

文章编号:1671-8860(2011)11-1284-06

文献标志码:A

# 利用地面激光扫描数据进行建筑物变化检测

吕 刚<sup>1</sup> 康志忠<sup>1</sup>

(1 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京市海淀区学院路29号,100083)

**摘要:**利用地面激光扫描仪具有的数据获取速度快、精度高、实时性强、能全天候工作等优点,在快速获取三维点云的基础上,通过点云自动拼接、Hausdorff 距离检测不同时期建筑物的三维模型变化,并改进了检测算法,提高了算法的执行效率。通过拟合平面构建 Delaunay 三角网求解变化区域的面积来评估灾害对建筑物的破坏程度,从而为灾害应急响应以及保险理赔等提供了可靠的决策依据。

**关键词:**地面激光扫描;变化检测;点云拼接;Hausdorff 距离;Delaunay 三角剖分

**中图法分类号:**P225; P237.3

地面三维激光扫描技术是整个三维数据获取和重构技术体系中最新的技术,与传统的测绘手段有很大的区别。它能够快速获取物体表面每个采样点的空间位置坐标,得到一个表示实体的点集合,称之为点云(point clouds)。点云数据借助于计算机软件处理,用点、线、多边形、曲线、曲面等形式将立体模型描述出来,便可以重建出实体的表面模型。变化检测在许多领域都已有成功地应用,如土地变化检测、环境检测和灾害评估等<sup>[1]</sup>。用地面激光扫描数据进行变化检测时,都是对关注目标进行变化分析,用重采样(配准)后的数据进行差分运算,然后比较变化<sup>[2]</sup>,或者对表面模型进行平差<sup>[3]</sup>。Hsiao 等人<sup>[4]</sup>提出了将地面激光扫描仪与全站仪或者 GPS 相结合的方法来获取和配准地形数据,然后将数据转换到二维平面与现有的电子地形图进行比较。如要更新地理信息,对受自然灾害地区的灾前灾后建筑物的结构变化进行对比,都需要有效而且及时的处理手段。当然,除了这些大场景,地面三维激光扫描技术同样适用于小规模的变化检测,甚至是人面部的表情探测<sup>[5]</sup>。

迄今为止,众多学者已经提出了多种基于影像的变化检测方法<sup>[6,7]</sup>,但是基于地面激光扫描数据的建筑物变化检测的研究并不多。由于利用 Hausdorff 距离进行变化检测的精度最为可靠,

因此本文采用 Hausdorff 距离来检测不同时期建筑物三维模型的变化情况,并针对 Girardeau-Montaut 等人提出的以下三个方面的问题:①激光点的采样间隔随距离的远近发生变化;② Hausdorff 距离的运算时间;③真实变化的识别(如区分遮挡的情况),首先利用基于反射值影像的点云自动拼接方法获取高精度的拼接结果,其次利用变化点云与参考点云的映射关系生成二维反射值影像组织点云数据,通过确定搜索窗口来改进 Hausdorff 距离检测方法,提高检测速度。此外,为了识别真实的变化,对因遮挡形成的伪变化区域进行检测和去除。目前对变化检测的研究主要是停留在对变化区域的识别,而对变化量的确定还少有涉及,因此,本文提出基于三角化的变化区域表面积计算方法,以测算变化量。

## 1 基于 Hausdorff 距离的建筑物变化检测

### 1.1 点云自动拼接

由于对建筑物的两次扫描测站的位置是不固定的,所以两次扫描结果得到的同一点的坐标是不一样的,因此在进行建筑物的变化检测之前,需要对两期数据进行点云拼接。反射值影像是根据扫描点的反射值和角度坐标排列而成的影像,同

收稿日期:2011-09-15。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40801191);对地观测技术国家测绘局重点实验室经费资助项目(2009-11);国家教育部留学回国人员科研启动基金资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010ZY22)。

