基于物体表面变化的点云自适应切片算法

熊骏伟, 刘全香

(武汉大学,武汉 430079)

摘要:目的 针对点云数据提出一种基于物体表面变化的自适应切片算法。方法 提出一种快速有效 的自适应点云切片算法,该算法基于空间极坐标系划分建立切片层和离散点之间的拓扑关联信息,通 过反距离加权法构造平面散乱点列,使用变化率平均法来插补切片。结果 算法快速准确、稳定可靠, 能够在物体高变化区域获得更多的切片。结论 基于物体表面变化的自适应切片算法是一种合理有 效的点云切片算法。

关键词:点云切片;逆向工程;3D打印;反距离加权法 中图分类号:TS801 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2016)05-0167-05

Adaptive Cloud Point Slicing Algorithm Based on Change of Object Surface

XIONG Jun-wei, *LIU Quan-xiang* (Wuhan University, Wuhan 430079, China)

ABSTRACT: Targeting at point cloud data, an adaptive slicing algorithm based on change of object surface was proposed. A speedy and effective adaptive cloud point slicing methodology was proposed, which established the topological interaction between slices and between cloud points based on space polar coordinate. Planar scattered point column was built through inverse distance weighting and slices were built through changing rate average. This methodology was speedy, accurate, steady and reliable, and could obtain more slices in fast–changed area. In conclusion, the adaptive cloud point slicing algorithm based on change of object surface is a reasonable and efficient algorithm.

KEY WORDS: cloud point slicing; reverse engineering; 3D printing; inverse distance weighting

随着计算机辅助设计和数字信号处理技术的发展,利用实物测量获取三维数据点,通过逆向工程^[1-2]的方法重建数字化实体进行产品开发和创新,能够大大提高产品设计效率^[3]。利用物体表面有限点集重建物体的问题吸引了很多学者专家的注意,其对于虚拟现实^[4]、形状分析、3D打印^[5]等多个领域的应用十分广泛。点云数据通常是使用线阵激光扫描,由于各项误差的存在,每条扫描线上的点云不可能都严格位于各自的光刀平面内,而是以一定的距离分布在光刀平面两侧^[6],使得三维激光测距获得的点云杂乱无章,数据量巨大^[7]。通常利用切片技术将空间离散点云转换为切片点云,把复杂的三维点云问题简化到二维平面内

处理,使三维空间难以处理的问题变得简单¹⁸。

点云切片是根据合适的加工方向,在某一方向 上用一系列一定间隔的平面切割点云数据,再提取 截面的轮廓信息。点云切片算法常用于逆向工程的 分层制造中,随着快速成形和三维打印技术逐渐趋 于成熟^{19—101},点云切片技术的适用范围将越来越广。

为了提高模型的成形精度和效率,常采用自适应 切片算法。国内外学者对点云自适应切片算法已有 了一系列研究,柯映林¹¹¹提出了基于点云密度进行切 片划分的算法,随机选取点云中的*n*个点和其最近的 *m*个点来估算点云密度,用点云密度和一定系数的乘 积作为切片厚度,从而能够在点云密度大的区域得到

收稿日期: 2015-07-17

作者简介:熊骏伟(1990一),男,湖北武汉人,武汉大学硕士生,主攻三维重建、印刷企业管理。

通讯作者:刘全香(1965—),女,湖北武汉人,武汉大学教授、硕导,主要研究方向为图像复制原理。

更小的切片厚度,然而点云密度的估算受随机选取的 n个点位置的影响,而点云密度的大小和需要切片数 量的多少没有十分必然的联系。Zhong S.¹²¹等基于反 距离平方法进行点云切片,基于点云密度进行判断切 片,未考虑物体的形态特征。Park H.T.¹³¹等提出的基 于虚拟边缘的自适应切片算法,其采用密度球来判断 准确的虚拟边缘,然后切片获得轮廓,但是初始点的 选取对切片效果影响大,且需要反复循环比较,算法 效率低。

文中提出的切片算法基于空间极坐标系分割散 乱点云层,并对散乱点云进行排序,建立点云间的临 接关系,以实现点之间的快速搜索,构建平面切片数 据。同时基于切片间层与层间的表面变化进行切片, 在高变化区域保留较多的切片,而在变化相对平缓的 区域保留较少切片。

