



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104036544 A

(43) 申请公布日 2014. 09. 10

(21) 申请号 201410293086. 1

(22) 申请日 2014. 06. 25

(71) 申请人 西安煤航信息产业有限公司
地址 710054 陕西省西安市长胜街 78 号

(72) 发明人 彭桂辉 段梦琦 杨培义 宋袁龙

(74) 专利代理机构 西安创知专利事务所 61213
代理人 谭文琰

(51) Int. Cl.
G06T 17/00(2006. 01)

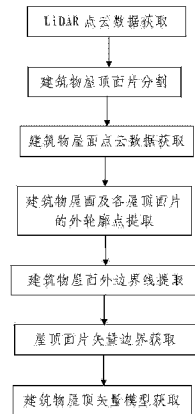
权利要求书7页 说明书23页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法,包括步骤:一、LiDAR 点云数据获取;二、LiDAR 点云数据处理,过程如下:201、建筑物屋顶面片分割,从建筑物屋顶分割出多个屋顶面片;202、建筑物屋面点云数据获取;203、建筑物屋面及各屋顶面片的外轮廓点提取,同时还需提取建筑物屋面的外边界线;204、屋顶面片矢量边界获取,过程如下:建立搜索信息集合、邻域搜索、外轮廓点类别确定和矢量边界确定;205、建筑物屋顶矢量模型获取:多个屋顶面片的矢量边界确定后,便获得建筑物屋顶的矢量模型。本发明方法步骤简单、设计合理且实现方便、使用效果好,能简便、快速且高质量完成建筑物屋顶的重建过程。



1. 一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法,其特征在于该方法包括以下步骤:

步骤一、LiDAR 点云数据获取:采用机载 LiDAR 测量系统获取待测区域的点云数据,并将所获取的点云数据传送至数据处理设备;所述点云数据中包括待测区域内多个建筑物屋顶的点云数据,每个建筑物屋顶的点云数据均包括该建筑物屋顶的多个测点及各测点的三维坐标;

步骤二、LiDAR 点云数据处理:采用所述数据处理设备分别对多个建筑物的点云数据进行处理,并获取各建筑物屋顶的矢量模型;多个建筑物的点云数据处理过程均相同;对待测区域内的任一个建筑物的点云数据进行处理时,过程如下:

步骤 201、建筑物屋顶面片分割:采用区域生长方法对当前所处理建筑物屋顶的点云数据进行处理,从当前所处理建筑物屋顶分割出多个屋顶面片,并获得多个屋顶面片的点云数据;之后,根据各屋顶面片的点云数据,且采用最小二乘法对各屋面面片分别进行平面拟合,获得各屋顶面片所在平面的平面方程;同时,对多个屋顶面片进行编号,并对多个屋顶面片的相邻关系分别进行记录,每个屋顶面片的相邻关系均包括与该屋顶面片相邻的屋顶面片的数量以及各相邻屋顶面片的布置位置;

多个所述屋顶面片均为平面,每个屋顶面片的点云数据均包括位于该屋顶面片上的多个测点及各测点的三维坐标;多个所述屋顶面片的数量为 N' 个, N' 为正整数且 $N' \geq 2$;

步骤 202、建筑物屋面点云数据获取:根据步骤 201 中所记录的多个屋顶面片的相邻关系,将多个屋顶面片的点云数据组合形成当前所处理建筑物屋面的点云数据;

步骤 203、建筑物屋面及各屋顶面片的外轮廓点提取:调用外轮廓点提取模块,从步骤 202 中所获取的当前所处理建筑物屋面的点云数据中提取出当前所处理建筑物屋面的多个外轮廓点,并获得当前所处理建筑物屋面的外轮廓点集合 A' ;同时,分别从步骤 201 中各屋顶面片的点云数据中提取出各屋顶面片的多个外轮廓点,并获得各屋顶面片的外轮廓点集合;

步骤 204、屋顶面片矢量边界获取:结合步骤 201 中多个屋顶面片的点云数据和相邻关系以及步骤 203 中各屋顶面片的外轮廓点集合,获取多个屋顶面片的矢量边界;多个屋顶面片的矢量边界获取方法均相同,对任一个屋顶面片 S_i 的矢量边界进行获取时,过程如下:

步骤 2041、建立搜索信息集合:将多个所述屋顶面片中除屋顶面片 $S'_{i'}$ 之外的 $N'-1$ 个屋顶面片的点云数据,组合成搜索信息集合 $J_{i'}$;搜索信息集合 $J_{i'}$ 中包括 $N'-1$ 个子集合, $N'-1$ 个子集合分别为 $N'-1$ 个屋顶面片的点云数据;其中, i' 为屋顶面片的编号, i' 为正整数且 $i' = 1, 2, \dots, N'$;

步骤 2042、邻域搜索:对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中的各外轮廓点分别进行邻域搜索,获得屋顶面片 $S'_{i'}$ 的邻域搜索信息,所述邻域搜索信息中包括屋顶面片 $S'_{i'}$ 的所有外轮廓点的邻域搜索点及各邻域搜索点的三维坐标;

对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中任一个外轮廓点 $C_{i',j'}$ 进行邻域搜索时,从步骤 201 中所建立的搜索信息集合 $S'_{i'}$ 中找出与外轮廓点 $C_{i',j'}$ 距离最近的测点,所找出的测点为外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的邻域搜索点,记作 $C'_{i',j'}$;

其中, j' 为正整数且 $j' = 1, 2, \dots, M'$, M' 为屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中外轮廓

点的总数量；

步骤 2043、外轮廓点类别确定：先根据屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中各外轮廓点的三维坐标，沿逆时针方向或顺时针方向，由先至后对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中的所有外轮廓点由先至后进行排序，再按照排序结果，由先至后对所述外轮廓点集合中各外轮廓点的邻域搜索点进行处理，并得出各外轮廓点的类别，过程如下：

步骤 I、邻域搜索点所属屋顶面片编号确定：根据步骤 2041 中 $N'-1$ 个所述子集合，判断邻域搜索点 $C'_{i'j'}$ 所属的子集合；并根据所属的子集合，确定邻域搜索点 $C'_{i'j'}$ 所属的屋顶面片，记录邻域搜索点 $C'_{i'j'}$ 所属屋顶面片的编号 k' ， k' 为正整数， $k' = 1、2、\dots、N'$ 且 $k' \neq i'$ ；

步骤 II、外轮廓点类别确定：根据当前所处理建筑物屋面的外轮廓点集合 A' ，判断外轮廓点 $C_{i'j'}$ 是否属于外轮廓点集合 A' ；当外轮廓点 $C_{i'j'}$ 属于外轮廓点集合 A' 时，外轮廓点 $C_{i'j'}$ 的类别为外边界线且其类别编号为 U ；否则，根据外轮廓点 $C_{i'j'}$ 和邻域搜索点 $C'_{i'j'}$ 的三维坐标，得出外轮廓点 $C_{i'j'}$ 和邻域搜索点 $C'_{i'j'}$ 的高程差 Δh_{ij} ；当 $\Delta h_{ij} \leq \Delta h_0$ 时，外轮廓点 $C_{i'j'}$ 的类别为屋脊线且其类别编号记作 $T_{k'}$ ；当 $\Delta h_{ij} > \Delta h_0$ 时，外轮廓点 $C_{i'j'}$ 的类别为阶跃线且其类别编号记作 $W_{k'}$ ；其中， $\Delta h_0 = 0.2m \sim 0.4m$ ；

步骤 III、按照步骤 I 至步骤 II 中所述的方法，对下一个外轮廓点的类别进行确定；

步骤 IV、多次重复步骤 III，直至完成屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中所有外轮廓点的类别确定过程；

步骤 2044、矢量边界确定：根据步骤 2043 中所确定屋顶面片 S_i 的外轮廓点集合中各外轮廓点的类别，并结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中各外轮廓点的三维坐标和步骤 201 中所记录的屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系，对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的矢量边界进行确定；

步骤 2045、多次重复步骤 2041 至步骤 2044，直至完成多个屋顶面片的矢量边界确定过程；

步骤 205、建筑物屋顶矢量模型获取：待步骤 204 中多个屋顶面片的矢量边界确定后，便获得当前所处理建筑物屋顶的矢量模型。

2. 按照权利要求 1 所述的一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法，其特征在于：步骤 201 中进行建筑物屋顶面片分割时，先将当前所处理建筑物屋顶的点云数据构建 kd 树，再从当前所处理建筑物屋顶的点云数据中随机选取一个测点作为种子点，并采用 K 邻近搜索算法搜索出多个邻近点，搜索出的多个邻近点与所述种子点组成邻近点集；之后，计算出所述邻近点集的法向量，并按照计算出的法向量进行区域生长，便分割出一个屋顶面片，且将所分割出的屋顶面片中的所有测点均从当前所处理建筑物屋顶的点云数据中删除；然后，按照对当前所处理建筑物屋顶的点云数据中剩余的点云数据再次进行屋顶面片分割，直至分割出所有屋顶面片；

其中，对所述邻近点集的法向量进行计算时，先对所述邻近点集中所有测点的法向量进行计算；之后，将所述邻近点集中所有测点的法向量叠加后，获得所述邻近点集的法向量；

所述邻近点集中所包含测点的数量为 D' 个， D' 个测点由先至后分别为 C_{1j1} 、 C_{1j2} 、 \dots 、 $C_{1jd'}$ ，其中 C_{1j1} 又记作 $C_{1j(d'+1)}$ ； D' 个测点中任一个测点 $C_{1jd'}$ 的法向量为 $(N_{d'} \cdot X, N_{d'} \cdot Y, N_{d'} \cdot Z)$ ， $N_{d'} \cdot X = (C_{1jd'} \cdot z + C_{1j(d'+1)} \cdot z) \times (C_{1jd'} \cdot y - C_{1j(d'+1)} \cdot y)$ ， $N_{d'} \cdot Y = (C_{1jd'} \cdot x + C_{1j(d'+1)} \cdot x) \times (C_{1jd'} \cdot z - C_{1j(d'+1)} \cdot z)$ ， $N_{d'} \cdot Z = (C_{1jd'} \cdot x - C_{1j(d'+1)} \cdot x) \times (C_{1jd'} \cdot y - C_{1j(d'+1)} \cdot y)$ ；

$z - C_{1j(d'+1)} \cdot z), N_{d'} \cdot Z = (C_{1jd'} \cdot y + C_{1j(d'+1)} \cdot y) \times (C_{1jd'} \cdot x - C_{1j(d'+1)} \cdot x)$; 其中, 测点 $C_{1jd'}$ 的三维坐标为 $(C_{1jd'} \cdot x, C_{1jd'} \cdot y, C_{1jd'} \cdot z)$, 测点 $C_{1j(d'+1)}$ 的三维坐标为 $(C_{1j(d'+1)} \cdot x, C_{1j(d'+1)} \cdot y, C_{1j(d'+1)} \cdot z)$ 。

3. 按照权利要求 1 或 2 所述的一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法, 其特征在于: 步骤 2042 中对外轮廓点 $C_{i'j'}$ 进行邻域搜索时, 以外轮廓点 $C_{i'j'}$ 为中心且以 0.5m ~ 1.5m 为搜索半径进行搜索。

4. 按照权利要求 1 或 2 所述的一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法, 其特征在于: 步骤 204 中进行屋顶面片矢量边界获取之前, 还需根据步骤 203 中所获取的当前所处理建筑物屋面的外轮廓点集合, 调用外边界线提取模块, 提取出当前所处理建筑物屋面的外边界线。

5. 按照权利要求 4 所述的一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法, 其特征在于: 步骤 II 中当 $\Delta h_{ij} > \Delta h_0$ 时, 还需对外轮廓点 $C_{i'j'}$ 和邻域搜索点 $C'_{i'j'}$ 的高程进行比较, 并建立阶跃线类别集合 W_k , 且将外轮廓点 $C_{i'j'}$ 和邻域搜索点 $C'_{i'j'}$ 中高程高的点放入阶跃线类别集合 W_k 中;

步骤 III 中对下一个外轮廓点的类别进行确定时, 当当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点的高程差 $> \Delta h_0$ 时, 还需对当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点的高程进行比较: 当阶跃线类别集合 W_m 已建立时, 将当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点中高程高的点放入集合 W_m 中; 否则, 需建立阶跃线类别集合 W_m , 并将当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点中高程高的点放入集合 W_m 中; 其中, m' 为当前所确定外轮廓点的邻域搜索点所属屋顶面片的编号, m' 为正整数, $m' = 1, 2, \dots, N'$ 且 $m' \neq i'$ 。

6. 按照权利要求 5 所述的一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法, 其特征在于: 步骤 2044 中进行矢量边界确定之前, 还需根据屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中各外轮廓点的三维坐标, 沿逆时针方向或顺时针方向, 由先至后对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中的所有外轮廓点进行排序, 并根据外轮廓点的排序结果, 对步骤 2043 中得出的所有外轮廓点的类别编号进行排序, 获得屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点类别编号序列;

排序完成后, 屋顶面片 $S'_{i'}$ 中相邻两个外轮廓点的类别编号相邻; 所述外轮廓点类别编号序列中, 多个外轮廓点的类别编号由先至后分别记作 $L_{i'1}, L_{i'2}, \dots, L_{i'M}$ 。

7. 按照权利要求 6 所述的一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法, 其特征在于: 步骤 II 中类别编号 T_k 中, T 表示类别为屋脊线, k' 表示在外轮廓点 $C_{i'j'}$ 的位置处屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 k' 的屋顶面片相交;

类别编号记作 W_k 中, W 表示类别为阶跃线, k' 表示在外轮廓点 $C_{i'j'}$ 的位置处屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 k' 的屋顶面片之间形成高低面;

步骤 2044 中进行矢量边界确定时, 由先至后对步骤 2043 中所述外轮廓点类别编号序列中相邻两个类别编号分别进行矢量边界点提取处理, 过程如下:

步骤 i、对类别编号 $L_{i'1}$ 和 $L_{i'2}$ 进行矢量边界点提取处理: 先判断 L_{i1} 和 L_{i2} 是否相同: 当 $L_{i1} = L_{i2}$ 时, 完成矢量边界点提取过程; 否则, 获取与类别编号 $L_{i'1}$ 和 $L_{i'2}$ 对应的矢量边界点, 过程如下:

当 $L_{i'1} = T_g$ 且 $L_{i'2} = T_h$ 时, 先计算出屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 g' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_g 和屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 h' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_h , 再计算出直线段 l_g 和 l_h 的交点 $C_{g'h'}$, 交点 $C_{g'h'}$ 为与类别编号 $L_{i'1}$ 和 $L_{i'2}$ 对应的矢量边界点;

当 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 中一个编号为 T_a 且另一编号为 U 时,先计算出屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 a' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_a ,再结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系,计算出直线段 l_a 与当前所处理建筑物屋面的外边界线之间的交点 C_a, C_a' 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点;

当 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 中一个编号为 W_b 且另一编号为 U 时,先根据阶跃线类别集合 W_b 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_b 中所有点所处的直线 l_b ,再结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系,计算出直线 l_b 与当前所处理建筑物屋面的外边界线之间的交点 C_b, C_b' 位于屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 b' 的屋顶面片的交界线上, C_b' 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点;

当 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 中一个编号为 T_e 且另一编号为 W_f 时,先计算出屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 e' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_e ;同时,根据阶跃线类别集合 W_f 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_f 中所有点所处的直线 l_f ,再结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系,计算出直线段 l_e 与直线 l_f 之间的交点 $C_{e',f}, C_{e',f}'$ 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点;

当 $L_{i',1} = W_p$ 且 $L_{i',2} = W_q$ 时,根据阶跃线类别集合 W_p 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_p 中所有点所处的直线 l_p ;同时,根据阶跃线类别集合 W_q 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_q 中所有点所处的直线 l_q ,再计算出直线 l_p 和 l_q 的交点 $C_{p,q}, C_{p,q}'$ 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点;

其中, g', h', a', b' 和 e' 均为屋顶面片的编号;

步骤 ii、对类别编号 $L_{i',t'}$ 和 $L_{i',(t'+1)}$ 进行矢量边界点提取处理:按照步骤 i 中所述的方法,对类别编号 $L_{i',t'}$ 和 $L_{i',(t'+1)}$ 进行矢量边界点提取处理;其中, t' 为正整数且 $t' = 1, 2, \dots, M'$;其中, $L_{i',1}$ 又记作 $L_{i',(M'+1)}$;

步骤 iii、多次重复步骤 ii,直至完成所述外轮廓点类别编号序列中任意相邻两个类别编号的矢量边界点提取处理过程;

步骤 iv、将步骤 i 至步骤 iii 中所提取的所有矢量边界点,按照提取的先后顺序由先至后连接,获得屋顶面片 $S'_{i'}$ 的矢量边界。

8. 按照权利要求 4 所述的一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法,其特征在于:步骤 203 中所述外轮廓点集合 A' 中包括当前所处理建筑物屋面的多个外轮廓点及各外轮廓点的三维坐标,各屋顶面片的外轮廓点集合中包括该屋顶面片上的多个外轮廓点及各外轮廓点的三维坐标;

