

# 采空区三维激光扫描点云数据处理技术

秦亚光, 罗周全, 汪 伟, 郑开欢  
(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 由于井下环境的复杂性,借助三维激光扫描仪获取的采空区边界三维空间信息点云数据中不可避免包含一些噪声点. 为此,提出曲率-弦长比复合判据实现了对点云数据中高频噪声点的过滤处理,并运用随机滤波法去除点云数据中的低频随机噪声点,通过分段低次插值法实现空区模型曲线光顺处理. 结果表明:过滤及光顺处理不仅有效去除了采空区点云数据中的噪声点,同时避免了采空区三维模型构建中自相交情况的出现,达到了采空区三维模型精确构建的目的.

**关 键 词:** 采空区;三维激光扫描;点云数据;噪声过滤;光顺处理  
**中图分类号:** TD 76      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2016)11-1635-05

## Cavity Three-Dimensional Laser Scanning Point Cloud Data Processing Technology

QIN Ya-guang, LUO Zhou-quan, WANG Wei, ZHENG Kai-huan  
(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Corresponding author: QIN Ya-guang, E-mail: csuqyg@163.com)

**Abstract:** Aiming at noise points in point cloud data detected by three-dimensional laser in cavity, curvature - chord ratio composite criterion was put forward for filtering and simplifying significant noise points. Besides, random filter algorithm was applied to reduce low frequency random noise points similar to the change of object. The piecewise low-order interpolation method was applied to fit cavity point cloud based on reduction and simplifying, thus the curve became smoother than before and after treatment. The application results show that the noise points in point cloud data detected by three-dimensional laser in cavity are effectively removed by filtering and smoothing treatment. Furthermore, the self-intersection in model is avoided. Therefore, cavity models generated by processed point cloud data are extremely identical to engineering practice.

**Key words:** cavity; three-dimensional laser scanning; point cloud data; noise filtering; smoothing treatment

金属及非金属地下矿山开采形成的采空区群是威胁矿山安全生产的主要灾害之一. 如何精确构建采空区三维可视化模型对于矿山安全高效生产具有重要的现实意义. 非接触式三维激光扫描仪 CMS 能够快速有效地获取包含采空区边界三维空间信息的大量点云数据,以此为基础可建立起采空区三维可视化模型. 但由于井下探测环境的复杂性、激光扫描探测设备自身的误差以及外部机械振动等因素的影响,不可避免地会产生噪声点,致使基于扫描获取的点云数据构建起来的采空区三维模型发生局部失真,从而影响到采空区三维可视化模型的精确构建. 因此,如何实现对激光扫描点云数据中的噪声点进行过滤处理显得尤为关键. 为此,不少学者进行了相关研究并取得了一定进展<sup>[1]</sup>. 熊立新等<sup>[2]</sup>提出了弦夹角及弦高比复合判据实现对激光扫描点云噪声过滤的方法;陈凯等<sup>[3]</sup>提出了基于 KD Tree 的点云去噪方法和基于点云特征的配准方法;方源敏等<sup>[4]</sup>提出了改进的角度偏差法;张文芬等<sup>[5]</sup>提出了边长角

度综合判据法。然而,这些研究主要只是针对具有高频特性的明显噪声点(表现为幅值大、频率高等现象)进行了过滤,而未实现对低频随机噪声点(表现为幅值小、局部出现毛刺等现象)的过滤<sup>[6]</sup>,以及对整个采空区三维模型的光顺处理,难以真正实现采空区三维模型的精确构建。

为此,在分析大量采空区三维激光扫描点云拓扑关系的基础上,总结出噪声点的典型特征。针对不同特征的噪声点,提出针对性的判断依据并对之进行过滤。最后,在实现点云去噪的基础上,对整个采空区三维模型进行光顺处理,从而获取更为精确的采空区三维可视化模型。

