

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005630

点云数据与 BIM 的古建筑三维模型构建方法研究*

牛丽娟 李立功

(陕西铁路工程职业技术学院 测绘工程系 渭南 714099)

摘要: 为了加强对古建筑的保护,避免对古建筑造成“二次破坏”,采用 GLS-2000 三维激光扫描仪采集古建筑的信息,应用改进的 ICP 算法实现古建筑点云数据拼接,Geomagic 软件实现点云数据去噪与精简,Revit 软件提取古建筑特征线并进行 3D 建模。最后以古建筑的屋顶构件、廊桥构件为例,对 BIM 技术的应用效果进行分析,并测试了改进的 ICP 算法的应用效果。结果表明,通过 BIM 扫描技术可以准确确定古建筑的尺寸信息,建立古建筑 3D 模型,有效保存古建筑的信息。改进 ICP 算法的配准耗时为 5.623 s,配准精度为 4.21 λ /mm,点云三维模型的误差均值为 0.113 m,中误差为 0.154 m,应用效果好。

关键词: BIM-3D 扫描技术;古建筑;建模

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

Research on 3D modeling of ancient buildings based on
point cloud data and BIM

Niu Lijuan Li Ligong

(Department of Surveying and Mapping Engineering, Shaanxi Railway Institute, Weinan 714099, China)

Abstract: In order to strengthen the protection of ancient buildings and avoid "secondary damage" to ancient buildings, GLS-2000 3D laser scanner collects the information of ancient buildings, uses improved ICP algorithm to realize the point cloud data splicing of ancient buildings, Geomagic software to realize the point cloud data denoising and simplification, and Revit software to extract the feature lines and 3D modeling of ancient buildings. Finally, taking the roof components and the gallery components of ancient buildings as examples, the application effect of BIM scanning technology is analyzed, and the application effect of the improved ICP algorithm is tested. The results show that BIM scanning technology can accurately determine the size information of ancient buildings, establish 3D model of ancient buildings, and effectively preserve the information of ancient buildings. The registration time of the improved ICP algorithm is 5.623 s, the registration accuracy is 4.21 λ /mm, the average error of point cloud 3D model is 0.113 m, and the mean square error is 0.154 m, and the application effect is good.

Keywords: BIM-3D scanning technology; ancient architecture; modeling

0 引言

古建筑物集合了劳动人民的血、泪及智慧的结晶,代表了历史的传承,代表了一个国家或者是一座城市的形象。随着时间的推移和社会的进步,古建筑中包含着很多的我国传统文化信息,是智慧的结晶,古建筑的保护问题已经成为了社会关注的热点^[1-2]。传统的信息采集方式采用 GPS、全站仪等的精度低,容易对古建筑造成“二次破坏”,传统的信息采集方式得到的效果图为二维图,信息表达不够详尽,信息采集的精度低,而三维(3D)激光扫描技术可以实现被

测目标信息的精确采集。关于建筑建模,很多学者进行了研究。Costanzo 等^[3]利用 TLS 和红外热像仪实现了古建筑教堂和修道院的三维扫描建模,对古建筑的重建具有重要的指导意义。

地面三维激光扫描技术在古建筑保护中的应用具有快速、详细、全天候等优势,可以实现智能化信息作业。我国对激光扫描仪的研究开始于 20 世纪 90 年代,该技术在文物考古、古建筑保护等方面应用十分广泛^[4-6]。关于点云数据三维建模很多学者进行了研究,并且取得了不错的应用效果,如王岩等^[7]采用 k-means 聚类算法、双边滤波去噪算

收稿日期:2020-12-29

* 基金项目:陕西铁路工程职业技术学院科研立项研究生项目(ky2019-13,ky2019-17)资助

法对点云数据去噪声,模型构建之后边界清晰。龙丽娟等^[6]基于三维激光扫描获得云数据,对变电站进行建模,模型的精确度较高,变电站的建模效果较好。徐金财等^[9]将三维激光点云数据导入 3ds Max 软件建立三维数字模型,提高了模型的建模精度。麻卫峰等^[10]基于点云数据实现了电力线提取,获得了满意的重建效果。鉴于这些研究成果可知,在对建筑物进行建模时,可以应用激光扫描仪采集点云数据,构建的模型边界清晰,该建模方法达到了理想的效果,基于此,可以考虑在古建筑建模时应用该方法,并且学者孙月霞等^[11]应用点云数据进行文物建模,确保了文物的修复效果,为文物的保护拓宽了路径。