步骤 203 中对当前所处理建筑物屋面的外轮廓点进行提取时,从当前所处理建筑物屋面的二维数据集中,提取多个外轮廓点,并形成外轮廓点集合 A'' ;所述外轮廓点集合 A'' 中外轮廓点的数量为 N 个,所述外轮廓点集合 A'' 中包含 N 个外轮廓点的二维数据, N 个所述外轮廓点连接形成当前所处理建筑物屋面的外轮廓线;之后,根据步骤 202 中当前所处理建筑物屋面的点云数据,获取外轮廓点集合 A'' 中各外轮廓点的三维坐标;

当前所处理建筑物屋面的二维数据集包括当前所处理建筑物的点云数据中多个测点在 $X-Y$ 平面直角坐标系上的二维坐标;

步骤 203 中对各屋顶面片的外轮廓点进行提取时,所有屋顶面片的外轮廓点提取方法与当前所处理建筑物屋面的外轮廓点的提取方法相同;其中,对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓

点进行提取时,从屋顶面片 S'_i 的二维数据集中,提取 M' 个外轮廓点,并形成外轮廓点集合 B'' ;所述外轮廓点集合 B'' 中外轮廓点的数量为 M' 个,所述外轮廓点集合 B'' 中包含 M' 个外轮廓点的二维数据;之后,根据步骤 201 中屋顶面片 S'_i 的点云数据,获取外轮廓点集合 B'' 中各外轮廓点的三维坐标;

屋顶面片 S'_i 的二维数据集包括屋顶面片 S'_i 的点云数据中多个测点在 X-Y 平面直角坐标系上的二维坐标;

对当前所处理建筑物屋面的外边界线进行提取时,过程如下:

步骤 2031、特征点提取:采用道格拉斯-普扑克算法对所述外轮廓线进行特征点提取,并从所述外轮廓点集合 A'' 中提取出 S 个特征点, S 个特征点分别记作 S_1 、 S_2 、 \dots 、 S_S ;

步骤 2032、最小二乘法直线拟合及初始边界线获取:对 S 个特征点中相邻两个特征点所在的直线分别进行拟合,并获得 S 条拟合直线; S 条拟合直线相交形成的封闭曲线为当前所处理建筑物的初始边界线,所述初始边界线由多个直线段连接而成;

对 S 个特征点中相邻两个特征点 S_a 和 S_b 进行直线拟合时,先将特征点 S_a 和 S_b 以及步骤 201 中所述外轮廓点集合中特征点 S_a 和 S_b 之间的所有外轮廓点组成直线点集,再利用最小二乘法对所述直线点集进行直线拟合,获得特征点 S_a 和 S_b 所在的拟合直线;其中, a 和 b 均为正整数且 $a \neq b$, $a = 1, 2, \dots, S$, $b = 1, 2, \dots, S$;

步骤 2033、建筑物主方向及副方向确定:先对步骤 2032 中所述初始边界线中的多个直线的方向向量进行确定,再对多个直线的方向向量的权重分别进行计算,并将权重最大的直线的方向向量作为当前所处理建筑物的主方向,将当前所处理建筑物的主方向的正交向量作为当前所处理建筑物的副方向;

步骤 2034、初始边界线规则化:对步骤 2032 中所述初始边界线中的多个直线段分别进行规则化处理;

对所述初始边界线中任一一个直线段进行规则化处理时,过程如下:

步骤 2034-1、规则化方向确定:根据步骤 2033 中所确定的主方向和副方向以及当前所处理直线的方向向量,对当前所处理直线的规则化方向进行确定:当当前所处理直线的方向向量更靠近主方向时,以主方向作为规则化方向;反之,当当前所处理直线的方向向量更靠近副方向时,以副方向作为规则化方向;

步骤 2034-2、是否需进行规则化判断:计算当前所处理直线段在步骤 2034-1 中所确定规则化方向上的投影长度 L ,并根据投影长度 L 对当前所处理直线段是否需进行规则化进行判断:当投影长度 $L \leq L_0$ 时,进入步骤 2034-3;否则,无需进行规则化处理,将当前所处理直线段所在的直线作为其规则化直线;其中, $L_0 = 50\text{cm} \sim 1\text{m}$ 。

步骤 2034-3、规则化处理:以当前所处理直线段的中点为起点,且以步骤 2034-1 中所确定的规则化方向为方向向量,生成当前所处理直线段的规则化直线;

步骤 2035、规则化边界线获取:步骤 2034 中所述初始边界线中的多个直线段均规则化处理完成后,多个直线段的规则化直线相交形成的封闭曲线为当前所处理建筑物的规划化边界线。

9. 按照权利要求 8 所述的一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法,其特征在于:步骤 2031 中采用道格拉斯-普扑克算法对所述外轮廓线进行特征点提取后,所提取的特征点数量为 M 个,其中 M 为正整数且 $M \geq S$; M 个特征点组成特征点集合, S 个特征点分别

记作 S_1, S_2, \dots, S_M , 特征点 S_1 又记作特征点 S_{M+1} ;

特征点提取完成后, 还需对所提取的 M 个特征点分别进行判定; 其中, 对 M 个特征点中任一个特征点 S_h 进行判定时, 判断特征点 S_h 与直线 $S_{h-1}S_{h+1}$ 之间的距离 d_h 是否大于 d_0 : 当 $d_h > d_0$ 时, 在所述特征点集合中保留特征点 S_h ; 否则, 从所述特征点集合中删除特征点 S_h , 并将特征点 S_h 标记为非特征点;

直线 $S_{h-1}S_{h+1}$ 为特征点 S_{h-1} 和 S_{h+1} 所在的直线, 特征点 S_{h-1} 和 S_{h+1} 为与特征点 S_h 相邻的两个特征点; 其中, h 为正整数且 $h = 1, 2, \dots, M$;

对 M 个特征点分别进行判定后, 所述特征点集合中特征点的数量为 S 个。

10. 按照权利要求 8 所述的一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法, 其特征在于: 所述外轮廓点集合 A'' 中的 N 个所述外轮廓点, 分别记作 $A_0, A_1, A_2, \dots, A_{N-1}$;

步骤 203 中对当前所处理建筑物屋面的外轮廓点进行提取时, 过程如下:

步骤 2011、构建 kd 树: 将当前所处理建筑物屋面的点云数据中, 多个测点在 X - Y 平面直角坐标系上的二维坐标构建 kd 树;

步骤 2012、邻域搜索: 利用步骤 2011 中所构建的 kd 树在 X - Y 平面上进行邻域搜索, 找出当前所处理建筑物屋面的所有外轮廓点, X - Y 平面为 X - Y 平面直角坐标系所在的水平面; 邻域搜索过程如下:

步骤 20121、第一次搜索: 以极值点 A_0 作为本次搜索的搜索点 O_1 且以 X 坐标轴的负半轴作为基准向量进行邻域搜索, 并在当前搜索点 O_1 的邻域内找出旋转角度最小的测点, 所找出的测点为第一次搜索出的外轮廓点 A_1 ;

当前搜索点的邻域内任一测点 C_i 的旋转角度为由基准向量逆时针旋转至向量 $\overrightarrow{O_1C_i}$ 的旋转角度; 极值点 A_0 为当前所处理建筑物的点云数据中 X 轴坐标值最大、 X 轴坐标值最小、 Y 轴坐标值最大或 Y 轴坐标值最小的测点;

步骤 20122、第 j 次搜索: 以第 $j-1$ 次搜索出的外轮廓点 A_{j-1} 作为本次搜索的搜索点 O_j 且以向量 $\overrightarrow{A_{j-1}A_{j-2}}$ 为基准向量进行邻域搜索, 并按照步骤 20121 中所述的方法, 在当前搜索点 O_j 的邻域内找出旋转角度最小的测点, 所找出的测点为第 j 次搜索出的外轮廓点 A_j ;

其中, j 为正整数且 $j \geq 2$; 当 $j = 2$ 时, $A_{j-2} = A_0$; 当 $j > 2$ 时, A_{j-2} 为第 $j-2$ 次搜索出的外轮廓点;

步骤 20123、多次重复步骤 20122, 直至搜索出的外轮廓点为 A_0 时, 完成邻域搜索过程;

步骤 2012 中进行邻域搜索过程中, 将极值点 A_0 和各次搜索到的外轮廓点均标记为已用点;

步骤 20123 中, 多次重复步骤 20122 且完成第 n 次搜索后, 获得第 n 次搜索出的外轮廓点 A_n , 并将外轮廓点 A_n 标记为已用点; 之后, 按照步骤 20122 中所述的方法, 将 A_n 作为搜索点, 进行第 $n+1$ 次搜索, 且当第 $n+1$ 次搜索过程中搜索到的外轮廓点为标记的已用点时, 将外轮廓点 A_n 标记为不可用点; 然后, 按照 $A_{n-1}, A_{n-2}, \dots, A_1$ 顺序, 由先至后对标记为有用点的外轮廓点进行回滚搜索, 过程如下:

步骤 I -1、第一次回滚搜索: 对第 $(n-1)$ 次搜索出的外轮廓点 A_{n-1} 进行回滚搜索, 过程如下:

步骤 I -11、第一次邻域搜索: 按照步骤 20121 中所述的方法, 以外轮廓点 A_{n-1} 作为本次

搜索的搜索点 O_{11} 且以向量 $\overline{A_{n-1}A_{n-2}}$ 为基准向量进行邻域搜索；

步骤 I -12、第一次邻域搜索结果处理：步骤 I -11 中搜索完成后，当在当前搜索点 O_{11} 的邻域测点集合 $S'(n-1)$ 中不能找出旋转角度最小的测点时，将外轮廓点 A_{n-1} 标记为不可用点，并进入步骤 II -1，进行下一次回滚搜索；

反之，当在邻域测点集合 $S'(n-1)$ 中找出旋转角度最小的测点时，将所找出的测点作为回滚搜索过程中第一次搜索出的外轮廓点 A_{11} ，且将外轮廓点 A_{11} 标记为已用点，并判断外轮廓点 A_{11} 是否为极值点 A_0 ；当外轮廓点 A_{11} 为极值点 A_0 时，完成回滚搜索过程；否则，进入步骤 I -13，进行下一次邻域搜索；

步骤 2012 中进行邻域搜索过程中，第 $(n-1)$ 次搜索时，当前搜索点 O_{n-1} 的邻域内所有测点组成邻域测点集合 $S(n-1)$ ；所述邻域测点集合 $S(n-1)$ 中的所有未标记的测点组成邻域测点集合 $S'(n-1)$ ；

步骤 I -13、第 k 次邻域搜索：以回滚搜索过程中第 $(k-1)$ 次搜索出的外轮廓点 $A_{1(k-1)}$ 作为本次搜索的搜索点 O_{1k} 且以向量 $\overline{A_{1(k-1)}A_{1(k-2)}}$ 为基准向量进行邻域搜索，并按照步骤 20121 中所述的方法，在当前搜索点 O_{1k} 的邻域内找出旋转角度最小的测点，所找出的测点为回滚搜索过程中第 k 次搜索出的外轮廓点 A_{1k} ；

其中， k 为正整数且 $k \geq 2$ ；当 $k = 2$ 时， $A_{1(k-2)} = O_{11}$ ， $A_{1(k-1)} = A_{11}$ ；当 $j > 2$ 时， $A_{1(k-2)}$ 为回滚搜索过程中第 $(k-2)$ 次搜索出的外轮廓点；

步骤 I -14、第 k 次邻域搜索结果处理：步骤 I -13 中搜索完成后，判断第 k 次搜索出的外轮廓点 A_{1k} 是否为极值点 A_0 ；当外轮廓点 A_{1k} 为极值点 A_0 时，完成回滚搜索过程；否则，返回步骤 I -13，进行下一次邻域搜索；

步骤 II -1、第 h 次回滚搜索：按照步骤 I -1 中所述的方法，对步骤 2012 中第 $(n-h+1)$ 次搜索出的外轮廓点 A_{n-h+1} 进行回滚搜索，直至完成回滚搜索过程；其中， h 为正整数且 $h \geq 2$ ；

步骤 2012 中完成回滚搜索过程后，当前状态下所有标记为已用点的测点组成步骤 201 中所述外轮廓点集合，并且所有标记为已用点的测点总数量为 N 个。

一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种建筑物屋顶建模方法,尤其是涉及一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法。

背景技术

[0002] 三维建筑模型被广泛地应用在城市和区域规划、交通规划、人口估计和预测、污染分析及能量预算等数字城市领域。传统的三维建模方法主要采用摄影测量等测绘手段进行城市建模,需要在立体像对中量测,所提取的三维模型存在精度低、质量差等问题,而且具有劳动强度大、成本高、周期长等缺点。

[0003] 目前基于机载 Lidar 数据的建模技术已经有了长足的发展,通过数据滤波处理分离地面点云,然后针对建筑物点云进行处理获得矢量模型,主要的方法包括模型驱动法和数据驱动法两种。其中,模型驱动法通过对点云数据进行处理后,与事先建立的建筑物模型库进行匹配,将匹配结果最好的模型单元作为建筑物形状进行重建。采用模型驱动法生成的建筑物模型规则化程度较高,并且在数据获取当中由于局部遮挡造成的部分信息损失也能够很好的弥补。例如 Weiner 利用数学形态学方法和数据本身的集合特征从精细 DEM 模型中提取建筑物区域,然后通过模型单元实现对建筑物的重建;Car Nardinocchi 于 2001 年使用房屋结构重建分解了的建筑物形状,通过定义一些常见的长方体、人字体等形状,每个结构的大小可以通过设置参数进行改变,通过真实建筑物点云数据与模型库中形状的匹配重建建筑物模型。但现有模型驱动法的三维重建方法都存在以下问题:

[0004] 第一、模型库不完备:复杂建筑物的建筑物风格难以估计,很难利用模型库种的简单集合模型组合成真正真实的建筑物模型;

[0005] 第二、建筑物本身难以分解:算法针对点云数据类型,很难通过空间的集合分析将复杂建筑物进行分解;

[0006] 第三、模型单元在选择时,参数的匹配难以定性:不同点云数据密度不同,数据库中间模型的形状也存在一定的重复,很难通过参数决定模型单元的选择。

[0007] 数据驱动法是直接对数据进行处理,通过分析建筑物点云数据特征,唯一的确定建筑物形状。数据的类型可能不单包括点云数据,也可能包括其他数据类型。2012 年 06 月 27 日公开的公开号为 CN102521884A 的发明专利申请文件中公开了一种基于 LiDAR 数据与正射影像的 3 维屋顶重建方法,就是利用 lidar 数据与正射影像提取房屋屋脊线从而重建模型的数据驱动法。这种方法一般需要通过分割的方法获取建筑物各个屋顶的面片,并建立起拓扑关系,然后通过面片相交获得屋脊线,最后将建筑物进行重建。例如, Rabbani 等利用平面拟合残差近视平面曲率,将法向量和平面拟合残差作为平滑约束条件进行区域生长;Palenichka 等采用尺度自适应的区域增长算法对 Lidar 距离影像进行多尺度分割。但上述数据驱动法的三维重建方法都存在以下问题:

[0008] 第一、对数据要求复杂:如公开号为 CN102521884A 的发明专利申请文件中所公开的基于 LiDAR 数据与正射影像的 3 维屋顶重建方法,就需要 lidar 点云数据和相对应的正

射影像两种数据,这样就提高了建筑物重建的门坎,正射影像本身存在畸变且不同的数据间匹配处理都会带来一定的误差;

[0009] 第二、当点云密度低、噪声大甚至点云缺失的情况下,无法正确提取特征直线,而造成合并的错误;

[0010] 第三、由于采用面面相交求交点的方法,所以当建筑物为多面(4个或以上)相交于一点时,只能保证三个面的正确性,而其它面在相交点处形成阶跃;

[0011] 第四、过于依赖分割的结果,在合并的过程中抛开了原始点云数据,无法判断错误的分割结果;

[0012] 第五、最终得到的是整个建筑的模型矢量,而不是各平面的模型矢量,因而当拓扑关系出现错误时,矢量模型难以纠正。

发明内容

[0013] 本发明所要解决的技术问题在于针对上述现有技术中的不足,提供一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法,其方法步骤简单、设计合理且实现方便、使用效果好,能简便、快速且高质量完成建筑物屋顶的重建过程。

[0014] 为解决上述技术问题,本发明采用的技术方案是:一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法,其特征在于该方法包括以下步骤:

[0015] 步骤一、LiDAR 点云数据获取:采用机载 LiDAR 测量系统获取待测区域的点云数据,并将所获取的点云数据传送至数据处理设备;所述点云数据中包括待测区域内多个建筑物屋顶的点云数据,每个建筑物屋顶的点云数据均包括该建筑物屋顶的多个测点及各测点的三维坐标;

[0016] 步骤二、LiDAR 点云数据处理:采用所述数据处理设备分别对多个建筑物的点云数据进行处理,并获取各建筑物屋顶的矢量模型;多个建筑物的点云数据处理过程均相同;对待测区域内的任一个建筑物的点云数据进行处理时,过程如下:

