

基于激光点云数据的无人驾驶航空器系统空中走廊构建

冯登超

(北华航天工业学院 遥感—导航—地理信息系统集成应用技术研究室, 河北 廊坊 065000)

摘要: 对低空安全和个人隐私保护进行了阐述, 提出了一种基于激光点云数据的无人驾驶航空器空中走廊构建技术; 采用噪声水平估计模型对数字表面模型的噪声幅度进行估计, 应用高斯滤波器对标记的噪声区域进行噪声抑制; 构建经验分解模型, 对滤波后的数字表面模型进行能量分解, 生成固有模态函数和残差信号, 结合基于坡度的阈值模型, 识别非地表目标, 生成数字地势模型; 采用数字表面模型和数字地势模型, 对低空空域进行空域分层处理, 将低空空域划分为顶层区、安全区和起降区三层空域; 采用地理位置数据映射方式, 将非地表物体和个人隐私保护区域, 映射到划分后的各层空域, 结合飞行路径规划技术, 避开飞行期间的个人隐私保护区和限制飞行区; 最后, 采用可视化技术实现低空空域空中走廊的三维构建; 实验结果表明, 该空中走廊的构建方法能够提高飞行区域地物目标的识别精度, 实现个人隐私保护, 对低空安全产业发展具有积极的意义。

关键词: 空中走廊; 数字地势模型; 个人隐私保护; 低空安全

Construction of Aerial Corridor for Unmanned Aircraft Systems in Low Altitude Airspace Based on Point Cloud of Laser Scanner

Feng Dengchao

(Integrated Laboratory of Remote Sensing, GNSS and GIS, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

Abstract: The low altitude safety and privacy protection were illustrated and the construction of aerial corridor for unmanned aircraft system in low altitude airspace based on point cloud of laser scanner was proposed. The noise amplitude of digital surface model was estimated by noise level model and the Gaussian filter was used to perform the noise suppression for the marked noise area. The empirical model decomposition method was designed to implement the extraction of energy to produce the intrinsic mode functions and the residual signal. Combined with the threshold model based on the slope range, non-ground objects were distinguished, and digital terrain model was constructed. Low altitude airspace was divided into three zones, namely upper zone, safe zone, and takeoff & landing zone based on the above digital surface model and digital terrain model. Aimed at nonground objects and privacy protection areas, the geographic datasets were mapped to the divided zones, the privacy protection areas and restriction areas were avoided based on flight path planning technology. Finally, the visualization technology was adopted to perform the three-dimensional construction of aerial corridor in low altitude airspace. The experiments showed the recognition accuracy of the ground objects in flight areas was improved based on the aerial corridor, the privacy protection was achieved, which has positive significance to the development of low altitude safety industry.

Keywords: aerial corridor; digital terrain model; noise estimation; privacy protection

0 引言

无人驾驶航空器系统通常是指装备各种传感器探测装置, 用于执行各种危险及应急任务, 无需驾驶员登机驾驶的遥控或自主智能航空器。随着我国低空空域的逐步开放, 无人驾驶航空器制造技术的不断进步, 生产成本大幅度降低, 大量的无人驾驶航空器系统已经出现在社会生产、生活的各个领域, 如娱乐活动、输油管线巡检、农业植保、应急救援、侦察侦测等。这极大的增加了无人驾驶航空器系统在低空空域的运营复杂度, 也对低空空域的航空器及地面目标带来了很大潜在的危险。为了确保低空空域安全, 实现个人隐私保护, 国内外学者

开展了一系列的研究工作。许多学者聚焦无人驾驶航空器系统的防撞系统研究^[1-3]。Soler 等提出了一种混合控制方法, 旨在避免航空器相撞^[4]。近年来, 一些学者相继开展致力于规范低空空域秩序、确保低空安全的研究^[5]。冯登超等分析了空中环境对低空空域飞行安全的影响, 探索了低空安全告警航图可视化技术^[6]。Sotiriou 等为了提高飞行安全性能, 提出了航迹一致性监测技术^[7]。Chougali 等采用实时算法调度方法, 探索了一种飞机着陆调度模型^[8]。Kim 等探索了一种无人驾驶航空器系统交通管理构建方法, 用于确保低空空域无人驾驶航空器系统的安全管理^[9]。Foina 等提出了一种基于航空物流模型的无人驾驶航空器交通管理解决方案^[10]。Fadlullah 等提出了一种动态航迹控制算法, 将其应用在无人驾驶航空器网络^[12]。

低空空域管理的一个关键要素是准确识别地面的各个区域^[14-15]。Yuan 等提出了一种基于空间约束、模型驱动聚类方法用于水体的分离^[13]。冯登超等提出了面向美国 G 区空域的小型无人驾驶航空器系统空中走廊构架方法^[16]。Voss 提出了

收稿日期: 2017-12-18; 修回日期: 2017-12-29。

基金项目: 河北省教育厅重点项目(ZD2016106)。

作者简介: 冯登超(1977-), 男, 四川西充人, 博士, 副教授, 主要从事低空安全空中走廊技术体系方向的研究。

一种适用于大气层底层空间的小型无人驾驶航空器系统管理框架,用于保护个人隐私和财产权利^[17]。Kim 等提出了一种基于服务器模式的实时隐私保护调度方法,防止无人驾驶航空器系统的视频侦察^[18]。

本文采用离散激光点云数据,设计空中走廊,用于确保低空空域飞行安全,实现个人隐私保护。首先,采用噪声幅度值估计方法对低空飞行区域覆盖的数字表面模型进行噪声水平估计,结合高斯滤波器进行区域噪声抑制。采用经验分解模型^[19-20]和形态学操作,对非地表目标进行检测,生成数字地势模型。采用飞行管理规则、数字地表模型和数字地势模型进行综合设计,完成对低空空域的空间区域划分。然后,提取个人隐私保护区域的边界信息,并将其映射到低空空域的各层空间,作为低空空域的限制飞行区域。最后,结合无人驾驶航空器系统的路径规划方法,采用计算机图像绘制技术^[21],生成三维可视化空中走廊。

本文的组织安排如下:第一部分描述用于个人隐私保护和飞行安全的空中走廊架构策略,探索数字地表模型的滤波方法、数字地势模型的生成方法、空域分层划分和三维可视化技术。第二部分展示相关仿真实验,并对实验结果进行分析。第三部分总结全文,指出三维数字化空中走廊构建的技术难点和下一步的研究方向。

