

# 激光测量点云的数据处理方法研究

陈 田

(上海电机学院机械学院, 上海 200245)

**摘要** 激光测量技术具有高分辨率、快速、非接触和数字化的特点,其应用日益广泛。基于激光测量的散乱点云,研究测量点云的数据处理方法。在分析通常的数据处理流程与方法的基础上,重点研究了如何应用数据的虚拟切割技术和测量点云的虚拟投影技术。点云虚拟切割技术主要包括径向/轴向切割技术、柱面切割技术与指定切割半径处的轴向截面切割技术。点云虚拟投影技术主要包括规则特征投影技术和轴向旋转投影技术。基于点云的虚拟投影,阐述了零件的参数提取策略。通过基于激光测量的零件数字化检测的实践表明所提出的点云数据处理方法与策略是行之有效的。

**关键词** 测量;点云;数据处理;虚拟切割;投影

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.091202

## Data Processing Methodology for Laser Measurement Point Cloud

Chen Tian

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200245, China)

**Abstract** As a high-resolution, rapid, non-contact digital means, laser measurement technology is increasingly widely applied in the field of manufacturing. The data processing method of point cloud is presented on the basis of measurement of scattered laser point cloud. Based on the usual methods of data processing and analysis, how to apply the virtual slicing technology and virtual projection technology of measuring point cloud is emphasized. The technologies of virtual slicing of point cloud include radial/axial slicing, cylindrical slicing, and axial slicing for the specified radius. Virtual projection technologies of point cloud mainly include feature projection and axial rotation projection technologies. Meanwhile, based on the virtual projection of point cloud, the extraction strategy of part parameter is concluded. It is validated by a part's digital detection after its laser measurement that the proposed data processing methods and strategies are effective.

**Key words** measurement; point cloud; data processing; virtual slicing; projection

**OCIS codes** 120.4630; 140.0140; 200.4560

## 1 引 言

在工业技术发达的国家,数字化制造技术已经成为提高企业产品竞争力的重要手段。产品质量是企业在国际市场竞争中取胜的关键。产品质量检测已成为制造中最重要的问题之一,提高检测的效率和精度是企业必须达到的目标。如今,机械制造工业生产正迅速走向大规模集成化和高度自动化,在以先进制造技术为指导的设计、制造和检测环境中,要求实施产品质量检测的设备具有自动化、集成化和智能化的特点<sup>[1]</sup>。激光测量技术作为一种具有高分辨率、快速、非接触的数字化手段,在当今制造业精密化的发展趋势下应用日益广泛<sup>[2,3]</sup>。

然而由激光测量零件实体表面结果数字化所得到的测量数据往往是无序、密度不均、非完整的大规模散乱点云<sup>[4]</sup>,需要能将这样的散乱点云转变为支持后续快速、准确的制造、检测和分析的有效形式。本文从激

**收稿日期**: 2011-04-12; **收到修改稿日期**: 2011-06-07; **网络出版日期**: 2011-07-25

**基金项目**: 上海市教育委员会重点学科建设项目(J51902)、上海电气中央研究院项目(10B60)和上海电机学院科研启动经费项目(10C432)资助课题。

**作者简介**: 陈 田(1973—),女,博士,副研究员,主要从事光学检测、数字化设计与制造等方面的研究。

E-mail: field.tian.chen@gmail.com

光测量出发,论述激光测量点云的数据处理方法。讨论了通常的测量点云的数据处理流程与方法,提出了针对数字化检测和制造的特殊数据处理策略,包括数据的虚拟切割及其应用、测量点云的几何投影处理等。

## 2 通常的数据处理流程与方法

数据处理的目的是通过对原始测量数据的均匀化、排序与平滑处理等,从大量的、可能是杂乱无章的数据中抽取并推导出对于某些特定后续工作有价值、有意义的数据<sup>[5-7]</sup>。下面是激光测量数据处理的通常步骤,根据测量数据的质量优劣,有些步骤可能被省略。