[0017] 步骤 201、建筑物屋顶面片分割:采用区域生长方法对当前所处理建筑物屋顶的点云数据进行处理,从当前所处理建筑物屋顶分割出多个屋顶面片,并获得多个屋顶面片的点云数据;之后,根据各屋顶面片的点云数据,且采用最小二乘法对各屋面面片分别进行平面拟合,获得各屋顶面片所在平面的平面方程;同时,对多个屋顶面片进行编号,并对多个屋顶面片的相邻关系分别进行记录,每个屋顶面片的相邻关系均包括与该屋顶面片相邻的屋顶面片的数量以及各相邻屋顶面片的布设位置;

[0018] 多个所述屋顶面片均为平面,每个屋顶面片的点云数据均包括位于该屋顶面上的多个测点及各测点的三维坐标;多个所述屋顶面片的数量为 N' 个, N' 为正整数且 $N' \geq 2$;

[0019] 步骤 202、建筑物屋面点云数据获取:根据步骤 201 中所记录的多个屋顶面片的相邻关系,将多个屋顶面片的点云数据组合形成当前所处理建筑物屋面的点云数据;

[0020] 步骤 203、建筑物屋面及各屋顶面片的外轮廓点提取:调用外轮廓点提取模块,从步骤 202 中所获取的当前所处理建筑物屋面的点云数据中提取出当前所处理建筑物屋面的多个外轮廓点,并获得当前所处理建筑物屋面的外轮廓点集合 A' ;同时,分别从步骤 201 中各屋顶面片的点云数据中提取出各屋顶面片的多个外轮廓点,并获得各屋顶面片的外轮

廓点集合；

[0021] 步骤 204、屋顶面片矢量边界获取：结合步骤 201 中多个屋顶面片的点云数据和相邻关系以及步骤 203 中各屋顶面片的外轮廓点集合，获取多个屋顶面片的矢量边界；多个屋顶面片的矢量边界获取方法均相同，对任一个屋顶面片 S_i 的矢量边界进行获取时，过程如下：

[0022] 步骤 2041、建立搜索信息集合：将多个所述屋顶面片中除屋顶面片 $S'_{i'}$ 之外的 $N'-1$ 个屋顶面片的点云数据，组合成搜索信息集合 $J_{i'}$ ；搜索信息集合 $J_{i'}$ 中包含 $N'-1$ 个子集合， $N'-1$ 个子集合分别为 $N'-1$ 个屋顶面片的点云数据；其中， i' 为屋顶面片的编号， i' 为正整数且 $i' = 1, 2, \dots, N'$ ；

[0023] 步骤 2042、邻域搜索：对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中的各外轮廓点分别进行邻域搜索，获得屋顶面片 $S'_{i'}$ 的邻域搜索信息，所述邻域搜索信息中包括屋顶面片 $S'_{i'}$ 的所有外轮廓点的邻域搜索点及各邻域搜索点的三维坐标；

[0024] 对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中任一个外轮廓点 $C_{i',j'}$ 进行邻域搜索时，从步骤 201 中所建立的搜索信息集合 $S'_{i'}$ 中找出与外轮廓点 $C_{i',j'}$ 距离最近的测点，所找出的测点为外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的邻域搜索点，记作 $C'_{i',j'}$ ；

[0025] 其中， j' 为正整数且 $j' = 1, 2, \dots, M'$ ， M' 为屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中外轮廓点的总数量；

[0026] 步骤 2043、外轮廓点类别确定：先根据屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中各外轮廓点的三维坐标，沿逆时针方向或顺时针方向，由先至后对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中的所有外轮廓点由先至后进行排序，再按照排序结果，由先至后对所述外轮廓点集合中各外轮廓点的邻域搜索点进行处理，并得出各外轮廓点的类别，过程如下：

[0027] 步骤 I、邻域搜索点所属屋顶面片编号确定：根据步骤 2041 中 $N'-1$ 个所述子集合，判断邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 所属的子集合；并根据所属的子集合，确定邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 所属的屋顶面片，记录邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 所属屋顶面片的编号 k' ， k' 为正整数， $k' = 1, 2, \dots, N'$ 且 $k' \neq i'$ ；

[0028] 步骤 II、外轮廓点类别确定：根据当前所处理建筑物屋面的外轮廓点集合 A' ，判断外轮廓点 $C_{i',j'}$ 是否属于外轮廓点集合 A' ；当外轮廓点 $C_{i',j'}$ 属于外轮廓点集合 A' 时，外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的类别为外边界线且其类别编号为 U ；否则，根据外轮廓点 $C_{i',j'}$ 和邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 的三维坐标，得出外轮廓点 $C_{i',j'}$ 和邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 的高程差 Δh_{ij} ；当 $\Delta h_{ij} \leq \Delta h_0$ 时，外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的类别为屋脊线且其类别编号记作 $T_{k'}$ ；当 $\Delta h_{ij} > \Delta h_0$ 时，外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的类别为阶跃线且其类别编号记作 $W_{k'}$ ；其中， $\Delta h_0 = 0.2\text{m} \sim 0.4\text{m}$ ；

[0029] 步骤 III、按照步骤 I 至步骤 II 中所述的方法，对下一个外轮廓点的类别进行确定；

[0030] 步骤 IV、多次重复步骤 III，直至完成屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中所有外轮廓点的类别确定过程；

[0031] 步骤 2044、矢量边界确定：根据步骤 2043 中所确定屋顶面片 S_i 的外轮廓点集合中各外轮廓点的类别，并结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中各外轮廓点的三维坐标和步骤 201 中所记录的屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系，对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的矢量边界进行确定；

[0032] 步骤 2045、多次重复步骤 2041 至步骤 2044，直至完成多个屋顶面片的矢量边界确

定过程；

[0033] 步骤 205、建筑物屋顶矢量模型获取：待步骤 204 中多个屋顶面片的矢量边界确定后，便获得当前所处理建筑物屋顶的矢量模型。

[0034] 上述一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法，其特征是：步骤 201 中进行建筑物屋顶面片分割时，先将当前所处理建筑物屋顶的点云数据构建 kd 树，再从当前所处理建筑物屋顶的点云数据中随机选取一个测点作为种子点，并采用 K 邻近搜索算法搜索出多个邻近点，搜索出的多个邻近点与所述种子点组成邻近点集；之后，计算出所述邻近点集的法向量，并按照计算出的法向量进行区域生长，便分割出一个屋顶面片，且将所分割出的屋顶面片中的所有测点均从当前所处理建筑物屋顶的点云数据中删除；然后，按照对当前所处理建筑物屋顶的点云数据中剩余的点云数据再次进行屋顶面片分割，直至分割出所有屋顶面片；

[0035] 其中，对所述邻近点集的法向量进行计算时，先对所述邻近点集中所有测点的法向量进行计算；之后，将所述邻近点集中所有测点的法向量叠加后，获得所述邻近点集的法向量；

[0036] 所述邻近点集中所包含测点的数量为 D' 个， D' 个测点由先至后分别为 C_{1j1} 、 C_{1j2} 、 \dots 、 $C_{1jd'}$ ，其中 C_{1j1} 又记作 $C_{1j(d'+1)}$ ； D' 个测点中任一测点 $C_{1jd'}$ 的法向量为 $(N_{d'} \cdot X, N_{d'} \cdot Y, N_{d'} \cdot Z)$ ， $N_{d'} \cdot X = (C_{1jd'} \cdot z + C_{1j(d'+1)} \cdot z) \times (C_{1jd'} \cdot y - C_{1j(d'+1)} \cdot y)$ ， $N_{d'} \cdot Y = (C_{1jd'} \cdot x + C_{1j(d'+1)} \cdot x) \times (C_{1jd'} \cdot z - C_{1j(d'+1)} \cdot z)$ ， $N_{d'} \cdot Z = (C_{1jd'} \cdot y + C_{1j(d'+1)} \cdot y) \times (C_{1jd'} \cdot x - C_{1j(d'+1)} \cdot x)$ ；其中，测点 $C_{1jd'}$ 的三维坐标为 $(C_{1jd'} \cdot x, C_{1jd'} \cdot y, C_{1jd'} \cdot z)$ ，测点 $C_{1j(d'+1)}$ 的三维坐标为 $(C_{1j(d'+1)} \cdot x, C_{1j(d'+1)} \cdot y, C_{1j(d'+1)} \cdot z)$ 。

[0037] 上述一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法，其特征是：步骤 2042 中对外轮廓点 $C_{i'j'}$ 进行邻域搜索时，以外轮廓点 $C_{i'j'}$ 为中心且以 0.5m ~ 1.5m 为搜索半径进行搜索。

[0038] 上述一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法，其特征是：步骤 204 中进行屋顶面片矢量边界获取之前，还需根据步骤 203 中所获取的当前所处理建筑物屋面的外轮廓点集合，调用外边界线提取模块，提取出当前所处理建筑物屋面的外边界线。

[0039] 上述一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法，其特征是：步骤 II 中当 $\Delta h_{ij} > \Delta h_0$ 时，还需对外轮廓点 $C_{i'j'}$ 和邻域搜索点 $C'_{i'j'}$ 的高程进行比较，并建立阶跃线类别集合 W_k ，且将外轮廓点 $C_{i'j'}$ 和邻域搜索点 $C'_{i'j'}$ 中高程高的点放入阶跃线类别集合 W_k 中；

[0040] 步骤 III 中对下一个外轮廓点的类别进行确定时，当当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点的高程差 $> \Delta h_0$ 时，还需对当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点的高程进行比较：当阶跃线类别集合 W_m 已建立时，将当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点中高程高的点放入集合 W_m 中；否则，需建立阶跃线类别集合 W_m ，并将当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点中高程高的点放入集合 W_m 中；其中， m' 为当前所确定外轮廓点的邻域搜索点所属屋顶面片的编号， m' 为正整数， $m' = 1, 2, \dots, N'$ 且 $m' \neq i'$ 。

[0041] 上述一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法，其特征是：步骤 2044 中进行矢量边界确定之前，还需根据屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中各外轮廓点的三维坐标，沿逆时针方向或顺时针方向，由先至后对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中的所有外轮廓点

进行排序,并根据外轮廓点的排序结果,对步骤 2043 中得出的所有外轮廓点的类别编号进行排序,获得屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点类别编号序列;

[0042] 排序完成后,屋顶面片 $S'_{i'}$ 中相邻两个外轮廓点的类别编号相邻;所述外轮廓点类别编号序列中,多个外轮廓点的类别编号由先至后分别记作 $L_{i',1}$ 、 $L_{i',2}$ 、 \dots 、 $L_{i',M}$ 。

[0043] 上述一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法,其特征是:步骤 II 中类别编号 T_k 中, T 表示类别为屋脊线, k' 表示在外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的位置处屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 k' 的屋顶面片相交;

[0044] 类别编号记作 W_k 中, W 表示类别为阶跃线, k' 表示在外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的位置处屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 k' 的屋顶面片之间形成高低面;

[0045] 步骤 2044 中进行矢量边界确定时,由先至后对步骤 2043 中所述外轮廓点类别编号序列中相邻两个类别编号分别进行矢量边界点提取处理,过程如下:

[0046] 步骤 i、对类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 进行矢量边界点提取处理:先判断 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 是否相同;当 $L_{i',1} = L_{i',2}$ 时,完成矢量边界点提取过程;否则,获取与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点,过程如下:

[0047] 当 $L_{i',1} = T_g$ 且 $L_{i',2} = T_h$ 时,先计算出屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 g' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_g 和屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 h' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_h ,再计算出直线段 l_g 和 l_h 的交点 $C_{g',h'}$,交点 $C_{g',h'}$ 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点;

[0048] 当 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 中一个编号为 T_a 且另一编号为 U 时,先计算出屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 a' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_a ,再结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系,计算出直线段 l_a 与当前所处理建筑物屋面的外边界线之间的交点 C_a , C_a 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点;

[0049] 当 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 中一个编号为 W_b 且另一编号为 U 时,先根据阶跃线类别集合 W_b 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_b 中所有点所处的直线 l_b ,再结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系,计算出直线 l_b 与当前所处理建筑物屋面的外边界线之间的交点 C_b , C_b 位于屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 b' 的屋顶面片的交界线上, C_b 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点;

[0050] 当 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 中一个编号为 T_e 且另一编号为 W_f 时,先计算出屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 e' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_e ;同时,根据阶跃线类别集合 W_f 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_f 中所有点所处的直线 l_f ,再结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系,计算出直线段 l_e 与直线 l_f 之间的交点 $C_{e',f'}$, $C_{e',f'}$ 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点;

[0051] 当 $L_{i',1} = W_p$ 且 $L_{i',2} = W_q$ 时,根据阶跃线类别集合 W_p 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_p 中所有点所处的直线 l_p ;同时,根据阶跃线类别集合 W_q 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_q 中所有点所处的直线 l_q ,再计算出直线 l_p 和 l_q 的交点 $C_{p',q'}$,交点 $C_{p',q'}$ 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点;

[0052] 其中, g' 、 h' 、 a' 、 b' 和 e' 均为屋顶面片的编号;

[0053] 步骤 ii、对类别编号 $L_{i',t'}$ 和 $L_{i',(t'+1)}$ 进行矢量边界点提取处理:按照步骤 i 中所述的方法,对类别编号 $L_{i',t'}$ 和 $L_{i',(t'+1)}$ 进行矢量边界点提取处理;其中, t' 为正整数且 $t' = 1, 2, \dots, M'$;其中, $L_{i',1}$ 又记作 $L_{i',(M'+1)}$;

[0054] 步骤iii、多次重复步骤ii,直至完成所述外轮廓点类别编号序列中任意相邻两个类别编号的矢量边界点提取处理过程;

[0055] 步骤iv、将步骤i至步骤iii中所提取的所有矢量边界点,按照提取的先后顺序由先至后连接,获得屋顶面片 S'_i 的矢量边界。

[0056] 上述一种基于机载LiDAR数据的建筑物屋顶重建方法,其特征是:步骤203中所述外轮廓点集合 A' 中包括当前所处理建筑物屋面的多个外轮廓点及各外轮廓点的三维坐标,各屋顶面片的外轮廓点集合中包括该屋顶面片上的多个外轮廓点及各外轮廓点的三维坐标;

[0057] 步骤203中对当前所处理建筑物屋面的外轮廓点进行提取时,从当前所处理建筑物屋面的二维数据集中,提取多个外轮廓点,并形成外轮廓点集合 A'' ;所述外轮廓点集合 A'' 中外轮廓点的数量为 N 个,所述外轮廓点集合 A'' 中包含 N 个外轮廓点的二维数据, N 个所述外轮廓点连接形成当前所处理建筑物屋面的外轮廓线;之后,根据步骤202中当前所处理建筑物屋面的点云数据,获取外轮廓点集合 A'' 中各外轮廓点的三维坐标;

[0058] 当前所处理建筑物屋面的二维数据集包括当前所处理建筑物的点云数据中多个测点在 X - Y 平面直角坐标系上的二维坐标;

[0059] 步骤203中对各屋顶面片的外轮廓点进行提取时,所有屋顶面片的外轮廓点提取方法均与当前所处理建筑物屋面的外轮廓点的提取方法相同;其中,对屋顶面片 S'_i 的外轮廓点进行提取时,从屋顶面片 S'_i 的二维数据集中,提取 M' 个外轮廓点,并形成外轮廓点集合 B'' ;所述外轮廓点集合 B'' 中外轮廓点的数量为 M' 个,所述外轮廓点集合 B'' 中包含 M' 个外轮廓点的二维数据;之后,根据步骤201中屋顶面片 S'_i 的点云数据,获取外轮廓点集合 B'' 中各外轮廓点的三维坐标;

[0060] 屋顶面片 S'_i 的二维数据集包括屋顶面片 S'_i 的点云数据中多个测点在 X - Y 平面直角坐标系上的二维坐标;

[0061] 对当前所处理建筑物屋面的外边界线进行提取时,过程如下:

[0062] 步骤2031、特征点提取:采用道格拉斯-普扑克算法对所述外轮廓线进行特征点提取,并从所述外轮廓点集合 A'' 中提取出 S 个特征点, S 个特征点分别记作 S_1 、 S_2 、 \dots 、 S_S ;

[0063] 步骤2032、最小二乘法直线拟合及初始边界线获取:对 S 个特征点中相邻两个特征点所在的直线分别进行拟合,并获得 S 条拟合直线; S 条拟合直线相交形成的封闭曲线为当前所处理建筑物的初始边界线,所述初始边界线由多个直线段连接而成;

[0064] 对 S 个特征点中相邻两个特征点 S_a 和 S_b 进行直线拟合时,先将特征点 S_a 和 S_b 以及步骤201中所述外轮廓点集合中特征点 S_a 和 S_b 之间的所有外轮廓点组成直线点集,再利用最小二乘法对所述直线点集进行直线拟合,获得特征点 S_a 和 S_b 所在的拟合直线;其中, a 和 b 均为正整数且 $a \neq b$, $a = 1, 2, \dots, S$, $b = 1, 2, \dots, S$;

[0065] 步骤2033、建筑物主方向及副方向确定:先对步骤2032中所述初始边界线中的多个直线的方向向量进行确定,再对多个直线的方向向量的权重分别进行计算,并将权重最大的直线的方向向量作为当前所处理建筑物的主方向,将当前所处理建筑物的主方向的正交向量作为当前所处理建筑物的副方向;

