

文章编号: 1001-3806(2021)03-0362-05

基于机载激光点云的电力线自动提取方法

李靖¹, 钱建国^{1*}, 王伟玺², 李晓明², 李游²

(1. 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 阜新 123000; 2. 深圳大学 智慧城市研究院, 深圳 518061)

摘要: 为了解决地形、走向复杂、点云密度不均匀的输电线路的电力线提取精度低的问题, 提出了一种高效的电力线自动提取和重建方法。首先通过空间分割和点云密度分析方法改进高程滤波算法实现电力线粗提取; 采用基于点云间倾斜角度平均值的滤波算法精提取电力线; 使用统计滤波算法完成电力线整体点云提取; 通过基于随机采样一致性算法的电力线分条提取算法分离电力线, 最后采用直线和抛物线结合的模型完成电力线重建。结果表明, 该方法电力线总的提取精度为 99.342%, 单条电力线重建精度最低为 0.042m, 对地形、线路走向和点云密度等因素具有较好的鲁棒性。该研究为复杂场景下大规模输电线路的电力线提取和 3 维重建提供了参考。

关键词: 激光技术; 电力线自动提取; 点云密度; 重建; 滤波; RANSAC

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.03.017

Power line automatic extraction method based on airborne laser point cloud

LI Jing¹, QIAN Jianguo¹, WANG Weixi², LI Xiaoming², LI You²

(1. School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Research Institute for Smart Cities, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China)

Abstract: In order to solve the problem of low accuracy of power line extraction of transmission lines with complex terrain and trending, and uneven point cloud density, an efficient method for automatic extraction and reconstruction of power lines was proposed. Firstly, through the space segmentation and point cloud density analysis method, the improved elevation filtering algorithm was used to achieve the rough extraction of power lines; the filtering algorithm based on the average value of the inclination angle between the point clouds was used to extract the power lines precisely; the statistical filtering algorithm was used to complete the extraction of the whole point cloud of the power lines. Then the power lines were separated by the random sample consensus (RANSAC)-based power line striping extraction algorithm, and finally the power line reconstruction was completed by using a model combining straight lines and paraboloids. The results show that the total power line extraction accuracy of this method is 99.342%, and the minimum reconstruction accuracy of a single power line is 0.042m, which is robust to terrain, line direction, point cloud density and other factors. This research provides a reference for power line extraction and 3-D reconstruction of large-scale transmission lines in complex scenarios.

Key words: laser technique; power line automatic extraction; point cloud density; reconstruction; filtering; RANSAC

引言

随着国民经济的高速发展, 输电线路规模日益庞大, 电网结构日益复杂, 对电力线周期性巡检提出了新的挑战。机载激光雷达技术可以快速准确地获取输电线路附近地形地物的高精度、高密度 3 维点云信息, 具备巡检效率高、成本低、点云数据精度高等优势, 因此近年来, 机载激光雷达技术在电力线无人机巡检中得

到了广泛应用, 为输电线路防灾减灾和安全隐患分析等工作提供了大量准确可靠的点云数据^[1-8]。

如何从输电线路激光点云数据中快速准确提取电力线点, 精确拟合生成电力线矢量是电力线无人机巡检的主要研究内容之一。近年来, 众多学者对此展开了研究, 提出了多种电力线提取方法。CHEN 等人使用顾及地形起伏特征的滤波方法剔除地面点, 然后采用维度和方向特征过滤植被点和电塔点, 最后通过 Hough 变换提取各条电力线点^[9], 但该方法中 Hough 变换需要将点云数据转换为图像, 且 Hough 变换对噪声点较为敏感。YU 等人通过不规则三角网加密和角度滤波方法过滤非电力线点, 使用 2 维 Hough 变换拟

作者简介: 李靖(1994-), 男, 硕士研究生, 现主要从事电力线巡检和激光点云分类的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 85356928@qq.com