1 点云切片算法描述及实现

1.1 点云分割处理

点云数据量庞大,杂乱无章,不利于点的搜索,因 此需要将点云分割开来,减小搜索范围,其步骤如下 所述。

1)进行点云融合。目前获取点云数据的各种技 术都不能一次性获得全部的点云数据,而是每次获取 物体一部分的点云数据,然后将各个部分拼接到一 起。以物体的中心为坐标原点,将垂直于放置水平面 的方向作为z轴,建立直角坐标系。

 将直角坐标系(x,y,z)转换成空间极坐标系
 (z, θ, ρ),其中空间极坐标系的z轴对应于直角坐标 系的z轴。

3)将点云模型按照z坐标分成若干层,每一层高 度为Δh(Δh的大小取决于实际应用,如计算机所需 显示模型的精度或快速成形机的最小加工层厚),对 于高度为H的物体,其被分为N=[H/Δh]份,划分后 每一层分割线所在高度记做Z_i(1≤i≤N+1)。将点云 按照z坐标从小到大进行排序,并将每个点按照z坐标 的值放入相应层中。

4)根据所需精度,将每一层点云按照极角平均分成 n 份,划分后每一区分割线所在角度记做 θ_i(0≤ i≤ n),将每层数组中的点云按照极角坐标大小进行 排序。

经过上述分割过程,点云在z轴方向被分为N层, 每一层分成n份,在后续平面构建过程中,求交平面位 于点云分层后每一层的中间。在每一层点云分成n份 角的每一个区域的正中间插值出一个点,每层插值处 共插值n个点,整个点云插值出N×n个点。分割过程 只是将点云分为了若干区间,便于后期点云的搜索, 提高计算速度。将点云根据z坐标分割,能够快速搜 索到第i层中的所有数据点,每一层的点云按照极坐 标排序,可以快速搜索到插值点处附近所有点,从而 实现数量庞大的散乱点云有序化,使得每个点的拓扑 关系明确,搜索便利。

1.2 构建平面切片数据

点云是离散表征物体表面特征信息的空间散乱 点集合,即 Ω ={ p_1, p_2, \dots, p_n }, p_i ={ z_i, θ_i, ρ_i }。在工程实 际应用中,一般沿着z轴切片,首先沿z轴方向构建一 平面族 $\Gamma(z_1, z_2, \dots, z_{N+1})$,从而将点云分成若干分割 块,对于z方向上每一个小分割块 B_{zi} ,考察平行于xOy平面的中轴面 $E_z(z=(z_i+z_{i+1})/2)$,将 B_{zi} 中的数据点向 E_z 做运算操作,得到 E_z 上一组共面的点集,平面 E_z 即为z向上的求交平面^[14–15]。 E_z 求得的点集经过轮廓拟合即 为切片,见图1。



图1 切片示意 Fig.1 Slicing map

基于分块后的点云计算求交平面数据一般采用2 种方法:投影法和求交法。在投影法中,将点云带中 的各个点向求交平面E上进行投影,从而得到求交平 面数据,但容易出现较多冗余点。在求交法中,通过 寻找求交平面两侧距离最近的点计算两点连线与求 交平面的交点,从而得到求交平面数据。这2种方法 都是使用1个或2个点的特征来近似表达模型的局部 轮廓特征,考虑的因素较少。

文中使用改进的反距离加权法¹⁶⁹来构建求交平面数据。对于三维物体,空间上每个点的位置是相互关联的,一般认为空间上距离较近的点比距离较远的点 其特征值具有更大的相似性。若已知点*P*周围有*N*个已知数据*z_i*(*x_i*, *y_i*)点,则对应于(*x*, *y*)点的*z*坐标为:

$$z = \sum_{i=1}^{N} \frac{z_i}{\left[d_i(x,y)\right]^u} / \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\left[d_i(x,y)\right]^u}$$
(1)

其中 $d_i(x,y)$ 为权重, $d_i(x,y)=\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$, μ 为相关指数,一般u取值为2。从公式(1)看出,对于 空间上任意一点,其投影面上的距离越近对所得z值 影响越大。反距离加权法将z坐标看作是xOy平面上 对应点的属性值,将三维空间降维到二维空间。文中 采用空间极角坐标系,将 ρ 看作是z和 θ 的属性值,因 此权重为 $d = \sqrt{(\theta_0 - \theta_i)^2 + (z_0 - z_i)^2}$ 。