时也已知像素点与三维点的映射关系。反射值影像对于各类扫描仪都可以生成,因此本文采用了基于反射值影像的点云数据自动拼接方法<sup>[8]</sup>。解算不同扫描带之间的坐标转换参数,关键在于如何获得三维同名点。由于常规的匹配方法不能适应全景反射值影像对存在的影像分辨率和拍摄角度差异大的情况,所以本方法采用尺度不变特征变换(SIFT)方法<sup>[9]</sup>,在影像上提取关键点,然后匹配同名点。此外,分析反射值影像具有的特点,利用已知的像素点和三维点的映射关系,推导三维同名点间的几何不变特性,如距离、点邻域法线方向的夹角等对同名点的位置进行预测,对匹配同名点中存在的错点进行剔除。同名点预测、匹配和错点剔除形成一个迭代过程,保证匹配算法的稳定性。

## 1.2 基于 Hausdorff 距离变化检测的优化算法

在计算机视觉领域中, Hausdorff 距离常用于对任意目标影像进行模板匹配<sup>[10]</sup>。从 Hausdorff 距离的计算原理可知,计算量与点集的大小成正比。假设参考点云和变化点云均有  $n$  个点,计算 Hausdorff 距离的时间复杂度为  $O(n^2)$ ,随着扫描仪扫描分辨率的提高、扫描场角度的增大,点云的点数通常达到百万甚至千万,因此导致 Hausdorff 距离的计算时间过长,无法满足实际需要。本文利用变化点云与参考点云的映射关系生成二维反射值影像组织点云数据,通过确定搜索窗口来改进 Hausdorff 距离检测方法,提高检测速度,确保能更高效地为相关决策部门服务。

首先将检测区域点云的三维坐标转换为二维反射值影像坐标,转换关系如下:

$$\begin{aligned} x &= \arctan(Y/X)/\Delta\theta \\ y &= \arctan(Z/(X^2 + Y^2)^{1/2})/\Delta\theta \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $x, y$  是点在影像上的坐标;  $X, Y, Z$  是点的三维坐标;  $\Delta\theta$  是扫描时的角分辨率。对于地面三维激光扫描仪,角分辨率  $\Delta\theta$  和扫描角度的范围是在扫描前预先定义好的,所以它们可以看作是扫描的固有参数。

将计算的二维影像坐标作为每个三维激光点在二维数组中的索引,从而可以二维数组来组织三维点云。变化点云中激光点的三维坐标首先通过式(2)变换到参考点云坐标系,然后利用式(1)计算出影像坐标。

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $[X_C \ Y_C \ Z_C]^T$ ,  $[X_R \ Y_R \ Z_R]^T$  分别为

变化点云中激光点的坐标和转化到参考点云坐标系中的坐标;  $\mathbf{R}$  和  $[T_X \ T_Y \ T_Z]^T$  分别为变化点云到参考点云坐标转换的旋转矩阵和平移量。

考虑到点云拼接误差的影响,变化点云与参考点云中同名点所计算的影像坐标不一定相等,但由于点云的拼接误差一般在 mm 级,所以坐标的差值较小,因此可以利用搜索窗口来减小变化检测的计算量,提高检测速度。首先取出参考点云中的一个点,以变化点云中影像坐标与其相等的点  $a[i][j]$  为中心,取一个  $k \times k$  ( $k$  为偶数) 大小的搜索窗口,找出窗口中与参考点的三维距离最近的点,如果距离小于给定阈值,即认为是没有变化的点。如果参考点云中的点在变化点云中找不到与之匹配的点,即认为该点就是变化点。以二维数组的形式来组织三维点云,也使得搜索窗口的确定不受三维点深度差异的影响。改进后的变化检测算法的时间复杂度降低为  $O(n)$ ,算法的执行效率显著提高。

## 1.3 伪变化区域的识别

如封二彩图 1 所示,通过 Hausdorff 距离检测出来的“变化”区域中可能包括不可见的被遮挡区域(蓝色点),这是由于两次扫描过程中测站的位置不同造成的。因此为了识别真实的变化,需要对因遮挡形成的伪变化区域进行检测和去除。

