐过程与误差累积^[2]。研究基于散乱点云数据的五轴数控加工刀轨生成方法,对于实现产品快速、精确制造具有重要意义。

现有算法通常在水平面上进行点云数控加工刀轨规划,根据点云微切平面计算刀位点、刀轴方向或进行刀轨精度控制。文献[3]按预定走刀步长在水平面内规划一组初始点,将其沿z轴向点云数据投影,与投影直线最近的点作为刀触点,并对刀触点邻近点集进行平面逼近,以平面法矢作为刀轴矢量,生成适用于平刀的五轴无干涉行切数控加工刀轨。文

收稿日期: 2011-06-02 修回日期: 2011-07-04

* 国家自然科学基金资助项目(51075247)和山东省自然科学基金资助项目(ZR2010EM008)

作者简介: 孙殿柱,教授,博士生导师,主要从事逆向工程、CAD/CAM 一体化研究,E-mail: dianzhus@sdut.edu.cn

献[4]将点云向水平面投影获取点云包围矩形并确定行切走刀方向, 基于点云投影数据进行刀位网格划分, 对刀位网格单元内部点云投影数据对应的原始数据进行平面逼近并计算最大偏差以及刀轴方向, 并根据最大偏差是否小于加工精度调整网格单元大小, 最后对刀位网格顶点进行加权平均获取刀位点, 生成适用于球刀的五轴数控行切加工刀轨。现有算法存在以下问题: 若点云数据在水平面出现投影重合, 无法获得正确的刀轨数据; 对于型面特征较为复杂的点云数据, 采用微切平面法矢作为刀轴矢量, 易造成相邻刀轴矢量的夹角变化较大, 降低数控加工过程中的机床稳定性。

为此, 基于刀具统一表示方法, 为点云数据规划刀位驱动点, 基于点云数据的动态索引获取瞬时加工区域, 计算瞬时加工区域中数据点对应刀位点集, 选取刀轴正向最高点作为当前刀位驱动点对应的无干涉刀位点, 检测相邻刀位点间的极限加工误差并采用二分插值法控制刀轨精度, 该算法刀具适用范围广, 可对型面复杂的产品点云数据高质量地生成五轴数控加工刀轨。

1 刀具统一表示

数控加工中常用的刀具有锥刀、锥度球刀及锥度牛鼻刀^[5]等, 如图1所示, 将上述刀具统一表示为锥度牛鼻刀, 其相关参数如图1d所示, 其中 R 为刀具半径, r 为圆角半径, L 为斜刃长度, α 为斜刃角度。

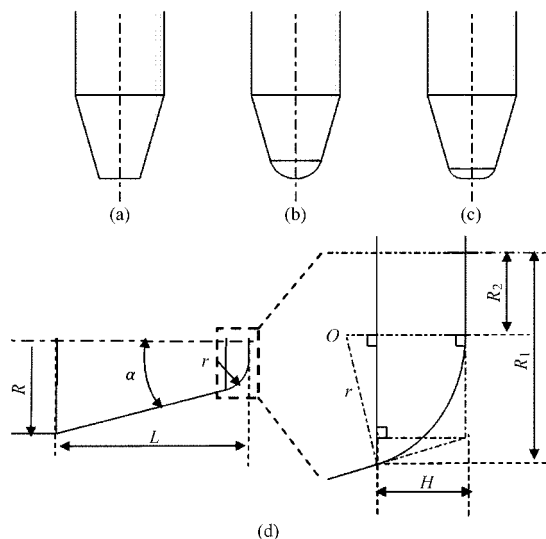


图1 数控加工常用刀具及参数

Fig. 1 Commonly used tools and the parameters of CNC machining

(a) 锥刀 (b) 锥度球刀 (c) 锥度牛鼻刀 (d) 刀具参数

在确定刀具参数 R 、 L 、 α 、 r 后, 刀具底部高度 H 、底部半径 R_1 及平底半径 R_2 计算式为

$$\begin{cases} H = r - r\sin\alpha \\ R_1 = R - L\sin\alpha + H\sin\alpha \\ R_2 = R_1 - r\cos\alpha \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知: 当刀具为锥刀时, $H = 0$, $R_1 = R_2 = R - L\sin\alpha$; 当刀具为锥度球刀时, $r = (R - L\sin\alpha) / (\cos\alpha - \sin\alpha + \sin^2\alpha)$, $R_2 = 0$ 。