- 1) 数据骤减:使测量点云骤然稀疏;
- 2) 去除异常点:有效减少明显的孤立、异常点;
- 3) 平滑处理:通过高斯滤波等有效方法,从多个视角扫描得到完整数据;
- 4) 法矢/曲率估算:通过主成分分析(PCA)算法求取各个点的法矢/曲率信息<sup>[8]</sup>;
- 5) 去除重复点:去除叠加的重复点,往往对多个视角扫描的数据处理有效;
- 6) 排序:将二维点云排序成一多边形封闭链;
- 7) 重采样:按照弧长参数进行点的均匀重采样。

## 3 数据的虚拟切割及其应用

作为本文的主要方法之一,数据的虚拟切割是刀具参数提取过程的关键应用。简言之,本文提出两种类型的虚拟切割,一种是平面切割,由定义通过点与平面切割方向就能够得到所关心的截面;另一种是曲面切割,包括规则曲面切割和不规则曲面切割。虚拟切割的目的就在于在预定义的平面或曲面上得到一组特定点集。另外对于点集的虚拟切割,系统根据点的密度信息提供默认的沿切割法向的厚度,以便获取足够的点集进行计算。同时该切割厚度也允许用户进行重新定义。由此,系统提供的径面切割工具是通过定义参照刀尖位置的切割深度来获取的垂直于轴心的截面;同时轴面切割工具则是基于预定义的截面外圆半径来获取的。通过虚拟切割获得的结果是一组全新的特殊点集,能很方便地计算出径向截面与轴向截面的参数<sup>[9]</sup>。目前,在一个径向截面上,该系统已经能够完全自动地提取十几个参数。除了上面提到的径向/轴向切割外,圆柱面切割是规则曲面切割中的一种,它被应用于指定圆柱半径的管状点云的获取。通过圆柱面切割得到螺旋线上的点集,就能够获悉刀具凹槽的螺旋面信息。特别地,基于给定的圆柱半径,能够方便地获取所有刀刃上轴向的刀尖位置,以便求得该处的轴向截面方向。

在开发的刀具检测系统中,虚拟切割是参数提取模块中的一个实用工具。通过虚拟切割能够方便地从原始的三维点云或已建的三角网格中获得特定截面的点集。

### 3.1 径向/轴向切割

径向/轴向切割工具如图1所示。所有对象的名称被列于切割工具面最上面的列表框中,该列表取决于用户所选择的类型,包括点云和三角网格。截面类型选项简化了用户定义,方便了用户选择所期望的常用特

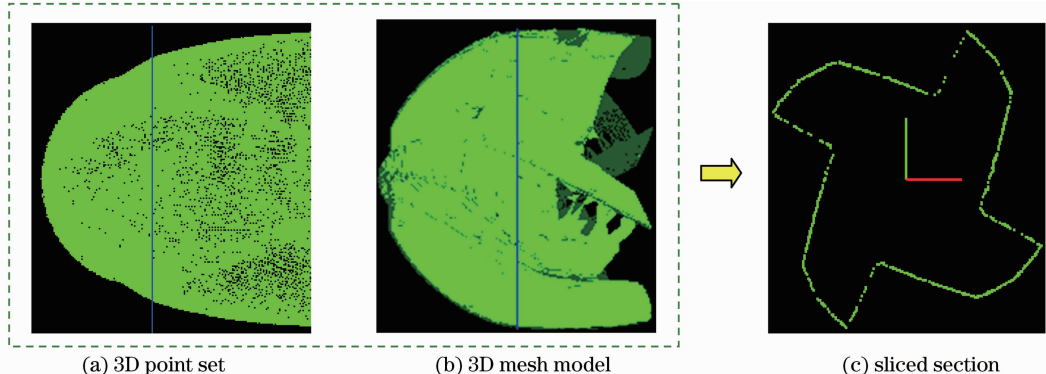


图1 虚拟切割

Fig.1 Virtual slicing

定切割方式。切割厚度是一种阈值设定,一般采用系统通过点云密度计算的推荐值。当用户点击界面中的“Apply”按钮时,就意味着在定义的切割平面附近将产生一组新的特定点集,该点集所占空间以切割平面为中心向上下延伸,其延伸偏移量均为所定义切割厚度的一半。随后根据需求,所有特定点集空间中的点就能够被投影到同一平面,默认将定义的切割面作为投影面。对于三角网格模型,切割厚度不需要定义,如果切割面穿过三角网格,系统则将切割面与组成三角网格的线段之间的交点作为特定点集。同样根据需求,该点集能够方便地被投影到与切割面平行或相同的平面上。该工具方便了径向或轴向截面上的参数提取。另外,系统提供一个通用的适合任意截面切割的工具,用户仅需指定一切割平面上的点及切割平面的法向,其运作原理与径向/轴向切割工具一致。