除了应用三维激光仪进行古建筑的点云数据采集之外,还需要应用相应的软件对点云数据进行处理,本研究中选择 BIM 软件。BIM 软件建模时具有可视化、协调性、模拟性、优化性和可出图性等 5 方面优点。综上,本研究中先采用三维激光扫描仪采集古建筑的信息,应用相应的算法及软件实现古建筑点云数据拼接、点云数据去噪与精简,最后在 BIM 软件中进行 3D 建模,以提高建筑模型的精度。

1 三维激光扫描结合 BIM 技术

1.1 技术原理

古建筑由于建设的年代久远,进行修复过程中采用传统的人工测量方式会在一定程度上造成古建筑的破坏,因此为了降低对古建筑的破坏,可以采用三维激光扫描结合 BIM 技术建模,对古建筑模型进行详尽分析。建模时,先在古建筑周围设置测站点,之后架设三维激光扫描仪进行扫描,扫描仪在扫描过程中发射激光束,激光束照射在古建筑表面实体上产生回波信息,并同时产生垂直向和水平向的步进角度,获得古建筑的三维坐标信息,这些信息构成矢量点云,像素承载着点云的距离及角度信息。点云数据的获取、预处理、分割之后导入 BIM 软件提取古建筑的特征线,得到古建筑三维模型。

1.2 技术应用流程

古建筑点云数据采集采用拓普康 GLS-2000 三维激光扫描仪,采集的数据利用 Geomagic 软件进行点云数据拼接、数据预处理及格式转换,得到 RCS 格式点云数据;将 RCS 格式点云数据导入 BIM 软件中,提取建筑特征线,并在软件 Revit 中完成不同组件的装饰及组装,最终得到整个古建筑的三维模型。技术应用流程如图 1 所示。

2 点云数据采集与处理

2.1 点云数据采集

为了保证古建筑建模的精度,点云数据的获取采用三维激光扫描技术(terrestrial laser scanning, TLS)和全站仪相结合的作业方式。根据古建筑的地形条件布设闭合导线,为了使古建筑室内和室外的坐标保持一致,采用室内、室外往返观测方法,观测完成之后计算导线全长相对闭合

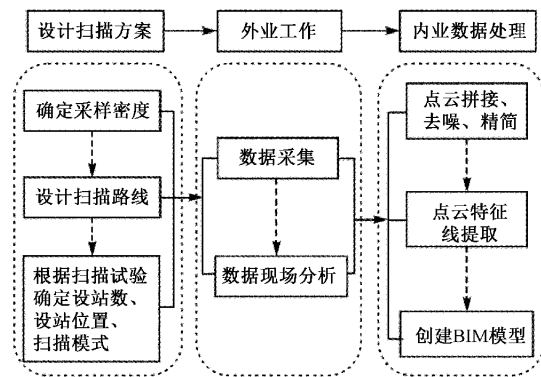


图 1 技术应用流程

差、相对误差,限差达到要求之后,观测停止。利用全站仪、扫描仪实测古建筑的特征点和标靶点的坐标,为后期数据配准、拼接及古建筑的三维建模做准备。

三维激光扫描仪采集数据时采用多测站多角度方法,共设置扫描站 20 站,采样点密度为 2 mm,为了保证数据扫描的准确性和拼接建模,站与站之间重叠度保持在 13% 左右,测量距离为 20~40 m,位置绝对误差为 5 mm,角分辨率为 0.04°。古建筑上的古纹图形、砖雕等的采样密度设置为 1 mm,其他结构的采样密度设置为 5 mm。数据采集过程中,每个观测站根据实际情况至少布设 3 个共同标靶,相邻的扫描站点之间布设 2 个共同标靶,标靶为相邻的点云数据的公共控制点。在扫描数据的同时收集纹理高清图片、360°全景摄影等辅助数据,保证建筑物的细节采集。数据采集时,采用正视拍摄和多角度拍摄的方法,具有相同特性的纹理尽量在同一时间段中采集完成,每种纹理的图片数量最少为 3 张,保证每个细节的完整性。当纹理过多时对图片进行编号和分类。地面或墙体铺装等纹理材质拍摄面积不宜过小,以免在内业进行拼接时出现较大的重复率。