2 驱动刀轨规划

在刀轨生成前预先进行刀位驱动点^[6]及对应法矢规划, 形成驱动刀轨, 依据刀位驱动点及对应法矢生成加工刀轨, 可有效增加刀轨形式, 如圆柱驱动刀轨、螺旋驱动刀轨等。

针对典型零件的加工可采用以下两种方式获取点云数据刀位驱动点:

(1) 依据点云型面特征规划与点云相交的刀轨截平面集, 对点云与刀轨截平面进行求交获取有序的刀轨截面点^[7], 对有序刀轨截面点进行数据压缩后作为刀位驱动点。

(2) 依据点云型面特征规划驱动几何体^[8], 例如曲线驱动、边界驱动等, 并将驱动几何体按精度要求离散为有序刀位驱动点。

在上述有序截面点压缩过程中, 仅对同行有序截面点集进行压缩。设同行有序截面点集为 $\{P_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, i, j 为有序截面点序号, s 为刀位驱动点间距, 具体压缩过程如下:

(1) 若 $n \geq 3$, 则设置 $i = 1, j = 3$, 执行步骤(2), 否则压缩过程结束。

(2) 计算 P_i 与 P_j 之间的距离 d , 若 $d < s$, 执行步骤(3), 否则执行步骤(4)。

(3) 比较 $j + 1$ 与 n 的大小, 若 $j + 1 \leq n$, 则设置 $j = j + 1$, 执行步骤(2), 否则执行步骤(4)。

(4) 删除 P_i 与 P_{j-1} 之间截面点, 设置 $i = j - 1$, 比较 $i + 2$ 与 n 的大小, 若 $i + 2 \leq n$, 则设置 $j = i + 2$, 执行步骤(2), 否则压缩过程结束。

在刀位驱动点规划过程中, 对刀位驱动点间距及其所形成刀轨的行距进行控制, 以保证刀轨生成精度。设加工精度为 ε , 刀具半径为 R , 则驱动刀轨行距与刀位点间距可由 $s = 2\sqrt{R^2 - (R - \varepsilon)^2}$ 求得。

对于刀位驱动点对应法矢, 三轴加工可将其设定为 Z 轴正向, 多轴加工可参考文献[8]对其进行设定。

3 瞬时加工区域获取

依据刀位驱动点及其法矢确定刀轴, 查询到刀轴距离不大于刀具半径的数据点, 并将其作为当前

瞬时加工区域。鉴于瞬时加工区域获取效率直接影响刀位点求解效率,本文基于点云动态索引 $R * S$ 树^[9]实现瞬时加工区域的快速获取。

设 P 、 v 分别为当前刀位驱动点及其法矢, C 、 r 分别为索引结点 N 的中心点与其外接球半径, R 为刀具半径, A 为由 P 、 v 确定的刀轴。采用公式 $d = |(C - P) \times v|$ 计算点到 A 的距离,采用深度优先遍历法快速查询距离 A 不大于刀具半径的叶结点集。查询过程如图 2 所示,具体步骤如下:

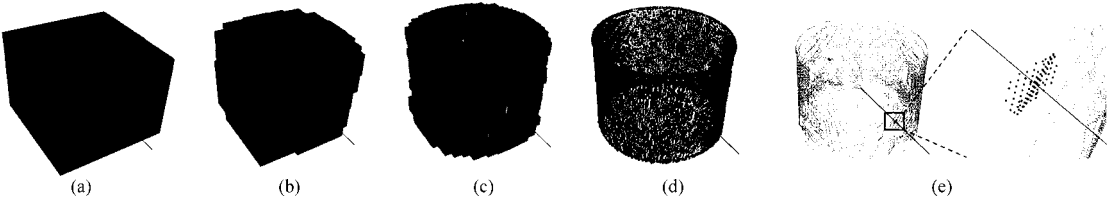


图 2 瞬时加工区域获取过程示意图

Fig. 2 Achieve instantaneous machining area

(a) 根结点 (b) 内部结点 (c) 叶结点 (d) 数据结点 (e) 瞬时加工区域

4 刀位点计算

确定刀轴后,依据刀触点与刀轴之间的距离可求得该刀触点对应的刀位点。如图 3 所示, v 为刀轴 A 的单位向量, P 为刀触点 P_c 在 A 上的投影, l 为 P_c 到 A 的距离,则刀位点 P_s 为

$$P_s = \begin{cases} P' + rv & (l \leq R_2) \\ P' + \sqrt{r^2 - (l - R_2)^2} v & (R_2 < l \leq R_1) \\ P' - [L - (R - l) / \tan \alpha] v & (R_1 < l \leq R) \end{cases} \quad (2)$$