[0066] 步骤2034、初始边界线规则化:对步骤2032中所述初始边界线中的多个直线段分别进行规则化处理;

[0067] 对所述初始边界线中任一个直线段进行规则化处理时,过程如下:

[0068] 步骤 2034-1、规则化方向确定:根据步骤 2033 中所确定的主方向和副方向以及当前所处理直线的方向向量,对当前所处理直线的规则化方向进行确定:当当前所处理直线的方向向量更靠近主方向时,以主方向作为规则化方向;反之,当当前所处理直线的方向向量更靠近副方向时,以副方向作为规则化方向;

[0069] 步骤 2034-2、是否需进行规则化判断:计算当前所处理直线在步骤 2034-1 中所确定规则化方向上的投影长度 L ,并根据投影长度 L 对当前所处理直线是否需进行规则化进行判断:当投影长度 $L \leq L_0$ 时,进入步骤 2034-3;否则,无需进行规则化处理,将当前所处理直线所在的直线作为其规则化直线;其中, $L_0 = 50\text{cm} \sim 1\text{m}$ 。

[0070] 步骤 2034-3、规则化处理:以当前所处理直线的中点为起点,且以步骤 2034-1 中所确定的规则化方向为方向向量,生成当前所处理直线的规则化直线;

[0071] 步骤 2035、规则化边界线获取:步骤 2034 中所述初始边界线中的多个直线段均规则化处理完成后,多个直线的规则化直线相交形成的封闭曲线为当前所处理建筑物的规划化边界线。

[0072] 上述一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法,其特征是:步骤 2031 中采用道格拉斯-普扑克算法对所述外轮廓线进行特征点提取后,所提取的特征点数量为 M 个,其中 M 为正整数且 $M \geq S$; M 个特征点组成特征点集合, S 个特征点分别记作 S_1, S_2, \dots, S_M , 特征点 S_1 又记作特征点 S_{M+1} ;

[0073] 特征点提取完成后,还需对所提取的 M 个特征点分别进行判定;其中,对 M 个特征点中任一个特征点 S_h 进行判定时,判断特征点 S_h 与直线 $S_{h-1}S_{h+1}$ 之间的距离 d_h 是否大于 d_0 :当 $d_h > d_0$ 时,在所述特征点集合中保留特征点 S_h ;否则,从所述特征点集合中删除特征点 S_h ,并将特征点 S_h 标记为非特征点;

[0074] 直线 $S_{h-1}S_{h+1}$ 为特征点 S_{h-1} 和 S_{h+1} 所在的直线,特征点 S_{h-1} 和 S_{h+1} 为与特征点 S_h 相邻的两个特征点;其中, h 为正整数且 $h = 1, 2, \dots, M$;

[0075] 对 M 个特征点分别进行判定后,所述特征点集合中特征点的数量为 S 个。

[0076] 上述一种基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶重建方法,其特征是:所述外轮廓点集合 A' 中的 N 个所述外轮廓点,分别记作 $A_0, A_1, A_2, \dots, A_{N-1}$;

[0077] 步骤 203 中对当前所处理建筑物屋面的外轮廓点进行提取时,过程如下:

[0078] 步骤 2011、构建 kd 树:将当前所处理建筑物屋面的点云数据中,多个测点在 X-Y 平面直角坐标系上的二维坐标构建 kd 树;

[0079] 步骤 2012、邻域搜索:利用步骤 2011 中所构建的 kd 树在 X-Y 平面上进行邻域搜索,找出当前所处理建筑物屋面的所有外轮廓点, X-Y 平面为 X-Y 平面直角坐标系所在的水平面;邻域搜索过程如下:

[0080] 步骤 20121、第一次搜索:以极值点 A_0 作为本次搜索的搜索点 O_1 且以 X 坐标轴的负半轴作为基准向量进行邻域搜索,并在当前搜索点 O_1 的邻域内找出旋转角度最小的测点,所找出的测点为第一次搜索出的外轮廓点 A_1 ;

[0081] 当前搜索点的邻域内任一测点 C_i 的旋转角度为由基准向量逆时针旋转至向量 $\overline{O_1C_i}$ 的旋转角度;极值点 A_0 为当前所处理建筑物的点云数据中 X 轴坐标值最大、X 轴坐标值最小、Y 轴坐标值最大或 Y 轴坐标值最小的测点;

[0082] 步骤 20122、第 j 次搜索：以第 $j-1$ 次搜索出的外轮廓点 A_{j-1} 作为本次搜索的搜索点 O_j 且以向量 $\overrightarrow{A_{j-1}A_{j-2}}$ 为基准向量进行邻域搜索，并按照步骤 20121 中所述的方法，在当前搜索点 O_j 的邻域内找出旋转角度最小的测点，所找出的测点为第 j 次搜索出的外轮廓点 A_j ；

[0083] 其中， j 为正整数且 $j \geq 2$ ；当 $j = 2$ 时， $A_{j-2} = A_0$ ；当 $j > 2$ 时， A_{j-2} 为第 $j-2$ 次搜索出的外轮廓点；

[0084] 步骤 20123、多次重复步骤 20122，直至搜索出的外轮廓点为 A_0 时，完成邻域搜索过程；

[0085] 步骤 2012 中进行邻域搜索过程中，将极值点 A_0 和各次搜索出的外轮廓点均标记为已用点；

[0086] 步骤 20123 中，多次重复步骤 20122 且完成第 n 次搜索后，获得第 n 次搜索出的外轮廓点 A_n ，并将外轮廓点 A_n 标记为已用点；之后，按照步骤 20122 中所述的方法，将 A_n 作为搜索点，进行第 $n+1$ 次搜索，且当第 $n+1$ 次搜索过程中搜索出的外轮廓点为标记的已用点时，将外轮廓点 A_n 标记为不可用点；然后，按照 A_{n-1} 、 A_{n-2} 、 \dots 、 A_1 顺序，由先至后对标记为有用点的外轮廓点进行回滚搜索，过程如下：

[0087] 步骤 I -1、第一次回滚搜索：对第 $(n-1)$ 次搜索出的外轮廓点 A_{n-1} 进行回滚搜索，过程如下：

[0088] 步骤 I -11、第一次邻域搜索：按照步骤 20121 中所述的方法，以外轮廓点 A_{n-1} 作为本次搜索的搜索点 O_{11} 且以向量 $\overrightarrow{A_{n-1}A_{n-2}}$ 为基准向量进行邻域搜索；

[0089] 步骤 I -12、第一次邻域搜索结果处理：步骤 I -11 中搜索完成后，当在当前搜索点 O_{11} 的邻域测点集合 $S'(n-1)$ 中不能找出旋转角度最小的测点时，将外轮廓点 A_{n-1} 标记为不可用点，并进入步骤 II -1，进行下一次回滚搜索；

[0090] 反之，当在邻域测点集合 $S'(n-1)$ 中找出旋转角度最小的测点时，将所找出的测点作为回滚搜索过程中第一次搜索出的外轮廓点 A_{11} ，且将外轮廓点 A_{11} 标记为已用点，并判断外轮廓点 A_{11} 是否为极值点 A_0 ；当外轮廓点 A_{11} 为极值点 A_0 时，完成回滚搜索过程；否则，进入步骤 I -13，进行下一次邻域搜索；

[0091] 步骤 2012 中进行邻域搜索过程中，第 $(n-1)$ 次搜索时，当前搜索点 O_{n-1} 的邻域内所有测点组成邻域测点集合 $S(n-1)$ ；所述邻域测点集合 $S(n-1)$ 中的所有未标记的测点组成邻域测点集合 $S'(n-1)$ ；

[0092] 步骤 I -13、第 k 次邻域搜索：以回滚搜索过程中第 $(k-1)$ 次搜索出的外轮廓点 $A_{1(k-1)}$ 作为本次搜索的搜索点 O_{1k} 且以向量 $\overrightarrow{A_{1(k-1)}A_{1(k-2)}}$ 为基准向量进行邻域搜索，并按照步骤 20121 中所述的方法，在当前搜索点 O_{1k} 的邻域内找出旋转角度最小的测点，所找出的测点为回滚搜索过程中第 k 次搜索出的外轮廓点 A_{1k} ；

[0093] 其中， k 为正整数且 $k \geq 2$ ；当 $k = 2$ 时， $A_{1(k-2)} = O_{11}$ ， $A_{1(k-1)} = A_{11}$ ；当 $j > 2$ 时， $A_{1(k-2)}$ 为回滚搜索过程中第 $(k-2)$ 次搜索出的外轮廓点；

[0094] 步骤 I -14、第 k 次邻域搜索结果处理：步骤 I -13 中搜索完成后，判断第 k 次搜索出的外轮廓点 A_{1k} 是否为极值点 A_0 ；当外轮廓点 A_{1k} 为极值点 A_0 时，完成回滚搜索过程；否

则,返回步骤 I -13,进行下一次邻域搜索;

[0095] 步骤 II -1、第 h 次回滚搜索:按照步骤 I -1 中所述的方法,对步骤 2012 中第 (n-h+1) 次搜索出的外轮廓点 A_{n-h+1} 进行回滚搜索,直至完成回滚搜索过程;其中, h 为正整数且 $h \geq 2$;

[0096] 步骤 2012 中完成回滚搜索过程后,当前状态下所有标记为已用点的测点组成步骤 201 中所述外轮廓点集合,并且所有标记为已用点的测点总数量为 N 个。

[0097] 本发明与现有技术相比具有以下优点:

[0098] 1、方法步骤简单、设计合理且实现方便。

[0099] 2、使用操作简便且易于掌握,具体过程如下:首先,对滤波处理后的建筑物屋顶点云数据建立 kd 树,利用法向量将建筑物屋顶分割成多个屋顶面片,再根据屋顶面片的点云集合最小二乘法计算各屋顶面片的平面方程;之后,再根据多个屋顶面片的点云集合,用邻域搜索追踪的方法得到各屋顶面片的外轮廓点云及建筑物屋顶的外轮廓点云,对建筑物屋顶的外轮廓点云采用最小二乘法拟合直线得出原始的外边界,再通过确定建筑的主方向规则化建筑物屋顶的外边界线;随后,对各屋顶面片的外轮廓点云进行建筑物内的拓扑搜索,并根据不同的搜索结果对各外轮廓点进行分(屋脊线、阶跃线和外边界线);随后,将连续的同类型的搜索点归入一个集合中,面片的外轮廓点云转化为连续的类别编号序列,再根据别编号序列的先后顺序做相应的矢量边界点提取处理,便得到各屋顶面片的矢量边界,从而获得建筑物屋顶的矢量模型。

[0100] 3、建筑物屋面外边界线提取方法简单、设计合理且使用效果好,具体过程如下:首先,对滤波处理后的建筑物点云数据建立 kd 树,利用邻域搜索加逆时针旋转查找旋转角度最小的外部点,得到建筑物外轮廓点云;其次,根据外轮廓点云集合,用道格拉斯-普克算法提取拐点点云,拐点通过二次判定去除误差点;之后,对连续拐点间的点最小二乘拟合直线,连接相邻直线交点得到原始的外边界;然后,以外边界线段的方向向量为基准,计算出所有外边界线段与基准方向基准的角度,角度小于阈值时基准向量叠加外边界线段的方向向量,否则叠加外边界线段的方向向量的正交向量,这样通过计算,权重向量长度最长的向量的方向为建筑的主方向,垂直方向为副方向;计算原始外边界与主方向或副方向的投影长度,小于长度阈值则按主方向或副方向规则化外边界线。所采用的外边界线提取方法不借助传统遥感图像处理方法,避免了从点云内插成二值图像过程中带来的误差。并且,在不构建三角网结构的基础上,直接分析点云的三维空间信息,降低了计算过程的复杂度和占用的空间,计算过程中只分析了一部分符合空间结构的点云,无需对所有点云数据进行分析、处理,因而处理效率高、速度快。

[0101] 边界点搜索过程(即建筑物外轮廓点提取过程)中加入了回滚搜索方式,当认为某一外轮廓点提取错误时,会回滚到上一个外轮廓点重新搜索,增强了算法的鲁棒性。与传统回滚方式不同,在回滚过程中会标记检测错误的点,在后面的分析中不再考虑,这样保证了提取过程一定会得到唯一确定的结果。同时,改进了传统道格拉斯-普克拐点提取的方法,在二次判断检查的过程中,剔除了错误的拐点。同时,利用最小二乘法保证了拐点间的点也被考虑进边界提取的过程中,因而本发明为一种多种提取方式组合的组合式外边界提取方法,这种组合式提取方法最大程度地保证了边界点云的特征。在不构建三角网的基础上,直接分析点云空间坐标,提取建筑物外轮廓点云,生成矢量边界线。另外,采用的主

方向提取方法,利用长度作为权重,保证在最小程度改变外边界方向的前提下,规则化矢量边界,使生成的矢量边界线能最大程度地与点云套合。综上,本发明利用点云数据集合,解决了无法精确、快速提取建筑物外边界的问题,不需要构建三角网或者内插格网,运行效率高、速度快、占用空间小,并且得到的外边界矢量规则化程度高,符合建筑建模需求。

[0102] 4、本发明在屋顶面片分割的基础上,基于屋顶面片外轮廓点云,逐一重建建筑物屋顶的多面结构,其结合分割得到的结果以及合并时外轮廓邻域内的信息,保留点云数据信息,还原建筑物矢量模型。相比于其他数据驱动类的方法,本发明的主要优势在于三维重建得到的建筑物模型正确性和完整性较高。相比于整体建筑特征提取,再计算合并的方法,将建筑物屋顶的整体重建变为了屋顶面片的重建,实现方便。同一条屋脊线在不同面片中进行了两次计算,最大程度地保留了细节的特征和面片间的拓扑关系。同时,考虑到了LiDAR数据的高程特征,利用高点的坐标处理阶跃线,同时根据房屋主方向规则化阶跃线,因而兼顾了模型精度和规则化程度。本发明不需要其他辅助数据的支持,具有较高的自动化程度和重建精度。对于具有复杂结构的建筑物重建,得到更理想的矢量模型结果,为复杂结构建筑物的重建提供了一种新的方法。

[0103] 5、使用效果好,本发明在利用机载LiDAR数据,提出了一种顾及多面片拓扑关系的建筑物三维建模的方法。针对多面片建筑物的特点延伸的按照屋脊线、阶跃线和边界线分类的处理面片的矢量边界,而不是传统的提取建筑物内的特征线;并提出了不同类别矢量线间的处理方法,保证了模型在分割的基础上,最大程度地还原点云的三维空间特征。

[0104] 由于LiDAR点云数据数据本身易获取且成本低,可快速对现实城市中各种房屋类型的建筑要素精确定位、准确提取三维坐标信息。本发明在此基础上提出了一种快速高效的三维建模方案,完全自动化的重建三维建筑模型。在数据组织上不需要构建三角网或栅格化处理点云,直接利用kd树分析点云的三维空间结构,节省了资源空间,大量减少了工作量,提高了方法的运行速度,降低了建模成本。

[0105] 综上所述,本发明方法步骤简单、设计合理且实现方便、使用效果好,能简便、快速完成建筑物屋顶的重建过程,并且所建模型的精确度高,其利用LiDAR点云数据的空间结构,解决了复杂建筑物模型三维重建的问题,具有运行效率高、速度快等特点,得到的模型最大程度保留了点云细节,精确度高、鲁棒性强。

[0106] 下面通过附图和实施例,对本发明的技术方案做进一步的详细描述。

附图说明

[0107] 图1为本发明的方法流程框图。

[0108] 图2为所获取建筑物屋面的点云图。

[0109] 图3为采用本发明所获取建筑物屋面外边界线的点云图。

[0110] 图4为采用本发明获取的建筑物屋顶的矢量模型图。

[0111] 图5为对本发明获取的建筑物屋顶矢量模型进行渲染后的模型图。

具体实施方式

[0112] 如图1所示的一种基于机载LiDAR数据的建筑物屋顶重建方法,包括以下步骤:

[0113] 步骤一、LiDAR点云数据获取:采用机载LiDAR测量系统获取待测区域的点云数

据,并将所获取的点云数据传送至数据处理设备;所述点云数据中包括待测区域内多个建筑物屋顶的点云数据,每个建筑物屋顶的点云数据均包括该建筑物屋顶的多个测点及各测点的三维坐标。

[0114] 本实施例中,进行 LiDAR 点云数据处理之前;先通过设置高程阈值对所获取的点云数据进行滤波,去除所述点云数据中需处理建筑物之外的其它地物的点云数据。同时,还需对滤波后的点云数据进行分类,找出待测区域内各建筑物的点云数据。

[0115] 本实施例中,如图 2 所示,所获取的点云数据为一个住宅区的点云数据,点云密度为 30 点 /m²,平均点间距约 20cm。

[0116] 步骤二、LiDAR 点云数据处理:采用所述数据处理设备分别对多个建筑物的点云数据进行处理,并获取各建筑物屋顶的矢量模型;多个建筑物的点云数据处理过程均相同;对待测区域内的任一个建筑物的点云数据进行处理时,过程如下:

