

基于多旋翼无人机的热红外地表温度场反演系统设计

胡 鹏¹, 伍光胜¹, 傅铭治², 罗意镛¹

(1. 广州市气象局, 广州 511430; 2. 广州市南沙区气象局, 广州 511400)

摘要: 对当前城市热岛效应研究所采用的三类主要方法进行了分析, 分别得出其优势和存在的不足, 提出了一种基于微小型多旋翼无人机平台开发小尺度高分辨率地表温度场观测系统的创新思路, 并对红外测温原理的研究, 设计了热红外无人机地表温度场反演系统, 开发了 B/S 架构的地表温度场反演软件, 实现了红外图像实时传输、自动拼图、米级网格化地表温度场反演、实景地图叠加、历史数据回放和数据导出等功能; 经多次飞行实践应用表明, 该系统运行稳定、数据准确、投资少, 机动灵活, 使用方便, 可弥补传统卫星遥感等观测手段的不足, 为开展城市区域热环境精细化观测提供了一种新的技术平台与工具, 也为气象无人机的应用开辟了一个新的方向。

关键词: 气象观测; 无人机; 热红外反演; 地表温度; 城市热岛

Design of Thermal Infrared Surface Temperature Field Inversion System Based on Multi Rotor UAV

Hu Peng¹, Wu Guangsheng¹, Fu Mingzhi², Luo Yilan¹

(1. Guangzhou Meteorological Service, Guangzhou 511430, China;

2. Nansha Meteorological Service, Guangzhou 511400, China)

Abstract: The advantages and disadvantages of the three main methods used in the current urban heat island effect research are analyzed, and an innovative idea of developing a small-scale and high-resolution surface temperature field observation system based on a micro multi-rotor UAV platform is proposed. The inversion system of surface temperature field for thermal infrared unmanned aerial vehicle (UAV) is developed, and the inversion software based on B/S structure is developed. The functions of infrared image real-time transmission, automatic mosaic, meter-scale grid surface temperature field inversion, real-time map stacking, historical data playback and data export are realized. The practice of many flights shows that the system is stable in operation, accurate in data, less in investment, flexible in maneuverability and convenient in use. It can make up for the shortcomings of traditional satellite remote sensing and other observation means, and provides a new technical platform and tool for fine observation of urban thermal environment, and also opens up a new way for the application of meteorological UAV.

Keywords: meteorological observation; UAV; thermal infrared inversion; urban heat island

0 引言

当前, 在全球气候变暖和城市化背景下, 城市热环境日渐恶化, 导致能耗持续增长、人体舒适度降低、甚至导致疾病发病率和死亡率上升, 已成为气候、环境、生态等领域研究的热点问题^[1]。为积极适应气候变化, 我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020)》中明确要求, 为提升城市功能与空间节约利用, 要把城市热岛效应形成机制与人工调控作为重点研究内容^[2]。

从研究方法来说, 关于城市热岛效应的研究, 主要有

收稿日期: 2018-10-26; **修回日期:** 2018-11-26。

基金项目: 广东省科技厅科技计划项目(2017ZC0403); 广东省气象局科技项目(2016B34)。

作者简介: 胡 鹏(1979-), 男, 湖南津市人, 硕士, 工程师, 主要从事气象信息网络及观测方向的研究。

通讯作者: 伍光胜(1966-), 男, 广东普宁人, 学士, 高工, 主要从事气象观测技术方向的研究。

三类: (1) 基于传统气象观测数据进行研究, 即利用气象台站的历史和实况资料进行研究。此方法优点是数据准确, 时间分布连续性好, 可研究城市热岛的年相、季相、日相变化特征, 分析演变规律, 缺点是气象台站有限, 空间分辨率较低, 以点带面, 不能完全掌握城市热岛的空间分布信息。(2) 基于数值模拟法进行研究, 即利用边界层数值模形, 研究地表与城市大气边界层间的热力交换过程。此方法的优点是可以得到热岛在时间上的变化规律, 描述其形成的物理过程, 对未来演变进行预测和模拟, 缺点主要是纯概念研究, 真实性受模型本身精度和参数设置影响较大。(3) 基于遥感技术进行研究, 即利用各种运载工具, 使用遥感传感器获取地面目标辐射或反射的电磁波, 以辨识目标信息的技术。由于通过遥感手段获取的观测资料具有时间同步性好、覆盖范围广的优点, 能进行大面积地表温度测定, 直观定量研究热岛特征, 特别是随着卫星热红外遥感技术的发展完善, 如空间分辨率和辐射分辨率的提