2.2 点云数据预处理

由于不同站点之间的坐标系相互独立,并且数据在采集的过程中还存在干扰因素,如数据冗余、噪点等,这样的数据建模之后精度低,因此,在进行建模之前需要对点云数据进行预处理,主要包括拼接、去噪点等。

1) 点云拼接

点云数据的拼接过程实际就是同名点坐标的映射过程,通过点云拼接将不同站点的独立坐标系的数据映射到同一个坐标系中。点云拼接采用的是改进的 ICP (iterative closest point) 算法。传统的 ICP 算法具有理论简单、算法稳定、鲁棒性强、适应性强等优点,但是该算法在应用过程中对初始位姿的要求比较严格,如果不同站点之间的云初始位姿相差较大,容易出现配准错误的问题,并且配准过程中耗时较长,为了解决这些问题提出了改进的 ICP 算法。改进的 ICP 算法利用 SAC-IA 算法对起始位姿进行优化,之后再利用 ICP 算法进行精配准,提高了配准精度,缩短了配准过程耗时。

(1) 传统 ICP 算法

传统 ICP 算法的具体步骤如下:

ICP 算法是通过最近点对来求解得到旋转平移矩阵。如果 Q 、 P 为两个带配准的点集,并且这两点集之间存在重叠部分,则 Q 、 P 之间的距离函数如式(1)所示。

$$d(P, Q) = \min_{q \in Q} \|q - p\| \quad (1)$$

通过 ICP 算法对两点之间的距离进行不断迭代,直至距离值小于设定的阈值为止。假设 P 中有 N_p 个点, Q 中有 Q_p 个点,则有 $P = (p_1, p_2, \dots, p_{N_p})$, $Q = (q_1, q_2, \dots, q_{Q_p})$ 。刚体变换矩阵为 (R, t) ,点初始位置: $P_0 = P, R_0 = I, t_0 = (0, 0, 0)^T$, k 代表迭代次数。通过式(1)计算 P 、 Q 中的各点距离,距离最短的点 $Y_k = \{y_{i,k}\}$ 计算如式(2)所示。

$$y_{i,k} = \min_{q \in Q} d(p_{i,k}, q) \quad (2)$$

当 $e(R_k, t_k)$ 最小时,完成迭代,得到 (R_k, t_k) ,如式(3)和(4)所示。

$$e(R_k, t_k) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \| (R_k p_{i,0} + t_k) - y_{i,k} \|^2 \quad (3)$$

$$e_k = \min_{R_k, t_k} d(R_k, t_k) \quad (4)$$

其中, R_k 为迭代 k 次的旋转矩阵, t_k 为迭代 k 次的平移矩阵。通过式(4)计算出 (R_k, t_k) ,求解目标点集在参考点集下的坐标 $P_{k+1} = \{p_{i,k+1}\}$:

$$p_{i,k+1} = R_k p_{i,0} + t_k \quad (5)$$

设置迭代完成条件:当迭代次数达到顶值或 $e_{k-1} - e_k < \tau$ 时,迭代完成,得到此时的旋转矩阵 R_k 和平移矩阵 t_k ;否则继续迭代^[12-14]。

(2) SAC-IA 算法

SAC-IA 算法是一种配准算法,该算法在应用过程中去除了离散点,配准时通过 FPFH 确定两点集之间的对应关系。但是,SAC-IA 算法在应用过程中得到的变换矩阵准确率低,并且算法运行的时间长,因此 SAC-IA 算法获得结果只能称之为粗配准。具体算法原理的主要步骤:从点集 P 中选取 k 个点,两个点之间的间距大于距离阈值 τ ,确定每个点的 FPFH 特征,且每个 FPFH 特征均不相同;在点集 Q 中寻找与点集 P 中类似的 FPFH 特征点,任意选择映射点^[15];解算旋转平移矩阵得到变换矩阵,通过 Huber 函数来判定配准结果,如式(6)所示。

$$L_\delta(a) = \begin{cases} \frac{1}{2} a_i^2, & |a_i| \leq \delta \\ \delta \left(|a_i| - \frac{1}{2} \delta \right), & |a_i| > \delta \end{cases} \quad (6)$$