[0117] 步骤 201、建筑物屋顶面片分割:采用区域生长方法对当前所处理建筑物屋顶的点云数据进行处理,从当前所处理建筑物屋顶分割出多个屋顶面片,并获得多个屋顶面片的点云数据;之后,根据各屋顶面片的点云数据,且采用最小二乘法对各屋面面片分别进行平面拟合,获得各屋顶面片所在平面的平面方程;同时,对多个屋顶面片进行编号,并对多个屋顶面片的相邻关系分别进行记录,每个屋顶面片的相邻关系均包括与该屋顶面片相邻的屋顶面片的数量以及各相邻屋顶面片的布置位置。

[0118] 多个所述屋顶面片均为平面,每个屋顶面片的点云数据均包括位于该屋顶面片上的多个测点及各测点的三维坐标;多个所述屋顶面片的数量为 N' 个, N' 为正整数且 N' ≥ 2。

[0119] 本实施例中,步骤 201 中进行建筑物屋顶面片分割时,先将当前所处理建筑物屋顶的点云数据构建 kd 树,再从当前所处理建筑物屋顶的点云数据中随机选取一个测点作为种子点,并采用 K 邻近搜索算法搜索出多个邻近点,搜索出的多个邻近点与所述种子点组成邻近点集;之后,计算出所述邻近点集的法向量,并按照计算出的法向量进行区域生长,便分割出一个屋顶面片,且将所分割出的屋顶面片中的所有测点均从当前所处理建筑物屋顶的点云数据中删除;然后,按照对当前所处理建筑物屋顶的点云数据中剩余的点云数据再次进行屋顶面片分割,直至分割出所有屋顶面片。此处,所构建的 kd 树为三维 kd 树。

[0120] 其中,对所述邻近点集的法向量进行计算时,先对所述邻近点集中所有测点的法向量进行计算;之后,将所述邻近点集中所有测点的法向量叠加后,获得所述邻近点集的法向量。

[0121] 本实施例中,采用 K 邻近搜索算法搜索出邻近点的数量为 15 个~ 20 个。

[0122] 所述邻近点集中所包含测点的数量为 D' 个, D' 个测点由先至后分别为 C_{1j1}、C_{1j2}、...、C_{1jD'},其中 C_{1j1} 又记作 C_{1j(d'+1)};D' 个测点中任一个测点 C_{1jd'} 的法向量为 (N_{d'}·X, N_{d'}·Y, N_{d'}·Z), N_{d'}·X = (C_{1jd'}·z + C_{1j(d'+1)}·z) × (C_{1jd'}·y - C_{1j(d'+1)}·y), N_{d'}·Y = (C_{1jd'}·x + C_{1j(d'+1)}·x) × (C_{1jd'}·z - C_{1j(d'+1)}·z), N_{d'}·Z = (C_{1jd'}·y + C_{1j(d'+1)}·y) × (C_{1jd'}·x - C_{1j(d'+1)}·x);其中,测点 C_{1jd'} 的三维坐标为 (C_{1jd'}·x, C_{1jd'}·y, C_{1jd'}·z), 测点 C_{1j(d'+1)} 的三维坐标为 (C_{1j(d'+1)}·x, C_{1j(d'+1)}·y, C_{1j(d'+1)}·z)。

[0123] 本实施例中,根据各屋顶面片的点云数据,且采用最小二乘法对各屋面面片分别进行平面拟合时,所用的平面模型为 A1 × x + B1 × y + C1 × z = n1。

[0124] 步骤 202、建筑物屋面点云数据获取：根据步骤 201 中所记录的多个屋顶面片的相邻关系，将多个屋顶面片的点云数据组合形成当前所处理建筑物屋面的点云数据。

[0125] 步骤 203、建筑物屋面及各屋顶面片的外轮廓点提取：调用外轮廓点提取模块，从步骤 202 中所获取的当前所处理建筑物屋面的点云数据中提取出当前所处理建筑物屋面的多个外轮廓点，并获得当前所处理建筑物屋面的外轮廓点集合 A' 。同时，分别从步骤 201 中各屋顶面片的点云数据中提取出各屋顶面片的多个外轮廓点，并获得各屋顶面片的外轮廓点集合。

[0126] 步骤 204、屋顶面片矢量边界获取：结合步骤 201 中多个屋顶面片的点云数据和相邻关系以及步骤 203 中各屋顶面片的外轮廓点集合，获取多个屋顶面片的矢量边界；多个屋顶面片的矢量边界获取方法均相同，对任一个屋顶面片 S_i 的矢量边界进行获取时，过程如下：

[0127] 步骤 2041、建立搜索信息集合：将多个所述屋顶面片中除屋顶面片 $S'_{i'}$ 之外的 $N'-1$ 个屋顶面片的点云数据，组合成搜索信息集合 $J_{i'}$ ；搜索信息集合 $J_{i'}$ 中包含 $N'-1$ 个子集合， $N'-1$ 个子集合分别为 $N'-1$ 个屋顶面片的点云数据；其中， i' 为屋顶面片的编号， i' 为正整数且 $i' = 1, 2, \dots, N'$ 。

[0128] 步骤 2042、邻域搜索：对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中的各外轮廓点分别进行邻域搜索，获得屋顶面片 $S'_{i'}$ 的邻域搜索信息，所述邻域搜索信息中包括屋顶面片 $S'_{i'}$ 的所有外轮廓点的邻域搜索点及各邻域搜索点的三维坐标。

[0129] 对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中任一个外轮廓点 $C_{i',j'}$ 进行邻域搜索时，从步骤 201 中所建立的搜索信息集合 $S'_{i'}$ 中找出与外轮廓点 $C_{i',j'}$ 距离最近的测点，所找出的测点为外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的邻域搜索点，记作 $C'_{i',j'}$ 。

[0130] 其中， j' 为正整数且 $j' = 1, 2, \dots, M'$ ， M' 为屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中外轮廓点的总数量。

[0131] 步骤 2043、外轮廓点类别确定：先根据屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中各外轮廓点的三维坐标，沿逆时针方向或顺时针方向，由先至后对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中的所有外轮廓点由先至后进行排序，再按照排序结果，由先至后对所述外轮廓点集合中各外轮廓点的邻域搜索点进行处理，并得出各外轮廓点的类别，过程如下：

[0132] 步骤 I、邻域搜索点所属屋顶面片编号确定：根据步骤 2041 中 $N'-1$ 个所述子集合，判断邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 所属的子集合；并根据所属的子集合，确定邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 所属的屋顶面片，记录邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 所属屋顶面片的编号 k' ， k' 为正整数， $k' = 1, 2, \dots, N'$ 且 $k' \neq i'$ 。

[0133] 步骤 II、外轮廓点类别确定：根据当前所处理建筑物屋面的外轮廓点集合 A' ，判断外轮廓点 $C_{i',j'}$ 是否属于外轮廓点集合 A' ；当外轮廓点 $C_{i',j'}$ 属于外轮廓点集合 A' 时，外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的类别为外边界线且其类别编号为 U ；否则，根据外轮廓点 $C_{i',j'}$ 和邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 的三维坐标，得出外轮廓点 $C_{i',j'}$ 和邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 的高程差 Δh_{ij} ；当 $\Delta h_{ij} \leq \Delta h_0$ 时，外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的类别为屋脊线且其类别编号记作 T_k ；当 $\Delta h_{ij} > \Delta h_0$ 时，外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的类别为阶跃线且其类别编号记作 W_k ；其中， $\Delta h_0 = 0.2m \sim 0.4m$ 。

[0134] 步骤 II 中，当外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的类别为屋脊线时，说明屋顶面片 $S'_{i'}$ 在外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的位置处与编号为 k' 的屋顶面片相交；当外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的类别为阶跃线时，说明屋顶面片

$S'_{i'}$ 与编号为 k' 的屋顶面片在外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的位置处阶跃形成高低面；当外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的类别为外边界线时，说明屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点 $C_{i',j'}$ 为当前所处理建筑物屋面的外边界点。

[0135] 步骤III、按照步骤 I 至步骤 II 中所述的方法，对下一个外轮廓点的类别进行确定。

[0136] 步骤IV、多次重复步骤III，直至完成屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中所有外轮廓点的类别确定过程。

[0137] 本实施例中，对步骤 II 中外轮廓点类别进行确定时，当外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的类别为外边界线且其类别编号为 U 时，建立边界线类别集合 U ，并将邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 放入集合 U 中；当外轮廓点 $C_{i',j'}$ 的类别为屋脊线且其类别编号记作 T_k 时，建立屋脊线类别集合 T_k ，并将邻域搜索点 $C'_{i',j'}$ 放入集合 T_k 中；步骤III中对下一个外轮廓点的类别进行确定时，当当前所确定外轮廓点及其邻域搜索点的高程差 $\leq \Delta h_0$ 且阶跃线类别集合 T_m 已建立时，将当前所确定外轮廓点的邻域搜索点放入集合 T_m 中；否则，需建立屋脊线类别集合 T_m ，并将当前所确定外轮廓点的邻域搜索点放入集合 T_m 中；其中， m' 为当前所确定外轮廓点的邻域搜索点所属屋顶面片的编号， m' 为正整数， $m' = 1, 2, \dots, N'$ 且 $m' \neq i'$ 。也就是说，将连续的相同类别编号的点放入到同一集合中。

[0138] 另外，步骤 2042 进行邻域搜索过程中，未查找到邻域搜索点时，则将外轮廓点 $C_{i',j'}$ 放入集合 K' ，步骤 2043 中进行外轮廓点类别确定和步骤 2044 中进行矢量边界确定时，无需考虑放入集合 K' 中的外轮廓点。

[0139] 步骤 2044、矢量边界确定：根据步骤 2043 中所确定屋顶面片 S_i 的外轮廓点集合中各外轮廓点的类别，并结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中各外轮廓点的三维坐标和步骤 201 中所记录的屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系，对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的矢量边界进行确定。

[0140] 步骤 2045、多次重复步骤 2041 至步骤 2044，直至完成多个屋顶面片的矢量边界确定过程。

[0141] 步骤 205、建筑物屋顶矢量模型获取：待步骤 204 中多个屋顶面片的矢量边界确定后，便获得当前所处理建筑物屋顶的矢量模型，详见图 4。对图 4 中的矢量模型进行渲染后，获得的模型详见图 5。

[0142] 本实施例中，步骤 204 中进行屋顶面片矢量边界获取之前，还需根据步骤 203 中所获取的当前所处理建筑物屋面的外轮廓点集合，调用外边界线提取模块，提取出当前所处理建筑物屋面的外边界线。

[0143] 本实施例中，步骤 203 中所述外轮廓点集合 A' 中包括当前所处理建筑物屋面的多个外轮廓点及各外轮廓点的三维坐标，各屋顶面片的外轮廓点集合中包括该屋顶面片上的多个外轮廓点及各外轮廓点的三维坐标。

[0144] 本实施例中，步骤 203 中对当前所处理建筑物屋面的外轮廓点进行提取时，从当前所处理建筑物屋面的二维数据集中，提取多个外轮廓点，并形成外轮廓点集合 A'' ；所述外轮廓点集合 A'' 中外轮廓点的数量为 N 个，所述外轮廓点集合 A'' 中包含 N 个外轮廓点的二维数据， N 个所述外轮廓点连接形成当前所处理建筑物屋面的外轮廓线；之后，根据步骤 202 中当前所处理建筑物屋面的点云数据，获取外轮廓点集合 A'' 中各外轮廓点的三维坐标。

[0145] 当前所处理建筑物屋面的二维数据集包括当前所处理建筑物的点云数据中多个

测点在 X-Y 平面直角坐标系上的二维坐标。

[0146] 步骤 203 中对各屋顶面片的外轮廓点进行提取时,所有屋顶面片的外轮廓点提取方法均与当前所处理建筑物屋面的外轮廓点的提取方法相同;其中,对屋顶面片 S'_i 的外轮廓点进行提取时,从屋顶面片 S'_i 的二维数据集中,提取 M' 个外轮廓点,并形成外轮廓点集合 B'' ;所述外轮廓点集合 B'' 中外轮廓点的数量为 M' 个,所述外轮廓点集合 B'' 中包含 M' 个外轮廓点的二维数据;之后,根据步骤 201 中屋顶面片 S'_i 的点云数据,获取外轮廓点集合 B'' 中各外轮廓点的三维坐标。

[0147] 屋顶面片 S'_i 的二维数据集包括屋顶面片 S'_i 的点云数据中多个测点在 X-Y 平面直角坐标系上的二维坐标。

[0148] 本实施例中,所述外轮廓点集合 A'' 中的 N 个所述外轮廓点,分别记作 A_0 、 A_1 、 A_2 、 \dots 、 A_{N-1} 。

[0149] 步骤 203 中对当前所处理建筑物屋面的外轮廓点进行提取时,过程如下:

[0150] 步骤 2011、构建 kd 树:将当前所处理建筑物屋面的点云数据中,多个测点在 X-Y 平面直角坐标系上的二维坐标构建 kd 树。

[0151] 此时,所构建的 kd 树是基于整个建筑物屋面点云数据的二维坐标构建的数据结构,该数据结构根据输入的单个二维坐标能快速搜索到邻近的点集及距离,是一种二维平面的搜索机制。

[0152] 步骤 2012、邻域搜索:利用步骤 2011 中所构建的 kd 树在 X-Y 平面上进行邻域搜索,找出当前所处理建筑物屋面的所有外轮廓点,X-Y 平面为 X-Y 平面直角坐标系所在的水平面;邻域搜索过程如下:

[0153] 步骤 20121、第一次搜索:以极值点 A_0 作为本次搜索的搜索点 O_1 且以 X 坐标轴的负半轴作为基准向量进行邻域搜索,并在当前搜索点 O_1 的邻域内找出旋转角度最小的测点,所找出的测点为第一次搜索出的外轮廓点 A_1 。

[0154] 当前搜索点的邻域内任一测点 C_1 的旋转角度为由基准向量逆时针旋转至向量 $\overline{O_1C_1}$ 的旋转角度;极值点 A_0 为当前所处理建筑物的点云数据中 X 轴坐标值最大、X 轴坐标值最小、Y 轴坐标值最大或 Y 轴坐标值最小的测点。

[0155] 步骤 20122、第 j 次搜索:以第 j-1 次搜索出的外轮廓点 A_{j-1} 作为本次搜索的搜索点 O_j 且以向量 $\overline{A_{j-1}A_{j-2}}$ 为基准向量进行邻域搜索,并按照步骤 20121 中所述的方法,在当前搜索点 O_j 的邻域内找出旋转角度最小的测点,所找出的测点为第 j 次搜索出的外轮廓点 A_j 。

[0156] 其中, j 为正整数且 $j \geq 2$;当 $j = 2$ 时, $A_{j-2} = A_0$;当 $j > 2$ 时, A_{j-2} 为第 j-2 次搜索出的外轮廓点。

[0157] 步骤 20123、多次重复步骤 20122,直至搜索出的外轮廓点为 A_0 时,完成邻域搜索过程。

[0158] 综上,对建筑物屋面外轮廓点进行提取时,先构建当前所处理建筑物屋面的二分查找树(即 kd 树);再以极值点 A_0 作为搜索点,以水平负方向作为基准方向,利用所构建的 kd 树逆时针搜索邻近点云,两测点间的方向与基准方向的逆时针旋转角度最小的测点作为第二个外轮廓点;之后,继续以第二个外轮廓点作为搜索点,与上一个外轮廓点之间的方向向量作为基准方向,搜索第三个外轮廓点;如此不断重复,直到搜回到起始点(极值点 A_0),

这样形成由建筑物屋面的多个外轮廓点组成的闭合线段,即建筑物屋面的外轮廓线。

[0159] 步骤 20121 和步骤 20122 中进行搜索时,当前搜索点的邻域均为以当前搜索点为中心且以 R 为搜索半径的圆形区域;其中, $R = 2d \sim 3d$, d 为步骤一中所述点云数据的点间距。本实施例中, $R = 50\text{cm}$,实际使用时,可以根据 u 具体需要,对 R 的取值大小进行相应调整。

[0160] 本实施例中,步骤 20121 中当前搜索点 O_i 的邻域内任一测点 C_i 的旋转角度记作 $\angle a_{ci}$,测点 C_i 的二维坐标为 (X_{ci}, Y_{ci}) ;第一次搜索时的基准向量为 T_1 ,且 $T_1 = (-1, 0)$;对 $\angle a_{ci}$ 进行计算时,先根据公式 $a_{ci} = X_{ci} \times (-1) + Y_{ci} \times 0 = -X_{ci}$,计算得出 a_{ci} ;当 $a_{ci} \geq 0$ 时,根据公式 $\angle a_{ci} = \arccos(a_{ci})$,计算得出 $\angle a_{ci}$;当 $a_{ci} < 0$ 时,根据公式 $\angle a_{ci} = 90^\circ - \arccos(a_{ci})$,计算得出 $\angle a_{ci}$ 。