1 空中走廊与个人隐私保护

为了构建空中走廊,本文采用离散激光扫描数据获取非地表目标的高程数据,结合数字滤波算法,生成数字地势模型。图 1 展示了本文提出的空中走廊构建流程图。在该空中走廊设计过程中,首先通过激光扫描点云数据,生成数字地表模型,估计数字地表模型的噪声水平,采用基于噪声水平的数字滤波器对噪声区域进行噪声抑制。然后,采用经验分解模型对滤波后的数字地表模型进行处理,结合基于坡度阈值模型和形态学开运算操作,生成数字地势模型。基于生成的数字地表模型和数字地势模型,结合低空空域的高程数据上限值,对低空空域进行空间立体分层。为了实现隐私区域保护,在空域中对个人隐私区域进行标记和空间映射,并将其应用于无人驾驶航空器系统路径规划设计中。根据低空空域的空间分层结果和标记后的隐私保护区,调整无人驾驶航空器路由规划中的节点位置,确保低空空域的飞行安全和个人隐私保护。最后,为了实现空中走廊的可视化展示,采用文献^[21]中的计算机绘图技术。

1.1 数字地势模型构建

激光点云数据,是采用激光在同一空间参考系下,获取被探测目标表面的每个采样点的空间坐标,在采集过程中经常引入大量的噪声数据^[20]。地面物体高程数据值越大,无人驾驶航空器系统在低空空域飞行的安全风险越大。通常,传统的滤波器,例如 Özcan' s 方法^[20]采用的中值滤波器,会引起激光点云数据的信息损失。因此,本文首先采用噪声水平估计,对基于激光点云数据的数字表面模型进行噪声水平估计。数字表面模型的噪声水平估计方法^[24]如下:

$$\hat{\sigma}_n^2 = \lambda_{\min} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i y_i^T \right) \quad (1)$$

$$y_i = x_i + n_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中: $\hat{\sigma}_n^2$ 是估计后的噪声方差, x_i 是中心位置第 i 个像素的纹理碎片, N 是噪声分布区域编号, λ_{\min} 是噪声分布区域矩

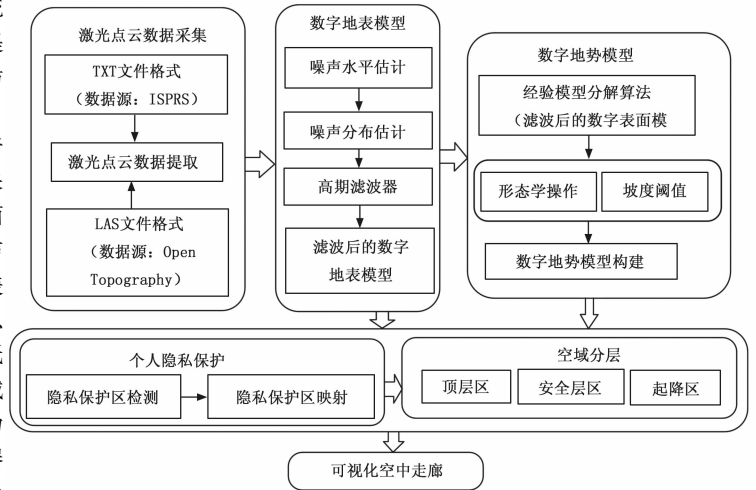


图 1 空中走廊结构设计流程图

阵的最小特征值。

根据公式 (1) 计算得到的噪声水平, 确定数字地表模型中的噪声分布区域。采用高斯滤波器对数字表面模型中的每个噪声区域的纹理碎片进行滤波操作。高斯滤波器中的尺度因子按照如下公式进行计算:

$$M_{\text{scalar}} = 2\sqrt{2} \sqrt{\hat{\sigma}_n^2} + 1 \quad (3)$$

其中: $2\sqrt{2}\hat{\sigma}_n^2$ 是高斯核函数的参数。

为了生成准确的数字地势模型, 需要对数字地表模型中的非地表目标进行检测。对于滤波后的数字地表模型, 本文采用基于经验模型分解的方法进行分解, 公式如下:

$$Y(i, j) = \sum_{l=1}^{L-1} X_l(i, j) + N(i, j) \quad (4)$$

其中: $Y(i, j)$ 是滤波后的数字地表模型, $X_l(i, j)$ 是固有模态函数, $N(i, j)$ 是残差信号, $L-1$ 是经验模型分解中固有模态函数的分解次数。经验模型分解是对与各种内在的时间尺度相关的能量信息进行提取, 通过筛选处理, 生成固有模态函数。由文献^[20]可知, 经验分解模型分解次数由固有模态函数决定。即, $X_l(i, j)$ 根据固有模态函数的最大次数进行分解。在筛选处理中, 采用基于代价函数的形态学开运算获取残差信号 $N(i, j)$ 。代价函数 F 如下:

$$F = \frac{\sum [Z(i, j) - Z_{\text{avg}}(i, j)]^2}{\sum Z(i, j)^2}, F \in [0, 1] \quad (5)$$

其中: $Z(i, j)$ 是坐标 (i, j) 位置处的滤波后的数字地表模型的幅值, $Z_{\text{avg}}(i, j)$ 是在相同位置滤波后的数字地表模型的幅度均值。当代价函数值大于阈值时, 停止迭代。残差矩阵判别规则如下:

$$J = \frac{V_{th}}{V_{dsm} - V_{residue}} * \rho \quad (6)$$

其中: V_{th} 是预设阈值 V_{dsm} 是数字地表模型幅值, $V_{residue}$ 是残差矩阵的幅值, ρ 是尺度因子 ($\rho \in [0, 1]$)。如果 $J \leq 1$, 该点被标记为地面。

为了获得非地表目标, 采用如下基于坡度的高程阈值计算公式:

$$R = R_{mi_thr} + S_{slope} * C \quad (7)$$

$$S_{slope} = \sqrt{\nabla X^2 + \nabla Y^2} \quad (8)$$

其中: R_{mi_thr} 是初始高程阈值, S_{slope} 是地面坡度, C 是设

置的网格大小。如果数字表面模型和数字地势模型的高程计算差值大于阈值 R ，矩阵中相应的网格被标记为非地表目标。

1.2 低空空域空间划分和路径可视化

为了构建无人驾驶航空器系统的空中走廊，空间分层设计依据低空空域的空间高程上限要求进行划分，包括顶层区、安全区和起降区空域。顶层区域为高于地面的固定值空域（如美国 G 区对小型无人机系统采用 500 英尺高度作为上限）。顶层区的形状采用加入固定值高程数据的数字地势模型的相同区域。安全区是介于顶层和起降层区域的空间区域。起降区是包含原始自然障碍物和人工障碍物的地表区域，采用数字地表模型进行设计。通常，无人驾驶航空器系统在起降区域危险系数比其它两层空域较大。由于受地面障碍物及各种不确定环境因素和人为因素干扰较大，无人驾驶航空器系统在起降阶段的安全风险系数相对较高。