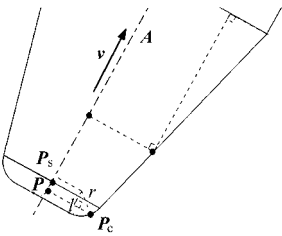


图 3 刀位点计算示意图

Fig. 3 Calculation of cutter location point

计算瞬时加工区域中数据点对应刀位点集,选取刀轴正向最高点作为当前刀位驱动点对应的无干涉刀位点。

5 刀轨生成及精度控制

逐一对刀位驱动点进行无干涉刀位点计算,可获取点云数据的初始数控加工刀轨。为获取符合精度要求的刀轨,需在刀轨生成过程中检测相邻刀位点间极限加工误差,对不满足加工精度要求的刀轨段采用二分插值法对其进行精度补偿。

- (1) 将结点 N 指向 $R * S$ 树根结点。
- (2) 计算 N 中心点到 A 的距离 d ,若 $d - r \geq R$,转至步骤(5)。
- (3) 若 N 为内部结点,将 N 中子结点插入到结点序列 P 中转至步骤(5)。
- (4) 逐点计算 N 中的数据点到 A 的距离 d ,若 $d \leq R$,将该数据点插入到瞬时加工区域序列中。
- (5) 若 P 不为空,从 P 中取出一个子结点,将 N 指向该子结点并返回步骤(2),否则查询过程结束。

设 D 为当前检测刀轨段, P_a 与 P_b 为 D 的两刀位点,其对应刀位驱动点分别为 P_0 与 P_1 ,刀轨精度补偿的具体步骤为:

- (1) 计算 D 两端点之间的极限加工误差,若极限加工误差小于预设的加工精度阈值,则 D 刀轨段的精度控制过程结束。
- (2) 在 D 的中点位置插入新刀位驱动点 P ,同时取 P_0 与 P_1 的对应法矢的合向量并进行单位化,将其作为 P 的对应法矢。
- (3) 计算 P 对应刀位点 P_c ,形成新的刀轨段 $P_a P_c$ 与 $P_c P_b$,分别将其作为当前刀轨段代入步骤(1)进行精度控制。

上述步骤中极限加工误差计算方法为:计算相邻两刀位点对应刀具轴向的平均矢量,以平均矢量为竖直轴计算两刀位点间的竖直距离 h 及水平距离 l' ,根据 h 及 l' 求解两刀位点处刀具轮廓线的交点 P ,并根据 h/l' 确定刀具的切削轨迹。如图 4 所示,当 $h/l' \leq \tan \alpha$ 时,切削轨迹为两刀位点处刀具轮廓圆角的公切线,当 $h/l' > \tan \alpha$ 时,切削轨迹为两刀位点处刀具轮廓圆柱过渡处的公切线,计算 P 到切削

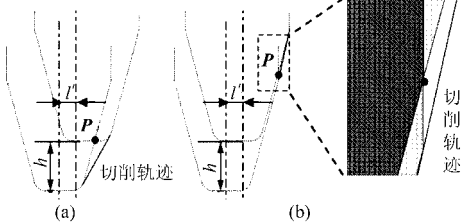


图 4 极限加工误差计算示意图

Fig. 4 Extreme machining error calculation

(a) $h/l' \leq \tan \alpha$ (b) $h/l' > \tan \alpha$

轨迹的距离,该距离即为极限加工误差。

6 应用实例

图 2e 所示的工艺品点云数据呈柱状且加工部分位于柱状侧面,若采用文献[4]所述的加工方法对其进行整体加工,如图 5 所示,无论投影平面垂直于柱状点云轴线还是平行于柱状点云轴线,均不能避免数据点的投影重合问题,从而导致算法失效。为解决该问题,可将点云数据沿轴线划分为多块进行分块加工,但由于文献[4]采用局部点集拟合平面的法矢作为刀轴矢量,若点云局部型面特征复杂将导致相邻刀位点间法矢变化幅度较大。图 6a 为采用文献[4]生成的刀轨,通过局部放大图可看出,