[0161] 步骤 20122 中当前搜索点 O_j 的邻域内任一测点 C_p 的旋转角度记作 $\angle a_{cp}$,测点 C_p 的二维坐标为 (X_{cp}, Y_{cp}) ,第 j 次搜索时的基准向量 $\overrightarrow{O_j A_{j-2}}$ 记作 (X_j, Y_j) ;对 $\angle a_{cp}$ 进行计算时,先根据公式 $a_{cp} = X_{cp} \times X_j + Y_{cp} \times Y_j$,计算得出 a_{cp} ;当 $a_{cp} \geq 0$ 时,根据公式 $\angle a_{cp} = \arccos(a_{cp})$,计算得出 $\angle a_{cp}$;当 $a_{cp} < 0$ 时,根据公式 $\angle a_{cp} = 90^\circ - \arccos(a_{cp})$,计算得出 $\angle a_{cp}$ 。

[0162] 本实施例中,步骤 2012 中进行邻域搜索过程中,将极值点 A_0 和各次搜索到的外轮廓点均标记为已用点。

[0163] 步骤 20123 中,多次重复步骤 20122 且完成第 n 次搜索后,获得第 n 次搜索出的外轮廓点 A_n ,并将外轮廓点 A_n 标记为已用点;之后,按照步骤 20122 中所述的方法,将 A_n 作为搜索点,进行第 $n+1$ 次搜索,且当第 $n+1$ 次搜索过程中搜索到的外轮廓点为标记的已用点时,将外轮廓点 A_n 标记为不可用点;然后,按照 A_{n-1} 、 A_{n-2} 、 \dots 、 A_1 顺序,由先至后对标记为有用点的外轮廓点进行回滚搜索,过程如下:

[0164] 步骤 I -1、第一次回滚搜索:对第 $(n-1)$ 次搜索出的外轮廓点 A_{n-1} 进行回滚搜索,过程如下:

[0165] 步骤 I -11、第一次邻域搜索:按照步骤 20121 中所述的方法,以外轮廓点 A_{n-1} 作为本次搜索的搜索点 O_{11} 且以向量 $\overrightarrow{A_{n-1} A_{n-2}}$ 为基准向量进行邻域搜索;

[0166] 步骤 I -12、第一次邻域搜索结果处理:步骤 I -11 中搜索完成后,当在当前搜索点 O_{11} 的邻域测点集合 $S'(n-1)$ 中不能找出旋转角度最小的测点时,将外轮廓点 A_{n-1} 标记为不可用点,并进入步骤 II -1,进行下一次回滚搜索;

[0167] 反之,当在邻域测点集合 $S'(n-1)$ 中找出旋转角度最小的测点时,将所找出的测点作为回滚搜索过程中第一次搜索出的外轮廓点 A_{11} ,且将外轮廓点 A_{11} 标记为已用点,并判断外轮廓点 A_{11} 是否为极值点 A_0 :当外轮廓点 A_{11} 为极值点 A_0 时,完成回滚搜索过程;否则,进入步骤 I -13,进行下一次邻域搜索;

[0168] 步骤 2012 中进行邻域搜索过程中,第 $(n-1)$ 次搜索时,当前搜索点 O_{n-1} 的邻域内所有测点组成邻域测点集合 $S(n-1)$;所述邻域测点集合 $S(n-1)$ 中的所有未标记的测点组成邻域测点集合 $S'(n-1)$;

[0169] 步骤 I -13、第 k 次邻域搜索:以回滚搜索过程中第 $(k-1)$ 次搜索出的外轮廓点 $A_{1(k-1)}$ 作为本次搜索的搜索点 O_{1k} 且以向量 $\overrightarrow{A_{1(k-1)} A_{1(k-2)}}$ 为基准向量进行邻域搜索,并按照步骤 20121 中所述的方法,在当前搜索点 O_{1k} 的邻域内找出旋转角度最小的测点,所找出的测

点为回滚搜索过程中第 k 次搜索出的外轮廓点 A_{1k} ；

[0170] 其中, k 为正整数且 $k \geq 2$; 当 $k = 2$ 时, $A_{1(k-2)} = O_{11}$, $A_{1(k-1)} = A_{11}$; 当 $j > 2$ 时, $A_{1(k-2)}$ 为回滚搜索过程中第 $(k-2)$ 次搜索出的外轮廓点;

[0171] 步骤 I -14、第 k 次邻域搜索结果处理: 步骤 I -13 中搜索完成后, 判断第 k 次搜索出的外轮廓点 A_{1k} 是否为极值点 A_0 ; 当外轮廓点 A_{1k} 为极值点 A_0 时, 完成回滚搜索过程; 否则, 返回步骤 I -13, 进行下一次邻域搜索;

[0172] 步骤 II -1、第 h 次回滚搜索: 按照步骤 I -1 中所述的方法, 对步骤 2012 中第 $(n-h+1)$ 次搜索出的外轮廓点 A_{n-h+1} 进行回滚搜索, 直至完成回滚搜索过程; 其中, h 为正整数且 $h \geq 2$;

[0173] 步骤 2012 中完成回滚搜索过程后, 当前状态下所有标记为已用点的测点组成所述外轮廓点集合 A'' , 并且所有标记为已用点的测点总数量为 N 个。

[0174] 综上所述, 进行建筑物屋面外轮廓点提取时, 增设回滚搜索机制, 因而能有效确保所提取外边界线的准确性和可操作性。

[0175] 本实施例中, 步骤 2012 中进行邻域搜索过程中, 将极值点 A_0 和各次搜索到的外轮廓点由先至后放入外轮廓点集合堆栈中, 并将放入所述外轮廓点集合堆栈中的极值点 A_0 和所有外轮廓点均标记为已用点。

[0176] 步骤 20123 中, 将外轮廓点 A_n 标记为不可用点的同时, 还需将外轮廓点 A_n 从所述外轮廓点集合堆栈中弹出。

[0177] 步骤 I -12 中将外轮廓点 A_{11} 标记为已用点的同时, 还需将外轮廓点 A_{11} 放入所述外轮廓点集合堆栈中。

[0178] 步骤 I -13 中将外轮廓点 A_{1k} 标记为已用点的同时, 还需将外轮廓点 A_{1k} 所述外轮廓点集合堆栈中。

[0179] 步骤 2012 中完成回滚搜索过程后, 当前状态下所述外轮廓点集合堆栈内的所有测点组成所述外轮廓点集合。

[0180] 本实施例中, 对当前所处理建筑物屋面的外边界线进行提取时, 过程如下:

[0181] 步骤 2031、特征点提取: 采用道格拉斯-普扑克算法对所述外轮廓线进行特征点提取, 并从所述外轮廓点集合 A'' 提取出 S 个特征点, S 个特征点分别记作 S_1 、 S_2 、 \dots 、 S_S ;

[0182] 本实施例中, 获得当前所处理建筑物屋面的外轮廓线后, 所获得 N 个外轮廓点 A_0 、 A_1 、 A_2 、 \dots 、 A_{N-1} 沿逆时针方向由前至后进行排列; 之后, 将外轮廓点 A_0 和 A_{N-1} 分别作为起始点和终止点, 将步骤 201 中所得到的外轮廓线分割成一条折线段, 之后再采用道格拉斯-普扑克算法对该折线段进行特征点提取, 所提取的特征点为突变的测点, 即拐点。

[0183] 本实施例中, 步骤 2031 中采用道格拉斯-普扑克算法对所述外轮廓线进行特征点提取时, 过程如下:

[0184] 步骤 20311、特征点指定: 将所述外轮廓点集合 A'' 中 N 个所述外轮廓点中任意相邻两个外轮廓点 A_D 和 A_F 指定为特征点, 并将外轮廓点 A_D 和 A_F 均标记为特征点; 其中 D 和 F 均为正整数且 $D \neq F$, $D = 1, 2, \dots, N$, $F = 1, 2, \dots, N$ 。

[0185] 本实施例中, $A_D = A_0$, $A_F = A_{N-1}$ 。

[0186] 步骤 20312、中间特征点获取: 将外轮廓点 A_D 和 A_F 作为一个特征点对, 从所述外轮廓点集合 A'' 找出一个与特征点对 A_D 与 A_F 所在的直线 $A_D A_F$ 的距离最远且未标记的外轮廓

点,并将所找出的外轮廓点作为特征点对 A_D 与 A_F 的中间特征点,记作 A_E ,且将外轮廓点 A_E 标记为特征点。

[0187] 步骤 20313、特征点对获取:以步骤 20312 中获取的中间特征点 A_E 重新组建特征点对。

[0188] 以中间特征点 A_E 重新组建特征点对时,将中间特征点 A_E 分别与特征点 A_D 和 A_F 组成两个特征点对,两个特征点对分别为特征点对 A_D 与 A_E 和特征点对 A_E 与 A_F 。

[0189] 步骤 20314、中间特征点获取及判断处理:对步骤 20313 中组成的两个特征点对分别进行中间特征点获取及判断处理,且两个特征点对的中间特征点获取及判断处理方法均相同。

[0190] 其中,对一个特征点对进行中间特征点获取及判断时,从所述外轮廓点集合 A'' 中找出一个与当前所处理特征点对所在的直线的距离最远且未标记的外轮廓点,并判断所找出的外轮廓点与当前所处理特征点对所在直线的距离 d 是否大于 d_0 :当 $d > d_0$ 时,将所找出的外轮廓点作为当前所处理特征点对的中间特征点,并将该中间特征点标记为特征点,并进入步骤 20315;否则,完成当前所处理特征点对的特征点提取过程。

[0191] 其中, $d_0 = 30\text{cm} \sim 50\text{cm}$ 。

[0192] 步骤 20315、特征点对获取与中间特征点获取及判断处理:先按照步骤 20313 中所述的特征点对获取方法,以步骤 20314 中所获取的中间特征点重新组建特征点对;之后,按照步骤 20314 中所述的方法,对本步骤中所组建的所有特征点对分别进行中间特征点获取及判断处理。

[0193] 步骤 20316、多次重复步骤 20315,直至完成所组建的所有特征点对的特征点提取过程。

[0194] 本实施例中,步骤 20314 中对所找出的外轮廓点与当前所处理特征点对所在直线的距离 d 进行计算时,根据公式 $d = (L'1 \times A_n \cdot X + L'2 \times A_n \cdot y + L'3) / \sqrt{L'1^2 + L'2^2}$,其中所找出的外轮廓点的二维坐标为 $(A_n \cdot X, A_n \cdot y)$,当前所处理特征点对的两个特征点的二维坐标分别为 $(A_t \cdot X, A_t \cdot y)$ 和 $(A_f \cdot X, A_f \cdot y)$,其中 $L'1 = A_f \cdot y - A_t \cdot y$, $L'2 = A_t \cdot x - A_f \cdot x$, $L'3 = A_f \cdot x \times A_t \cdot y - A_t \cdot x \times A_f \cdot y$ 。

[0195] 本实施例中,步骤 2031 中采用道格拉斯-普扑克算法对所述外轮廓线进行特征点提取后,所提取的特征点数量为 M 个,其中 M 为正整数且 $M \geq S$; M 个特征点组成特征点集合, S 个特征点分别记作 S_1 、 S_2 、 \dots 、 S_M ,特征点 S_1 又记作特征点 S_{M+1} 。

[0196] 特征点提取完成后,还需对所提取的 M 个特征点分别进行判定;其中,对 M 个特征点中任一个特征点 S_h 进行判定时,判断特征点 S_h 与直线 $S_{h-1}S_{h+1}$ 之间的距离 d_h 是否大于 d_0 :当 $d_h > d_0$ 时,在所述特征点集合中保留特征点 S_h ;否则,从所述特征点集合中删除特征点 S_h ,并将特征点 S_h 标记为非特征点。

[0197] 直线 $S_{h-1}S_{h+1}$ 为特征点 S_{h-1} 和 S_{h+1} 所在的直线,特征点 S_{h-1} 和 S_{h+1} 为与特征点 S_h 相邻的两个特征点;其中, h 为正整数且 $h = 1, 2, \dots, M$ 。

[0198] 对 M 个特征点分别进行判定后,所述特征点集合中特征点的数量为 S 个。

[0199] 综上,步骤 2031 中进行特征点提取时,先从外轮廓点集合中的第一个外轮廓点和最后一个外轮廓点作为特征点对,使外轮廓线形成一条折线段;之后,分别计算特征点对中的两个特征点之间的所有外轮廓点到两个特征点连线的距离,将距离最大且大于 d_0 外

轮廓点作为中间特征点,并将中间特征点分别与特征点对中的两个特征点组成两个特征点对;然后,对组成的特征点对再进行中间特征点获取,当中间特征点到特征点对中两个特征点连线的距离小于 d_0 时结束。

[0200] 由于道格拉斯-普扑克算法存在一定的限制性,主要原因在于外轮廓点集合中的第一个外轮廓点和最后一个外轮廓点(即指定的特征点)要求都不能为拐点,因而提取出的特征点并不都是拐点,因而需对提取出的特征点进行二次确认,即判定。实际进行判定时,根据所判断特征点的前后相邻两个特征点进行验证。

[0201] 步骤 2032、最小二乘法直线拟合及初始边界线获取:对 S 个特征点中相邻两个特征点所在的直线分别进行拟合,并获得 S 条拟合直线; S 条拟合直线相交形成的封闭曲线为当前所处理建筑物的初始边界线,所述初始边界线由多个直线段连接而成。

[0202] 对 S 个特征点中相邻两个特征点 S_a 和 S_b 进行直线拟合时,先将特征点 S_a 和 S_b 以及步骤 201 中所述外轮廓点集合中特征点 S_a 和 S_b 之间的所有外轮廓点组成直线点集,再利用最小二乘法对所述直线点集进行直线拟合,获得特征点 S_a 和 S_b 所在的拟合直线;其中, a 和 b 均为正整数且 $a \neq b$, $a = 1, 2, \dots, S$, $b = 1, 2, \dots, S$ 。

[0203] 本实施例中,步骤 2032 中对相邻两个特征点 S_a 和 S_b 进行直线拟合时,先将所述直线点集中所有测点的 X 轴坐标值组成 X 轴坐标集合,并将所述直线点集中所有测点的 X 轴坐标值组成 Y 轴坐标集合;之后,计算 X 轴坐标集合中多个 X 轴坐标值的方差,记作 σ_x ;同时,计算 Y 轴坐标集合中多个 Y 轴坐标值的方差,记作 σ_y ;然后,根据计算得出的 σ_x 和 σ_y ,选取拟合用的直线模型:当 $\sigma_x \geq \sigma_y$ 时,所选取的直线模型为 $y = kx + b$;否则,当 $\sigma_x < \sigma_y$ 时,所选取的直线模型为 $x = ky + b$;最后,根据所述直线点集中所有测点的二维坐标,并利用所选取的直线模型进行直线拟合。

[0204] 本实施例中,采用直线模型 $y = kx + b$ 进行直线拟合时, $k = [n * \sum (x_g \times y_g) - \sum x_g \times \sum y_g] / [n \times \sum y_g^2 - \sum y_g \times \sum y_g]$, 式中 n 为所述直线点集中的测点总数量, $\sum (x_g \times y_g)$ 为所述直线点集中所有测点的 X 轴与 Y 轴坐标值的乘积之和, $\sum x_g$ 为所述直线点集中所有测点的 X 轴坐标值之和, $\sum y_g$ 为所述直线点集中所有测点的 Y 轴坐标值之和, $\sum y_g^2$ 为所述直线点集中所有测点的 Y 轴坐标值的平方之和。

[0205] 步骤 2033、建筑物主方向及副方向确定:先对步骤 2032 中所述初始边界线中的多个直线的方向向量进行确定,再对多个直线的方向向量的权重分别进行计算,并将权重最大的直线的方向向量作为当前所处理建筑物的主方向,将当前所处理建筑物的主方向的正交向量作为当前所处理建筑物的副方向。

[0206] 本实施例中,对步骤 2032 中所述初始边界线中的多个直线的方向向量进行确定时,沿逆时针方向由先至后对各直线的方向向量进行确定。

[0207] 本实施例中,步骤 2032 中所述初始边界线由 P 个直线段组成,所述初始边界线中有 P 个顶点, P 个顶点分别为 S 条拟合直线相交后的交点, P 个顶点沿逆时针方向由先至后分别记作 T_1, T_2, \dots, T_P , P 个直线段沿逆时针方向由先至后排列,其中 P 个直线段中第 s 条直线段记作直线段 $T_s T_{s+1}$,其中 s 为正整数且 $s = 1, 2, \dots, P$,其中顶点 T_1 又记作 T_{P+1} ,个直线段中第 s 条直线的方向方向为 $T_s T_{s+1}$ 。

[0208] 本实施例中,步骤 2033 中对多个直线的方向向量进行确定时,多个所述直线的方向向量确定方法均相同。对任一个直线段 l_q 的方向向量 V_q 进行确定时,根据公式

$V_{Q \cdot X} = \frac{X_{Q2} - X_{Q1}}{\sqrt{(X_{Q2} - X_{Q1})^2 + (Y_{Q2} - Y_{Q1})^2}}$ 和公式 $V_{Q \cdot Y} = \frac{Y_{Q2} - Y_{Q1}}{\sqrt{(X_{Q2} - X_{Q1})^2 + (Y_{Q2} - Y_{Q1})^2}}$ 进行计算, 方向