文中使用改进后的反距离加权法进行插值。算 法仅用P点所在子空间内的数据点进行反距离加权法 计算特定点的坐标值,见图2。将该子空间分成4个部 分,在每个部分中寻找最接近目标点的一个点,最终4 个部分从4个不同方向对插值点进行约束,该算法比 投影法和求交法利用1个或2个点进行约束要全面, 且不会出现传统反距离加权法中常见的插值点高于 周围点这一不合理的现象,同时由于计算点减少,从 而能够提高插值速度。对于目标点P₀(z₀, θ₀, ρ₀);



Fig.2 Search area map

经过点云的初步分割和使用反距离加权法构建求 交平面上的数据点,点云将会变换成一组均匀切片。

1.3 自适应切片插值

在切片过程中,能否尽可能保留物体表面信息与 同一 θ 角上相邻两点间的变化大小并无绝对关系,而 是与这两点间的变化趋势有关。图3为某一物体横截 面,沿z轴方向在同一 θ 平面的6个点A,B,C,D,E,F, 其相对位移相同,在A,B,C,D等4个点中,去除B,C 点后使用A,D点拟合后的曲线和用A,B,C,D等4个 点拟合的曲线相差不大。在C,D,E点中,去掉D点后 使用C,E点拟合的曲线和C,D,E点拟合的曲线相差 很大。由此,决定物体表面细节特征信息的因素不是 相邻两点间坐标差值的大小,而是这2点变化趋势的 差值大小,其数学描述见后文。文中将变化趋势差异 大的区域称为高曲率变化区域。



图 3 物体横截面 Fig.3 Cross section of object

图4a为一物体的剖面图,粗实线是使用均匀切片 方法的切片所在位置,图4b是使用该方法曲线重建后 的形状。图4a中的细虚线是在高曲率变化面添加的 切片,图4c是增加切片后曲线重建后的形状。从图4 可以看到,均匀切片算法虽然在低变化区域能够基本 保留物体的表面特征,但是在高变化区域无法再现物 体的轮廓外貌,只有对高变化区域增加切片数量,才 能够更多地保留细节。



图4 不同切片算法效果比较 Fig.4 Effects comparison of different slicing algorithms

在切片过程中,如果想尽可能多地保留物体的变 化特征,需要在高变化区域获取更多的切片,这样才 能更好地保留物体的表面细节,而在变化相对平缓的 区域可以保留少数切片,从而减少数据量。理想的自 适应切片插值应该是对高变化区域的点云块 B_a 沿着z轴方向进行进一步分割, $B_{a}=\{B_{1},B_{2},\dots,B_{n}\}$,然后在 B_{i}^{i} 中计算出求交平面。但是在实际应用中,由于每一 层高度 Δh 可能取值很小,点云块 B_{a} 中的点云数量有 限,当进一步分割 B_{a} 以后,可能造成点云块 B_{i}^{i} 中的点 云数量稀疏,对应的求交平面上的数据也会很稀少, 拟合得到的轮廓线将会和实际物体轮廓线相差很 大。由此,文中采用插补的方式来增加切片数量。对 于求交平面 E_{i} ,首先判断其是否为高曲率变化面定 义和判断方法如下所述。

由于空间上的点云是离散的,对于同一 θ 角上相 邻的两点 $M(z_i, \theta, \rho_m), N(z_{i+1}, \theta, \rho_m), N$ 点处的斜率 公式定义为:

$$f_{N}^{i} = \frac{\rho_{n} - \rho_{m}}{z_{i+1} - z_{i}}$$
(3)

对于同一 θ 角上不相邻的两点 $M(z_m, \theta, \rho_m)$, $N(z_n, \theta, \rho_n)$,定义N点相对于M点的斜率公式为:

$$f_{N \to M}^{i} = \frac{\rho_{n} - \rho_{m}}{z_{n} - z_{m}}$$

$$\tag{4}$$

一阶导数表示某一点相对于另一点的变化,而二 阶导数是切线斜率变化的速度,对于高变化区域,其 绝对值会比低曲率变化区域的值大,N点处的二阶导 数定义为:

$$f_{N}' = \frac{f_{N}' - f_{M}'}{z_{n} - z_{m}}$$
(5)

根据二阶导数的性质,使用二阶导数f 来评判 E_i 切片上第n个点相对于 E_{i-1} 切片上第n个点的变化速率大小。高变化面一般分为两种情况:整个面相对于上一个面整体或绝大部分点都有收缩或膨胀趋势,对于这种情况,判定是否 $\sum_{i=1}^{n} \rho_i / n \ge \delta_1$, δ_1 为阈值;面上有部分位置相对于上个面有突出或凹陷,对于这种情况,判定是否存在连续3个 $\rho_i, \rho_{i+1}, \rho_{i+2} \ge \delta_2$,取连续3个点进行判断是为了避免噪声产生误判, δ_2 为阈值。