高,已逐步在城市热岛研究中发挥越来越重要的作用^[3-5]。卫星热红外遥感技术通常是采集以像元为单位的城市下垫面辐射温度(亮温),利用亮温、地温、气温三者之间的密切关系,来进行城市热环境分布特征研究,如国内不少学者都使用 NOAA/AVHRR/LANDSAT TM/EIM+等卫星数据对北京、上海、珠三角等多个城市地区进行了相关的研究。但是,由于目前卫星平台受过境时刻、云层遮挡、空间分辨率等的限制,使得城市地表温度场的小尺度精细化反演存在着难以克服的困难。

近年来,随着微小型无人机技术的发展成熟,利用其机动灵活、操作简单、成本低廉、稳定可靠的特点,如搭载高精度红外热成像设备并开发相应的红外图像处理和反演软件,则可以为城市热岛研究提供一种新型的高分辨率地热观测平台,弥补卫星红外遥感技术的不足,为开展城市精细化气象服务提供有效支持。

1 红外测温原理

红外测温的原理来源于黑体辐射机理,即任何物体,只要其温度高于绝对零度就会向外辐射电磁波,对于理想的辐射源—黑体而言,辐射能量与温度的关系符合普朗克定律^[6],即:

$$P_b(\lambda T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

式(1)中, $P_b(\lambda T)$ 是 T 温度下、 λ 波长处、单位面积黑体的辐射功率, C_1 、 C_2 为辐射常数,这个公式揭示了辐射能量与黑体温度和相应波长的关系。

根据斯特藩—玻耳兹曼定理:黑体的表面单位面积上所发射的所有波长的总辐射功率 $P_b(T)$ 与温度 T 的4次方成正比,即:

$$P_b(T) = \sigma T^4 \quad (2)$$

式(2)中 σ 为斯特藩常数, T 为热力学温度。由于相同条件下,物体辐射的功率总是小于黑体的功率,即物体的单色辐射功率 $P(T)$ 小于黑体的单色辐射功率 $P_b(T)$,且它们的比值是不随波长变化的常数 $\varepsilon = P(T)/P_b(T)$,因此可得:

$$P(T) = \varepsilon P_b(T) = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

故所测物体的温度为:

$$T = \sqrt[4]{\frac{P(T)}{\varepsilon \sigma}} \quad (4)$$

在实际地表温度测量中,由于地表热辐射在其传导过程中,还受到大气和辐射面的多重影响,红外传感器所观测到的热辐射强度已不再是单纯的地表热辐射强度,还包括了环境反射和大气辐射部分,因此红外遥感所获得的辐射温度数据,还与观测对象反射率、大气温度和相对湿度、观测距离等因素有关,需通过大气辐射校正和地表比辐射率校正,才能比较准确地反映地表温度。此外,在用于城市热岛研究的街区级尺度地表温度观测应用中,由于范围较小,可认为观测区域内大气温湿度条件基本一致,从而忽略大气对辐射温度的影响,简化温度计算^[7]。

2 热红外无人机地表温度反演系统

针对开展城市热环境精细化观测和研究的现实需求和传统卫星遥感观测的不足,根据红外测温理论,文章设计并实现了一种基于微型四旋翼无人机平台的地表温度场反演系统。系统利用微型四旋翼无人机操作简单、机动灵活、垂直飞行、航拍分辨率高等特点,以微型四旋翼无人机作为载机平台,搭载高清红外相机作为热辐射传感器,通过开发热红外地表温度场反演软件实现对城市小尺度区域地表温度的精细化观测,完成从无人机航拍红外照片实时推送并反演生成精度达5 m的地面网格化温度场及与实景地图叠加显示和历史数据查询等功能。

2.1 系统组成

由于系统基于微小型旋翼无人机平台开发,融合热成像技术、航拍及图像处理技术等,与其他类型的无人机系统相比,其外观结构、应用领域、性能指标均有所不同,但从系统原理和系统结构上讲,它同时也符合一个典型的无人机系统组成结构,主要包括了飞机平台、地面站、数据通信、有效载荷和配套软件等部分。按照可行性原则、先进性原则、可靠性原则,结合实际业务需求,系统组成框图如图1所示。