1 明显噪声点过滤方法

在采空区三维激光扫描过程中,由于移动物体的存在或者机械振动等原因,使得激光扫描探测仪在某一瞬间或者极短时间内收集到一些明显偏离其他正常点云的数据。这些噪声点具有如下特点:①幅值比较大,在激光扫描形成的同一圈曲线上出现很大的峰值,在该点的变化远远大于其他正常点云;②频率比较高,这类噪声点往往只占同圈点云数据中极小的一部分,有时仅为一个单独的点,表现为极高的频率<sup>[7]</sup>。针对此类噪声点的明显特征,提出曲率-弦长比复合判据对其进行有效识别和过滤。

从每一圈点云数据的第一个点开始,分别求取各点与前后相邻两点所构成的空间圆在该点的曲率以及激光探头到该点的弦长。通过设定合理的阈值,曲率阈值通常在 0.05~1.0 之间,弦长阈值通常在 0.5~2.0 之间,保留阈值范围内的点云数据,去除范围之外的点云。

1.1 曲率-弦长比

在采空区激光扫描探测仪的每一圈扫描轨迹线上包含几百个点云数据<sup>[8-9]</sup>,这些点按一定的顺序连接形成一个闭合的曲面。在同一扫描轨迹线上任意相邻的 3 个点可以确定一个空间圆,通过求取圆的半径进而可以求取该点的曲率。设任意一条轨迹线上的一点为 $(x_2, y_2, z_2)$ ,与其相邻的前后两点分别为 $(x_1, y_1, z_1)$ , $(x_3, y_3, z_3)$ 。令其所确定的圆心坐标为 $(x_0, y_0, z_0)$ ,半径为 $R$ 。

空间 3 点所确定的平面方程为

$x$

$y$

$z$

$1$

$x_1$

$y_1$

$z_1$

$1$

$x_2$

$y_2$

$z_2$

$1$

$x_3$

$y_3$

$z_3$

$1$

$=0$

$.$

$(1)$

根据圆心到 3 点的距离都为半径可得出

$R^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2,$

$R^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2,$

$R^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2.$

$(2)$

联立式(1),式(2)即可求得圆心坐标 $(x_0, y_0, z_0)$ ,根据圆心坐标可以得到半径 $R$ 及曲率 $k$ :

$R = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2},$

$k = 1/R = (\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2})^{-1}.$

设同一轨迹线上相邻两点分别为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ , $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ ,激光扫描探头所在位置为中心点 $O(x_0, y_0, z_0)$ 。 $O$ 到 $P_i, P_{i+1}$ 的距离分别为 $d_i, d_{i+1}$ , $\eta_i$ 代表 $d_i$ 与 $d_{i+1}$ 的比值。对于正常的点云数据来说, $d_i$ 和 $d_{i+1}$ 差值不大,比值较小;但对于高频明显噪声点来说,由于噪声点的突然跳跃,使得该点处的弦长明显大于正常点云的弦长,前后两条弦长比值明显偏大。

$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2},$

$d_{i+1} = \sqrt{(x_{i+1} - x_0)^2 + (y_{i+1} - y_0)^2 + (z_{i+1} - z_0)^2},$

$\eta_i = d_i/d_{i+1}.$

1.2 阈值选择

阈值的选取对于噪声点的过滤至关重要,不合理的阈值会导致噪声点过滤不全或者正常的点云被删除。阈值的选择是一个不断反复的过程,需要根据工程实际与过滤结果反复对比进而确定合理的阈值,一般从 1 附近开始试验。噪声点的过滤流程如图 1 所示。

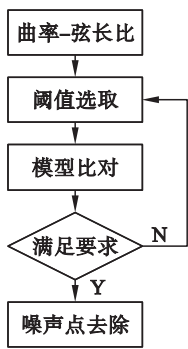


图 1 阈值选择流程图  
Fig. 1 Threshold selection flowchart

2 低频随机噪声点过滤方法

在采空区三维激光扫描探测获取的点云数据中,存在一些与被测空区表面接近的低频随机噪声点。在点云密集区存在的低频随机噪声点可能会使点云之间的拓扑关系发生紊乱,出现自相交现象,从而影响模型的精确构建。这类噪声点主要

表现为频率低、幅值小、在模型曲线曲面上出现毛刺等现象. 针对此类噪声点, 在对高频噪声点过滤的基础上, 运用随机滤波处理方法对其进行过滤处理<sup>[10-12]</sup>.