首先分别将参考点云/变化点云的三维坐标转换到各自相对的坐标系(变化点云/参考点云坐标系),利用式(1)计算二维影像坐标。在理想情况下,变化点云与参考点云中同名点所计算的影像坐标应相等,所以对计算出的影像坐标相等的点进行深度值的比较,如果满足条件式(3),则判断被转换点在扫描固定点云时为不可见点,应标记为伪变化区域:

$$R_T - R_F > \epsilon \quad (3)$$

其中,  $R_T$  为被转换点在固定坐标系中的深度值(即该点到坐标原点的距离);  $R_F$  为固定点的深度值;  $\epsilon$  为给定的阈值。该扫描仪的固有角分辨率 为  $0.045^\circ$ ,确定了扫描仪的最小扫描间隔,再考虑扫描仪因为扫描距离产生的测距和测角误差以及点云的拼接误差的影响,得出最佳的  $\epsilon$  为 5 cm,如果阈值太小,会误检出大量未变化点;若阈值太大,则会漏检伪变化点。

考虑到点云拼接误差的影响,变化点云与参考点云中同名点所计算的影像坐标不一定相等,因此类似于 § 1.2 中所提的搜索窗口,在固定坐标系的点云中,以影像坐标与被转化点相等的点  $a[i][j]$  为中心,取一个  $k \times k$  ( $k$  为偶数) 大小的窗

口,取窗口中所有点的深度平均值为  $R_F$ ,以减弱点云拼接误差对可见性判断的影响。如封二彩图 2 所示,红色区域为检测出的伪变化区域,是因凸出的楼梯部分的遮挡和视角不同造成的。因此在进行变化检测时,需要将这一区域剔除。

由于用 Hausdorff 距离检测出来的建筑物的变化区域仅是大量的离散点云,因此为了服务于实际应用,需要确定一个指标来进行变化区域的量化。毫无疑问,体积是一个理想的指标。然而,激光扫描的工作原理决定了对于具有复杂结构的建筑物而言,所采集的点云数据由于无法穿透建筑物外表面,因此很难精确地确定变化区域的体积。考虑到建筑物的外表面多数都是平面,所以本文将平面表面积作为量化变化区域的指标,通过构建 Delaunay 三角网,提出基于三角化的变化区域表面积计算方法,来精确计算建筑物变化区域的表面积。

#### 1.4 基于三角化的变化区域表面积计算方法

首先利用基于反射值影像的区域分割方法<sup>[11]</sup>对离散点云进行平面分割和拟合,根据拟合得到的平面方程剔除非平面点,确保对同一平面上的点构建三角网。本文采用 Delaunay 三角剖分<sup>[12]</sup>生成三角网,如封二彩图 3 所示。

##### 1.4.1 Delaunay 三角剖分

给定二维平面上的点集  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  ( $n > 3$ ),假设这些点不全共线,若用  $\text{dist}(P_i, P_j)$  表示  $P_i$  与  $P_j$  的欧氏距离,且区域  $V(P_i) = \{x \mid \text{dist}(x, P_i) < \text{dist}(x, P_j), x \in R^2, i \neq j\}$  中包含的点到  $P_i$  的距离比到点集中其他任意点  $P_j$  的距离都近,称该区域  $V(P_i)$  为点  $P_i$  的 Voronoi 图,  $P_i$  为  $V(P_i)$  的内核。

将点集  $P$  的所有相邻 Voronoi 多边形的内核相连,形成点集  $P$  的三角剖分 DT,称这样的剖分结果为点集  $P$  的 Delaunay 三角剖分,称 DT 中的三角形为 Delaunay 三角形。如图 1 所示,  $P_i$  所对应的 Voronoi 区域是距离  $P_i$  点比距离任何其他  $P_j$  点都近的点的集合;而 Delaunay 三角剖分是连接有公共 Voronoi 边的点所形成的三角剖分。

求解 Delaunay 三角剖分的算法有很多,如逐点插入法(如 Bowyer<sup>[13]</sup>、Watson<sup>[14]</sup> 算法)、对角线交换算法(如 Lawson<sup>[15]</sup> 算法)、扫描线算法、约束三角化算法等<sup>[16]</sup>。本文采用 Lawson 算法,其步骤如下:从任意初始三角形网格  $T$  出发,设  $e$  是  $T$  的一条内边,  $Q$  是共享  $e$  边的两个三角形形成的四边形,如果其中的一个三角形的外接圆包