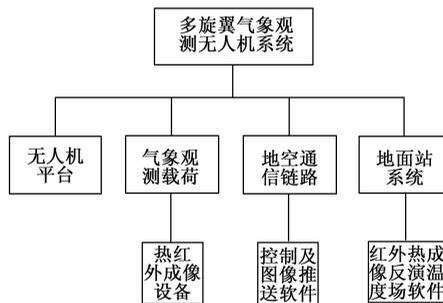


图1 系统组成框图

2.2 硬件平台

根据实际应用场景,载机平台选用四旋翼无人机,以提高飞行灵活性和飞行时间。机身部分均采用碳纤维材料,从而在降低机体重量的前提下,取得较高的机械强度和稳定性能^[8]。任务载荷则选用安装在三自由度增稳云台上的美国 FLIR 公司高灵敏度航拍热像仪。该热像仪采用非制冷型氧化钒(VOx)焦平面阵列上电路和非均匀校正相结合的方法,能够在较宽温度范围和较高精度内工作,同时保持极好的动态范围和均匀性,且结构紧凑,仅重120 g,易于安装于微型无人机上。地空通信链路上,选用 DJI Lightbridge2 高清图传链路,其工作频率为5.725~5.825 GHz和2.400~2.483 GHz,最远通信距离为5000 m,采用无线链路动态适应技术,平衡了距离、电磁环境和通信质量的冲突,并能自动选择最佳信道,在有需要时切换信道和调整带宽,保障数据的流畅性,有效降低数据丢包现象。由于使用单向图像数据传输技术,使得图像传输延迟大大降低,此外,利用专门开发的图片推送程序,可实现航拍照片向

地面服务器的实时推送。整个平台主要技术指标如表 1。

表 1 主要技术指标

参数	指标
重量/(kg)	2.4
轴距/(mm)	650
航速/(m/s)	22
续航时间/(min)	30
最大高度/(m)	500
有效载荷/(kg)	1.2
最远控制距离/(m)	5000
测温精度/(°C)	+/-3

2.3 热红外地表温度场反演软件

热红外地表温度场反演软件是本系统的核心软件，其主要功能包括：实时拼接、反演无人机拍摄红外图像为温度场数据；结合 GIS 卫星影像地图实现温度场显示分析界面并支持任意点的温度取值；历史数据查询和导出。

软件的主要流程如图 2 所示。

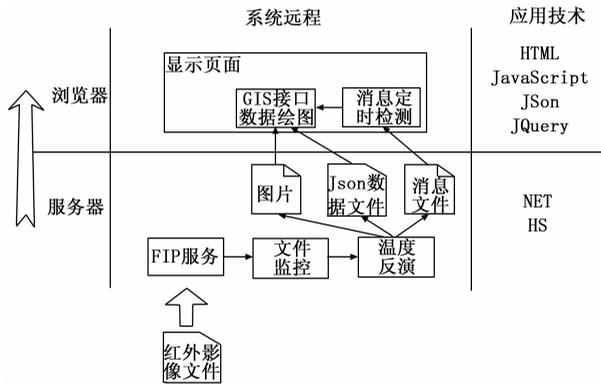


图 2 软件流程图

1) 无人机拍摄的红外图像文件通过 FTP 方式传送到地面服务器，服务器模块利用文件夹实时监控，获得图像文件传输完成的触发事件，执行红外图像反演温度数据并调整为格点温度数据操作，产生当前拍摄过程的温度场合并文件和更新信息文件。温度场合并文件包括 JJson 格式的温度场数据文件和填色图片。用户在浏览器上查看温度场分析页面时，页面代码中的 JavaScript 定时函数通过 JQuery 检查服务器上的消息文件更新情况，当检查到温度场更新时，从服务器调取最新的填色图片和数据文件，运用 ArcGIS API for JavaScript，将填色图片和格点温度数据显示到卫星影像地图上。