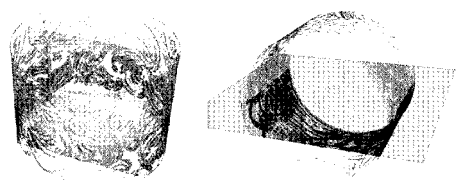


图 5 投影平面的不同放置方式

Fig. 5 Different placements of the projection plane

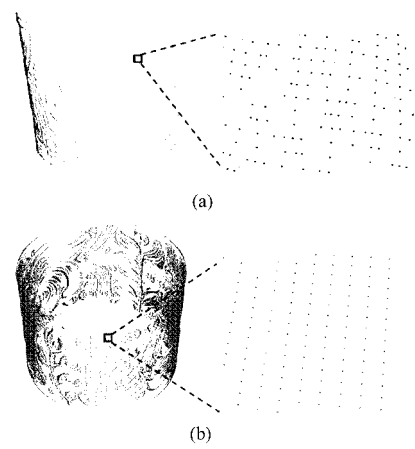


图 6 两种算法生成的刀轨

Fig. 6 Two algorithms to generate tool path

(a) 文献[4]算法 (b) 本文算法

由局部点集拟合平面获取刀轨法矢在相邻刀位点间变化幅度较大,容易造成机床振动。

采用本文算法对图 2e 所示工艺品的表面规划出圆柱刀位驱动点,生成如图 6b 所示整体刀轨,由刀轨局部放大图可见,本文算法生成的刀位点法矢方向变化幅度小。

为更清晰的反映上述两种算法所生成刀轨的法矢变化,随机截取部分五轴数控加工代码进行分析,B、C 两摆动轴的角度变化情况如图 7 所示,基于本文算法对应的数控加工代码中 B、C 轴摆动角度变化更为规律、均匀,可提高加工过程中机床各轴的运动平稳性。

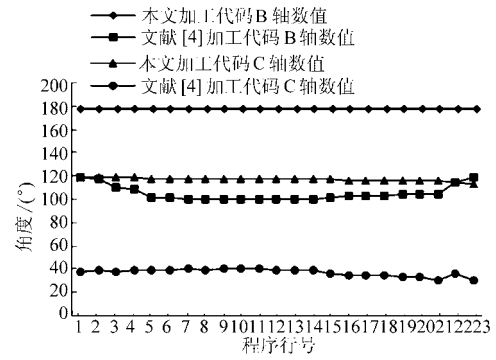


图 7 两种算法生成加工代码中 B、C 摆动角度曲线

Fig. 7 Two algorithms to generate machining code B, C swing angle

7 结论

(1) 统一锥度刀具模型,提出相应的刀位点计算方法,扩展了刀具类型的使用范围,利于刀具的合理选择应用,有效提高了切削效率。

(2) 通过预先规划刀位驱动点及其法矢获取加工刀轨,可生成型面复杂点云数据的五轴数控加工刀轨,且刀位点法矢方向变化幅度小,有利于提高加工效率及机床加工过程中的稳定性。

(3) 通过二分插值法控制刀轨精度,可有效保证型面复杂产品点云数据的五轴数控生成精度。

参 考 文 献

- 1 欧阳俊华. 近距离三维激光扫描技术[J]. 红外,2006,27(3):1~7.
Ouyang Junhua. Techniques of close-range 3D laser scanning[J]. Infrared, 2006,27(3):1~7. (in Chinese)
- 2 邓志华,王霄,刘会霞. 基于测量数据直接生成 NC 加工轨迹的方法研究[J]. 机床与液压,2006,34(9):72~74.
Deng Zhihua, Wang Xiao, Liu Huixia. Research on the method to generate NC tool path directly from measure data[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006, 34(9):72~74. (in Chinese)
- 3 谢叻,魏安顺,周印. 基于激光测量点云数据的五坐标加工刀轨生成[J]. 上海交通大学学报,2004,38(8):1 378~1 381.
Xie Le, Wei Anshun, Zhou Yin. Tool path generation for five-axis numerical control machining from laser scan points [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004,38(8):1 378~1 381. (in Chinese)
- 4 杨磊,何雪明. 点云直接生成刀具路径及其后置处理[J]. 机械设计与制造,2008(9):206~208.
Yang Lei, He Xueming. Study of generating tool path from discrete data point cloud and post processing [J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(9):206~208. (in Chinese)