设 $H_1(i, j)$ and $H_2(i, j)$ 分别是地理位置坐标 (i, j) 处的数字地表模型和数字地势模型的高程数据值， $H_{constant}$ 是无人驾驶航空器系统在低空空域的最大允许高程数据值。低空空域的每层空间的高程数值，按照如下公式进行计算：

$$H_{bottom_zone}(i, j) = H_1(i, j) \quad (9)$$

$$H_{up_zone}(i, j) = H_2(i, j) + H_{constant} \quad (10)$$

$$H_{safe_zone}(i, j) \in [H_{bottom_zone}(i, j), H_{up_zone}(i, j)] \quad (11)$$

其中： $H_{bottom_zone}(i, j)$ 是起降区的高程数值， $H_{safe_zone}(i, j)$ 是安全区的高程数值范围， $H_{up_zone}(i, j)$ 是顶层区的高程数值。

随着低空空域的逐步开放，世界许多国家，包括我国，无人驾驶航空器引起的个人隐私侵犯事件频发，而且呈现逐年上升趋势。因此，在空中走廊设计过程中，需要对特定区域进行个人隐私保护。在本文中研究中，采用如下方法进行个人隐私区域保护：首先，提取隐私保护区域的轮廓，并将其映射到空间各层。然后，对标记后的隐私保护区域的边界地理位置数据与空间区域的飞行航道的离散节点比较，动态调整无人驾驶航空器在空中走廊中的路径节点，避免无人驾驶航空器系统在飞行过程中，通过未经允许的禁飞区，触发个人隐私侵犯。

在可视化研究中，本文采用计算机图像绘制方法^[21]绘制三维空中走廊。该空中走廊的可视化技术包括四部分内容。第一部分是激光点云数据的三维可视化及空间分层，包括水平地理位置坐标 (X, Y) ，高程数据 Z 值。第二部分是数字地表模型和数字地势模型的三维可视化绘制。第三部分是空中走廊中的图标绘制，包括障碍物、罗盘、限制区、禁飞区、机场等。第四部分是飞行路径可视化展示，包括不同的飞行高度和拓扑图信息。其中，飞行路径地图中的一些符号绘制如图 2 所示。可视化空域分层和无人驾驶航空器系统的飞行路径如图 3 所示。在图 3 (b)、图 3 (c) 中，黑色标记线表示无人驾驶航空器系统的飞行路径。

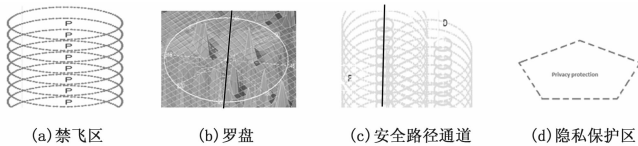


图 2 可视化图标绘制

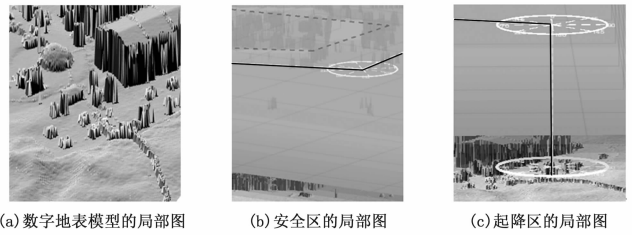


图 3 低空空域三维模型和飞行路径展示

2 仿真实验与结果分析

本文提出的空中走廊构建中，采用的仿真实验环境是 MATLAB 2015b。在实验中，选用的激光点云测试数据集总共包括两种：具有参考地表数字标记值的 15 组 ISPRS 国际标准激光点云数据集^[22]；美国德克萨斯州野马岛的四个测试区域的激光点云数据集^[23]。两种测试数据集的地形特性描述，分别参见表 1 和表 2 所示。

表 1 ISPRS 数据集中选取的带有参考地表标记的 15 组测试样本数据的地形特征

ISPRS 激光扫描数据集	地形特性
Samp11, Samp12	陡坡, 山坡有植被和建筑物
Samp21, Samp 22, Samp23, Samp24	大的建筑物, 不规则建筑物, 带有桥和涵洞的区域
Samp31	混合植被的高密度建筑物, 带顶的建筑物, 带有不同高程数据特征的物体
Samp41, Samp42	有火车的铁路 (低密度地势)
Samp51, Samp52, Samp53, Samp54	有植被的陡坡, 河床上的植被
Samp61	大型建筑物, 空旷路面
Samp71	桥梁, 桥下通道, 道路

表 2 野马岛采集的激光扫描数据的地面区域特征

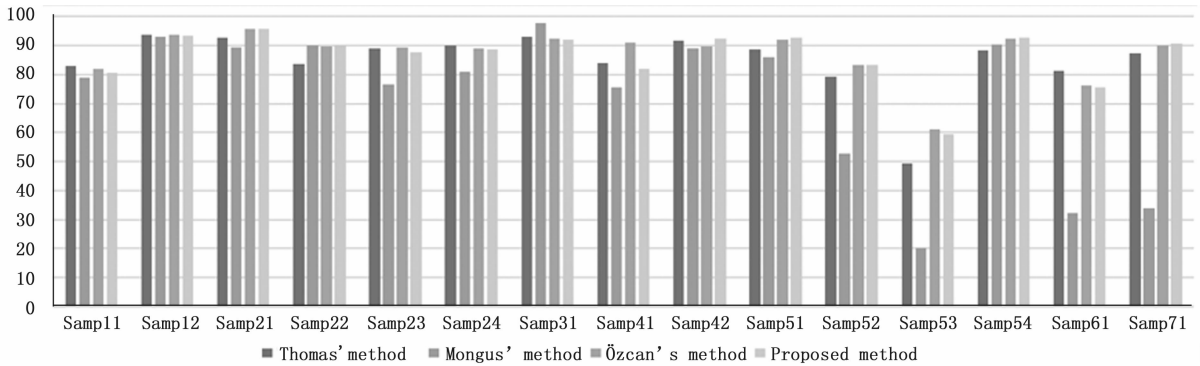
测试样本名称	特性
real_samp1 (Port Royal Ocean Resort 会议中心)	小型建筑物, 带有不同形状的游泳池, 长椅, 喷泉, 走廊, 乒乓球台
real_samp2 (Lost Colony Villas)	小型游泳池, 住宅区, 路灯, 小路
real_samp3 (野马岛会议中心)	带有不同形状的建筑物, 中央空调制冷塔, 广场
real_samp4 (Sandpiper Resort Condominiums)	高大建筑物, 游泳池, 停车场的汽车, 有小树冠的树木, 小路

为了生成精准的数字地势模型，仿真实验中选取了 4 种主流算法与本文方法进行比较，即 Thomas 方法^[25]、Mongus 方法^[26]、Özcan's 方法^[20]以及本文提出的方法。以上 4 种算法的参数设置如表 3 所示。

