

主被动多传感器组合的宽角成像系统设计实验

林宗坚¹ 苏国中¹ 申朝永² 吴博义³

1 中国测绘科学研究院,北京,100039
2 贵州省第三测绘院,贵州 贵阳,550004
3 山西省基础地理信息院,山西 太原,030001

摘 要:按照国家航空应急测绘的需求提出了一种多传感器组合成像系统。在此系统中,将组合数码相机、视频和红外相机、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)和小型合成孔径雷达(miniature synthetic aperture radar, MiniSAR)集成到统一的时空基准,分别且同时地实现大像幅光学成像,白天和夜间视频影像获取与传输,三维激光点云获取,以及全天候的微波遥感。详细阐述了组合宽角相机在改善影像质量和作业效率方面的优势。根据上述设计,将实验系统安装在中航时无人机上进行了飞行检验,给出了所获取的白天和夜间数据成果。

关键词:航空摄影;主被动多传感器;组合宽角成像;国家航空应急测绘
中图法分类号:P246.2; TP73 **文献标志码:**A

主被动多传感器组合宽角成像系统是面向国家航空应急测绘能力建设目标而设计的。这个建设目标包含“救灾应急”和“平战结合”两方面的需求^[1-2]。救灾应急的航空测绘需求包括快速报告大面积灾情,快速进行灾体土石方量测,全天候、全天时应对能力,有效应对各种灾情等。平战结合的日常工作需求包括灾害多发地区的日常监测,地理国情监测,基础测绘航空影像的高效获取,以及三维高精度测量技术开拓工程应用新领域等。

1 系统组成与功能设计

1.1 总体结构

主被动多传感器组合宽角成像系统由组合宽角光学相机、视频相机、红外相机、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)、微波雷达等多种传感器组合而成。其中前 3 者为被动传感器,后 2 者为主动传感器。各部分的功能如下:组合宽角光学相机用于进行高分辨率、宽视场的可见光范围彩色成像,视频相机用于实现白天灾情现场的实时可传输成像,红外摄像用于夜间灾情现场的实时可传输成像,激光雷达获取高程点云数

据用于实现灾体土石方快速量测和夜间灾情现场成像,微波雷达用于雨雾霾天气的灾情影像获取。这 5 种传感器基本上形成了全天候、全天时的影像获取能力。系统结构如图 1 所示。

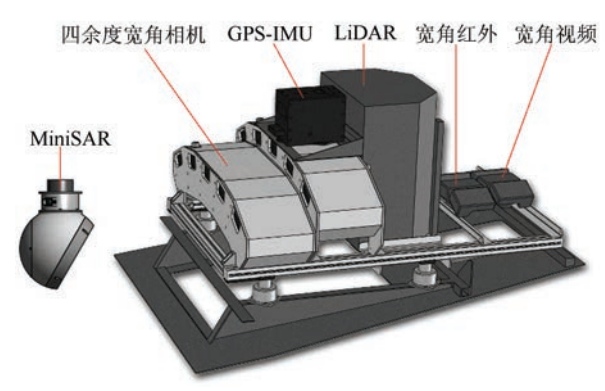


图 1 主被动多传感器组合宽角成像系统
Fig.1 Active-Passive Multi-sensor Combined Wide-Angle Imaging System

1.2 组合宽角光学相机

1.2.1 光学结构

组合宽角相机是整个系统中最主要的设备,所获取的数据占整个系统的 80%,在救灾应急中用于获取大面积的高分辨率影像,在平时测量业务中作为高分辨率、高效率的航空摄影机^[3]。

组合宽角光学相机由 10 个 Canon-5DSR 相机(或性能相当的其他光学相机)组合构成 85° (航向) $\times 105^{\circ}$ (旁向)视场,4 亿像元的大面阵成像能力(见图 2)。根据作业航高 300~3 000 m 范围获取 5~30 cm 地面采样间隔(ground sampling distance,GSD)影像的要求,采用 50 mm 焦距镜头。