向量 $V_Q = (V_Q \cdot X, V_Q \cdot Y)$; 式中, 直线段 l_Q 的两端点的二维坐标分别为 (X_{Q1}, Y_{Q1}) 和 (X_{Q2}, Y_{Q2}) 。

[0209] 对直线段 l_Q 的方向向量的权重进行计算时, 由先至后将直线段 l_Q 的方向向量 V_Q , 分别与所述初始边界线中其它各直线的方向向量叠加后, 获得直线段 l_Q 的权重向量 W_Q , 过程如下:

[0210] 步骤 20331、叠加顺序确定及角度差阈值 c_0 设定: 按照叠加先后顺序, 对所述初始边界线中其它各直线的方向向量进行排序; 其中, 角度差阈值 $c_0 = 5^\circ \sim 10^\circ$, $c_{\perp} = 90^\circ - c_0$ 。

[0211] 步骤 20332、第一次叠加: 将直线段 l_Q 的方向向量 V_Q 作为基准方向向量, 先计算出本次叠加的直线的方向向量与基准方向向量之间的角度差 $\Delta \angle_{Q1}$; 再结合步骤 20331 中所设定的 c_0 和 c_{\perp} , 并根据计算得出的 $\Delta \angle_{Q1}$ 确定叠加方式: 当 $\Delta \angle_{Q1}$ 更接近 c_0 时, 将基准方向向量与本次叠加的直线的方向向量叠加; 当 $\Delta \angle_{Q1}$ 更接近 c_{\perp} 时, 将基准方向向量与本次叠加直线的方向向量的正交向量叠加; 之后, 按照所确定的叠加方式进行叠加, 并将叠加后的向量作为下一次叠加的基准叠加向量。

[0212] 步骤 20333、第 t 次叠加: 将第 $t-1$ 次叠加后的向量作为本次叠加的基准叠加向量, 先计算出本次叠加直线的方向向量与当前状态下的基准叠加向量之间的角度差 $\Delta \angle_{Qt}$; 再结合步骤 20331 中所设定的 c_0 和 c_{\perp} , 并根据计算得出的 $\Delta \angle_{Qt}$ 确定叠加方式: 当 $\Delta \angle_{Qt}$ 更接近 c_0 时, 将当前状态下的基准叠加向量与本次叠加的直线的方向向量叠加; 当 $\Delta \angle_{Qt}$ 更接近 c_{\perp} 时, 将当前状态下的基准叠加向量与本次叠加直线的方向向量的正交向量叠加; 之后, 按照所确定的叠加方式进行叠加, 并将叠加后的向量作为下一次叠加的基准叠加向量。

[0213] 步骤 20334、多次重复步骤 20333, 直至完成方向向量 V_Q 与所述初始边界线中其它各直线的方向向量的全部叠加过程, 且叠加过程完成后所得的向量为直线段 l_Q 的权重向量 W_Q 。

[0214] 步骤 2033 中权重最大的直线段为权重向量的长度最大的直线段。

[0215] 本实施例中, 步骤 20332 中对本次叠加的直线的方向向量与基准方向向量之间的角度差 $\Delta \angle_{Q1}$ 进行计算时, 根据公式 $\Delta \angle_{Q1} = \arccos(|V_{L1} \cdot X \times V_Q \cdot X + V_{L1} \cdot Y \times V_Q \cdot Y|)$ 进行计算; 本次叠加的直线的方向向量为 $(V_{L1} \cdot X, V_{L1} \cdot Y)$, 基准方向向量为 $(V_Q \cdot X, V_Q \cdot Y)$;

[0216] 步骤 20333 中对本次叠加的直线的方向向量与当前状态下的基准叠加向量之间的角度差 $\Delta \angle_{Qt}$ 进行计算时, 根据公式 $\Delta \angle_{Qt} = \arccos(|V_{Lt} \cdot X \times V_t \cdot X + V_{Lt} \cdot Y \times V_t \cdot Y|)$ 进行计算; 本次叠加的直线的方向向量为 $(V_{Lt} \cdot X, V_{Lt} \cdot Y)$, 当前状态下的基准方向向量为 $(V_t \cdot X, V_t \cdot Y)$ 。

[0217] 本实施例中, 步骤 20332 中叠加后的向量记作 $(V_Q' \cdot X, V_Q' \cdot Y)$; 将基准方向向量与本次叠加直线的方向向量叠加时, $V_Q' \cdot X = V_{L1} \cdot X + V_Q \cdot X$, $V_Q' \cdot Y = V_{L1} \cdot Y + V_Q \cdot Y$; 将基准方向向量与本次叠加直线的方向向量的正交向量叠加时, $V_Q' \cdot X = V_{L1 \perp} \cdot X + V_Q \cdot X$, $V_Q' \cdot Y = V_{L1 \perp} \cdot Y + V_Q \cdot Y$; 本次叠加直线的方向向量的正交向量为 $(V_{L1 \perp} \cdot X, V_{L1 \perp} \cdot Y)$;

[0218] 步骤 20333 中叠加后的向量记作 $(V_t' \cdot X, V_t' \cdot Y)$; 将当前状态下的基准叠加向量与

本次叠加的直线的方向向量叠加时, $V_t'.X = V_{L_t}.X + V_t.X$, $V_t'.Y = V_{L_t}.Y + V_t.Y$; 将当前状态下的基准叠加向量与本次叠加直线的方向向量的正交向量叠加时, $V_t'.X = V_{L_t \perp}.X + V_t.X$, $V_t'.Y = V_{L_t \perp}.Y + V_t.Y$; 本次叠加直线的方向向量的正交向量为 $(V_{L_t \perp}.X, V_{L_t \perp}.Y)$ 。

[0219] 步骤 2034、初始边界线规则化: 对步骤 2032 中所述初始边界线中的多个直线段分别进行规则化处理。

[0220] 对所述初始边界线中任一一个直线段进行规则化处理时, 过程如下:

[0221] 步骤 2034-1、规则化方向确定: 根据步骤 2033 中所确定的主方向和副方向以及当前所处理直线的方向向量, 对当前所处理直线的规则化方向进行确定: 当当前所处理直线的方向向量更靠近主方向时, 以主方向作为规则化方向; 反之, 当当前所处理直线的方向向量更靠近副方向时, 以副方向作为规则化方向。

[0222] 步骤 2034-2、是否需进行规则化判断: 计算当前所处理直线在步骤 2034-1 中所确定规则化方向上的投影长度 L , 并根据投影长度 L 对当前所处理直线是否需进行规则化进行判断: 当投影长度 $L \leq L_0$ 时, 进入步骤 2034-3; 否则, 无需进行规则化处理, 将当前所处理直线所在的直线作为其规则化直线; 其中, $L_0 = 50\text{cm} \sim 1\text{m}$ 。

[0223] 步骤 2034-3、规则化处理: 以当前所处理直线的中点为起点, 且以步骤 2034-1 中所确定的规则化方向为方向向量, 生成当前所处理直线的规则化直线。

[0224] 本实施例中, 步骤 2034 中进行初始边界线规则化之前, 先找出步骤 2032 中所述初始边界线中方向向量相同的所有直线段, 并将方向向量相同的所有直线段合并为一条直线; 进行规则化处理时, 仅需对合并后的直线进行规则化处理。实际进行规则化处理时, 合并后直线的中点坐标为取方向向量相同的所有直线段的平均值。

[0225] 本实施例中, 步骤 2034-2 中对当前所处理直线在步骤 2034-1 中所确定规则化方向上的投影长度 L 进行计算时, 先根据公式 $\Delta \angle \theta = \arccos(|V_H.X \times V_{\pm}.X + V_H.Y \times V_{\pm}.Y|)$ 进行计算, 当前所处理直线的方向向量为 $(V_H.X, V_H.Y)$, 主方向为 $(V_{\pm}.X, V_{\pm}.Y)$; 之后, 根据计算得出的 $\Delta \angle \theta$, 对投影长度 L 进行计算: 当步骤 2034-1 中所确定规则化方

向为主方向时, $L = \sin\left(\frac{\Delta \angle \theta}{2}\right) \times \sqrt{(V_H.X - V_{\pm}.X)^2 + (V_H.Y - V_{\pm}.Y)^2}$; 当步骤 2034-1 中所确

定规则化方向为副方向时, $L = \sin\left(\frac{90^\circ - \Delta \angle \theta}{2}\right) \times \sqrt{(V_H.X - V_{\pm}.X)^2 + (V_H.Y - V_{\pm}.Y)^2}$ 。

[0226] 综上, 实际进行规划化处理时, 当前所处理直线的中点坐标保持不变, 方向向量改为主方向或副方向。

[0227] 步骤 2035、规则化边界线获取: 步骤 2034 中所述初始边界线中的多个直线段均规则化处理完成后, 多个直线的规则化直线相交形成的封闭曲线为当前所处理建筑物的规划化边界线。

[0228] 如图 3 所示, 采用本发明所述的方法对边界线进行规划化后, 除部分弧线或者大角度的线段外, 得到的建筑物屋面外边界线在规则化的前提下, 覆盖了全部点云的外边界, 使用效果非常好。图 3 中, 左侧为未经规则化的边界线, 右侧为规则化后的边界线。

[0229] 本实施例中, 步骤 2042 中对外轮廓点 $C_{i,j}$ 进行邻域搜索时, 以外轮廓点 $C_{i,j}$ 为中心且以 $0.5\text{m} \sim 1.5\text{m}$ 为搜索半径进行搜索。实际使用时, 可以根据具体需要, 对搜索半径进行相应调整。并且, 实际进行搜索时, 沿逆时针方向进行搜索, 并且以外轮廓点 $C_{i,j}$ 的邻近

区域内最外一点（即 X 轴坐标或 Y 轴坐标值最小的测点）开始搜索。

[0230] 本实施例中，步骤 2044 中进行矢量边界确定之前，还需根据屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中各外轮廓点的三维坐标，沿逆时针方向或顺时针方向，由先至后对屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点集合中的所有外轮廓点进行排序，并根据外轮廓点的排序结果，对步骤 2043 中得出的所有外轮廓点的类别编号进行排序，获得屋顶面片 $S'_{i'}$ 的外轮廓点类别编号序列。

[0231] 排序完成后，屋顶面片 $S'_{i'}$ 中相邻两个外轮廓点的类别编号相邻；所述外轮廓点类别编号序列中，多个外轮廓点的类别编号由先至后分别记作 $L_{i'1}$ 、 $L_{i'2}$ 、 \dots 、 $L_{i'M}$ 。

[0232] 本实施例中，步骤 II 中当 $\Delta h_{ij} > \Delta h_0$ 时，还需对外轮廓点 $C_{i'j}$ 和邻域搜索点 $C'_{i'j}$ 的高程进行比较，并建立阶跃线类别集合 W_k ，且将外轮廓点 $C_{i'j}$ 和邻域搜索点 $C'_{i'j}$ 中高程高的点放入阶跃线类别集合 W_k 中。

[0233] 步骤 III 中对下一个外轮廓点的类别进行确定时，当当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点的高程差 $> \Delta h_0$ 时，还需对当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点的高程进行比较；当阶跃线类别集合 W_m 已建立时，将当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点中高程高的点放入集合 W_m 中；否则，需建立阶跃线类别集合 W_m ，并将当前所确定外轮廓点和其邻域搜索点中高程高的点放入集合 W_m 中；其中， m' 为当前所确定外轮廓点的邻域搜索点所属屋顶面片的编号， m' 为正整数， $m' = 1, 2, \dots, N'$ 且 $m' \neq i'$ 。

[0234] 本实施例中，步骤 II 中类别编号 T_k 中，T 表示类别为屋脊线， k' 表示在外轮廓点 $C_{i'j}$ 的位置处屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 k' 的屋顶面片相交。

[0235] 类别编号记作 W_k 中，W 表示类别为阶跃线， k' 表示在外轮廓点 $C_{i'j}$ 的位置处屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 k' 的屋顶面片之间形成高低面。

[0236] 本实施例中，步骤 2044 中进行矢量边界确定时，由先至后对步骤 2043 中所述外轮廓点类别编号序列中相邻两个类别编号分别进行矢量边界点提取处理，过程如下：

[0237] 步骤 i、对类别编号 $L_{i'1}$ 和 $L_{i'2}$ 进行矢量边界点提取处理：先判断 $L_{i'1}$ 和 $L_{i'2}$ 是否相同；当 $L_{i'1} = L_{i'2}$ 时，完成矢量边界点提取过程；否则，获取与类别编号 $L_{i'1}$ 和 $L_{i'2}$ 对应的矢量边界点，过程如下：

[0238] 当 $L_{i'1} = T_g$ 且 $L_{i'2} = T_h$ 时，先计算出屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 g' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_g 和屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 h' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_h ，再计算出直线段 l_g 和 l_h 的交点 $C_{g'h}$ ，交点 $C_{g'h}$ 为与类别编号 $L_{i'1}$ 和 $L_{i'2}$ 对应的矢量边界点。其中，交点 $C_{g'h}$ 为三个平面（即屋顶面片 $S'_{i'}$ 、编号为 g' 的屋顶面片和编号为 h' 的屋顶面片）的交点。当 $L_{i'1} = T_g$ 且 $L_{i'2} = T_h$ 时，说明屋顶面片 $S'_{i'}$ 先与编号为 g' 的屋顶面片相交，紧接着再与编号为 h' 的屋顶面片相交。

[0239] 当 $L_{i'1}$ 和 $L_{i'2}$ 中一个编号为 T_a 且另一编号为 U 时，先计算出屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 a' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_a ，再结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系，计算出直线段 l_a 与当前所处理建筑物屋面的外边界线之间的交点 C_a ， C_a 为与类别编号 $L_{i'1}$ 和 $L_{i'2}$ 对应的矢量边界点。其中，交点 C_a 处于当前所处理建筑物屋面的外边界线上，交点 C_a 为屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 a' 的屋顶面片的公共交点。对交点 C_a 的计算方法为：先计算出直线段 l_a 与当前所处理建筑物屋面的外边界线中相交的所有交点，再将所求出的交点中距离 kd 树搜索得到的点距离最近的点作为 C_a 。当 $L_{i'1} = T_a$ 且 $L_{i'2} = U$ 时，说明屋顶面片 $S'_{i'}$ 先与编号为 a' 的屋顶面片相交且其下一条外边界线段为当前所处理建筑物屋面的外边界线；反之，

当 $L_{i',1} = U$ 且 $L_{i',2} = T_a$ 时,说明屋顶面片 $S'_{i'}$ 的一条外边界线段为当前所处理建筑物屋面的外边界线,紧接着屋顶面片 $S'_{i'}$ 再与编号为 a' 的屋顶面片相交。

[0240] 当 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 中一个编号为 W_b 且另一编号为 U 时,先根据阶跃线类别集合 W_b 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_b 中所有点所处的直线 l_b ,再结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系,计算出直线 l_b 与当前所处理建筑物屋面的外边界线之间的交点 C_b , C_b 位于屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 b' 的屋顶面片的交界线上, C_b 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点。其中,当 $L_{i',1} = W_b$ 且 $L_{i',2} = U$ 时,说明屋顶面片 $S'_{i'}$ 先与编号为 b' 的屋顶面片阶跃形成高低面且其下一条外边界线段为当前所处理建筑物屋面的外边界线;反之,当 $L_{i',1} = U$ 且 $L_{i',2} = W_b$ 时,说明屋顶面片 $S'_{i'}$ 的一条外边界线段为当前所处理建筑物屋面的外边界线,紧接着屋顶面片 $S'_{i'}$ 再与编号为 a' 的屋顶面片阶跃形成高低面。

[0241] 当 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 中一个编号为 T_e 且另一编号为 W_f 时,先计算出屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 e' 的屋顶面片之间的相交直线段 l_e ;同时,根据阶跃线类别集合 W_f 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_f 中所有点所处的直线 l_f ,再结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系,计算出直线段 l_e 与直线 l_f 之间的交点 $C_{e'f}$, $C_{e'f}$ 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点。其中,当 $L_{i',1} = T_e$ 且 $L_{i',2} = W_f$ 时,说明屋顶面片 $S'_{i'}$ 先与编号为 e' 的屋顶面片相交,紧接着再与编号为 f' 的屋顶面片阶跃形成高低面;反之,当 $L_{i',1} = W_f$ 且 $L_{i',2} = T_e$ 时,说明屋顶面片 $S'_{i'}$ 先与编号为 f' 的屋顶面片阶跃形成高低面,紧接着再与编号为 e' 的屋顶面片相交。

[0242] 当 $L_{i',1} = W_p$ 且 $L_{i',2} = W_q$ 时,根据阶跃线类别集合 W_p 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_p 中所有点所处的直线 l_p ;同时,根据阶跃线类别集合 W_q 中所有点的三维坐标,采用最小二乘法拟合出集合 W_q 中所有点所处的直线 l_q ,再计算出直线 l_p 和 l_q 的交点 $C_{p,q}$,交点 $C_{p,q}$ 为与类别编号 $L_{i',1}$ 和 $L_{i',2}$ 对应的矢量边界点。此时,屋顶面片 $S'_{i'}$ 先与编号为 p' 的屋顶面片阶跃形成高低面,紧接着再与编号为 q' 的屋顶面片阶跃形成高低面。