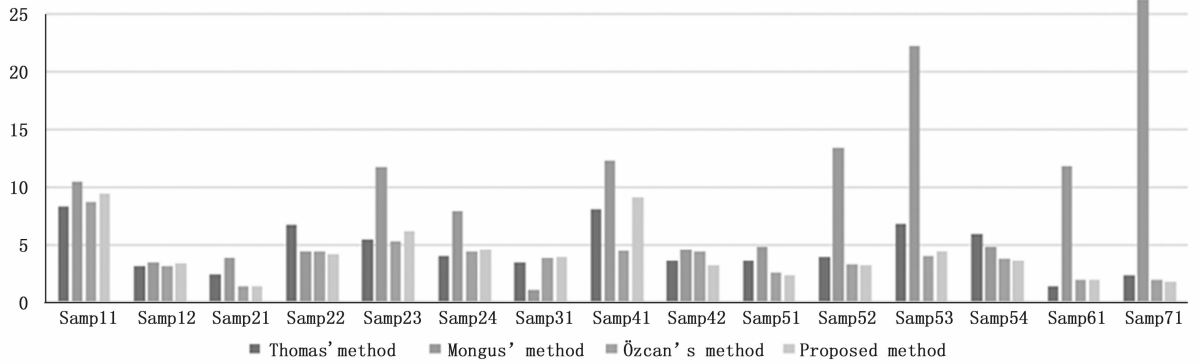
为了对数字地势模型的构建效果进行客观评价，本文分别采用了 Kappa 分数、总误差率、Skewness 和 Kurtosis 四种性能评价参数。对于 15 组标准 ISPRS 激光点云数据集，采用上述 4 种方法获得的 Kappa 分数如图 4 所示。

表 3 4 种方法的参数设置

Thomas 方法		Mongus 方法		Özcan 方法		本文方法	
网格大小	1	b	0.25	网格大小	1	网格大小	1
初始坡度	0.2	k	0.05	边缘阈值	5	边缘阈值	5
窗尺寸	[1,16]	n		迭代次数	10	迭代次数	10
最大阈值	0.45	滤波器最大值	50	最大窗尺寸	20	最大窗尺寸	20
高程尺度因子	1.2			最大阈值	4	最大阈值	4
				硬高程阈值	0.6	硬高程阈值	0.6
				坡度阈值的逻辑值	1	坡度阈值的逻辑值	1
				固有模态函数的最大分解次数	1	固有模态函数的最大分解次数	1
						碎片大小	7
						置信度	0.99
						噪声水平估计迭代次数	3



(a) 基于 ISPRS 测试样本数据集的四种方法的 Kappa 分数值比较



(b) 基于 ISPRS 测试样本数据集的四种方法的总误差率比较

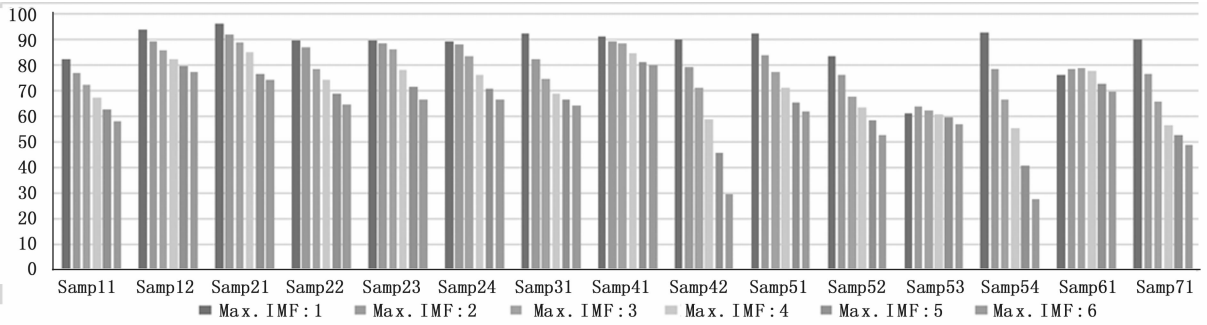
图 4 基于 ISPRS 样本数据集的数字地势模型 Kappa 分数和总误差率比较

根据图 4 (a) 的直方图分析可知, 四种方法中, 本文提出的方法和 Özcan 方法都能获得比其它两种方法较大的 Kappa 分数值。对于测试样本 Samp22, Samp42, Samp51, Samp52, Samp54, Samp71, 本文提出的方法获得的 Kappa 分数值分别为 90.1381, 92.5285, 92.8452, 83.2073, 92.8114, 90.6518, 本文方法获得的 Kappa 分数值均高于其它三种方法。对于其它样本, 本文提出的方法也能获得相对较高的 Kappa 分数。图 4 (b) 表明, Thomas 方法^[25]、Mongus 方法^[26]两种方法计算的总误差率较大, 本文提出的方法和 Özcan 方法^[20]都能够获得较低的总误差率。对于样本 Samp22, Samp42, Samp51, Samp52, Samp54, Samp71, 本文提出的方法的总误差率分别是 4.1766, 3.1881, 2.3648, 3.2526,

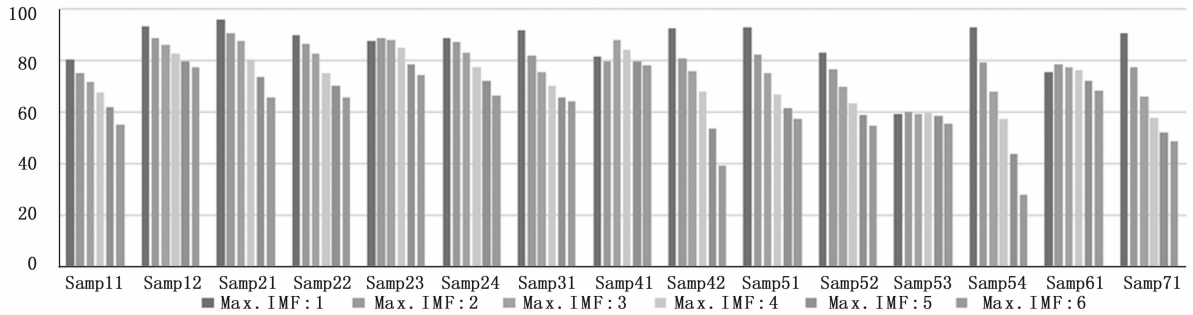
3.5897, 1.8089, 低于其它三种方法的总误差率。对于 ISPRS 其它的测试样本, 本文提出的方法也能获得较低的错误率。从本次实验中的 Kappa 分数和总误差率比较结果表明, 本文提出的方法对于 ISPRS 数据集的测试样本, 能够取得较好的数字地势模型。

由于固有模态函数的最大分解次数对于构建的数字地势模型的性能非常重要。在以下实验中, 对本文提出的方法及 Özcan 方法^[20]的固有模态函数的最大分解次数进行了定量计算, 评估不同分解次数对数字地势模型性能的影响。对于固有本征函数, 设置不同的最大分解次数, 计算获得的实验结果如图 5 所示。