随机滤波的基本思路是: 任意一条轨迹线上相邻的 3 点分别为  $Q_j, Q_{j+1}, Q_{j+2}$ , 第  $j$  个点  $Q_j$  与第  $j+1$  个点  $Q_{j+1}$  的距离为  $d_1$ , 第  $j+1$  个点与第  $j+2$  个点  $Q_{j+2}$  的距离为  $d_2$ , 第  $j$  个点与第  $j+2$  个点的距离为  $d_3$ . 设  $\Delta = d_3 - d_1$ ;  $\delta = \|d_2 - d_1\|$ ; 给定阈值  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ;  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  为两边夹角, 规定逆时针方向旋转为正, 顺时针为负, 如图 2 所示.

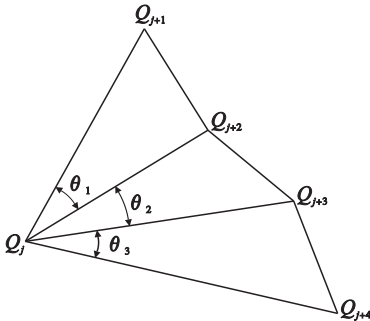


图 2 点的分布示意图  
Fig. 2 Points distribution diagram

当  $\varepsilon_1 < \Delta$  且  $0 \leq \delta \leq \varepsilon_2$ , 如果  $\theta_1$  与  $\theta_2$  的符号方向相反, 则  $Q_{j+1}$  点被认为是噪声点; 如果  $\theta_1$  与  $\theta_2$  符号方向相同, 然后比较  $\theta_1$  与  $\theta_3$ , 如果  $\theta_1$  与  $\theta_3$  符号方向相反, 则  $Q_{j+1}$  点被认为是噪声点; 如果  $\theta_1$  与  $\theta_3$  符号方向相同, 则  $Q_{j+1}$  点保留. 这种随机滤波判断准则可以消除扫描点云数据中与被测空区表面变化接近的低频随机噪声点.

关于  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  选取, 需要根据点云数据的密集程度综合考量, 如果  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  太小容易出现漏判, 太大可能会出现误判, 使得真实点被删除. 为了避免出现漏判、误判等现象, 可以反复进行多次试验, 不断调整  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  大小, 直到得到满意的结果为止.

### 3 模型的光顺处理

由于采空区原始激光扫描的点云数目庞大, 即使每一圈点云数据也有几百个. 因此, 对点云数据进行插值时很难在全域上进行, 需要对每一圈点云数据进行分段多次插值. 在分段插值中, 进行一次插值所包含的点云区间称为窗口<sup>[13]</sup>. 设任一圈点云区间为  $[x_1, x_n]$ , 每个窗口包含  $m$  个点云数据, 前一个窗口的最后一点作为后一个窗口的第一点. 这样每一个窗口逼近一个多项式  $g(x)$ .

$$g(x) = \begin{cases} g_1(x), & x_1 \leq x \leq x_m; \\ g_2(x), & x_m \leq x \leq x_{2m}; \\ \vdots & \vdots \\ g_{\frac{n}{m}}(x), & x_{n-m} \leq x \leq x_n. \end{cases}$$