收稿日期: 2020-05-09; 收到修改稿日期: 2020-06-20

合电力线水平投影分离各条电力线^[10],该方法计算量较大,算法效率有待提高。SHEN 等人沿 x 轴将输电线路点云分割为多个子空间,然后通过高程阈值分割滤波算法过滤地面点,然后采用高程密度分割算法提取电力线点^[11],但该方法过滤地形起伏较大,走向多样的输电线路的地面点效果有限,尤其是输电线路走向倾向于 y 轴或者走向呈折线状时。

作者在前人研究的基础上^[12-20],总结分析电力线点的空间分布特征后,提出了一种高效的电力线自动提取和矢量化重建方法。电力线自动提取时采用改进后的高程滤波算法,通过空间分割和子空间网格的点云密度分析,解决了地形、走向复杂、点云密度不均匀的输电线路中电力线提取精度不高的问题。电力线矢量化重建包括直线拟合和抛物线拟合两部分。

1 电力线激光点云自动提取方法

本文中提出的基于机载激光点云的电力线自动提取和矢量化重建方法技术流程如图 1 所示。该方法首先通过空间分割方法将输电线路点云划分为多个小尺度子空间网格,然后通过本文中提出的基于子空间网格点云密度的高程滤波算法完成电力线粗提取。接着采用基于倾斜角度平均值的滤波算法精提取电力线,最后通过统计滤波算法对电力线精提取结果去噪,得到电力线整体点云,提高电力线提取准确度。采用基于随机采样一致性 (random sample consensus, RANSAC) 算法的电力线分条提取算法对各档电力线进行电力线分离,并根据最小二乘法拟合单条电力线的直线和抛物线模型,生成电力线矢量。

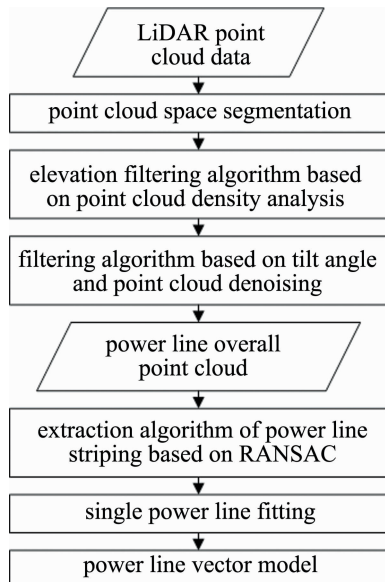


Fig. 1 Power line automatic extraction flow chart

1.1 电力线整体点云提取

传统高程阈值分割算法沿 x 轴方向^[11]或者输电线路主方向^[12]对输电线路进行空间分割,并不适用于地形起伏较大,线路走向呈折线状的输电线路,此外输电线路激光点云数据中可能存在点云密度不均匀的情况,影响电力线的提取精度。因此本文中提出了改进后的电力线提取算法,具体实现方法见下。

1.1.1 子空间网格分割 根据输电线路地形起伏变化情况设置分割尺度 d_x ,将线路原始点云空间 S 沿 x 轴方向等距分割为 n 个单元网格 $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$, x_{\min} 和 x_{\max} 表示原始点云的 x 坐标最值, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

$$n = \lceil \frac{x_{\max} - x_{\min}}{d_x} \rceil \quad (1)$$

根据线路地形实际情况设置分割尺度 d_y ,将单元网格 S_i 沿 y 轴方向等距分割为 m_i 个子空间网格 $S_{i,j} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_i)$, y_{\min} 和 y_{\max} 表示单元网格 S_i 中点云的 y 坐标最值。

$$m_i = \lceil \frac{y_{\max} - y_{\min}}{d_y} \rceil \quad (2)$$

线路点云空间分割时网格分割尺度 d_x 和 d_y 取值范围一般从几米到几十米,通常情况下地形起伏变化越小分割尺度越大,地形起伏变化越大分割尺度越小。输电线路点云的子空间网格分割如图 2 所示。