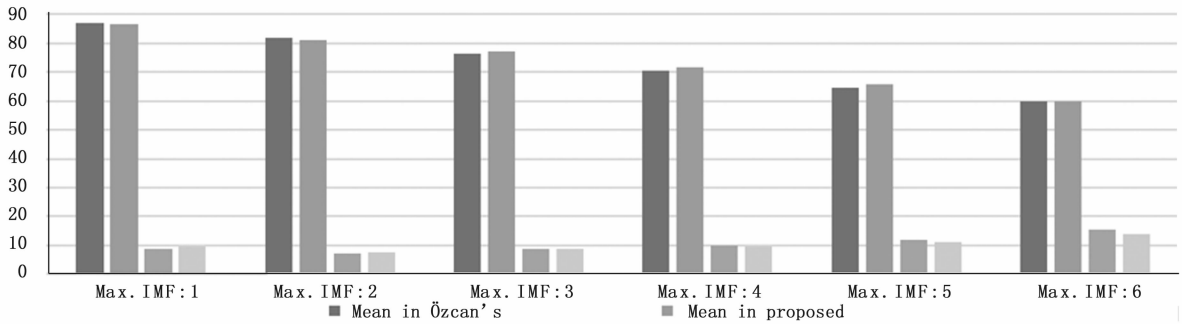
在图 5 中, Max. IMF 表示固有模态函数的最大分解次数。



(a) Özcan方法对固有模态函数采用不同最大分解次数获得的Kappa分数值比较



(b) 本文中方法中对固有模态函数采用不同最大分解次数获得的Kappa分数值比较



(c) Özcan方法和本文中方法的Kappa 分数的均值和标准差

图 5 Özcan 方法和本文中方法的 Kappa 分数值比较

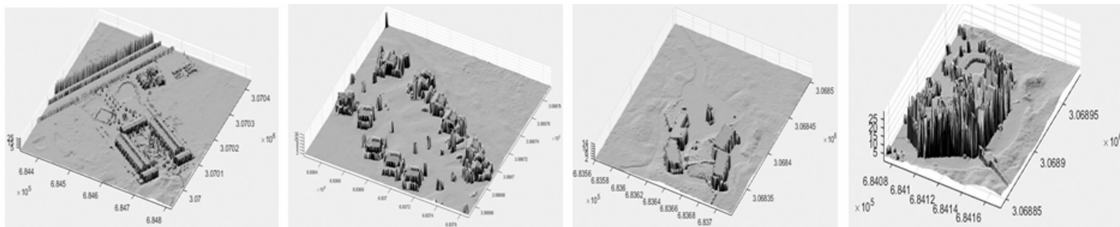
由图 5 (a) 的直方图数据表明，对于 Özcan 方法^[20]，在 ISPRS 样本数据测试中，Kappa 分数随着固有模态函数的分解次数的增加而呈现下滑趋势。由该组实验获得的直方图数据可知，最佳的 Kappa 分数值出现在最大分解次数为 1 次。图 5 (b) 表明，本文提出的方法，在 ISPRS 样本数据集生成的数字地势模型的 Kappa 分数也呈现下降趋势，且在最大分解次数为 1 时取得最优 Kappa 分数值。图 5 (c) 比较了本文方法和 Özcan 方法^[20]得到的均值和标准差。从图 5 (c) 直方图数据表明，Kappa 分数的均值随着固有模态函数的最大分解次数的增加而呈现整体下降趋势。对于实验中选取的 15 组 ISPRS 测试样本数据集，当固有模态函数的最大分解次数从 1 次增加到 6 次时，Özcan's 方法^[20]的 Kappa 分数分别为 87.18235, 81.79479, 76.32071, 70.50371, 64.69338, 59.75527。在同样测试环境下，本文提出的方法获得的 Kappa 分数均值分别是 86.45674, 81.02425, 77.06374, 71.50672, 65.59312, 60.03348。两种方法的测试结果表明，Kappa 分数随着固有模态函数的分解次数的增加呈现逐步递减趋势。当最大分解次数为 1 次时，Kappa 分数值高于固有模态函数在其它分解次数时的计算值。该结论也解释了在表 3 的参数设置中，固有模态函

数的最大分解次数设置为 1 次的原因。当固有模态函数的最大分解次数为 1 时，上述实验中，本文提出的噪声水平估计和检测到的噪声分布区域如表 4 所示。

表 4 采用本文方法获得的 ISPRS 15 组样本数据的噪声水平估计结果

ISPRS	噪声水平	噪声分布区域的数量	ISPRS	噪声水平	噪声分布区域的数量
Samp11	0.33	9328.00	Samp42	0.12	8901.00
Samp12	0.24	16442.00	Samp51	0.05	43037.00
Samp21	0.15	5625.00	Samp52	0.04	41529.00
Samp22	0.10	14373.00	Samp53	0.04	81307.00
Samp23	0.17	10797.00	Samp54	0.07	3697.00
Samp24	0.14	2500.00	Samp61	0.02	39640.00
Samp31	0.22	11321.00	Samp71	0.02	33035.00
Samp41	0.08	6710.00			

由表 4 可知，对与 15 组 ISPRS 测试样本，噪声水平估计值均不相同，噪声分布区域的数量也各不相同。实验数据表明，噪声水平和噪声分布区域检测结果，随着地形的不同而变化，如果采用滤波器进行整体滤波，会带来相应的信息损失。



(a) 采用激光扫描样本数据的4个测试区的数字地表模型



(b) 4个测试区对应的遥感影像

图 6 采用激光扫描数据构建的数字地表模型和对应区域的遥感影像图

以下的仿真实验中,采用美国德克萨斯州野马岛的4个测试区的激光扫描数据 `real_samp1`、`real_samp2`、`real_samp3`、`real_samp4`,设置固有模态函数的最大分解次数为1次,对生成的数字地势模型进行性能评估。在上述4个测试区域,采用激光扫描点云数据集构建的数字地表模型和同一区域的遥感图像如图6所示。

采用本文方法,在野马岛的四个测试区域 `real_samp1`、`real_samp2`、`real_samp3`、`real_samp4`得到的噪声水平估计值和提取的噪声分布区域数量如表5所示。

表 5 真实测试区的噪声水平估计和噪声区域数据提取

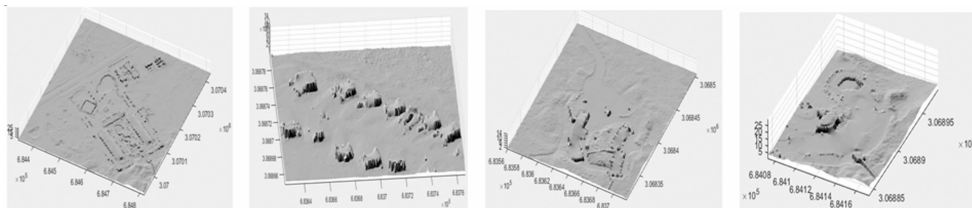
样本数据	噪声水平	噪声分布区域的数量	样本数据	噪声水平	噪声分布区域的数量
<code>real_samp1</code>	0.03	158167.00	<code>real_samp3</code>	0.03	12388.00
<code>real_samp2</code>	0.02	7373.00	<code>real_samp4</code>	0.04	4473.00