为了保证插值多项式在  $x_m, x_{2m}, \dots, x_{n-m}$  处连续且连接处光滑, 前后两条插值多项式在区间端点处的函数值、函数一阶导数在该点的值必须相等, 即同时满足约束条件:

$$\begin{cases} g_k(x_{km}) = g_{k+1}(x_{(k+1)m}) , \\ g'_k(x_{km}) = g'_{k+1}(x_{(k+1)m}) . \end{cases}$$

### 4 实例应用

某地下大型铅锌矿 -400mS9-10 采空区在利用三维激光扫描探测仪 CMS (cavity monitoring system) 进行探测时, 因现场湿度大、温度高、粉尘浓度大等复杂环境因素的影响. 实测点云数据中包含大量噪声点, 生成的三维模型下部存在严重失真情况. 如图 3 所示, 矩形框内主要为高频噪声点.

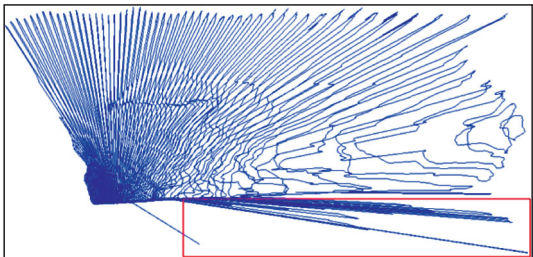


图 3 点云数据中噪声点  
Fig. 3 Noise point of point cloud data

-400mS9-10 采空区原始激光扫描数据的 XYZ 格式文件中包含 23 938 个数据点, 设备自身反馈回来的噪声点为 121 个. 运用上述方法对高频显性噪声点进行过滤. 根据采场实际及工程精度要求分别设定  $k$  及  $\eta_i$ , 针对不同的  $k, \eta_i$  值的去噪结果见表 1. 根据去噪结果与工程实际对比: 当  $k$  取 0.05 ~ 0.1,  $\eta_i$  取 1.0 ~ 2.0 时, 去除点数为 78 个, 采空区下部的噪声点明显被过滤掉了, 其结果如图 4 所示.

在显性的高频噪声点过滤的基础上, 对点云数据中存在的低频噪声点进行过滤. 为了保证低频噪声点过滤的效果, 对不同的阈值  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  进行反复修正, 直到既保证工程实际要求, 又合理地过滤掉低频噪声点为止. 对于不同的  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  值, 低频噪声点精简过滤结果见表 2. 可以看出: 当  $\varepsilon_1 = (0.8 \sim 1.0) \times 10^{-5}$ ,  $\varepsilon_2 = (1.0 \sim 1.2) \times 10^{-5}$  时, 过滤的点云数据在 42 ~ 47 之间, 精简去噪后生成

的采空区三维模型精度明显提高。

表 1 不同 $k, \eta_i$ 值明显噪声点精简过滤结果			
Table 1 Streamline filter results of significant noise points under different $k$ and $\eta_i$			
编号	$k$	$\eta_i$	去噪个数
1	0.4 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	252
2	0.4 ~ 0.5	1.0 ~ 1.5	237
3	0.4 ~ 0.5	1.5 ~ 2.0	205
4	0.3 ~ 0.4	0.5 ~ 1.0	199
5	0.3 ~ 0.4	1.0 ~ 1.5	168
6	0.3 ~ 0.4	1.5 ~ 2.0	166
7	0.2 ~ 0.3	0.5 ~ 1.0	142
8	0.2 ~ 0.3	1.0 ~ 1.5	131
9	0.2 ~ 0.3	1.5 ~ 2.0	117
10	0.1 ~ 0.2	0.5 ~ 1.0	112
11	0.1 ~ 0.2	1.0 ~ 1.5	105
12	0.1 ~ 0.2	1.5 ~ 2.0	98
13	0.05 ~ 0.1	0.5 ~ 1.0	76
14	0.05 ~ 0.1	1.0 ~ 1.5	78
15	0.05 ~ 0.1	1.5 ~ 2.0	78