含四边形  $Q$  的全部 4 个顶点,那么将  $e$  用  $Q$  的另一条对角线替换;否则  $e$  是局部优化的,此时保持  $e$  不变。这一交换过程一直进行到所有三角形均满足外接圆准则为止。如图 2 所示,  $\triangle ABC$  的外接圆内无  $D$  点,  $\triangle ACD$  的外接圆内无  $B$  点,但  $\triangle ABD$  的外接圆内有  $C$  点。

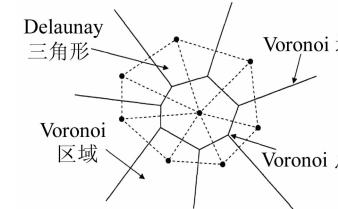


图 1 Delaunay 三角

剖分和 Voronoi 图

Fig. 1 Delaunay Triangulation and Voronoi Graph

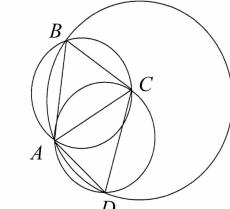


图 2 Lawson 局部优化

Fig. 2 Lawson Local Optimization

如封二彩图 4 所示,由在同一平面的散点构建的三角网会包括建筑物立面上的空洞部分,如窗、通风口等,而这些空洞部分不应参与表面积的计算,因此应从三角网中剔除。

##### 1.4.2 空洞剔除与面积计算

在墙面的空洞部分,如窗户,构建的三角形顶点都在窗户的边界处,内部没有顶点,所以三角形的边长相比墙面上三角形的要长(封二彩图 5(a))。根据这个判别依据,本文为三角形的周长设定一个阈值,大于此数值的三角形将被剔除(封二彩图 5(b)),剩余的三角形即为所需要计算面积的部分,如封二彩图 6 所示。由于三角形的三边长都已知,因此可以根据海伦公式<sup>[17]</sup>通过式(4)计算检测区域的表面积:

$$\Delta_{CR} = \sum_{i=1}^n \sqrt{s_i(s_i - a_i)(s_i - b_i)(s_i - c_i)} \quad (4)$$

其中,  $\Delta_{CR}$  为变化区域的表面积;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为三角形  $i$  的各边边长;  $s_i$  为三角形  $i$  的半周长;  $n$  为三角网内三角形的个数。

利用式(4)分别计算建筑物变化前后区域的表面积,从而利用式(5)确定建筑物的受损率为:

$$R_D = \Delta_{OR} / \Delta_{CR} \quad (5)$$

其中,  $R_D$  为建筑物的受损率;  $\Delta_{OR}$ 、 $\Delta_{CR}$  分别为计算出的变化前后区域的表面积。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验数据

本文的实验数据是利用 FARO LS 880 地面型激光扫描仪采集的前后相邻两站的点云数据

faro\_LS\_007.xyz(1期)和faro\_LS\_009.xyz(2期)。由于没有真实的建筑物变化后的扫描数据,所以在后期采集的faro\_LS\_009.xyz中删除了如封二彩图7所示的5个区域中的部分点云,以模拟灾害发生后建筑物的受损情况。

## 2.2 点云自动拼接实验结果

根据基于反射值影像的点云数据自动拼接方法<sup>[8]</sup>对两期点云数据进行自动拼接,拼接的中误差为3.65 mm,得到坐标转换的旋转矩阵为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.999812 & 0.016688 & 0.000815 \\ -0.016985 & 0.999807 & 0.000753 \\ 0.000312 & -0.000361 & 0.999570 \end{bmatrix}$$