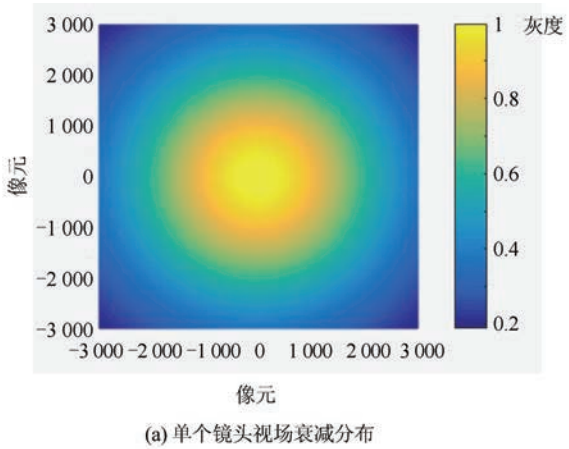


图 2 10 镜头组合宽角相机

Fig.2 Ten Lens Combination of Wide-Angle Camera

组合宽角成像的必要性:

1)避免宽角单镜头边缘影像衰减,提高光学质量。根据光度学理论,单镜头视场边缘的信号



(a) 单个镜头视场衰减分布

是按照其光线偏离中心线夹角 θ 的余弦的 4 次方衰减的^[4],如图 3 所示。

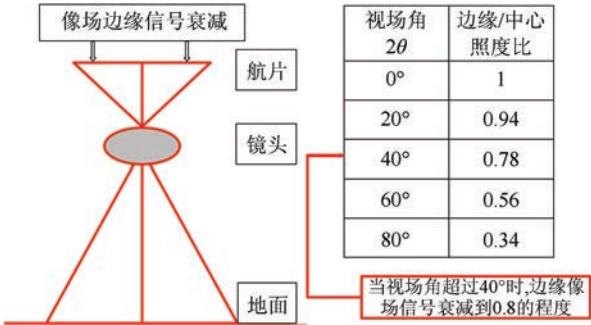


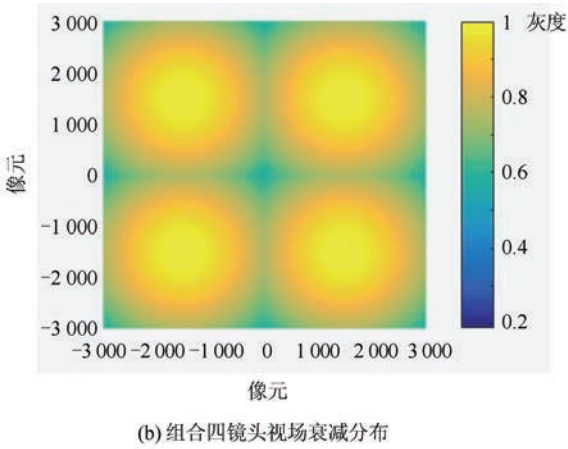
图 3 单镜头视场边缘的信号衰减

Fig.3 Edge Signal Attenuation in Single Len Field

在数码相机中,即便采取了电子增益的办法,虽然增强了边缘信号强度,但信噪比改善不大,存在着低对比度影像问题^[5]。

采用多个镜头组合构成宽角成像,则可由单个小视场影像拼成大视场影像,得到光度学概念中的优质大视场影像。图 4 所示为由 4 个镜头形成的组合宽角成像,回避了边缘劣质影像的情况^[6]。

图 5 所示是由 5 个相机获取的组合宽角影像。



(b) 组合四镜头视场衰减分布

图 4 组合宽角成像

Fig.4 Combination of Wide-Angle Imaging

2)扩大视场角,提高空三构网的几何精度。通过组合宽角成像扩大了视场角,形成了大幅面影像,也就提高了航摄的基高比,从而提高了立体解算高程的精度(见图 6)。

宽角大幅面影像有利于空中三角网构建中提高共线方程解算像片方位元素的精度。表 1 所示为按相对定向理论公式计算出来的几种像场角情况下的姿态角解算精度。由此可见,扩大像场角可以数倍地提高姿态角的解算精度。当前市场上优质的惯性测量单元(inertial measurement unit,

IMU)测姿精度达 0.003° ,这意味着在使用窄角相机(或线阵相机)时,要依靠 IMU 提高定向精度,而使用宽角相机时则可直接解算出甚至更高的定向精度。

3)增加冗余度,增强可靠性。由 10 个相机组成的宽角成像结构如图 7 所示,其中 $A_1B_1C_1D_1$ 组合构成航向 $60^{\circ}\times$ 旁向 105° 、焦距 50 mm 的 2 亿像元像场, $A_2B_2C_2D_2$ 也构成了另一组等同像场。这两个像场既可拼接成 $85^{\circ}\times 105^{\circ}$ 的 4 亿像元像场,也可分别成为 2 个具有双余度的 2 亿像