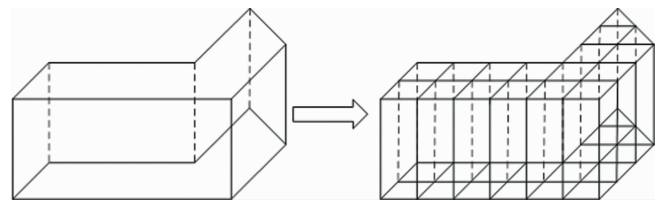


Fig. 2 Schematic diagram of point cloud space division of transmission lines

1.1.2 电力线粗提取 子空间网格中可能有以下 5 种点集:地面点集;地面点和植被点集;地面点和电力线点集;地面点、植被点和电力线点集;电力线点集。根据电力线点在相同空间内相比于非电力线点通常具有高程较高和点云密度较小的特征,对子空间网格进行点云密度分析,然后通过高程滤波算法尽可能多地过滤非电力线点。

$$f(z) = \begin{cases} z_{\min}, z_{\text{mean}} + a, & (d > 0.6D) \\ z_{\min}, z_{\min} + b, & (0.03D \leq d \leq 0.6D) \\ 0, & (d < 0.03D) \end{cases} \quad (3)$$

式中, d 表示每个子空间网格的点云平均密度, D 表示输电线路总体点云的点云平均密度(输电线路总体点

云个数/输电线路水平投影面积), a 和 b 表示常数, z_{\min} 和 z_{mean} 分别表示每个子空间网格点云高程的最小值和平均值, $f(z)$ 表示不同条件下子空间网格中需要被滤除的非电力线点的高程区间。

1.1.3 电力线精提取 电力线点在小范围内的高程变化具有远小于植被点和电塔点的特征, 因此对于电力线粗提取结果中的植被点和电塔点, 本文中采用基于点云间倾斜角度平均值的滤波算法^[10]进行电力线精提取, 算法原理如下: 对点云中每个点给定半径 r 进行 K 维树 (K -dimensional tree, KdTree) 范围搜索, 计算搜索区域其它点到搜索点的倾斜角度的平均值, 倾斜角度平均值小于阈值的搜索点视为电力线点, 否则视为非电力线点。点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ 与点 $p_j(x_j, y_j, z_j)$ 倾斜角度的计算公式为:

$$\theta_{i,j} = \arctan\left[\frac{|z_j - z_i|}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}}\right] \quad (4)$$

1.1.4 点云去噪 为了提高电力线点云提取精度, 本文中采用统计滤波算法滤除上述提取结果中的噪声点。通过 KdTree 的最近邻搜索方法遍历点云获取其邻域, 统计分析搜索点与邻域内各点的距离, 计算平均距离和方差, 假设结果呈高斯分布, 那么与搜索点距离在标准区间外的点视为噪声点, 从电力线精提取点云中删除, 最终得到电力线整体点云。

1.2 电力线激光点云分档分条提取

将提取的电力线整体点云按相邻两座电塔之间的电力线为一档进行电力线分档。根据两座电塔之间的电力线的水平投影呈直线且相互平行的特性, 通过本文中提出的基于 RANSAC 的电力线分条提取算法拟合出投影点云中的直线, 进而分离各条电力线。基于 RANSAC 的电力线分条提取算法思路如下: (1) 从单档电力线的水平投影点云中随机抽取两个点确定直线, 设置距离阈值, 计算其它投影点到直线 L_1 的距离, 距离小于 d_{th} 的点加入直线点集 P_1 , 并统计点集元素个数 N_1 ; (2) 设置随机采样次数 m , 重复 $m-1$ 次随机采样, 得到直线 L_2, L_3, \dots, L_m 及对应的直线点集 p_2, p_3, \dots, p_m ; (3) 根据最小二乘法求取最大直线点集的最佳拟合直线, 将投影点还原为 3 维点云, 并从单档电力线点云中删除该条电力线; (4) 根据单条电力线高程呈连续性分布的特征, 对提取的电力线点云进行高程排查, 通过 KdTree 遍历搜索电力线点, 剔除与周围点有高程突变的噪声点, 以确保电力线点云提取的准确率; (5) 重复步骤 (1) ~ 步骤 (4), 提取下一条电力线, 直到所有电力线分离完成。