如果判断拟合后的层面 *E*_i为高变化面,则需要在 两层切片中插补中间切片。文中使用变化率平均法 来插补中间切片数据,其用数学描述:对于同一角上 的两点*A*(*z*₁, *θ*, *ρ*₁)和*B*(*z*₂, *θ*, *ρ*₂),两点之间高度差 *M*=*lz*₁-*z*₂*l*,对于在*AB*线段上任一点*P*₀(*z*₀, *θ*, *ρ*₀),距*A* 点的高度差 *m*=*lz*₀-*z*₁*l*,文中定义变化率平均法来作为 插补切片层的计算依据。变化率平均法的思想是两 点间的变化是均匀的、逐步的,其数学含义是使两点 间插入点的值的斜率和起始点斜率之差与该点到起 始点的距离成正比,从而使得插值点斜率的变化均 匀,这样能够使两点之间过渡均匀,即:

$$\frac{f'_{P \to A} - f'_{A}}{(f'_{B} - f'_{A})} = \frac{m}{M}$$
(6)
EP:

$$\frac{\rho_0 - \rho_1}{z_0 - z_1} - f_A^i = \frac{m}{M} (f_B^i - f_A^i)$$
(7)

2 实验实例及结论

文中使用 VC++和 OpenGL 编程,在 Windows 7平 台实现算法。图 5a 为某油田管道中一段,共有 39 600 个数据点。图 5b--d 均是使用 0.01 层厚(点云数据在 采集以后经过收缩变换处理,因此此处无度量单位), 管道切片后的点云切片组,每一层均有100个插值 点。图5b是均匀切片的点云切片组,图5c—d是使用 文中算法的点云切片组,其中图5c阈值为0.05,图5d 阈值为0.01,算法实施用时均不超过3s。



图 5 管道点云切片结果比较 Fig.5 Comparison of pipeline slicing results

从图5b可以看出,均匀切片算法对物体表面进 行等距离切片,当层厚较大时在高变化区域容易丢失 物体细节,只能通过减小切片层厚来尽量多地保留物 体表面细节,但是会大大增加数据冗余。图5c-d是 使用文中算法在不同阈值下的效果,对比可知阈值设 置越小,能够保留的微小区域越多。文中算法和均匀 切片算法在相同切片层厚条件下增加的切片层数并 不多,数据量增加不大,但是更能更好地保留物体表 面形状特征。在实际应用中,通过需求的不同设置阈 值、切片厚度和每层插值数,能够获得所需精度的切 片组。

由于自适应切片算法没有客观的评价方法,因此 采用主观评价法将文中算法(0.01层厚度,阈值0.01) 和均匀切片法(0.01层厚)、柯映林基于密度分割的算 法(系数*k*=6)、Zhong S.反距离平方切片法进行比较。 实验选用15段长0.5 m的某油田管道采集到的点云进 行切片,实验前由实验对象在管道原始图像上凭主观 感受标记出物体所有细节部分,被标记的观测点总数 为87。参加实验的观察者共20人。在进行完切片以 后,将切片模型和原始图像做对比,由观察者判断切 片模型能否在相应位置重现原始图像的细节,如果在 未被标记的部位进行插补切片,则认为是错误切片。 判断实验在间隔不小于1 d的情况下重复3次。文中 采用错误判断率(WD)来研究观察者的准确性,每一 个观察者对每一个细节重现"是"或"否"的判断和整 个评价实验的结果作比较,如果该观察者对于该处细节的判断为"是",而整个判断的通过率为10%(小于50%)为"否",则认为该观察者的判断是错误判断。WD表示观察者的误判数和总样本数之商,其值越小说明观察者判断的准确率越高。结果表明,20位观察者的WD为0.1,在可接受范围内,因此实验数据是有效的。

将判断错误的样本剔除后,对于单个观察者,定 义细节保留率=总的保留下来的细节/总的被标记的观 测点,错误率=错误切片/总的被标记的观测点,将所有 观察者结果求平均,得到主观判断实验结果见表1。

表1 不同算法细节保留率和错误率对比

Tab.1 Comparison of details retention rate and error rate among different algorithms