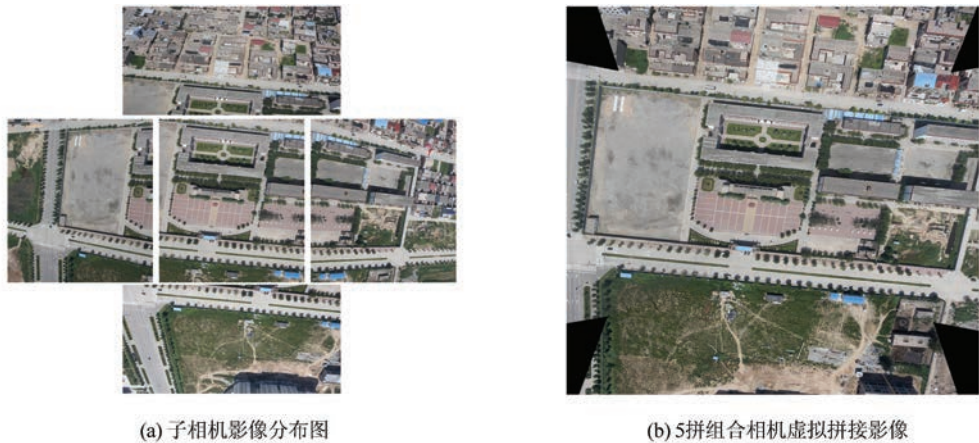


图 5 由 5 个相机获取及拼接的组合宽角影像

Fig.5 A Combination of Five Camera and Mosaic Wide-Angle Image

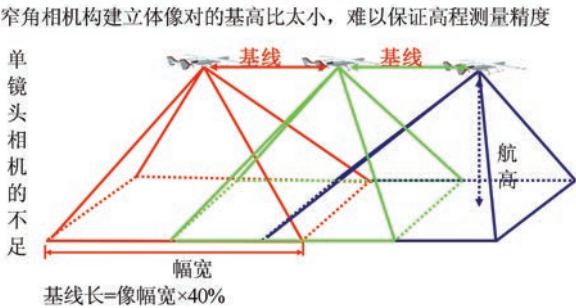


图 6 大像幅扩大基高比

Fig.6 Base-Height Ratio Expanded by Large Format

元像场。假若其中一组出现故障,则另一组可构成 60%重叠度的正常影像;假若两组相机都正常工作,则可构成 80%重叠度的正常影像。这就是双余度成像的可靠性设计。 E_1 和 E_2 是 2 个 24 mm 焦距的相机,组合构成航向 $100^{\circ} \times$ 旁向 72° 的具有 1 亿像元的像场。它与 $ABCD$ 像场构成另一种双余度成像,实现相互支持的几何检校,提高可靠性。而且,当遇到阴云天气低航高飞行时,24 mm 焦距所获取的高分辨率影像更方便直接使用。

综合上述,地面每一个点都有 4 余度重叠成像(见图 8)。

表 1 不同像场角下的各相对定向元素的标准差

Tab.1 Orientation Elements with Different Field Angles

像场角 (2θ)	$\sigma_{\varphi}=\sigma_{\varphi'}$	$\sigma_{\omega'}$	$\sigma_{\kappa}=\sigma_{\kappa'}$
26°	$0.004\ 2^{\circ}$	$0.005\ 1^{\circ}$	$0.023\ 0^{\circ}$
38°	$0.003\ 2^{\circ}$	$0.003\ 8^{\circ}$	$0.013\ 8^{\circ}$
53°	$0.002\ 2^{\circ}$	$0.002\ 6^{\circ}$	$0.006\ 5^{\circ}$
74°	$0.001\ 5^{\circ}$	$0.001\ 8^{\circ}$	$0.003\ 3^{\circ}$
90°	$0.001\ 0^{\circ}$	$0.001\ 2^{\circ}$	$0.002\ 6^{\circ}$