平移量为:

$$\Delta = (12.265761 \quad 2.642776 \quad -0.017889) \text{m}$$

## 2.3 基于 Hausdorff 距离变化检测的优化

用常规的 Hausdorff 距离计算方法对封二彩图7所示的5个区域进行检测,结果如表1所示。

表 1 Hausdorff 距离对不同区域的变化检测结果

Tab. 1 Change Detection Results of Different Regions Using Hausdorff Distance

检测区域	参与运算点数/个		检测变化点数/个	计算用时/h:m:s
	1期	2期		
墙右上	1 197 812	296 371	1 033 323	1:14:17
墙中下	558 429	625 375	417 877	1:05:38
楼梯	586 438	191 707	453 648	0:30:47
墙左	106 559	364 230	65 969	0:09:06
通道	84 082	192 936	63 125	0:04:17

以墙左区域为例,考虑到两期点云拼接的中误差为3.5 mm,这里确定Hausdorff距离的判定阈值为5 mm,检测出来的效果如封二彩图8所示。蓝色区域为在1期点云中检测出的发生变化的部分,除了事先模拟的变化区域以外,左下角的红色矩形框内的蓝色部分为一打开的窗户上的点,这是因为该窗户在采集2期数据时关闭,所以被作为变化检测出来。右侧红色矩形框中呈竖直条状分布的蓝色点是房间内墙壁上的点,由于扫描的视角不同造成在2期点云中为不可见,因此属于被检测出的伪变化区域。表1中其余检测出的变化区域如封二彩图9所示。

如表2所示,墙右上区域包含的点超过100万,而对其进行变化检测所用的耗时大于1 h,过长的计算时间会影响到变化检测的实际应用。

针对本文提出的基于搜索窗口的改进Hausdorff距离检测方法,对不同大小的搜索窗口进行了实验,计算用时比较见表2,可知改进的算法使检测效率得到很大提高。同时将封二彩图9(c)显示区域的左下角放大,以显示不同大小搜索窗

口得到的检测结果(封二彩图10)。从图中可明显看出,20×20窗口检测出来的变化区域的边界与所在的建筑物吻合得很好,尽管相对其他大小的搜索窗口而言检测速度最慢,但由于将遍历的点数从1 197 812减小为400,计算用时也仅为1 min 13 s,相比改进前效率得到极大的提高。其余两组窗口的检测区域边界部分都有一定的损失。造成这一现象的原因是点云拼接误差和影像坐标计算误差的累积,如果搜索窗口过小,可能会将正确的点排除在外,因此确定20×20大小的窗口为变化检测的搜索窗口。

表 2 改进前后的计算用时比较

Tab. 2 Comparison of Computation Cost Before and After Optimization

墙右上区域	算法改进前	算法改进后			
		窗口大小	4×4	10×10	16×16
计算用时/h:m:s	1:14:17	0:00:32	0:00:50	0:01:20	0:01:47

针对封二彩图8中右侧红色矩形框所示的伪变化区域问题,利用§1.3中所提的伪变化区域的识别方法对检测出的变化点云数据进行可见性判断,结果见封二彩图11,图中红色区域为检测出的在2期点云数据中为不可见的部分,其中包括封二彩图8中右侧红色矩形框所示的部分,都作为伪变化区域被剔除掉。

## 2.4 基于三角化的变化区域表面积计算

本文对封二彩图8、彩图9所示的变化区域利用提出的基于三角化的变化区域表面积计算方法进行表面积的计算。以封二彩图10中的蓝色区域为例,首先进行区域分割,将同属于一个面的点云划分为一类,用不同的颜色表示,见封二彩图12。然后提取出墙面(封二彩图13),进行平面拟合<sup>[18]</sup>(封二彩图14)。拟合得到如下的平面方程:

$$-0.231965x + 0.972723y - 0.00129426z + 11.1463 = 0 \quad (6)$$

以点到平面的距离为依据,剔除原始点云中不属于该平面上的点,然后对剩余的点进行Delaunay三角网的构建,见封二彩图4。利用§1.4.2中所提的方法剔除三角网中的空洞部分(封二彩图5)。

根据式(4),对剔除空洞后的Delaunay三角网计算墙左区域的变化部分的面积为29.18 m<sup>2</sup>。该变化区域所在的总墙体求得的面积为251.53 m<sup>2</sup>,根据式(5)计算得到变化率为11.60%。

