

Research on Mesh Model Reconstruction for One Station Terrestrial Laser Scanning Point Cloud

Shan Gao¹, Yi Zhu¹, Zhengpeng Zhang²

¹Center of E-Government, Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing

²Country School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin

Email: ggsskkll@126.com

Received: Oct. 12th, 2011; revised: Oct. 29th, 2011; accepted: Nov. 12th, 2011.

Abstract: This paper focuses on the method of constructing model with point clouds. It introduces the method of the based on the spherical projection algorithm and the based on spatial triangle algorithm. Firstly analyzed laser scanning data collection principle and basic characteristics of data. By exploring the merit and demerit of above two kinds of methods, and considering the features of the single stand ground laser scanning point cloud, specifically introduce the spatial triangle mesh growth model. Firstly this algorithm makes the point cloud data onto a sphere with central projection, making the mesh on the sphere to ensure the correct adjacency relations between the points; then according to the space Delaunay analyzed, making four limiting conditions to choose point and constitute mesh. Finally, using the VBA development to realize the establishment.

Keywords: Laser Scanning; Spatial Triangle Mesh; Modeling; Point Cloud

单景扫描点云数据网模型的构建方法研究

高珊¹, 朱翊¹, 张正鹏²

¹中国测绘科学研究院, 北京

²辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新

Email: ggsskkll@126.com

收稿日期: 2011年10月12日; 修回日期: 2011年10月29日; 录用日期: 2011年11月12日

摘要: 本文主要对点云数据网模型的构建方法进行研究, 探讨点云数据构网的方法——基于球面投影构网算法以及基于空间三角的构网算法。本文首先分析了激光扫描数据的采集原理和数据基本特点, 通过研究以上两种构网方法的优势与不足, 考虑到单站地面激光扫描点云数据的特点, 具体给出了空间三角网生长算法的模型并应用于实践。该算法首先利用中心投影的方式将单站激光扫描点云数据投影到一个球面上, 在球面上进行构网, 这样保证了点之间的正确邻接关系; 然后根据空间 Delaunay 构网条件, 制定了四个限制条件来进行选点构网; 最后在 AUTOCAD 平台下结合 VBA 语言, 以具体雕像为例, 实现了空间三角网模型建立。

关键词: 激光扫描; 空间三角网; 建模; 点云

1. 引言

三维激光扫描测量技术是最近发展迅速的一种新技术, 已成为空间数据获取的一种重要技术手段, 特别是机载激光扫描系统发展得很快, 如瑞典的 ToPEye 机载系统等都已经用于快速获取大面积三维地形数据^[1]。基于地面的三维激光扫描系统可用于城市三维重

建和局部区域空间信息获取, 目前正引起广泛的关注。三维激光扫描技术能够在短时间内快速获取目标表面精确而密集的点集, 是一种高效的数据获取模式, 在很多领域都得到了应用。而实际应用中由于处理的需要, 例如: 可视化、数据简化等, 都需要将这些离散点进行三角化构成三角网。目前有多款软件可以进行

三角网模型的建立,其中瑞士徕卡三维激光扫描软件 Cyclone 是最常用的软件之一。但是 Cyclone 软件的三维建模功能有些不足。有时会出现一个点与多点相连。而且拼接处会出现裂缝和狭长三角形,造成三角网的不连续。所以本文对单景点云数据网模型构建方法进行了研究。

2. 激光扫描点云数据的预处理

2.1. 三维激光数据获取

1) 利用三维激光扫描仪获取点云数据,首先进行设站:

在对实体建筑进行数据获取时,可设三站,正面设一站,然后每隔 120°设一站,这样就能够扫描到整个建筑的表面,使得数据完整。

2) 站点与实际物体的距离要控制在 50 到 100 米之间;

因为若距离太远,扫描得到的点太少,不利于模型的构建,若距离太近又不能保证建筑物整体表面全部扫描到,既无法保证数据的完整性。

3) 进行布设控制点;

布设控制点必须遵循一条原则就是控制点所设的位置必须使三维激光扫描仪每两站扫描到的控制点至少要有三个是相同的^[2]。

在以上准备工作做完后,接下来就进行扫描过程,将仪器架设在第一站上,进行数据连接,区域设置,参数设置,开启扫描空间,完成扫描。获取完一个站点的数据后再将仪器转到下一个站点进行同样步骤来获取数据。如图 1,为扫描后在 Cyclone 软件下获得的原始点云。