### 3.2 圆柱面切割

圆柱面切割工具界面及其原理同径向/轴向切割工具。用户仅需交互式地拖动圆柱半径的大小来完成设定。图2给出圆柱面切割的一些结果,可以很清楚地看到两组螺旋线状的特定点集,它们是通过在两个不同圆柱半径定义下通过圆柱虚拟切割获得的两组结果。基于此,系统就能自动地分析某刀具凹槽的螺旋面属性。更为重要的是,在轴向上,能够轻易地获取已知圆柱半径对应的准确的刀刃点位置,以便于准确计算该刀刃点对应的轴截面方向,轴截面应该经过刀刃上的点,平行于轴心,并且其刀刃点处的法向应该穿过轴心,即与轴心相交。

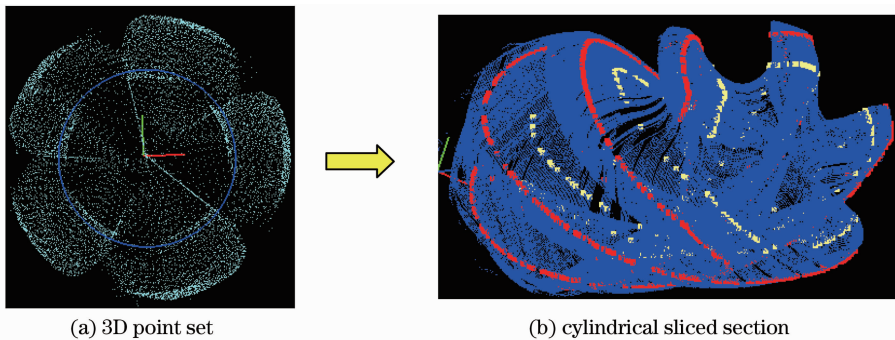


图2 圆柱面切割

Fig. 2 Cylindrical slicing

### 3.3 指定切割半径处的轴向截面

如图3所示,点 $P$ 是在用户指定了切割半径(即线段 $OP$ )后所获取的轴向刀刃上的点,这是通过虚拟圆柱面切割而得到的点集在轴心沿刀尖方向的若干最高点之一。图3(a)的刀具中共有5个刀刃和5条凹槽(回转型刀具的刀刃数和凹槽数相等),所以有5个最高点<sup>[10]</sup>。经过最高点就能够方便地找到轴向截面。图3(a)中 $MN$ 是轴向截面的投影,投影平面平行于轴心,且 $MN$ 上的点 $P$ 处的法线 $OP$ 指向轴心 $O$ ,即 $OP$ 垂直于 $MN$ 。用同样的方法,对于该5个刀刃的回转型刀具,在同一切割半径处能够获得另外的4个轴向截面。图3(b)所示为一把4刃刀具。靠上部连续垂直于轴的点集就是指定刀尖位置的径向截面上的点。根据径向截面可以计算出对应的切割半径,已知切割半径则可通过以上的方法新生成对应切割半径处的4组类似的轴向截面上的点集。