式中: $a_i = y_i - f(x_i)$, a_i 表示第 i 组点对变化后的间距, δ 为预值。通过令 Huber 函数最小,确定最优变换,最终得到配准结果。

(3) 改进 ICP 算法

利用 SAC-IA 算法找到较优起始位置,通过 ICP 算法进一步精确配准。具体算法原理如下:

①通过上述 SAC-IA 算法根据式(6)对点集 P 进行旋转和平移,等得到初始配准后的点集 P' 。

②通过式(2)得到点集 P' 中与点集 Q 距离最近的点 $Y_k = \{y_{i,k}\}$ 。

③通过式(3)~(5)对目标函数进行求解得到 (R_k, t_k) 。

④利用式(6)对点集 P' 与点集 Q 进行配准。

⑤当迭代次数到达顶值或目标函数小于阈值时,迭代结束,得到此时的旋转矩阵 R_k 和平移矩阵 t_k 。

2) 点云数据去噪与精简

由于古建筑表面存在纹理、缺陷或者材质的原因导致数据扫描中存在误差,获得非目标点云数据,此外,设备问题、扫描中其他因素(如行人、汽车等)的干扰也会存在噪点,因此需要对采集点云数据去噪点和精简。采用 k-means 聚类算法实现数据精简,k-means 算法可以准确地发现所有集群,结果如图 2 所示,对于边缘数据精简。采用双边滤波算法对点云数据进行去噪。

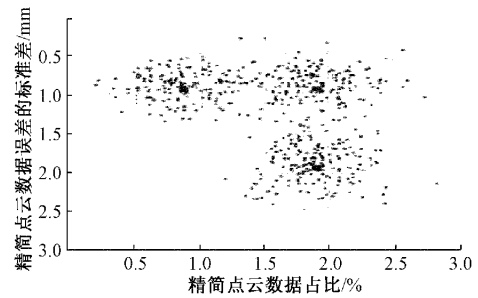


图 2 k-means 算法数据识别结果

在应用双边滤波去噪声时,先定义点云数据:

$$Z = Z_i + \beta \cdot n \quad (7)$$

式中: Z 、 Z_i 为滤波后的点云数据、原始三维激光扫描点云数据; β 为双边滤波因子; n 为数据点 Z_i 的法向量。

光顺滤波函数、特征保持权函数定义如式(8)和(9)所示。

$$W_c(x) = \exp \left[\frac{-x^2}{(2\sigma_c^2)} \right] \quad (8)$$

特征保持权函数定义为:

$$W_s(y) = \exp \left[\frac{-y^2}{(2\sigma_s^2)} \right] \quad (9)$$

式(8)和(9)都是高斯函数, σ_c 、 σ_s 全部为高斯参数。建筑点云数据去噪与精简之后进行点云分割。

3) 点云分割

由于古建筑物包含的构件较多,为了便于建模,根据不同的构件如墙柱、梁、檩、枋等进行点云数据分割,数据分割完成之后得到不同构件的点云数据存储于 Cyclone 数据库中。

3 古建筑 BIM 建模

3.1 轮廓线提取

古建筑在进行 BIM 建模过程中需要对轮廓线进行提

取,调整不同视图的深度和剖切深度,通过软件中的“视图—可见性/图形”设置,保留古建筑的主要构件,设置“revit 链接”对墙柱、梁、檩、枋等构件进行灰色填充,根据图形比例尺调整裁剪框的大小,外墙材料用料填充及标注,利用空间几何原理对现场拍摄的高清照片相应的特征点和特征线进行提取和曲线拟合得到轮廓线,轮廓线采用粗线描边。

3.2 古建筑 BIM 建模

古建筑建模时选择的 Revit 软件,应用该软件借助提取的轮廓线和特征点得到古建筑不同构件的尺寸数据,通过这些尺寸数据对不同的构件进行组装,组装完成之后得到古建筑的模型。