2.2. 数据的加工与处理

1) 相邻扫描站的拼接

由于一幅扫描点云图无法获取实际物体的全貌,而不同扫描站获得的点云分别采用其各自的局部坐标系。因此需要将它们配准到一个统一坐标系下,来完成图像的拼接。

2) 数据的去噪处理

在数据采集由于采用密集的采样方式,所测量得到的点云数据可达到几十万到几百万个点;另一方面,由于测量采用光学原理,受光照条件、传感器的

噪声等影响,测量数据中会存在着大量无用的数据,即所谓的“噪声”点,这些数据的存在对曲面重构是十分有害的,应将其剔除^[3]。

3) 数据的过滤处理

即进行数据的重采样过程。对于高密度“点云”,由于存在大量的冗余数据不仅会使计算量加大,而且还会影响到曲面的光顺性,所以需要按一定要求减少测量点的数量。

4) 点云图像的导出

本文是在 AUTOCAD 下进行 VBA 开发来实现三角网模型的构建,所以要将 Cyclone 软件生成的 .imp 文件导出并转化成 .dwg 或 .dxf 格式。如图 2,为导出转换成 .dxf 格式的铜像头部图像。

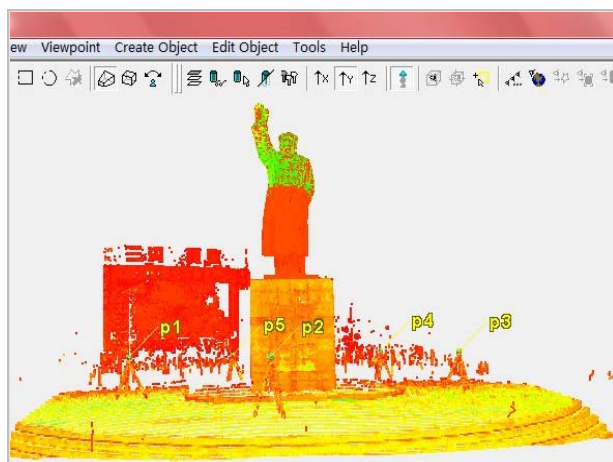


Figure 1. The original point cloud
图 1. 原始点云

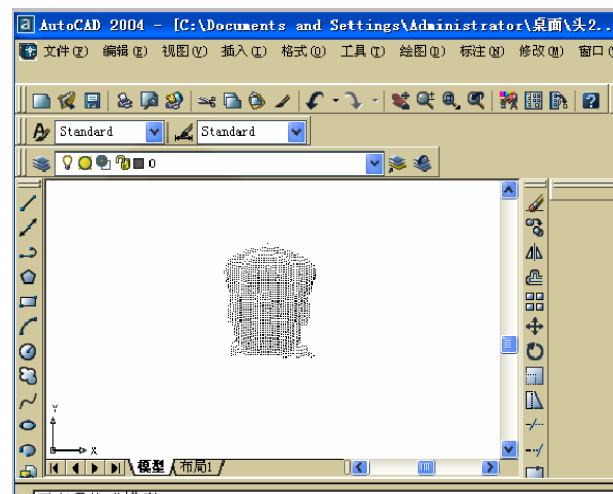


Figure 2. Export image
图 2. 导出图像

3. 基于点云数据的数据网模型

3.1. 基于球面投影构网

1) 定义投影球面: 地面激光扫描仪采用扫描仪的设备坐标系记录数据点的坐标, 其原点为扫描头的发射中心点, 因此本文将以原点为球心, 然后在点云中随机抽取若干点, 并计算它们与原点的平均距离作为投影球面半径, 从而定义投影球面^[4]。

2) 构建初始三角网: 如图 3, 点 A~F 为坐标系的 3 个坐标轴与投影球面的 6 个交点, 按逆时针方向连接相邻交点, 分别构成 8 个三角形 $\triangle ABE$, $\triangle BCE$, $\triangle CDE$, $\triangle DAE$, $\triangle BAF$, $\triangle CBF$, $\triangle DCF$, $\triangle ADF$, 这些等边三角形无缝、无重叠的连接, 构成了一个闭合的球面 Delaunay 三角网, 将该三角网作为初始三角网^[2]。