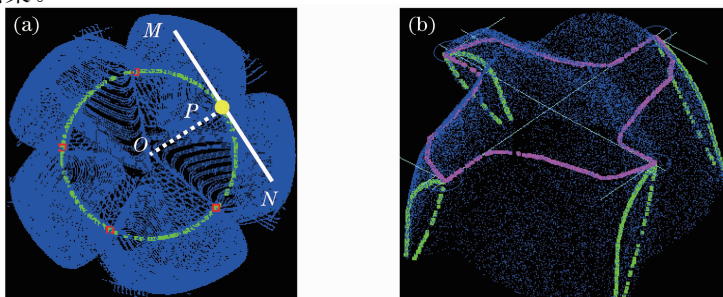


图3 轴向截面切割

Fig. 3 Axial section slicing

## 4 测量点云的几何投影处理

### 4.1 规则特征投影

即使对于一个复杂形状的零件,仍然存在部分相对比较规则的几何特征,比如直纹面特征。对于如图4(a)所示的某类型平头铣刀,其刀刃4个槽(Gash)就是由3片典型的直纹面所构成的,由此对于每一槽特征都能找到其投影平面。对于“Gash I”的当前视角就是“Gash I”的投影平面,即“Gash I”上的所有三维测量点在该视角重合投影到同一多义线上。由此该特征所对应的参数即可方便地计算出来。又如图4(b)所示为某平头刀具的4个轴向刀尖。对于每一个轴向刀尖,其投影平面均用虚线框加亮显示。可以看出,轴向刀尖两相邻直纹面的投影将与加粗线重合,也就是说加粗线的位置即为轴向刀尖相关参数的计算平面。

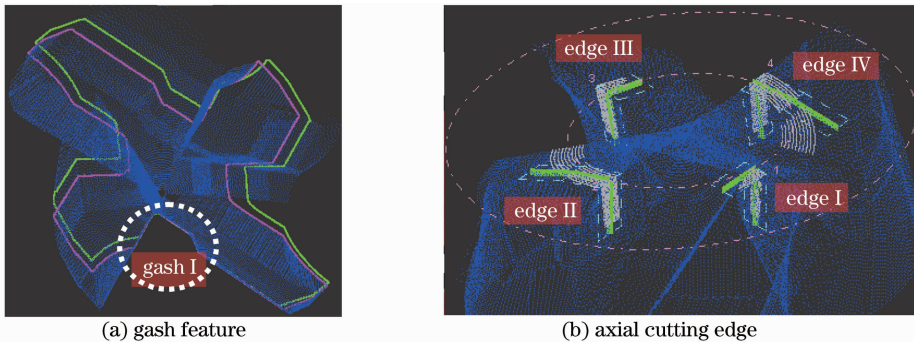


图4 直纹面特征提取

Fig. 4 Feature extraction on ruled surface

### 4.2 轴向旋转投影流程

#### 4.2.1 轴向旋转投影流程

轴向旋转投影是将所有被测量的三维点围绕刀具轴心旋转,并在保持原始点与轴心距离不变的条件下,将其投影到同一轴面。也就是说,对每一点都是一种等半径的旋转投影方式。基于二维平面的旋转投影结果,能够方便地将其轮廓提取出来。更进一步,将已提取的二维轮廓上的点对应于原始三维点集,恢复其正确的三维信息,由此来计算相应的参数。

例如,基于一回转件的测量三维点云,投影通过刀具轴心,确定投影平面,该系统所采用的默认投影平面为通过轴心( $Z$ 轴)的 $YOZ$ 平面。紧接着,在保持每一点到轴心距离不变的条件下,将所有点绕轴心旋转并投影到指定投影面上。由此计算相应参数,提取二维轮廓。图5显示出基于轴向投影平面的参数提取结果。总体来看,轴向旋转投影有两种获取方式,一种是确保每一点的旋转角度小于 $90^\circ$ ,如图5(a),(c)所示;另一种则实现半平面投影,如图5(b)中右图所示。

#### 4.2.2 基于旋转投影技术的参数提取

对任意旋转线的三维测量数据,都能够方便地获取其轴向旋转投影。通过旋转投影能够直接或者间接地提取至少10个关键参数,如内廓直径、外廓直径、螺旋角、导程、球头铣刀的球头半径、平头铣刀的刀尖圆弧半径和端面凹角、钻头的倒锥角和刀刃夹角、绞刀的刀尖倒角和锥度角。大部分参数对刀具的性能都非常关键。图5(a),(b)分别是对球头铣刀与平头铣刀进行轴面旋转投影后可提取参数的示意图<sup>[9,10]</sup>。由图5(a)可获得的参数包括通过提取最小最大轮廓而计算的外廓直径 $D_1$ 、内廓直径 $D_2$ 及轴向凹槽夹角( $\pi -$