1.3 单条电力线重建方法

理想情况下电力线在理论力学中的空间形态的数学模型为悬链线模型, 根据已有研究结果发现抛物线方程可视作电力线悬链线模型的近似表达, 且比悬链线模型有更高的模型重建效率和精度, 更适合电力线重建^[13]。因此将单条电力线的 3 维重建分为曲线拟合和直线拟合, 直线拟合时首先将电力线点云投影到 xy 平面, 然后根据最小二乘法求取参量 k, b , 直线方程式如下:

$$y = kx + b \quad (5)$$

曲线拟合时先求取电力线方向, 然后将单条电力线投影到电力线方向和 Z 轴所构成的平面^[13], 最后根据拟合 z 值与点云实际 z 值的残差平方和 Q 最小求取抛物线模型的最佳参量 a_0, a_1, a_2 。抛物线方程和最小二乘法求的残差平方和计算公式如下:

$$z = a_0x^2 + a_1x + a_2 \quad (6)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (a_0x_i^2 + a_1x_i + a_2 - z_i)^2 = \min \quad (7)$$

2 实验与分析

本文中以 Microsoft Visual Studio 2013 为程序开发平台, 使用点云库 (point cloud library, PCL) 完成算法设计。为了验证电力线自动提取和重建算法的可行性, 采用中国能源建设集团广东省电力设计院提供的两段输电线路机载激光点云数据进行实验测试, 两段输电线路中植被众多, 同档电力线水平投影相隔最短距离为 0.38m, 走廊内点云密度不均匀, 部分地区存在点云密度比较稀疏的情况。数据 1: 线路总长度为 2km, 线路走向为直线段, 地形起伏变化较大, 点云总数为 9325655, 点云平均密度为 68point/m²; 数据 2: 线路总长度为 1.95km, 线路走向为折线段, 地形起伏变化较小, 点云总数为 7314818, 点云平均密度为 71point/m²。原始点云数据如图 3 所示。

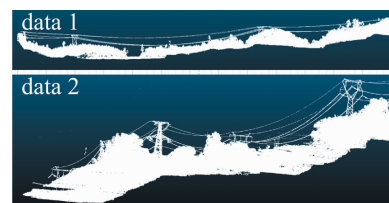


Fig. 3 Original laser point cloud of transmission line

输电线路空间分割时根据地形起伏情况设置分割尺度, 数据 1 中设置 $d_x = d_y = 5$, 数据 2 中设置 $d_x = 25$, $d_y = 15$ 。如果不对分割后的子空间网格进行点云密度分析, 高程阈值区间都统一为 $(z_{\min}, z_{\text{mean}} + a)$, 会因为

子空间内点云密度大小不一,导致电力线粗提取结果中要么存在大量植被点和杆塔点,要么部分电力线点被过滤掉。此外某些子空间网格中可能只有电力线点,此时无论高程阈值区间怎么取值都会造成电力线点被过滤的结果,因此需要对子空间网格进行点云密度分析,以便提高电力线提取的效率和准确率。如图 4 所示,数据 1 中该处点云比较稀疏。

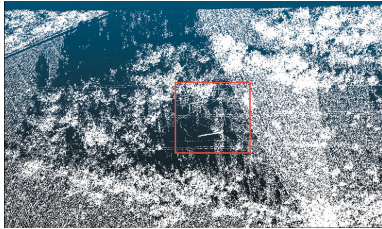


Fig. 4 Sparse area of point cloud

高程滤波时(3)式中高程阈值区间数据 1 设置 $a = b = 5$, 数据 2 设置 $a = 5, b = 4$ 。如图 5 所示,两组数据的粗提取结果可靠,没有造成电力线缺失,对输电线路地形、走向和点云密度等因素鲁棒性较好,能滤除绝大多数地面点,大量植被点和电塔点,左侧为数据 1 的电力线粗提取部分结果,右侧为数据 2 的电力线粗提取部分结果。