- machining centers [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(1): 127 ~ 130. (in Chinese)
- 3 潘淑微. 数控车床主轴热误差快速辨识及补偿技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Pan Shuwei. The research for spindle thermal error expeditious identification and compensation of NC lathe [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- 4 Wu Hao, Zhang Hongtao, Guo Qianjian. Thermal error optimization modeling and real-time compensation on a CNC turning center [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 207(1 ~ 3): 172 ~ 179.
- 5 朱睿, 朱永炉, 陈真, 等. 基于最优分割和逐步回归方法的机床热误差建模方法研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2010, 49(1): 52 ~ 56.
Zhu Rui, Zhu Yonglu, Chen Zhen, et al. Optimal partition method & stepwise regression based thermal error modeling for a machine tool [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2010, 49(1): 52 ~ 56. (in Chinese)
- 6 吴雄彪, 姚鑫骅, 傅建中. 基于贝叶斯网络的数控机床热误差建模[J]. 中国机械工程, 2009, 20(3): 293 ~ 296.
Wu Xiongbiao, Yao Xinhua, Fu Jianzhong. Thermal error modeling of NC machine tools based on Bayesian networks [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(3): 293 ~ 296. (in Chinese)
- 7 Erdal K, Baris U, Okvay K. Grey system theory-based models in time series prediction [J]. Expert Systems with Application, 2010, 37(2): 1784 ~ 1789.
- 8 Deng S, Yeh T H. Applying least squares support vector machines to the airframe wing-box structural design cost estimation [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(12): 8417 ~ 8423.
- 9 闫嘉钰, 杨建国. 灰色 GM(X, N) 模型在数控机床热误差建模中的应用[J]. 中国机械工程, 2009, 20(11): 1297 ~ 1300.
Yan Jiayu, Yang Jianguo. Application of grey GM(X, N) model on CNC machine thermal error modeling [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(11): 1297 ~ 1300. (in Chinese)
- 10 Vapnik V. Nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1999.
- 11 林伟青, 傅建中, 陈子辰, 等. 数控机床热误差的动态自适应加权最小二乘支持矢量机建模方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 178 ~ 182.
Lin Weiqing, Fu Jianzhong, Chen Zichen, et al. Modeling of NC machine tool thermal error based on adaptive best-fitting WLS-SVM [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 178 ~ 182. (in Chinese)
- 12 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
-

(上接第 229 页)

- 5 王兰城. CNC 雕刻机刀具的选择及调整[J]. 现代制造工程, 2004(11): 31 ~ 32.
Wang Lancheng. The selection and adjusting for CNC engraving machine tool [J]. Machinery Manufacturing Engineer, 2004(11): 31 ~ 32. (in Chinese)
- 6 谢叻, 阮雪榆, 周儒荣. 自由曲面自适应投影法精加工刀轨生成[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(10): 1382 ~ 1384.
Xie Le, Ruan Xueyu, Zhou Rurong. NC tool path generation based on adaptive projection method for freeform surfaces [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(10): 1382 ~ 1384. (in Chinese)
- 7 孙殿柱, 孙永伟, 朱昌志, 等. 基于最小生成树的切片数据点排序算法[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(2): 68 ~ 71.
Sun Dianzhu, Sun Yongwei, Zhu Changzhi, et al. Sorting algorithm of slicing data based on minimum spanning tree [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(2): 68 ~ 71. (in Chinese)
- 8 葛起文. 驱动几何体和投射矢量[J]. 模具技术, 1997(4): 80 ~ 84.
Ge Qiwen. The drive geometry and project vector [J]. Die and Mould Technology, 1997(4): 80 ~ 84. (in Chinese)
- 9 田中朝. 三角网格曲面重建及求交理论、方法研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2008.
- 10 孙殿柱, 朱昌志, 李延瑞, 等. 散乱点云局部型面参考数据的快速查询算法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 218 ~ 221.
Sun Dianzhu, Zhu Changzhi, Li Yanrui, et al. Algorithm of local model reference data querying for scattered points [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 218 ~ 221. (in Chinese)
- 11 孙殿柱, 李心成, 李延瑞, 等. 三角网格曲面高精度刀轨快速生成算法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 223 ~ 226.
Sun Dianzhu, Li Xincheng, Li Yanrui, et al. Research on high precision and fast generation algorithm of NC tool path for triangular mesh surface [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 223 ~ 226. (in Chinese)