3) 逐点插入构网: 将某点 P 插入三角网过程为: 首先搜索包含点 P 的三角形, 如图 4, 若以 $\triangle DEF$ 为起点搜索点 P 所在的三角形, 判断点 P 是否在 $\triangle DEF$ 即判断 P 是否在 $\triangle DEF$ 每条边的正方向上。连接 OD 与 OE 构成三角形 $\triangle DEO$, 点 P 与 $\triangle DEO$ 的位置关系即为点 P 与线段 DE 的位置关系, 以三棱柱 P-DEO 的体积(见公式(1))的正负来判断点 P 与线段 DE 的位置关系:

$$V_{D-ABC} = (1/6) \cdot \begin{vmatrix} x_D - x_A & y_D - x_A & z_D - z_A \\ x_D - x_B & y_D - x_B & z_D - z_B \\ x_D - x_C & y_D - x_C & z_D - z_C \end{vmatrix} \quad (1)$$

如果 V 的符号为正, 则点 P 在线段 DE 法向量的正方向上, 如果 V 的符号为负则点 P 位于线段 DE 法向量的负方向, 如果 V 等于零, 则 P 位于 $\triangle DEO$ 所在的平面上。如 P 在有向边 DE 的负方向上则以包含边 DE 的相邻三角形 $\triangle DGE$ 为起点继续搜索。那么搜索将按照箭头所指的方向很快就能找到点 P 所在的三角形 $\triangle ABC$ 。然后删除 $\triangle ABC$, 连接点 P 与 $\triangle ABC$ 的三个顶点, 形成三个新的三角形 $\triangle PAB$, $\triangle PBC$ 和 $\triangle PAC$ 。

4) 对这 3 个新三角形和其相邻的三角形用球面 LOP 算法局部优化三角网, 主要思想: 判断以三角网内任何一个三角形的外接圆为底的较小球冠上不包含第四点, 若不含则新生成的三角形为最优。结合前文点与三角形位置关系的讨论, 判断以一个三角形外接圆为底的较小球冠上是否包含某点可简化为判断该点是否在这个三角形法向量的正方向上, 可以利用公式 (1)。循环上述步骤直到所有点都处理完毕。

5) 数据点反投影: 构网结束后, 需要将点与点之间的连接关系进行记录保存, 然后将投影点保持构网关系反投影回原始位置并对三角网进行拼接。

3.2. 基于空间三角的构网

1) 首先任意取一点为初始三角形的第一个顶点, 在其他点中找与此点空间距离最近的点作为初始三角形的第二个点^[5]。然后利用三角形边角关系: $c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos c$ 在其余点中找出 C 角最大的点作为第一个三角形的最后一个顶点。式中 c 为 AB 边长, a 为 BC 边长, b 为 AC 边长, C 角为 AB 边对着的三角形内角。

2) 接下来对第 i (1~n)号三角形的第 j (1~3)条边(如图 5 中的边 AB, 第三个顶点为 C, 待扩展点为 E, 当前总的三角形个数为 n)进行扩展。

如图 5 中 CD 为三角形 ABC 的高, 垂直于边 AB, 平面 P 将空间分为三部分: C 点同侧, C 点异侧。平面 P 上, 待扩展点必须在 C 点异侧, 判断同异侧方法:

$$A(x_a, y_a, z_a), B(x_b, y_b, z_b), C(x_c, y_c, z_c)$$

$$\text{设: } T = (AB + BC + AC) / 2$$

由海伦公式得:

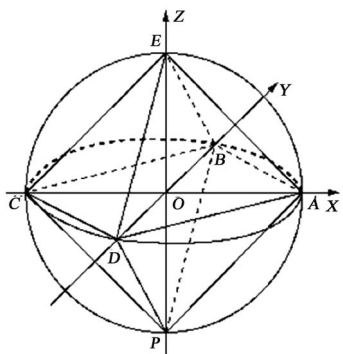


Figure 3. Projective sphere and initial TIN
图 3. 投影球面和初始三角网

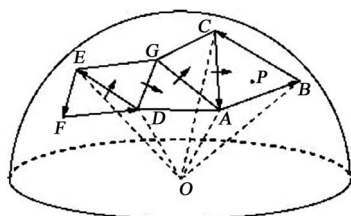


Figure 4. Searching for the triangle including the point on sphere
图 4. 球面上搜索点所在的三角形

$$S_{ABC} = \sqrt{T(T-AB)(T-BC)(T-AC)} = (AB \cdot CD)/2$$

可得: $CD = 2 \cdot S_{ABC} / AB$ 且 $AD = \sqrt{AC^2 - CD^2}$

所以:

$$D(x, y, z) = \begin{cases} x_D = x_A + AD(x_B - x_A)/AB \\ y_D = y_A + AD(y_B - y_A)/AB \\ z_D = z_A + AD(z_B - z_A)/AB \end{cases}$$

$$CD = \begin{cases} x = x_C - x_D \\ y = y_C - y_D \\ z = z_C - z_D \end{cases}$$