其中，将红外图像反演为经纬度点上的温度值和多张图像拼接温度场是本软件的技术难点。其具体实现步骤如下：

通过红外摄像机厂家提供的 SDK 类库，将单张红外图像的全部像素值转换为精度为 0.001 °C 的温度二维数据组。转换后的数据样例如下图 3；每行 640 个数据，对应图像宽度；共 512 行，对应图像高度。

```

1 文件: .org_4e172f490785d6a9_1481269695000.jpg
2
3 参数: 辐射率: 1
4 反射温度: 22 °C
5 距离: 20 m
6 大气温度: 22 °C
7 外部光学温度: 22 °C
8 外部光学传输: 1
9 相对湿度: 50 %
10
11 帧 1
12 20.813, 20.664, 20.792, 20.728, 20.898, 20.707, 20.536, 20.877, 20.813, 21.004,
13 29.842, 29.647, 29.51, 29.451, 28.942, 28.863, 28.508, 28.469, 28.232, 27.954, 2
14 05, 30.153, 30.192, 30.056, 29.822, 29.959, 29.432, 29.608, 29.059, 28.961, 28.7
15 20.813, 21.11, 21.364, 20.962, 21.427, 21.174, 21.174, 21.279, 21.131, 21.449,
16 30.075, 29.822, 30.192, 29.627, 29.529, 29.393, 29.314, 29.28, 28.725, 28.686, 28.
17 21.174, 21.004, 21.11, 21.258, 21.343, 21.427, 21.237, 21.385, 21.427, 21.069,
18 0.289, 30.056, 30.231, 30.25, 29.975, 29.842, 29.705, 29.666, 29.314, 29.334, 25
19 20.94, 21.089, 21.131, 21.174, 21.11, 21.406, 21.237, 21.279, 20.94, 21.025, 21
20 9.705, 29.861, 29.588, 29.995, 29.529, 29.608, 29.373, 29.059, 28.961, 28.883, 2
21 20.877, 21.004, 21.11, 20.963, 21.174, 20.877, 21.385, 21.406, 21.195, 21.279,
22 29.92, 29.275, 29.744, 29.49, 29.451, 29.373, 29.373, 29.04, 28.961, 28.824, 25
    
```

图 3 原始数据样例

2) 通过红外图片文件的 XMP 信息，提取该图片中心点经纬度、长宽、拍摄视角、拍摄高度、无人机偏航角、俯仰角、翻转角信息。

3) 转换步骤 1 所得温度二维数组为网格点（经纬度）温度数组。如图 4 所示，即通过步骤 2 提取的图片和无人机位置信息，通过三角函数计算出图片四个顶点的经纬度坐标，然后对四个顶点范围内的每一个网格点反算出该点在图片上的像素坐标，从而取得每个网格点的温度值。

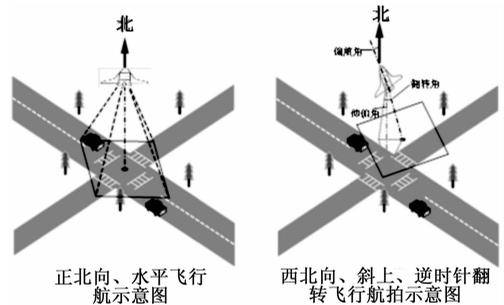


图 4 航拍示意图

无人机正北向、有仰俯角、有翻转角的飞行拍照，所拍照片上任意一点 (x, y) 的经纬度 $(lon1, lat1)$ 的计算公式如下：

$$\begin{aligned}
 lon1 &= lon0 + h \tan(\alpha + \theta_r) / n \\
 lat1 &= lat0 + h \tan(\beta + \theta_p) / s
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

其中： $(lon0, lat0)$ 是相片拍摄时无人机所在的经纬度， h 为无人机距地高度； θ_r 为翻转角， θ_p 为俯仰角； s 为纬度距离转度数参数，全球各地纬度 1° 的间隔长度都相等（因为所有经线的长度都相等），大约是 111 km/1°； n 为经度距离转度数参数，大约为 111 cos $(lat0)$ km/1°； α 为照片上点 (x, y) 与图片中心点 (x_0, y_0) 之间夹角在经度方向上的分量； β 为照片上点 (x, y) 与图片中心点 (x_0, y_0) 之间夹角在纬度方向上的分量。

加入偏航角后，任意一点 (x, y) 绕图片中心点 (x_0, y_0) 偏转后的经纬度 $(lon2, lat2)$ 。

计算如下：

$$\begin{aligned}
 lon2 &= (lon1 - lon0') \cos\gamma - (lat1 - lat0') \sin\gamma - lon0' \\
 lat2 &= (lon1 - lon0') \sin\gamma - (lat1 - lat0') \cos\gamma - lat0'
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$(lon0', lat0')$ 为图片中心点 (x_0, y_0) 的经纬度， γ