4)用长焦相机进行组合宽角成像,能显著提高航空摄影的生产效率。

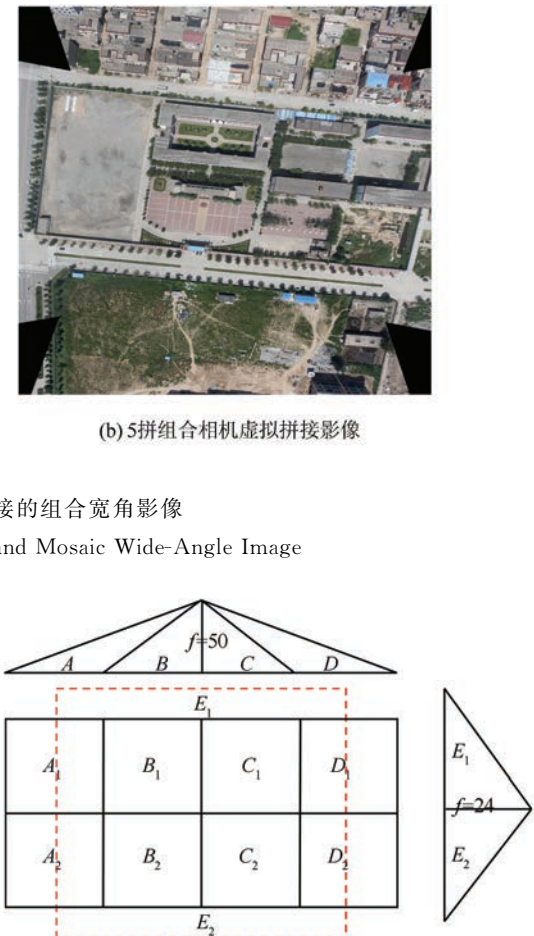


图 7 组合宽角成像结构

Fig.7 Combination Structures of Wide-Angle Imaging

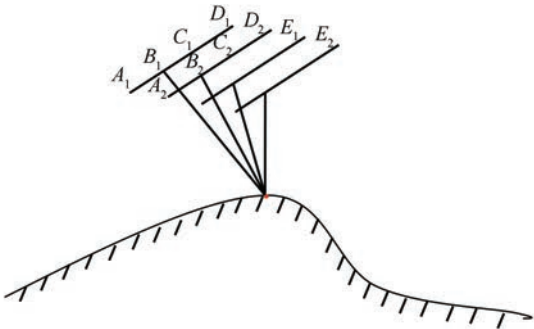


图 8 4 余度重叠成像

Fig.8 4 Redundancy of Overlapping Images

航空飞行摄影作业效率=每小时摄影面积 \times 每 km^2 获取的像元数

每小时摄影面积=作业飞行速度 \times 航带宽度
航带宽度=航高 $\times 2 \tan \theta$ (θ 为旁向像场角的一半)

每 km^2 获取到的像元数= $1\ \text{km}^2 / \text{GSD}^2$
$$\text{GSD} = \frac{\text{像元尺寸} \times \text{航高}}{\text{焦距}}$$

图 2 所示的 10 镜头组合宽角相机的生产效率示见表 2。

表 2 几种典型航高的作业参数

Tab.2 Several Typical Flight Height Operating Parameters

航高	GSD	航速	航带宽	每小时覆盖面积
/m	/cm	/(km·h ⁻¹)	/m	/(km ² ·h ⁻¹)
500	5	160	1 000	160
1 000	10	160	2 000	320
2 000	20	180	4 000	720
3 000	30	180	6 000	1 080

多年积累的航空摄影生产经验说明,航空摄影的空域资源是十分难得的。因此,有效地利用空域时间是非常重要的,长焦宽角组合相机可以大幅度提高航空摄影的生产效率。

1.2.3 组合宽角成像技术的关键

组合宽角相机的基本原理是把主光轴各向倾斜的多镜头(多相机)所获取的多帧面阵影像通过

$$\begin{cases} \Delta x_{ij} = \Delta s_{xi} - \Delta s_{xj} + \frac{x_i}{f} \Delta s_{zi} - \frac{x_j}{f} \Delta s_{zj} + f \left(1 + \frac{x_i^2}{f^2} \right) \Delta \varphi_i - f \left(1 + \frac{x_j^2}{f^2} \right) \Delta \varphi_j + \\ \quad \frac{x_i y_i}{f} \Delta \omega_i - \frac{x_j y_j}{f} \Delta \omega_j - y_i \Delta \kappa_i + y_j \Delta \kappa_j \\ \Delta y_{ij} = \Delta s_{yi} - \Delta s_{yj} + \frac{y_i}{f} \Delta s_{zi} - \frac{y_j}{f} \Delta s_{zj} + \frac{x_i y_i}{f} \Delta \varphi_i - \frac{x_j y_j}{f} \Delta \varphi_j + f \left(1 + \frac{y_i^2}{f^2} \right) \Delta \omega_i - \\ \quad f \left(1 + \frac{y_j^2}{f^2} \right) \Delta \omega_j + x_i \Delta \kappa_i - x_j \Delta \kappa_j \end{cases} \quad (1)$$