由表5可知,根据估计的噪声水平,野马岛的4个测试区域的激光扫描样本数据都检测到了噪声分布区域。在后续实验

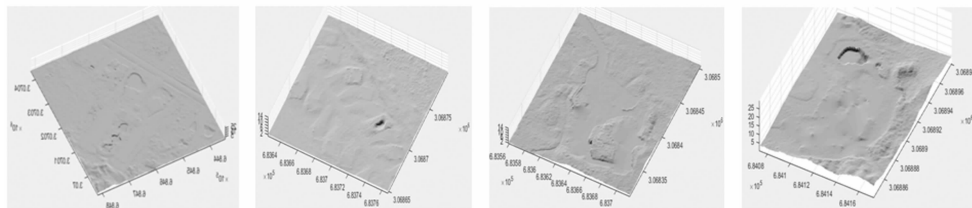
中,采用 `real_samp1` 样本区域数据构建测试区的空中走廊。由表5可知,该样本的噪声水平估计值为0.03,噪声分布区域数据为158167。相应地,采用高斯滤波器对158167个噪声区域的激光点云数据进行噪声抑制,而不是对整个区域的数据进行滤波。由于采用区域噪声抑制,该方法的滤波效果高于Özcan方法^[20]中采用中值滤波方法对整个区域进行滤波的效果,后续的图7实验结果验证了该结论的正确性。

采用本文方法及Özcan方法^[20]生成的四种数字地势模型如图7所示。其中,测试样本从左至右依次为 `real_samp1`、`real_samp2`、`real_samp3`、`real_samp4`。

比较图7(a)和图7(b)可知,在图7(a)中,展示了采用Özcan方法^[20]生成的数字地势模型。由于在该方法中采用中值滤波方法,带了了信息损失,导致部分真实的非地表目标没有被滤除。本文方法中,由于采用噪声水平估计,对噪声区域进行了分块识别和抑制,得到了如图7(b)所示的数字地势模型。由图7(b)可知,与Özcan方法^[20]生成的数字地势模型图7(a)相比,在图7(b)的数字地势模型中,滤除



(a) 基于Özcan方法的数字地势模型



(b) 本文提出的数字地势模型

图 7 Özcan 方法和本文方法生成的数字地势模型比较

了大量非地表目标。此外，将图 7 (b) 与相同区域的真实遥感图像，即图 6 (b) 进行比较，发现该地势模型较好的保留了地表的原始形态，从而进一步验证了本文方法获取的数字地势模型的准确性。

在以下实验中，对测试样本 *real_samp1*, *real_samp2*, *real_samp3*, *real_samp4* 中的非地表目标的检测效果进行比较。在本文方法中，采用了噪声水平估计方法对数字地表模型进行滤波，结合经验模型分解，生成数字地势模型，然后，对非地表目标进行边缘检测和数字标记。本文方法和 Özcan 方法^[20]获取的非地表目标识别结果如图 8 所示。

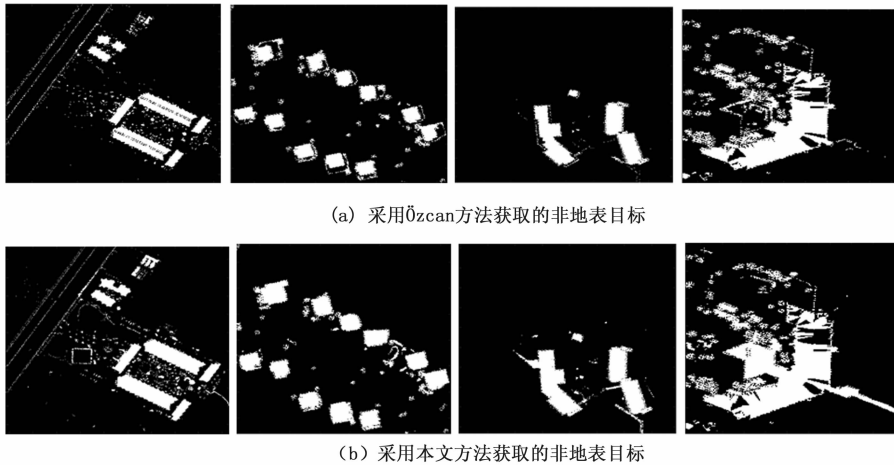


图 8 Özcan 方法和本文方法获取的非地表目标比较

根据图 8 可知，与 Özcan 方法相比，采用本文采用的方法提取到了更多的非地表目标细节信息。与 ISPRS 激光点云标准数据集不同，在野马岛的四个测试区域的激光点云数据集中，没有标准参考地面标记点数据。为了估计生成的数字地势模型的性能，实验中采用了 Skewness 和 Kurtosis 进行性能评价。图 9 表明，本文提出的方法获得了较低的 Skewness 值和 Kurtosis 值，进一步说明了采用本文方法能够检测到更多的非地表目标。

图 9 (a) 和图 9 (b) 的直方图分别描述了 Skewness 值和 Kurtosis 值。在图 9 (a) 中，对于四组测试样本 *real_samp1*, *real_samp2*, *real_samp3*, *real_samp4*，本文提出的方法获得的 Skewness 值分别为 2.6303, 2.2056, 3.1926, 1.8916，采用 Özcan 方法^[20]获得的 Skewness 值分别为 2.9041, 2.5997,

3.417, 2.3185。图 9 (a) 的实验结果表明，通过对上述四组样本测试数据结果比较，本文提出的方法获得的 Skewness 值小于 Özcan 方法获得的 Skewness 值。在图 9 (b) 直方图中，本文方法获得的上述四个样本的 Kurtosis 值分别是 7.9187, 5.8645, 11.192, 4.578，低于 Özcan 方法获得的 Kurtosis 值，即 9.4336, 7.7582, 12.6757, 6.3757。中心极限定理指出，自然的测量样本数据集通常符合正态分布。非地表的目标可能会干扰地表数据的正态分布。较低的 Skewness 值和 Kurtosis 数值表明数字地势模型接近正态分布。因此，由 Skewness 数值及 Kurtosis 数值结果分析可知，与 Özcan 方法^[20]相比，本文方法获得了较为准确的数字地势模型。