古建筑主要包括台基、屋顶、屋身,屋顶包括椽、吻兽、筒瓦、望板等,屋身包括墙体、檩、梁、柱、窗、门等不同的构件,装饰分成外部装饰(雕刻、彩画等)和内部装饰。建模时选择 Revit 软件的“路径跟随”“镜像”“模型交错”等命令,导入到 SketchUp 组合成统一的模型。对于吻兽、筒瓦等不规则组件的建模选择 Geomagic studio 软件,通过构建曲面、三角网格及修补空洞等建模,导入到软件 Revit 中合成统一的模型。

不同的构件建模完成之后,确定平面图中不同组件位置进行组合,组合过程中,注意检验不同构件点云数据的精度一致性及不同的构件是否处于同一坐标系,如果坐标系不同则调用 Reload 命令根据绝对坐标完成组件的坐标系替换。

3.3 纹理贴图

为了使古建筑 BIM 建模更加具有真实感,需要对古建筑进行纹理贴图,纹理贴图需要借助 Photoshop 软件对纹理图片进行剪切、变换等,消除纹理中的杂质点之后进行统一的调色等,图片的纹理处理完成之后在 Revit 软件中对比较复杂的曲面进行纹理贴图。贴图完成之后,利用 Revit 软件生成平、立、剖面图,在 Revit 中,选择“平行投影”,并将视图选择为“正视图”,执行“文件”→“导出”命令,生成模型效果图。

4 建模实例分析

4.1 信息采集

为了对 BIM-3D 扫描技术的应用效果进行分析,选择某一古建筑的屋顶构件、廊桥构件进行建模分析。采用站式三维激光扫描方法对古建筑的屋顶信息进行采集,将三维激光扫描点云模型导入 Revit,建立 BIM 构件模型。BIM 模型与实景图对比如图 3 所示。通过 BIM 建模图形和现场实物进行对比可知,通过三维激光扫描技术可以准确确定古建筑的尺寸信息及点云模型,建立的 BIM 模型可以有效保存古建筑的信息。

4.2 改进 ICP 算法的应用分析

仿真实验利用 Microsoft Visual studio 2013 实现,计算

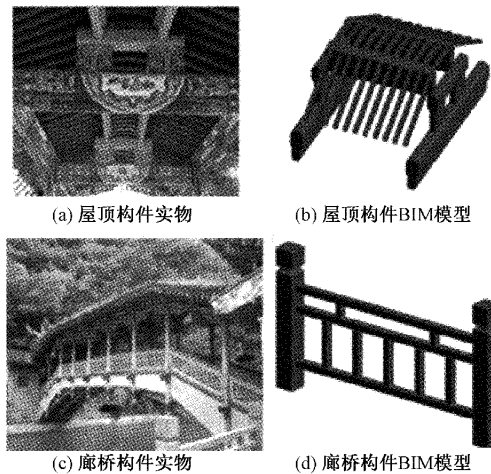


图 3 实物及 BIM 模型对比

机的系统为 Window 10 系统,为了验证改进 ICP 算法的可靠性,采用某个古建筑的数据进行测试。仿真过程中采用传统 ICP 算法以及本文的改进算法进行匹配分析,测试两种算法的配准效率及配准精度。ICP 配准成果图、改进算法配准成果图如图 4 和 5 所示。ICP 算法的配准耗时为 7.322 s,配准精度为 6.83 λ /mm;改进 ICP 算法的配准耗时为 5.623 s,配准精度为 4.21 λ /mm。根据结果可知,改进的 ICP 算法应用效果好。改进的 ICP 算法构建的模型细节更加突出、图像更加清晰、建模的视觉效果更好。

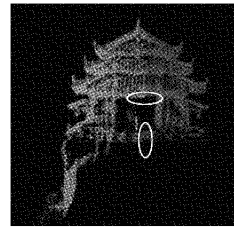


图 4 ICP 配准成果图

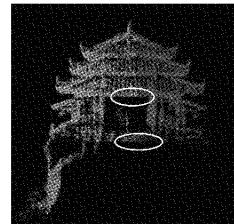


图 5 改进算法配准成果图

4.3 精度对比

选择古建筑一个主楼和一个窗体 5 组数据分析 BIM 模型精度,选择真实的数据进行精度对比分析。根据右手法构建空间直角坐标系,得到的数据如表 1 所示,根据数据计算出 BIM 模型的误差均值和中误差。