式中, f 代表焦距; i,j 代表相邻影像片号(图 9); $(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij})$ 为其重叠区内各像点的视差值,通过影像匹配求得; $(\Delta s_x, \Delta s_y, \Delta s_z, \Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \kappa)$ 代表各相机相对于虚拟中心相机的相对外方位元素的改正值。每两片相邻重叠区内的每一个特征点,都可列式(1)的一组方程。将全部重叠区视差方程进行整体求解,就可以求得全部相机外方位元素的改正值。

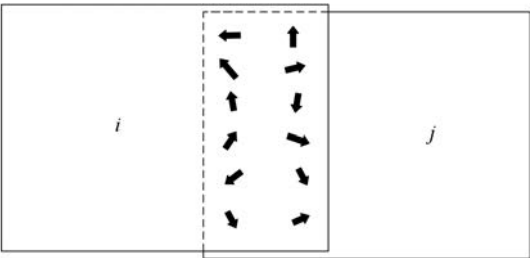


图 9 相邻影像重叠区像点视差

Fig.9 Parallax in Overlapping Area of Adjacent Images

2)动态自检校。考虑到空中摄影时诸多因素的影响,组合相机中的各个单相机难以保证精确的同时曝光。在飞行平台运动的情况下,各相机间的微小曝光时间差引起的重叠区影像视差可表达成运动状态下的外方位元素的函数。将式(1)简化表达成:

$$P(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}) = F(\Delta s_{xi}, \Delta s_{yi}, \Delta s_{zi}, \Delta \varphi_i, \Delta \omega_i,$$

二次计算成像的方法,构成等效的单中心投影宽角影像。二次计算成像分成初算和精算两大步骤。初算根据地面检校的参数进行,包括每个单相机的畸变差改正和各相机相对于虚拟组合相机外方位元素的投影变换,按照摄影测量的经典公式进行。精算则是在航空飞行后,针对每次曝光的影像自动化进行。这是本产品的核心技术,包括静态自检校和动态自检校两部分。

1)静态自检校。本产品的 10 个相机组合采取比较轻薄的机械结构,为校正机械加工、安装调试、环境温度和长期运行等引起的变形误差,采取了每片自检校的方法。这是利用各相邻面阵影像的重叠部分影像视差进行的。自检校方程为:

$$\Delta \kappa_i, \Delta s_{xj}, \Delta s_{yj}, \Delta s_{zj}, \Delta \varphi_j, \Delta \omega_j, \Delta \kappa_j) \quad (2)$$

而各外方位元素与飞行平台运动参数的关系可以表示为:

$$\begin{bmatrix} d\Delta s_{xi} \\ d\Delta s_{yi} \\ d\Delta s_{zi} \\ d\Delta \varphi_i \\ d\Delta \omega_i \\ d\Delta \kappa_i \end{bmatrix} = \Delta T_i \begin{bmatrix} V_{s_x} \\ V_{s_y} \\ V_{s_z} \\ V_{\varphi} \\ V_{\omega} \\ V_{\kappa} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_{s_{xi}} \\ Q_{s_{yi}} \\ Q_{s_{zi}} \\ Q_{\varphi_i} \\ Q_{\omega_i} \\ Q_{\kappa_i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, Q_i 表示第 i 个相机由静态检校确定的外方位元素值(相对于虚拟组合的单中心投影相机); $d\Delta s_i$ 表示第 i 个相机在飞行平台按 \mathbf{V} 速度矢量运动情况下,因曝光时间延迟 ΔT_i 而导致的外方位元素增量。由此实现对各相机影像的动态改正。