算法名称	细节保留率/%	错误率/%	
文中算法	95	3	
均匀切片算法	40	0	
柯映林法	88	6	
Zhong S.法	90	5	

从实验结果可知,文中算法在细节保留率和错误 率上均优于其他3种算法,虽然均匀切片算法的错误 率为0,但是仅仅是因为未对任何细节增加切片,所以 没有错误。对切片后各算法的实验结果进行分析,文 中算法出现错误切片的地方主要是由于阈值的设置 使人眼不敏感的微小凹陷或突起处增加了切片数量, 因此在实际切片时要根据需要设置阈值。柯映林法 和Zhong S.法切片主要依赖于采集到的点云密度,当 细节处点云稀疏时常常漏检,而对于平滑区域如果采 集到的点云密度比较大时,会错误地增加切片层。

3 结语

文中算法能够在给定的形状误差范围内实现点 云的不等厚切片,实施简单有效,反距离加权法比求 交法和投影法在构建切片数据时更合理有效。采用 极坐标能够简化点云的曲线拟合过程,直接根据点的 极坐标值就能完成曲线的重建,大大减少了计算量, 使切片过程实现了自动化,也不需进行大量的比较运 算,减少了人机交互操作,实现了点云自适应切片的 自动化。由于文中算法是基于物体表面变化的算法, 除了可以使用切片重构曲面模型外,通过设置不同的 阈值还可以用来检测物体的表面变化。

参考文献:

- 孙文涛,董斌.产品设计中逆向工程技术应用研究[J].包装工程,2014,35(12):80—83.
 SUN Wen-tao, DONG Bin. The Reverse Engineering Applied in Crafts Design[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(12): 80—83.
- [2] CURTIS S K, HARSTON S P, MATTSON C A. The Fundamentals of Barriers to Reverse Engineering and Their Implementation into Mechanical Components[J]. Research in Engineering Design, 2011, 22(4):245-261.
- [3] 杨红娟,陈继文,周以齐.逆向工程中约束驱动数据点云曲面特征优化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2010,22
 (5):811-816.

YANG Hong-juan, CHEN Ji-wen, ZHOU Yi-qi. Constraint Driven Optimization of Surface Features from Point Cloud in Reverse Engineering[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(5):811-816.

- [4] SAREEN K K, KNOPF G K, CANAS R. Hierarchical Data Clustering Approach for Segmenting Colored Three-dimensional Point Clouds of Building Interiors[J]. Optical Engineering, 2011, 50(7): 1—11.
- [5] 郑顺义,王晓南,马电.一种便捷式小型物体三维重建方法
 [J]. 武汉大学学报(信息科学版),2015,40(2):147—152.
 ZHENG Shun-yi, WANG Xiao-nan, MA Dian. A Convenient
 3D Reconstruction Method of Small Objects[J]. Geomatics and
 Information Science of Wuhan University, 2015,40(2):147—152.
- [6] 许烨璋,王鑫森,郑德华,等.一种改进的RANSAC算法提 取多模型圆弧特征点云[J]. 测绘工程,2015,24(1):28— 32.

XU Ye-zhang, WANG Xin-sen, ZHENG De-hua, et al. An Improved Algorithm of RANSAC to Extract Feature Point Cloud of Multi-model Arc[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2015, 24(1):28-32.

- [7] 陈璋雯,达飞鹏. 基于模糊熵迭代的三维点云精简算法[J]. 光学学报,2013,33(8):161—167.
 CHEN Zhang-wen, DA Fei-peng. 3D Point Cloud Simplification Algorithm Based on Fuzzy Entropy Iteration[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8):161—167.
- [8] 程效军,方芳. 基于形态学的散乱点云轮廓特征线提取[J].
 同济大学学报(自然科学版),2014,42(11):1738—1743.
 CHENG Xiao-jun, FANG Fang. Morphology-based Scattered Point Cloud Contour Extraction[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2014,42(11):1738—1743.
- [9] 刘星,周晓江.工业设计在三维打印时代面临的发展变化
 [J].包装工程,2011,32(12):104—107.
 LIU Xing, ZHOU Xiao-jiang. Change and Development of In (下转第 177页)

.....