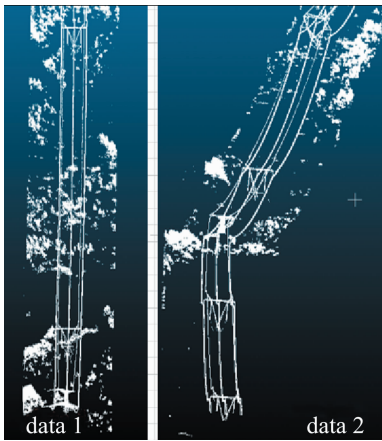


Fig. 5 Elevation filtering results

两组点云数据在电力线精提取时 KdTree 的搜索半径设置为 1.5m,角度阈值设置为 9° ,统计滤波时通过 KdTree 遍历点云搜索最邻近的 50 个点,剔除与搜索点距离在 3 倍标准差外的噪声点。两组点云数据的电力线整体点云提取结果准确完整,精度较高,噪声点少,部分结果如图 6 所示。

对电力线整体点云按照相邻两座电塔为一档进行分档处理后,随机选取第 2 档电力线作为后续电力线分条提取和电力线拟合重建的实验数据。根据本文中提出的基于 RANSAC 直线拟合的电力线分条提取算

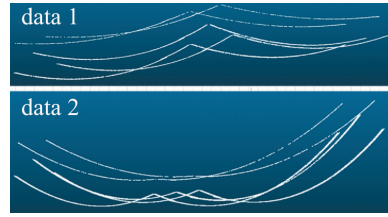


Fig. 6 Power line point cloud

法分离各条电力线,RANSAC 直线拟合时采样次数为 40,距离阈值设置为 0.38m,高程排查搜索半径为 1.5m,高程差阈值为 1m。电力线分条提取精度详见表 1,该档内 8 条电力线总的提取精度达到 99.342%,单条电力线的最低提取精度为 98.90%。

Table 1 Extraction accuracy of power line

| power line | original number | extraction number | extraction accuracy/% |
|------------|-----------------|-------------------|-----------------------|
| 1 | 788 | 784 | 99.49 |
| 2 | 783 | 778 | 99.36 |
| 3 | 787 | 779 | 99.48 |
| 4 | 767 | 763 | 99.47 |
| 5 | 700 | 698 | 99.71 |
| 6 | 675 | 668 | 98.96 |
| 7 | 574 | 570 | 99.30 |
| 8 | 546 | 540 | 98.90 |

第 2 档电力线分条提取后,将各条电力线依次投影到 xy 平面、电力线方向和 z 轴构成的平面上,根据最小二乘法则计算直线拟合方程和抛物线最佳拟合曲线方程,最后在 $[x_{min}, x_{max}]$ 上每隔 0.3m 根据直线方程和抛物线方程生成对应的 y 值和 z 值,得到电力线 3 维矢量节点,近似表达电力线矢量。电力线重建结果精度评定采用原始电力线 LiDAR 点云与 3 维重建模型的最佳拟合点的欧氏距离的最大值 d_{max} 、平均值 d_{mean} 和最小值 d_{min} 3 项指标为评价标准,其中距离平均值为最重要的精度评价指标。该档电力线 3 维重建精度统计结果如表 2 所示,模型拟合的距离平均值最大误差为 0.042m。

Table 2 Accuracy evaluation of 3-D reconstruction of power lines

| power line | d_{mean}/m | d_{max}/m | d_{min}/m |
|------------|--------------|-------------|-------------|
| 1 | 0.036 | 0.134 | 0.001 |
| 2 | 0.039 | 0.123 | 0.002 |
| 3 | 0.041 | 0.229 | 0.001 |
| 4 | 0.041 | 0.129 | 0.001 |
| 5 | 0.042 | 0.150 | 0.003 |
| 6 | 0.040 | 0.170 | 0.001 |
| 7 | 0.039 | 0.113 | 0.001 |
| 8 | 0.039 | 0.115 | 0.001 |