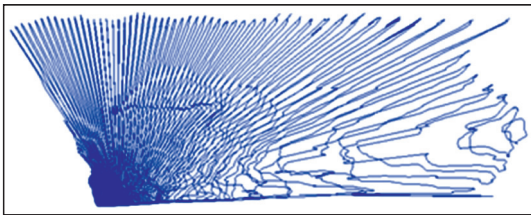


图 4 采空区点云去噪效果图

表 2 不同 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 值低频噪声点精简过滤结果			
Table 2 Streamline filter results of low-frequency noise points under different $\varepsilon_1$ and $\varepsilon_2$			
编号	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	去噪个数
1	$0.6 \times 10^{-5}$	$0.6 \times 10^{-5}$	12
2	$0.6 \times 10^{-5}$	$0.8 \times 10^{-5}$	15
3	$0.6 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	16
4	$0.6 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	20
5	$0.8 \times 10^{-5}$	$0.6 \times 10^{-5}$	26
6	$0.8 \times 10^{-5}$	$0.8 \times 10^{-5}$	29
7	$0.8 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	42
8	$0.8 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	47
9	$1.0 \times 10^{-5}$	$0.6 \times 10^{-5}$	35
10	$1.0 \times 10^{-5}$	$0.8 \times 10^{-5}$	40
11	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	43
12	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	45
13	$1.2 \times 10^{-5}$	$0.6 \times 10^{-5}$	39
14	$1.2 \times 10^{-5}$	$0.8 \times 10^{-5}$	52
15	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	63
16	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	86

在噪声点过滤的基础上,对其进行光滑处理即对点云数据进行插值.在插值计算时以每一圈点云数据中 3 个点为一个插值区间进行分段低次插值.在前后相邻两个窗口的交点处,通过设定边界约束条件,保证插值多项式在该点处函数值及一阶导数值相等.根据该方法依次对每一圈点云数据进行插值.点云数据光滑处理前后生成的曲线如图 5 所示.

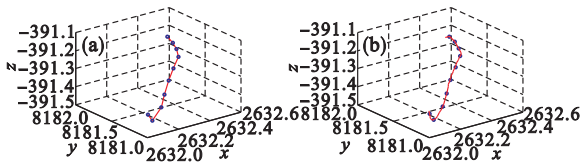


图 5 点云数据光滑处理前后对比图  
Fig. 5 Comparison figure of point cloud before and after smoothing treatment  
(a)—光滑处理前;(b)—光滑处理后.

## 5 结 论

- 1) 在分析大量采空区三维激光扫描探测点云拓扑关系的基础上,总结出噪声点的典型特征,将噪声点分为高频噪声点和低频噪声点.
- 2) 针对采空区激光扫描点云数据中的高频噪声点,提出了曲率-弦长比复合判据方法实现对其的精简过滤.
- 3) 运用随机滤波法去除了采空区激光扫描探测点云数据中与被测物体表面变化接近的低频随机噪声点,有效避免了模型构建中自相交现象的发生.

- 4) 在实现噪声点过滤的基础上,运用分段低次插值法对采空区点云数据进行了线性插值,使得处理后的采空区三维模型线条更为光滑,进一步提高了采空区三维模型的精度.

## 参考文献:

[1] Błaszczyk B K W, Janowski A, Kamiński W, et al. Optimization algorithm and filtration using the adaptive TIN model at the stage of initial processing of the ALS point cloud[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2012, 37 (6): 583 - 589.

[2] 熊立新, 罗周全, 罗贞森, 等. 深部复杂环境下采空区激光扫描异常点云数据修正[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 438 - 442, 446.  
(Xiong Li-xin, Luo Zhou-quan, Luo Zhen-yan, et al. Data amendment of abnormal point cloud of goaf by laser scan in deep complex environment[J]. *Journal of Northeastern University( Natural Science )*, 2014, 35(3): 438 - 442, 446.)

[3] 陈凯, 张达, 张元生. 采空区三维激光扫描点云数据处理方法[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 08120031 - 6.