图 10 展示了三维空中走廊的可视化空域划分结果。由图 10 (a) 可知低空空域被分成三层区域，即顶层区、安全区、起降区。根据公式 (9)，采用数字地势模型构建的顶层区如图 10 (b) 所示。根据公式 (10) 构建的安全区如图 10 (c) 所示。根据公式 (11)，采用数字地表模型构建的起降层区域如图 10 (d) 所示。为了实现个人隐私保护，对于个人隐私保护区的边缘检测结果，采用地理水平坐标与数字地表模型中的位置进行匹配，然后映射到低空空域的各层空间，在空中走廊的路径规划中修正路径节点，避免无人驾驶航空器系统飞行中通过个人隐私保护区。基于个人隐私保护区的空中走廊路径规划如图 11 所示。

在图 11 中，节点 A, B, C, D, E 表示在低空空域中，无人驾驶航空器系统路径中的关键节点。其中，节点 A 表示无人驾驶航空器系统的当前位置，节点 E 表示无人驾驶航空器系统的着陆点位置。如果路径地图的节点由 A、B、D、E 组成，则无人驾驶航空器系统将在低空空域飞行过程中通过个人隐私保护区，而该区域是禁止通行区域。因此，需要对路径规划的节点进行调整，避免无人驾驶航空器系统通过个人隐私保护区，即，对安全区和起降区的路径地图中的节点进行修正，修正后的节点为 A, B, C, D, E。测试样本 *real_samp1* 中的隐私保护区域检测结果如图 12 所示。

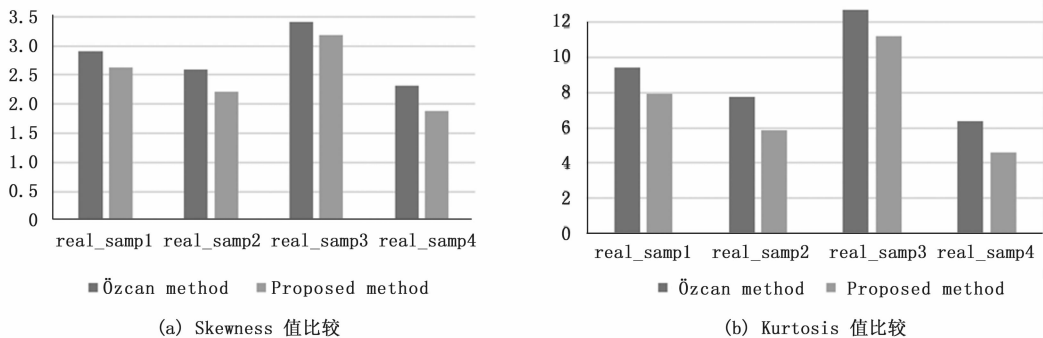
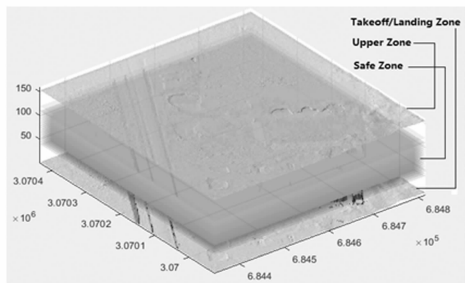
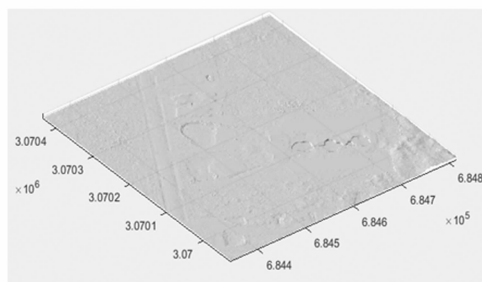


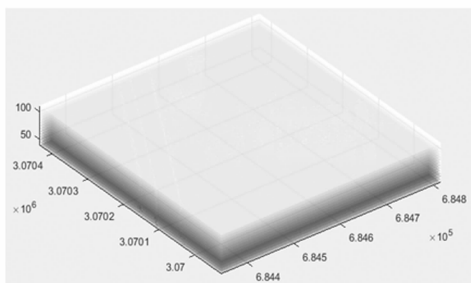
图 9 采用 Özcan 方法和本文方法获得的 Skewness 数值和 Kurtosis 数值比较



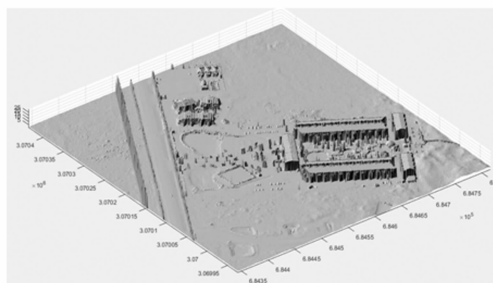
(a) 空间分层



(b) 基于数字地势模型的顶层区



(c) 安全区



(d) 基于数字地表模型的起降区

图 10 空中走廊的空间划分

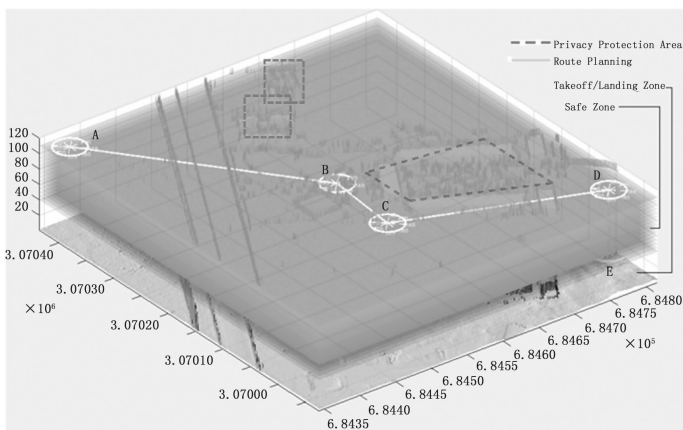


图 11 适用于个人隐私保护的空中走廊路径规划效果

边界提取结果，对该边界对应的地理位置信息坐标进行空间映射后，作为空中走廊的各层空间区域的限制区边界线，从而实现个人隐私保护。

3 结束语

本文提出了一种基于激光扫描点云数据的空中走廊构建方法，用于确保低空空域安全，实现个人隐私保护。采用噪声水平估计确定激光点云数据的噪声分布区域，运用高斯滤波器实现局部区域的精准噪声抑制。采用 Kappa 分数和总误差率对固有模态函数的最大分解次数进行定量分析，结果表明当固有模态函数的最大分解次数为 1 次时，能够获得较好的数字地势模型。采用基于经验模型分解方法和形态学开运算完成对数字地势模型的构建。对于 ISPRS 标准数据集，包括地表和非地表目标的参考值标记数据。因此，采用 Kappa 分数和总误差率，评估在给定参考标记点数据时，采用本文方法的有效性。对于没有参考标记点数据的真实激光点云测试数据集，采用 Skewness 数值和 Kurtosis 数值，评估生成的数字地势模型的性能，结合卫星遥感数据验证非地表目标的真实性。遥感图像解译结果与本文提出的方法检测到的非地表目标比对结果表明，本文方法能够提高非地表目标检测精度，提升数字地势模型的构建质量。根据生成的数字地表模型和数字地势模型，结合文中的空域分层公式，将低空空域划分为顶层区，安全区和起降区。此外，将个人隐私保护区域与空域划分相结合，通过地理信息坐标映射方式，在划分的三层空间中设置个人隐私保护区，调整无人驾驶航空器系统的路径规划节点，避免无人驾驶航空器系统通过隐私保护区。最终，采用可视化技术实现了空中走廊的可视化构建。