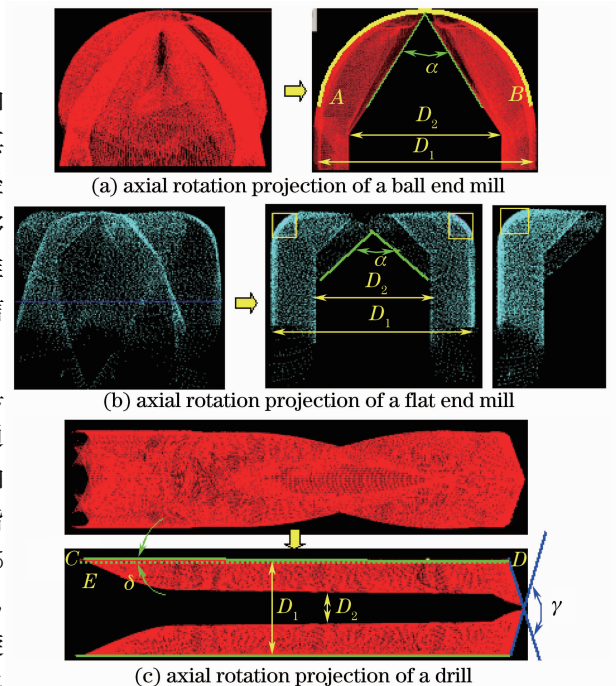


图5 轴向旋转投影与参数提取

Fig. 5 Axial rotation projection and parameter extraction

$\alpha)/2$ 。图 5(b)是对平头铣刀进行轴面旋转投影后可提取参数的示意,与球头铣刀相似,基于轴向旋转投影,通过提取最小最大轮廓可计算外廓直径  $D_1$ 、内廓直径  $D_2$  和轴向凹槽夹角  $(\pi-\alpha)/2$ 。图 5(c)则是基于轴向旋转投影的钻头参数提取示意图,参数包括外廓直径  $D_1$ 、内廓直径  $D_2$ 、倒锥角  $\delta$  和刀刃夹角  $\gamma$ 。

## 5 结 论

本文基于激光测量的散乱点云,研究测量点云的数据处理方法。基于通常的数据处理流程与方法的分析,重点研究了如何应用数据的虚拟切割技术和测量点云的虚拟投影技术。通过对刀具的激光测量点云的数据处理,完成了某制造企业的特种刀具,包括球头铣刀、平头铣刀、钻头等,若干关键参数的成功快速提取,实现了刀具的数字化检测。

## 参 考 文 献

- Xiong Youlun, Yang Shuzi. Automation, integrating, and intellectualization of measurements[J]. *Chin. Mechanical Engineering*, 1992, **3**(1): 20~22  
熊有伦, 杨叔子. 测量自动化、集成化和智能化[J]. 中国机械工程, 1992, **3**(1): 20~22
- Natasa Vujica Herzog, Stefano Tonchia, Andrej Polajnar. Linkages between manufacturing strategy, benchmarking, performance measurement and business process reengineering[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, **57**(3): 963~975
- Bruce Morey. Aerospace embraces in-process metrology[J]. *Manufacturing Engineering*, 2010, **144**(3): 1
- Tian Chen, Xiaoming Du, Ming Jia *et al.*. Application of optical inspection and metrology in quality control for aircraft component[C]. Proceedings of the 2010 International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (CMAE 2010), 2010, V5294~V5298
- Fan Guangqiang, Hu Shunxing, Xie Jun *et al.*. Application of the adaptive filter to the data processing for Raman lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3002~3006  
范广强, 胡顺星, 谢军等. 自适应滤波在拉曼激光雷达数据处理中的应用[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 3002~3006
- Woo H., Kang E., Wang Semyung *et al.*. A new segmentation method for point cloud data[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, **42**(2): 167~178
- Wu Fenghe, Zhang Xiaofeng. Three-dimensional reconstruction method based on parameter mapping and B-spline interpolation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 977~982  
吴凤和, 张晓峰. 基于参数域映射及 B 样条插值的三维重构方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(7): 977~982
- N. J. Mitra, A. Nguyen, L. Guibas. Estimating surface normals in noisy point cloud data[J]. *International Journal of Computational Geometry and Applications*, 2004, **14**(4-5): 261~276
- Tian Chen, Xiaoming Du, Jianming Zheng *et al.*. System and Method for Extracting Parameters of a Cutting Tool: US Patents, 7577491[P]. 2009
- Tian Chen, Xiaoming Du, Kevin Harding *et al.*. Method and System for Gash Parameter Extraction of a Cutting Tool: US Patent, 20100280649[P]. 2010