(Chen Kai,Zhang Da,Zhang Yuan-sheng. Point cloud data processing method of cavity 3D laser scanner [ J ]. *Acta Optica Sinica*,2013,33(8):08120031 – 6. )

[ 4 ] 方源敏,夏永华,陈杰,等. 基于改进的角度偏差法的采空区点云数据精简[J]. 地球科学与环境学报,2012,34(2): 106 – 110.

(Fang Yuan-min,Xia Yong-hua,Chen Jie, et al. Study on point cloudy data simplification of goaf based on improved angular deviation method[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*,2012,34(2):106 – 110. )

[ 5 ] 罗周全,张文芬,罗贞焱,等. 复杂采空区三角网模型剖面轮廓线提取方法[J]. 科技导报,2014,32(18):48 – 53.

(Luo Zhou-quan,Zhang Wen-fen,Luo Zhen-yan, et al. Extraction of sectional contour lines of goafs using triangulation model [ J ]. *Science and Technology Review*, 2014,32(18):48 – 53. )

[ 6 ] Yukie N, Yutaka O, Hiromasa S. Tomographic surface reconstruction from point cloud[J]. *Computers and Graphics ( Pergamon )*,2015,46:55 – 63.

[ 7 ] Damir V,Drazen B,Sonja J,et al. Evaluation of 3D tool wear in machining by successive stereo-photogrammetry and point cloud processing [ J ]. *Journal of Materials Processing Technology*,2013,20(3):449 – 458.

[ 8 ] Liu Y S,Paul J C,Yong J H, et al. Automatic least-squares projection of points onto point clouds with applications in reverse engineering [ J ]. *Computer-Aided Design*, 2006, 38 ( 12 ) :1251 – 1263.

[ 9 ] Zhang X C,Xi J T,Yan J Q. A methodology for smoothing of point cloud data based on anisotropic heat conduction theory [ J ]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2006,30(1/2):70 – 75.

[ 10 ] Wayne K P,Bengtsson J,Kjellberg A, et al. Low frequency noise“pollution”interferes with performance[ J ]. *Noise and Health*,2001,4(13):33 – 49.

[ 11 ] Bucksch A,Lindenbergh R. CAMPINO—a skeletonization method for point cloud processing [ J ]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*,2008,63(1):115 – 127.

[ 12 ] Chroboczek J A,Szewczyk A,Piantino G. Low frequency noise point probe measurements on a wafer level using a novel programmable current amplifier[ C ]//Proceedings of International APS/IEEE Conference on Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations. Gainesville,2001:22 – 25.

[ 13 ] Ikeda K,Masuda H. A study on smooth surface reconstruction from large-scale noisy point-clouds ( 3rd report )-fast smoothing of large-scale point-clouds by GPU based streaming processing [ J ]. *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*,2012,78(7):611 – 615.



(上接第 1629 页)

[ 7 ] Liu G X,Dai E F,Ge Q S, et al. A similarity-based quantitative model for assessing regional debris-flow hazard [ J ]. *Natural Hazards*,2013,69(1):295 – 310.

[ 8 ] 符文熹,聂地新,任光明,等. 中国泥石流发育分布特征研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,1997,8(4):39 – 43.

(Fu Wen-xi,Nie Di-xin,Ren Guang-ming, et al. The study on debris flow’ s distribution regularity in China[ J ]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*,1997,8 (4):39 – 43. )

[ 9 ] Zhang W,Chen J P,Wang Q, et al. Velocity and runoff determination of a debris flow based on energy conservation: the Dongwupu debris flow in Tianjin, China[ J ]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*,2014,48 (1):5 – 14.

[ 10 ] Ni H Y. Experimental study on initiation of gully-type debris flow based on artificial rainfall and channel runoff [ J ]. *Environmental Earth Sciences*,2015,73(10):6213 – 6227.