CD 既为 P 平面法向量 (x, y, z) 将 C, E (待扩扩站
点, 任取)坐标代入公式:

$$F(x, y, z) = x \cdot (x - x_A) + y \cdot (y - y_A) + z \cdot (z - z_A) \quad (2)$$

其中 (x, y, z) 为平面 P 法向量。

$$\text{显然: } F(x, y, z) = \begin{cases} > 0 & \text{观测点与点C同侧} \\ = 0 & \text{观测点位于P平面上} \\ < 0 & \text{观测点位于C点异侧} \end{cases}$$

遍历所有待定点, 对于点 E , 如果 AE 或者 BE 已经存在于两个三角形内, 则不考虑该点。否则根据上面的 F 值将点分为三个区域, 并且舍去 $F > 0$ 的点。然后由三角形边角关系式求出对 A, B 两点的张角。张角最大的点就是扩展的点。如图 5, 点 E 就符合上诉条件, 因此连接 AE 和 BE , 形成新的三角形。如果不存在这样的点, 那么忽略该边的扩展。循环上述步骤直到所有边扩展完毕则构网完成。

3.3. 改进算法设计

下面对基于空间三角的构网方法提出可行的改进方案:

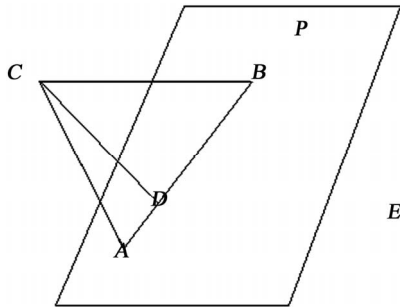


Figure 5. Triangle plane and vertical plane
图 5. 三角形平面与垂直面图

1) 点云没有经过球面投影, 造成空间内三角形的邻接关系无法正确判断。因此可以将上述球面投影的方法引进过来, 解决此问题。即首先对单站点云数据进行球面投影。

2) 对于基准边应该加上一个约束条件: 用于扩展的基准边只能够扩展一次, 既一条边只能被两个三角形共用。方法是在运用基准边时, 先在存储了已用基准边的数组中查找是否存在待扩展的基准边, 从而判断边是否只扩展了一次。

3) 在寻找扩展点这一步中, 虽然算法提出先寻找基准边所在三角形的另一顶点的异侧点, 再在异侧点这个范围内找寻角度最大的点来确认待扩展点, 但是所找寻的待定点并不是就满足这两个条件就可以的, 还要满足待扩展点与基准边两点所生成的两条边不与已形成三角形相交, 否则构成的新三角形就会与已构成的三角形造成叠加, 导致三角网的不连续性。所以要在寻找待扩展点的条件中加上上诉这个条件, 使得最终获得的三角网效果更佳。具体采用的判定方法如下:

如图 6, 以 AB 为基准边来扩展下一点时, 选取 C 点的异侧点, 然后在异侧点中如果恰巧 $\angle EAB$ 最大, 那么按照上面的算法就要将待扩展点选为点 E , 这样就造成 $\triangle ABE$ 和 $\triangle ABC$ 的叠加, 所以就要排除这样不合理的点。这样每选中一个扩展点就要判断它所生成的两条新边与已有三角形的边是否相交。因此问题就转化成了判断两线段是否相交。例如判断边 AE 与 CD 是否相交就先求两线段所在直线的交点, 然后用交点的 x, y 坐标值与两线段的最大最小 x, y 坐标值作比较, 如果交点的 x, y 值同时在两条线段的最大最小值之间则证明交点在两条线段上, 即两条线段相交。所以新生成的边与原有三角形的边相交, 那么此点舍去。将