(a) real_samp1 的遥感影像



(b) 个人隐私保护区提取

图 12 采用本文方法获得的个人隐私保护区

图 12 (a) 是测试区域的参考遥感图像。在样本 real_samp1 的参考遥感图像中，包含用红色方块表示的三块隐私保护区。图 12 (b) 是本文方法的个人隐私保护区的边缘检测及

然而，由于我国地形复杂，低空空域的飞行环境受地表波动、气流以及地面建筑物的影响较大，同时也面临许多临时的商业活动或重大节日聚会等不确定社会因素的影响，与地面路

面交通管理方式存在很大的不同。为了确保低空空域中空走廊的实用性,在下一步的研究过程中,将以面向低空安全的三维数字化空中走廊体系的技术构架^[27]为指导,结合空域的飞行环境和地面的人文及社会活动信息,深入研究空中走廊的动态更新机制,对空中走廊通道进行动态调整与更新,及时有效地进行飞行引导,使低空空域中的航空器严格按照空中走廊进行飞行,避免航空器进入空中走廊之外的限制区域,从而保证确保低空空域资源的高效、合理使用。

参考文献:

- [1] Insaurralde C C. Architectural design for intelligent autonomy in unmanned aircraft [J]. *Proceeds of Digital Avionics Systems*, 2015: 5C3-1-5C3-12.
- [2] Huang W, Ding W, Liu C. Multi-parametric programming approach for data link of UAS based on State Machine [A]. *Proceedings of Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration* [C]. 2015: 156-169.
- [3] Roelofsen S, Gillet D, Martinoli A. Reciprocal collision avoidance for quadrotors using on-board visual detection [A]. *Proceedings of Intelligent Robots and Systems* [C]. 2015: 4810-4817.
- [4] Sereewattana M, Ruchanurucks M, Rakprayoon P, et al. Automatic landing for fixed-wing UAV using stereo vision with a single camera and an orientation sensor: a concept [A]. *Proceedings of Advanced Intelligent Mechatronics* [C]. 2015: 29-34.
- [5] Soler M, Kamgarpour M, Lioret J, et al. A hybrid optimal control approach to fuel-efficient aircraft conflict avoidance [A]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 99: 1-13.
- [6] Feng D, Yuan X. Advancement of security alarm aeronautical chart visualization in low altitude airspace [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29 (3): 305-315.
- [7] Sotiriou D, Kopsaftopoulos F, Fassois S. An adaptive time-series probabilistic framework for 4-D trajectory conformance monitoring [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 99: 1-11.
- [8] Chougali S, Roudane A, Mansouri K, et al. New model for aircraft landing scheduling using real time algorithms scheduling [A]. *Proceedings of Intelligent Systems and Computer Vision* [C]. 2015: 1-7.
- [9] Kim Y, Jo J, Shaw M. A light weight communication architecture for small UAS traffic management (SUTM) [A]. *Proceedings of Integrated Communication Navigation, and Surveillance*, 2015.
- [10] Foina A G, Krainer C, Sengupta R. An unmanned aerial traffic management solution for cities using an air parcel model [A]. *Proceeding of Unmanned Aircraft Systems* [C]. 2015: 1235-1300.
- [11] Feng D, Yuan X. Advancement of safety corridor and emergency management visualization in low altitude airspace [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30 (4): 485-495.
- [12] Fadlullah Z M, Takaishi D, Nishiyama H, et al. A dynamic trajectory control algorithm for improving the communication throughput and delay in UAV-aided networks [J]. *IEEE Network*, 2016, 30 (1): 100-105.
- [13] Yuan X, Sarma V. Automatic urban water body detection and segmentation from sparse ALSM data via spatially constrained, model-driven clustering [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8 (1): 75-77.
- [14] Yuan X, Hu L, Buckles B, et al. An adaptive method for the construction of digital terrain model from Lidar data [A]. *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium* [C]. 2008: 828-830.
- [15] Sarma V, Yuan X, Hu L, et al. Road extraction from LiDAR using geometric and elevation features [A]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Earth Observation for Global Changes* [C]. 2009: 25-29.
- [16] Feng D, Yuan X. Automatic construction of aerial corridor for navigation of unmanned aircraft systems in class G airspace using LiDAR [A]. *Proc. SPIE 9828, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications XIII* [C]. 2016.
- [17] Voss P B. Rethinking the regulatory framework for small unmanned aircraft: the case for protecting privacy and property rights in the lowermost reaches of the atmosphere [A]. *Proc. Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* [C]. 2013: 173-178.
- [18] Kim Y, Jo J, Shrestha S. A server-based real-time privacy protection scheme against video surveillance by unmanned aerial systems [A]. *Proc. Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* [C]. 2014: 684-692.
- [19] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [A]. *Proc. R. Soc. Lond. A* [C]. 1998: 903-995.
- [20] Özcan A H, Ünsalan C. LiDAR data filtering and DTM generation using empirical mode Decomposition [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 1-12.
- [21] Bertalmio M, Guillermo S, Caselles V, et al. Image inpainting [A]. *Proc. Computer Graphics and Interactive Techniques* [C]. 2000: 417-424.
- [22] Vosselman G. ISPRS test on extracting DEMs from point clouds: a comparison of existing automatic filters [EB/OL]. <http://www.itc.nl/isprswgiii-3/filtertest/index.html>. 15 Sep. 2006.
- [23] NSF. Available; <http://opentopo.sdsc.edu/gridsphere/gridsphere?cid=geonlidar> [EB/OL]. accessed on May. 10, 2016.
- [24] Liu X, Tanaka M, Okutomi M. Single-image noise level estimation for blind denoising [J]. *IEEE transactions on Image Processing*, 2013, 22 (12): 5226-5238.
- [25] Thomas J P, Keith C C, William A M. An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 33: 21-30.
- [26] Mongus D, Lukac D, Zalik B. Ground and building extraction from LiDAR data based on differential morphological profiles and locally fitted surfaces [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 93: 145-156.
- [27] 冯登超. 面向低空安全三维数字化空中走廊体系的飞行器交通管理平台构建 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25 (12): 137-140.