[0243] 其中, g' 、 h' 、 a' 、 b' 和 e' 均为屋顶面片的编号。

[0244] 步骤 ii、对类别编号 $L_{i',t'}$ 和 $L_{i',(t'+1)}$ 进行矢量边界点提取处理:按照步骤 i 中所述的方法,对类别编号 $L_{i',t'}$ 和 $L_{i',(t'+1)}$ 进行矢量边界点提取处理;其中, t' 为正整数且 $t' = 1、2、\dots、M'$;其中, $L_{i',1}$ 又记作 $L_{i',(M'+1)}$ 。

[0245] 步骤 iii、多次重复步骤 ii,直至完成所述外轮廓点类别编号序列中任意相邻两个类别编号的矢量边界点提取处理过程。

[0246] 步骤 iv、将步骤 i 至步骤 iii 中所提取的所有矢量边界点,按照提取的先后顺序由先至后连接,获得屋顶面片 $S'_{i'}$ 的矢量边界。

[0247] 本实施例中,步骤 i 中对交点 $C_{g'h'}$ 进行求解时,先利用屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 g' 的屋顶面片的平面方程,求出相交直线段 l_g 后,再得出直线段 l_g 在 X-Y 平面上的投影直线 l_g (只需不考虑直线段 l_g 中的 Z 轴坐标即可);同理,利用屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 h' 的屋顶面片的平面方程,求出相交直线段 l_h ,后,再得出直线段 l_h 在 X-Y 平面上的投影直线 l_h (只需不考虑直线段 l_h 中的 Z 轴坐标即可),此时只需在 X-Y 平面上求出投影直线 l_g 和投影直线 l_h 的交点 $C_{g'h'}$,便得出交点 $C_{g'h'}$ 的二维坐标,由于交点 $C_{g'h'}$ 位于屋顶面片 $S'_{i'}$ 上,则结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的平面方程,便能得出交点 $C_{g'h'}$ 的三维坐标。

[0248] 对交点 $C_{a'}$ 进行求解时,由于所得出的当前所处理建筑物屋面的外边界线位于二维平面(即 X-Y 平面)上,先利用屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 a' 的屋顶面片的平面方程,求出相交直线段 $l_{a'}$ 后,再得出直线段 $l_{a'}$ 在 X-Y 平面上的投影直线 $l_{a'}$ (只需不考虑直线段 $l_{a'}$ 中的 Z 轴坐标即可);然后,结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系,计算出投影直线 $l_{a'}$ 与当前所处理建筑物屋面的外边界线之间的交点 $C_{a'}$,此时得出交点 $C_{a'}$ 的二维坐标,由于交点 $C_{a'}$ 位于屋顶面片 $S'_{i'}$ 上,则结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的平面方程,便能得出交点 $C_{a'}$ 的三维坐标。

[0249] 对交点 $C_{b'}$ 进行求解时,先得出直线 $l_{b'}$ 在 X-Y 平面上的投影直线 $l_{b'}$ (只需不考虑直线段 $l_{b'}$ 中的 Z 轴坐标即可);然后,再结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的相邻关系,计算出投影直线 $l_{b'}$ 与当前所处理建筑物屋面的外边界线之间的交点 $C_{b'}$,此时得出交点 $C_{b'}$ 的二维坐标,由于交点 $C_{b'}$ 位于屋顶面片 $S'_{i'}$ 上,则结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的平面方程,便能得出交点 $C_{b'}$ 的三维坐标。

[0250] 对交点 $C_{e'f'}$ 进行求解时,先利用屋顶面片 $S'_{i'}$ 与编号为 e' 的屋顶面片的平面方程,求出相交直线段 $l_{e'}$ 后,再得出直线段 $l_{e'}$ 在 X-Y 平面上的投影直线 $l_{e'}$ (只需不考虑直线段 $l_{e'}$ 中的 Z 轴坐标即可);同时,得出直线 $l_{f'}$ 在 X-Y 平面上的投影直线 $l_{f'}$ (只需不考虑直线段 $l_{f'}$ 中的 Z 轴坐标即可);然后,计算出投影直线 $l_{e'}$ 与投影直线 $l_{f'}$ 之间的交点 $C_{e'f'}$,此时得出交点 $C_{e'f'}$ 的二维坐标,由于交点 $C_{e'f'}$ 位于屋顶面片 $S'_{i'}$ 上,则结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的平面方程,便能得出交点 $C_{e'f'}$ 的三维坐标。

[0251] 对交点 $C_{p'q'}$ 进行求解时,先得出直线段 $l_{p'}$ 在 X-Y 平面上的投影直线 $l_{p'}$ (只需不考虑直线段 $l_{p'}$ 中的 Z 轴坐标即可);同时,得出直线 $l_{q'}$ 在 X-Y 平面上的投影直线 $l_{q'}$ (只需不考虑直线段 $l_{q'}$ 中的 Z 轴坐标即可);然后,计算出投影直线 $l_{p'}$ 与投影直线 $l_{q'}$ 之间的交点 $C_{p'q'}$,此时得出交点 $C_{p'q'}$ 的二维坐标,由于交点 $C_{p'q'}$ 位于屋顶面片 $S'_{i'}$ 上,则结合屋顶面片 $S'_{i'}$ 的平面方程,便能得出交点 $C_{p'q'}$ 的三维坐标。

[0252] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例,并非对本发明作任何限制,凡是根据本发明技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、变更以及等效结构变化,均仍属于本发明技术方案的保护范围内。

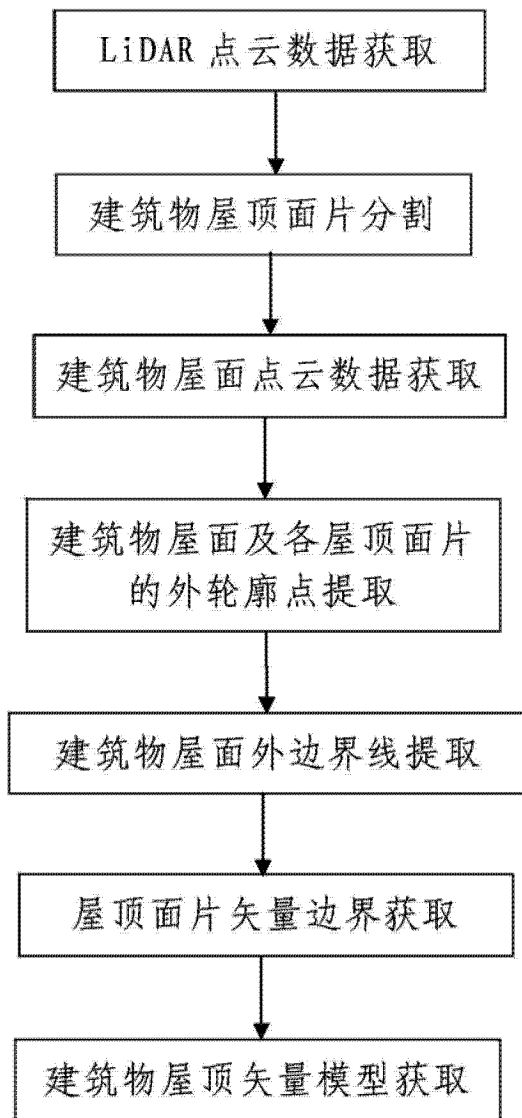


图 1

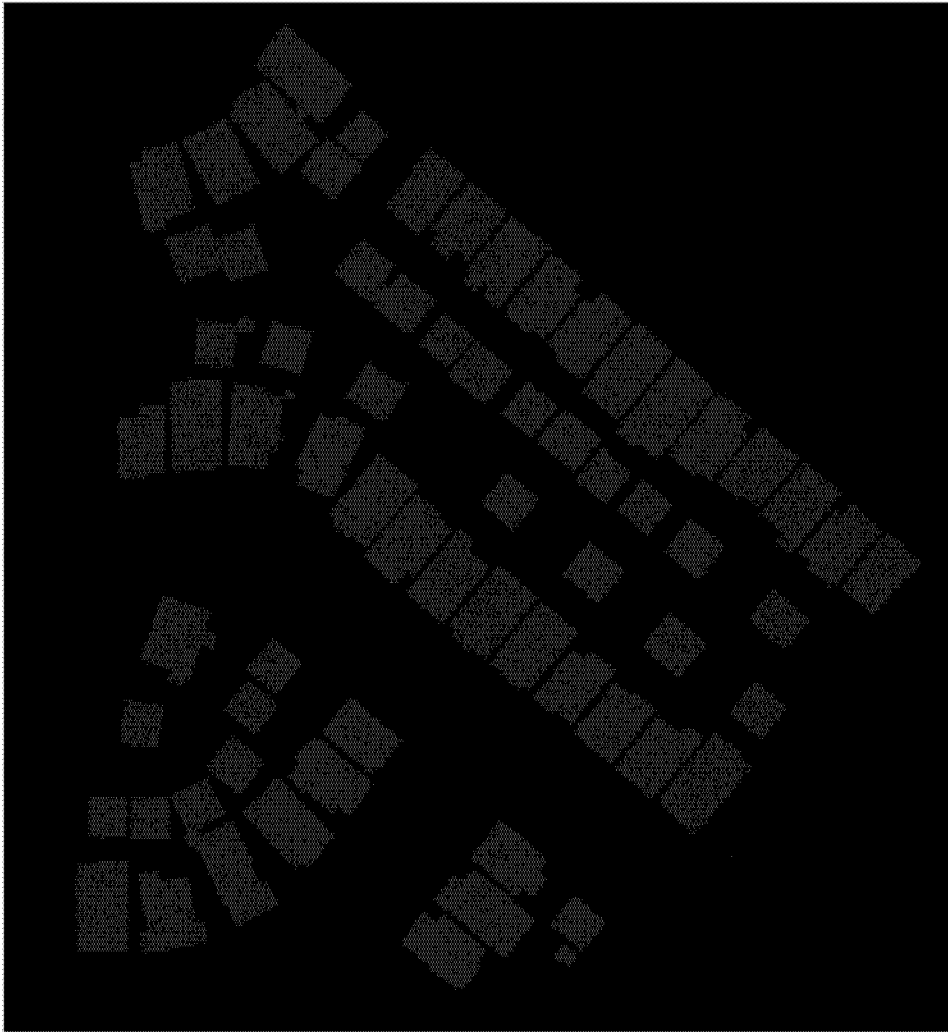


图 2

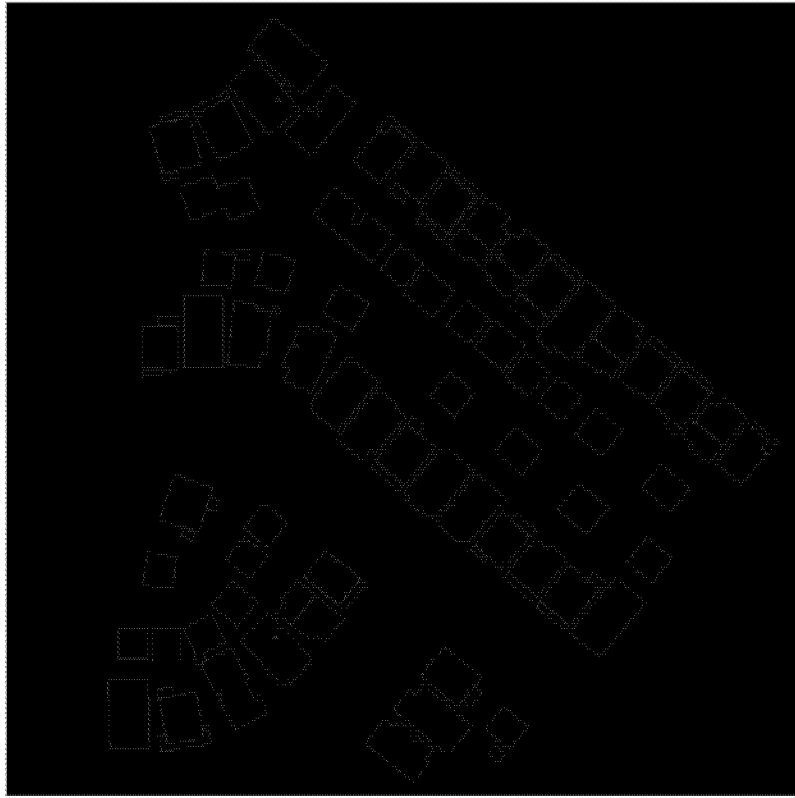


图 3

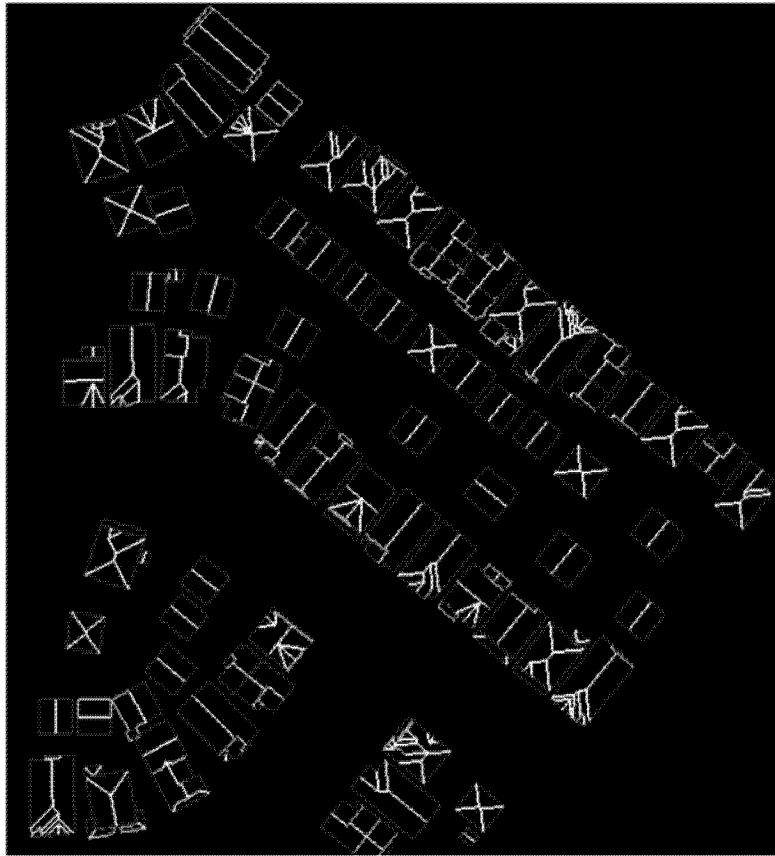


图 4

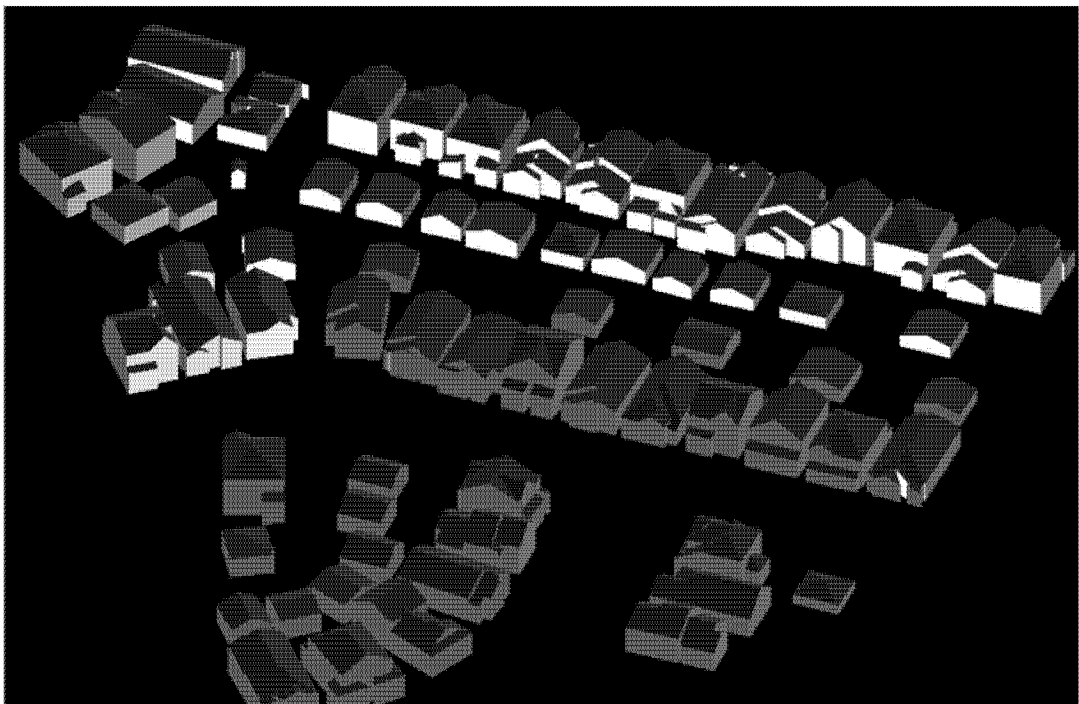


图 5