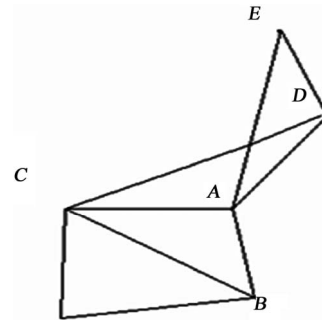


Figure 6. Extension edge schematic
图 6. 扩展边示意图

此条件加进选点的约束条件之中，这样就可以完善此算法，使利用此算法所构建的三角网更加合理。

改进后算法实现流程图如图 7。

4. 基于单景点云的空间三角网实现

4.1. 实现过程

1) 首先，创建窗体，方便选择待构网的图层，以及处理后图层的存储处。将所有图层添加到窗体组合框，同时返回选中的待处理图层名。

2) 将待处理图层中的所有离散点的三维坐标记录到数组 ElvPn()中，以便于以后的使用，并定义初始球面，确定半径以及原点。主要代码如下：

```

For Each element In PntSet
    tempPnt = element.Coordinates
    ElvPnt(intNode-1).note = intNod
    intNode = intNode + 1

```

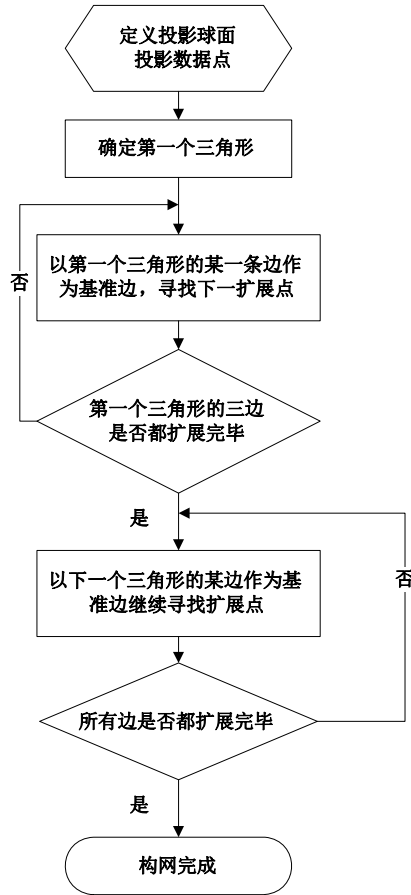


Figure 7. Flowchart
图 7. 流程图

```

Next
r = (MathCal.Ldjl(py, ElvPnt(0)) + MathCal.Ldjl(py, ElvPnt(5) ...)/7

```

3) 求出各点在球面上的投影坐标。存到数组 tydset()中。主要代码如下：

```

For i = 0 To intPNum - 1
    tydset(i).note = MathCal.tydzb(ElvPnt(i), r).not...'调用了求投影点坐标的函数

```

4) 构建第一个三角形，选择 tydset()数组中第一个元素作为初始三角形的第一个顶点，然后寻找与第一个点空间距离最近的点作为初始三角形的第二个点，主要代码如下：

```

For i = 1 To count
    If min > MathCal.Ldjl(tydset(0), tydset(i))
Then '调用的是求两点的距离函数 Ldjl()

```

同时记录该点在数组中的下标值

5) 取与第一个点和第二个点形成的角度最大的点作为初始三角形的第三个点，然后将第一个三角形存储到数组 tri()中，形成的三条边存储到 zbianset()数组中。主要代码如下：

```

ppc(j).cos = (a ^ 2 + b ^ 2 - c ^ 2) / (2 * a * b) '求角的 cos 值
If min > ppx(i).cos Then
    'cos 值最小的点为角度最大的点
    min = ppc(i).cos
    tri(0).a = tydset(0).note ... zbianset(2).sd = tri(0).a:
    zbianset(2).md = tri(0).c...

```

6) 以单个三角形作为循环单位，依次将三边作为基准边来进行扩展。以三角形的其中一边作为基准边进行扩展，判断该边是否扩展过，然后寻找该边所对三角形顶点的异侧点，作为扩展点的一个约束条件，主要代码如下：

```

If zbianset(s).sd = d And zbianset(s).md = e Then
    s = s + 1...'判断基准边是否扩展过
    f = m * (pe.x - pa.x) + n * (pe.y - pa.y) + g * (pe.z - pa.z)
If f > 0 Then ycd = False
'两点是同侧的