3 结论

提出了一种高效的电力线提取方法,在电力线粗提取部分设计了一种新的高程滤波算法,该算法通过空间分割和子空间网格的点云密度分析,避免了输电线路走向和地形对电力线提取的影响,提高了高程滤波算法在点云密度不均匀的输电线路数据中的适用性。实验结果表明,本文中的电力线提取方法具有较好的稳健性和抗干扰性,电力线点云提取与3维重建的精度较高,满足实际工程需要,可以应用于大规模复杂环境下的输电线路激光点云数据处理中。

参 考 文 献

- [1] ZHOU X F, JIANG H. Automatic power line extraction from airborne LiDAR data in complex terrain background [J]. *Applied Laser*, 2019, 39(4): 696-702 (in Chinese).
- [2] LIANG A Q, MA H Ch, CAI Zh. An airborne LiDAR data power line extraction method based on SVM [J]. *Laser Journal*, 2019, 40(2): 29-34 (in Chinese).
- [3] FRYSKOWSKA A. Improvement of 3-D power line extraction from multiple low-cost UAV imagery using wavelet analysis [J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 700.
- [4] WANG P H, XI X H, WANG Ch, *et al.* Study on power line fast extraction based on airborne LiDAR data [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(2): 154-158 (in Chinese).
- [5] LIN X G, ZHANG J X. 3-D power line reconstruction from airborne LiDAR point cloud of overhead electric power transmission corridors [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 347-353 (in Chinese).
- [6] WU J J, CHEN L, LI L, *et al.* Power line extraction and reconstruction from airborne LiDAR point cloud [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(4): 500-505 (in Chinese).
- [7] MA W F, WANG J L, WANG Ch, *et al.* Precise extraction and reconstruction of power line by using model residual [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(2): 60-66 (in Chinese).
- [8] WANG Y J, CHEN Q, LIU L, *et al.* A Hierarchical unsupervised method for power line classification from airborne LiDAR data [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(12): 1406-1422.
- [9] CHEN Ch, MAI X M, SONG Sh, *et al.* Automatic power lines extraction method from airborne LiDAR point cloud [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(12): 1600-1605 (in Chinese).
- [10] YU J, MU Ch, FENG Y M, *et al.* Powerlines extraction techniques from airborne LiDAR data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(11): 1275-1279 (in Chinese).
- [11] SHEN X J, QIN Ch, DU Y, *et al.* An automatic power line extraction method from airborne light detection and ranging point cloud in complex terrain [J]. *Journal of Tongji University*, 2018, 46(7): 982-987 (in Chinese).
- [12] WU H, LIU H Y, DING G F, *et al.* Automatic extraction of power lines from laser point clouds in complex environments [J/OL]. (2019-10-28) [2020-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20191028.1125.008.html> (in Chinese).
- [13] DUAN M Y. 3-D power line reconstruction from airborne LiDAR point cloud [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015: 63-81 (in Chinese).
- [14] MA W F, WANG J L, WANG Ch, *et al.* An extraction algorithm of power lines from airborne LiDAR point clouds [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2019, 36(1): 39-44 (in Chinese).
- [15] YE L, LIU Q, HU Q W. Research of power line fitting and extraction techniques based on LIDAR point cloud data [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2010, 33(5): 30-34 (in Chinese).
- [16] XU L G, GUO T, WU Sh H, *et al.* Fast extraction and reconstruction of power line based on point cloud data features [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(2): 244-249 (in Chinese).
- [17] XU B, LIU Zh J, WANG J. Extraction and security detection of power line based on laser point cloud data [J]. *Laser Journal*, 2017, 38(7): 48-51 (in Chinese).
- [18] YANG Y, LI H N. An automatic power lines extraction method based on airborne LiDAR point cloud [J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*. (2019-10-08) [2020-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20191008.1539.034.html> (in Chinese).
- [19] LIU X L, ZHENG Sh Y, XU L. Power line automatic extraction algorithm based on LiDAR data [J]. *Journal of Geomatics*, 2017, 42(4): 13-16 (in Chinese).
- [20] SHI Zh W, LIN Y, LI H. Extraction of urban power lines and potential hazard analysis from mobile laser scanning point clouds [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(9): 3411-3428.