对其余4个区域重复以上步骤得到的三角网

见封二彩图15。表3中列出了所有检测区域的表面积和实际检测变化率的计算结果。为了进一步验证算法的有效性,本文借助Delaunay三角网对变化区域的外围边界进行提取,将理论变化区域和实际检测区域的面积进行比较(表4)后发现,5个区域的理论和实际检测面积差值的中误差仅为0.0049 m<sup>2</sup>,证明了本文算法的有效性,完全可以满足灾害应急响应服务以及保险理赔评估等实际应用的需要。

表3 变化区域表面积与变化率

Tab. 3 Surface Areas and Rates of Change

变化区域	实际检测面积/m <sup>2</sup>	建筑实体总面积/m <sup>2</sup>	变化率/%
墙左	29.18	251.53	11.60
楼梯	236.36	612.49	38.59
墙中下	39.06	483.80	8.07
墙右上	56.13	251.53	22.32
通道	94.84	118.11	80.30

表4 理论变化区域与实际检测区域面积  
(未去空洞)比较Tab. 4 Change Detection Areas Compared with  
Theoretical and Practical (with Holes)

变化区域	理论变化面积/m <sup>2</sup>	实际检测面积/m <sup>2</sup>	面积误差 $\Delta/m^2$
墙左	72.662 2	72.656 2	0.006 0
楼梯	296.359 6	296.354 3	0.005 3
墙中下	62.648 6	62.645 2	0.003 4
墙右上	120.638 7	120.635 5	0.003 2
通道	95.826 8	95.820 8	0.006 0
面积平均误差	0.004 8 cm <sup>2</sup>	面积中误差±0.004 9 cm <sup>2</sup>	

### 3 结语

本文依据地面激光扫描仪数据对建筑物进行了变化区域的检测以及变化量的确定等研究。实验表明,利用Hausdorff距离进行变化检测能够取得满意的精度,但是其计算用时与遍历的点数成正比,对高分辨率的点云进行检测会出现耗时过长的问题。基于搜索窗口的改进算法能大幅度提高检测的速度,同时还能够检测和剔除不可见造成的伪变化区域,保证变化检测的正确性。实验结果还说明,通过从散点中构建Delaunay三角网并剔除建筑物的空洞部分,能够精确地确定变化区域的表面积,从而最终确定建筑物的变化或受损情况。由于本文目前只针对平面进行了表面积的计算,因此下一步将对如何根据点云数据计算复杂曲面的表面积进行研究,以提高本文方法的适用性。

### 参 考 文 献

- [1] 刘直芳,张继平.变化检测方法及其在城市中的应用[J].测绘通报,2002(9):25-27
- [2] Shcafer T, Kyriovic P, Zamecnikova M. Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo[C]. INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia, 2004
- [3] van Gosliga R, Lindenbergh R, Pfeifer N. Deformation Analysis of a Bored Tunnel by Means of Terrestrial Laser Scanning[C]. Image Engineering and Vision Metrology, ISPRS Symposium, Dresden, 2006
- [4] Hsiao K H, Liu J K, Yu M F. Change Detection of Landslide Terrains Using Ground-based LiDAR Data[C]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey, 2004
- [5] 李必军,方志祥,任娟.从激光扫描数据中进行建筑物特征提取研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2003,28(1):65-70
- [6] Girardeau-Montaut D, Roux M, Marc R, et al. Change Detection on Points Cloud Data Acquired with a Ground Laser Scanner[C]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Enschede, the Netherlands, 2005
- [7] Zeibak R, Filin S. Change Detection via Terrestrial Laser Scanning[J]. IASPRS, 2007, 36(3), 430-435
- [8] Kang Zhizhong, Zhang Liqiang, Li J, et al. Automatic Registration of Terrestrial Laser Scanning Point Clouds Using Reflectance Panoramic Images [J]. Sensors, 2009, 9(4): 2 621-2 646
- [9] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-invariant Keypoints[J]. IJCV, 2004, 60(2): 91-110
- [10] 舒丽霞,周成平,彭晓明,等.基于Hausdorff距离图像配准方法研究[J].中国图像图形学报,2003,8(12):1 412-1 417
- [11] Xu Wenzhe, Kang Zhizhong, Jiang Tao. Segmentation Approach for Terrestrial Point Clouds Based on the Integration of Graph Theory and Region Growing [C]. 2009 Joint Urban Remote Sensing Event, Shanghai, 2009
- [12] Weisstein E W. Delaunay Triangulation—Wolfram MathWorld Web Resource [OL]. <http://mathworld.wolfram.com/DelaunayTriangulation.html>, 1999
- [13] Bowyer A. Computing Dirichlet Tessellation[J]. Computer Journal, 1981, 24(2):162-166