```

```
Else                ycd = True
```

```
'两点异侧
```

```
End If
```

7) 同时扩展点所生成的两条新边还不能与已形成三角形相交, 所以要与形成三角形的所有边进行判断, 来确定是否可以作为待扩展点, 主要代码如下:

```
kya=MathCal.SegmtIntersect(tydset(yi),tydset(er),tydset(i),tydset(d-1))
```

```
kyb=MathCal.SegmtIntersect(tydset(yi),tydset (er),tydset (i),tydset (e-1))
```

```
If kya = 0 And kyb = 0 Then
```

ky = True 'ky 就是判断待扩展点 i 所新生成的两条边是否与其他边相交的变量

8) 在所有符合上述两个条件的点中找到角度最大的点, 确定为下一扩展点。并将新生成的三角形和三边存储到数组 tri()和 zbianset()数组中。然后依次对三角形的其它两边做同样的处理, 分别找到合适的扩展点, 形成新的三角形。然后对下一个三角形进行同样的扩展, 从而形成最终的三角网。下面是判定所有三角形是否已扩展完毕的代码:

当符合下面这个条件时就没有三角形能够扩展了, 即构网完成。

```
If tri(n).a = 0 And tri(n).b = 0 And tri(n).c = 0 Then
```

```
Exit For
```

```
End If
```

9) 将扩展生成的每一个三角形的三个顶点的点号存储到了 tri()数组中后, 下面进行程序的最后一项, 绘制三角网。主要代码如下:

```
For i = 0 To intCount
```

```
intFPnt = tri(i).a...:dblTriangle(0) = ElvPnt(intFPnt - 1).x...
```

```
Set pPolyLine = ThisDrawing.ModelSpace.
```

```
Add3DPoly(dblTriangle)
```

```
pPolyLine.Closed = True
```

```
Next
```

10) 由三角网生成三维面实体, 主要代码如下:

```
DEMVirtual.LineToFace objTinLayer, tri, ElvPnt
```

```
Set objTinFace = ThisDrawing.ModelSpace.
```

```
Add3DFace(dblFPnt, dblSPnt, dblTPnt, dblFPnt)
```

最终成果如图 8。

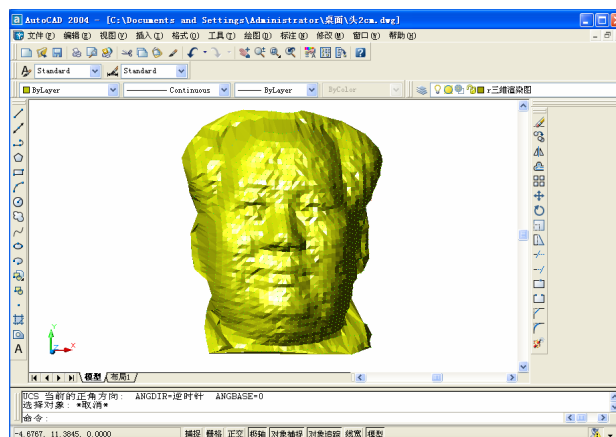


Figure 8. Results figure

图 8. 成果图

5. 结论

本文主要根据获得的三维激光扫描数据, 依据数据本身的特点, 重点探讨建立空间表面模型的基本方法以及实际应用。主要讨论了两种建模方法: 基于球面投影构网方法以及基于空间三角算法的构网方法。通过研究以上两种构网方法的优势与不足, 考虑到单站地面激光扫描点云数据的特点, 具体给出了改进后空间三角网生长算法的模型。该算法只适合于简单数据的构网, 而且形成的三角网局部地区可能会出现三角形的叠加问题, 也可能出现狭长三角形, 并不能保证所有的三角形都符合 Delaunay 准则, 所以需要对待选点的约束条件进一步完善。

6. 致谢

在此, 非常感谢我的导师朱翊老师的在论文构思和书写过程中给予的指导与帮助。同时也感谢张正鹏老师在算法等方面给予我的指导帮助。

参考文献 (References)

- [1] 郑顺义, 苏国中等. 三维点集的自动表面重构算法[J]. 武汉大学学报, 2005, 49(2): 154-157.
- [2] 刘鑫, 严建华等. 基于 3D 栅格的点云三角网格模型重构研究[J]. 上海大学学报, 2003, 9(3): 17-23.
- [3] 李清泉, 杨必胜等. 三维空间数据的实时获取、建模与可视化[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [4] 张帆, 黄先锋等. 基于球面投影的单站地面激光扫描点云构网方法[J]. 测绘学报, 2009, 38(1): 48-54.
- [5] 刘学, 张弘. 基于三维激光扫描数据的构筑物三角构网模型[J]. 测绘科学, 2008, 33(1): 168-169.