参考文献:

- LIN X, WETZSTEIN G, LIU Y, et al. Dual-coded Compressive Hyperspectral Imaging[J]. Optics letters, 2014, 39 (7): 2044-2047.
- [2] FARBER V, YITZHAK A, ADRIAN S. Super-resolution Compressive Imaging with Anamorphic Optics[J]. Optics Express, 2013, 21(22):25851-25863.
- [3] JIA Ying-biao, FENG Yan, WANG Zhong-liang. Reconstructing Hyperspectral Images from Compressive Sensors via Exploiting Multiple Priors[J]. Spectroscopy Letters, 2015, 48 (1):22-26.
- [4] LIN X, LIU Y, WU J, et al. Spatial-spectral Encoded Compressive Hyperspectral Imaging[J]. ACM Transactions on Graphics(TOG), 2014, 33(6):233-235.
- [5] SALARIAN M, NADERNEJAD E, NAIMI H M. A New Modified Fast Fractal Image Compression Algorithm[J]. Imaging Science Journal, 2013, 61(2):219-231.
- [6] ZHANG Y, WANG X Y. Fractal Compression Coding Based on Wavelet Transform with Diamond Search[J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2012, 13(1):106—112.
- [7] JAFERZADEH K, KIANI K, MOZAFFARI S. Acceleration of Fractal Image Compression Using Fuzzy Clustering and Discrete Cosine Transform Based Metric[J]. IET Image Processing, 2012, 6(7): 1024–1030.
- [8] YITZHAK A, ADRIAN S. Compressive Sensing Spectrometry Based on Liquid Crystal Devices[J]. Optics Letters, 2013, 38

(23):4996-4999.

- [9] IN J, YANG B, LIANG K, et al. General Image Denoising Framework Based on Compressive Sensing Theory[J]. Computers & Graphics, 2014, 38:382—391.
- [10] XU Guang-wu, XU Zhi-qiang. Compressed Sensing Matrices from Fourier Matrices[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(1):469-478.
- [11] MA C, CAO X, TONG X, et al. Acquisition of High Spatial and Spectral Resolution Video with a Hybrid Camera System
 [J]. International Journal of Computer Vision, 2014, 110(2): 141-155.
- [12] FOWLER J E. Compressive Pushbroom and Whiskbroom Sensing for Hyperspectral Remote-sensing Imaging[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing(ICIP), 2014:684—688.
- [13] JIN Tan, MA Yan-ting, BARON D. Compressive Imaging via Approximate Message Passing with Image Denoising[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(8): 2085—2092.
- [14] LI Qun, SCHONFELD D, FRIEDLAND S. Generalized Tensor Compressive Sensing[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), 2013: 1-6.
- [15] BAIG M Y, LAI E M, PUNCHIHEWA A. Compressed Sensing Based Distributed Image Compression[J]. Applied Sciences, 2014, 4(2): 128—147.

(上接第171页)

dustrial Design in Three-dimensional Printing Era[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(12): 104—107.

- [10] SANZ-IZQUIERDO B, PARKER E A. 3D Printing Technique for Fabrication of Frequency Selective Structures for Built Environment[J]. Electronics Letters, 2013, 49 (18) : 1117-1118.
- [11] 柯映林,王青.反求工程中的点云切片算法研究[J]. 计算机 辅助设计与图形学学报,2005(8):1798—1802.
 KE Ying-lin, WANG Qing. Research on Point Cloud Slicing Technique in Reverse Engineering[J]. Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics, 2005(8):1798— 1802.
- [12] ZHONG Shan, YANG Yong-qiang, HUANGYan-lu. Data Slicing Processing Method for RE/RP System Based on Spatial Point Cloud Data[J]. Computer-aided Design and Applications, 2013, 11(1):20-31.
- [13] PARK H T, CHANG M H, PARK S C. A Slicing Algorithm of Point Cloud for Rapid Prototyping[C]// Proceeding of the 2007 Summer Computer Simulation Conference.San Diego, 2007: 16—19.

- [14] 柯映林,王青.反求工程中的点云切片算法研究[J]. 计算机 辅助设计与图形学学报,2005,17(8):1798—1802.
 KE Yin-lin, WANG Qing. Research on Point Cloud Slicing Technique in Reverse Engineering[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(8):1798— 1802.
- [15] 张胜文,张洪刚,方喜峰,等. 基于切片技术的点云数据预处理研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2009,23 (5):403—406.

ZHANG Sheng-wen, ZHANG Hong-gang, FANG Xi-feng, et al.Research on Data Pre-processing with Point Cloud Slicing Technique[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 23(5): 403– 406.

[16] 薛树强,杨元喜. 广义反距离加权空间推估法[J]. 武汉大学 学报(信息科学版),2013(12):1435—1439.

XUE Shu-qiang, YANG Yuan-xi. Generalizad Inverse Distance Weighting Method for Spatial Interpolation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013(12): 1435—1439.