- [14] Watson D F. Computing the  $N$ -dimensional Delaunay Tessellation with Application to Voronoi Polytopes[J]. Computer Journal, 1981, 24(2): 167-172
- [15] Lawson C L. Software for Surface Interpolation[J]. Mathematical Software, 1977, 14(6): 161-194
- [16] Shewchuk J R. Delaunay Refinement Mesh Generation[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1997
- [17] Weisstein E W. Heron's Formula—Wolfram MathWorld Web Resource [OL]. <http://mathworld.wolfram.com/HeronsFormula.html>, 1999
- [18] 曾齐红, 毛建华, 李先华, 等. 激光雷达点云平面拟合过滤算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 33(1): 25-28

第一作者简介:吕钊,硕士生,主要从事地面激光扫描数据的分析与处理。

E-mail: edward\_1986623@163.com

## Change Detection of Buildings Based on Terrestrial Laser Scanning Data

LUE Zhao<sup>1</sup> KANG Zhizhong<sup>1</sup>

(1 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, 29 Xueyuan Road, Haidian District, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Change detection has been widely applied in various fields. The fast and effective monitoring of change is involved in disaster dynamic monitoring, pollution monitoring and urban planning, etc. Terrestrial laser scanning is employed to detect the change of building models, taking the advantage of high speed, good precision, real-time, able to work around the clock, etc. The method consists of three steps: automatic point cloud registration; building change detection using optimized hausdorff distance algorithm from different model laser scan epochs; by plane fitting and Delaunay triangulation constructing, the change of regions of interest is quantified to assess the extent of the damage of disasters on the building, which provides a reliable basis for decision making in emergency response, insurance claim evaluation, etc.

**Key words:** terrestrial laser scanning; change detection; point clouds registration; Hausdorff distance; Delaunay triangulation

**About the first author:** LUE Zhao, postgraduate, majors in the analysis and processing of terrestrial laser scanning data.

E-mail: edward\_1986623@163.com

### 欢迎订阅 2012 年《武汉大学学报·信息科学版》

《武汉大学学报·信息科学版》即原《武汉测绘科技大学学报》，是以测绘为主的专业学术期刊。其办刊宗旨是：立足测绘科学前沿，面向国际测量界，通过发表具有创新性和重大研究价值的测绘理论成果，展示中国测绘研究的最高水平，引导测绘学术研究的方向。本刊为中国中文核心期刊，EI 核心刊源期刊。是国家优秀科技期刊和中国高校精品科技期刊，并获中国国家期刊奖，入选中国期刊方阵。

本刊主要栏目有院士论坛、学术论文、科技新闻等，内容涉及摄影测量与遥感、大地测量与物理大地测量、工程测量、地图学、图形图像学、地球动力学、地理信息系统、全球定位系统等。收录本刊论文的著名国际检索机构包括 EI、CAS、PCK 等，其中 EI 收录率达 100%，其影响因子长期名列中国高校学报前列。本刊读者对象为测绘及相关专业的科研人员、教师、研究生等。

本刊为月刊，国内外公开发行，邮发代号 38-317，国外代号 MO1555。A4 开本，128 面，定价 10 元/册，每月 5 日出版。漏订的读者可以与编辑部联系补订。