1)误差均值,可以反映出测量数据的偏离程度,计算如式(10)所示。

表 1 主楼和窗体的 BIM 模型与真实数据比较

	主楼			窗体	
	x	y	z	y	z
真实数据	16.871	90.368	40.927	12.650	23.838
点云三维模型	16.964	90.395	41.295	12.416	23.673
绝对误差	0.093	0.027	0.368	0.234	0.165

$$E(x) = (\sum |x_1 - x_2|) / n \quad (10)$$

式中: $E(x)$ 代表误差均值; x_1 代表测量值; x_2 代表真值; n 代表数据个数。

2)中误差的计算如式(11)所示。

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta \Delta}{n}} \quad (11)$$

式中: n 代表数据个数; Δ 代表绝对误差; m 代表中误差。

根据式(10)和(11)对表 1 中数据进行计算,点云三维模型的误差均值为 0.113 m,中误差为 0.154 m。由此可知,BIM 三维模型的精度较高。

5 结 论

基于 GLS-2000 三维激光扫描仪采集古建筑的信息,应用改进的 ICP 算法实现古建筑点云数据拼接,Geomagic 软件实现点云数据去噪与精简,Revit 软件提取古建筑特征线并进行 3D 建模,为古建筑的保护及建模提出了新思路和新方法^[15]。采用三维激光扫描技术这种非接触的方式采集点云信息,避免了对古建筑的“二次伤害”,可以便捷地获取古建筑的各种结构关系,提高了古建筑建模的工作效率,并且构建的模型精确度较高,可以预见,采用三维激光扫描仪及 BIM 软件实现古建筑的信息采集、建模具有广阔的应用前景和价值。但是,为了确保古建筑建模的精度,下一步还需要继续改进点云数据的处理算法。

参考文献

- [1] 孙文潇,王健,刘春晓. 三维激光扫描在古建筑测绘中的应用[J]. 测绘科学,2016,41(12):297-301.
- [2] 王全,张月,王玉泽,等. 三维激光扫描及放样机器人与 BIM 技术在旧建筑改造中的结合应用[J]. 施工技术,2018,47(S1):1490-1492.

- [3] COSTANZO A, MINASI M, CASULA G, et al. Combined use of terrestrial laser scanning and IR thermography applied to a historical buliding [J]. Sensors,2015,15(1):194-213.
- [4] 刘建华. 基于迭代最小二乘的平面标靶点云去噪方法初探[J]. 电子测量技术,2019,42(18):76-80.
- [5] 李茂月,马康盛,王飞,等. 基于结构光在机测量的叶片点云预处理方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(8):55-66.
- [6] 李俊宝. TLS 在古建筑物测绘及建模中的应用研究[D]. 西安:长安大学,2015.
- [7] 王岩,曲金博,由迎春. 古建筑物三维点云数据去噪方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(6):1074-1081.
- [8] 龙丽娟,夏永华,黄德. 一种基于三维激光扫描点云数据的变电站快速建模方法[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(20):361-370.
- [9] 徐金财,李朝奎,陈建辉. 一种基于 3ds Max 与 Smart 3D 的三维模型构建方法[J]. 测绘通报,2020(11):61-65.
- [10] 麻卫峰,王金亮,王成,等. 电力线点云精细提取与重建的模型残差实现[J]. 测绘科学,2020,45(2):60-66.
- [11] 孙月霞,李梁杭,朱铃铃. 基于点云数据的文物修复与建模[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(10):57-59.
- [12] 郎萍. ICP 算法的改进及大规模点云配准方法的研究[D]. 太原:中北大学,2017.
- [13] 曾繁轩,李亮,刁鑫鹏. 基于曲率特征的迭代最近点算法配准研究[J]. 激光与光电子学进展,2017,54(1):113-120.
- [14] 焦晨,王宝锋,易耀华. 点云数据滤波算法研究[J]. 国外电子测量技术,2019,38(11):18-22.
- [15] 闫文娟,王水璋. 无人机倾斜摄影航测技术与 BIM 结合在智慧工地系统中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(10):59-65.

作者简介

牛丽娟,工学硕士,讲师,主要研究方向为现代测量数据处理方法。

E-mail: shiyajuan68@163.com