1.2.4 像移补偿技术

当飞机航速导致在相机曝光时间内的影像位移量超过 GSD 的一半时,影像分辨率将降低一个等级。设相机曝光时间为 1 ms,飞机航速为 180 km/h,则在曝光瞬间影像点的地面位移量为 5 cm/ms。因此,当相机执行 $GSD \leq 10$ cm 的航飞任务时,就必须进行像移改正(或补偿)。

像移补偿采用类似于时间延迟积分理解的影像复原方法。如图 10 所示,设在曝光时间 τ 内,

由于航速导致在航线方向上有 $x_1, x_2 \cdots x_\tau$ 像元被曝光,其曝光量产生的灰度记录在 L_1 单元,沿 X 方向有 $L_1, L_2 \cdots L_k$ 个曝光记录,可列方程:

$$\begin{aligned} L_1 &= g_1 + g_2 + \cdots + g_\tau \\ L_2 &= g_2 + \cdots + g_\tau + g_{\tau+1} \\ &\vdots \\ L_k &= g_\tau + g_{\tau+1} + \cdots + g_{\tau+k-1} \end{aligned} \tag{4}$$

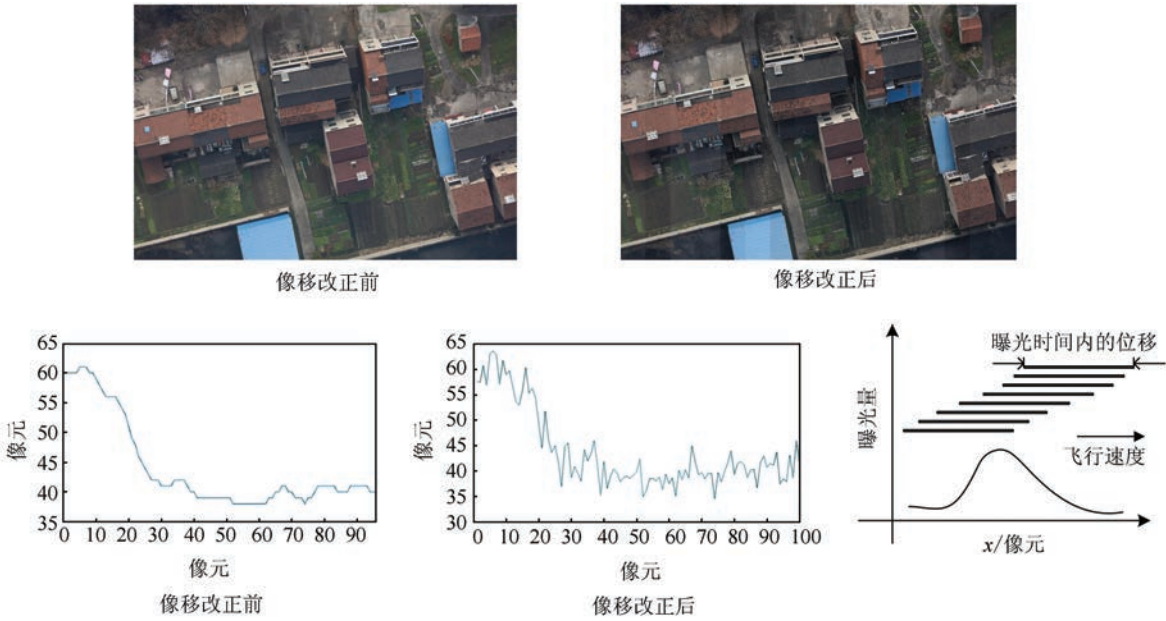


图 10 像移补偿技术原理
Fig.10 Principle of Time Delay Solution

面打击目标的视频跟踪器,本系统要求的是快速报告地面大面积范围的灾情现场。因此,市场上通用的单个 1 280×720×30 帧/s 的标清相机不能满足要求,必须模仿组合宽角光学相机的方式,将 3 个视频相机组合成旁向视场达 70°的宽角视频系统,根据需要可灵活(或先后)选择其中 1 路实时下传。视频系统与相机测姿定位系统(positioning and orientation system, POS)一体化集成,使得每帧影像都能参照 POS 参数而直接具有 100 m 的地面实时定位精度。

满足以上结构功能的器件性能指标为:

- 1) 焦距>12 mm;
- 2) 单机旁向视场角≥24°,可局部视场独立作业;
- 3) 机上高清视频(1 920×1 080)存储,标清(1 280×720)数据实时下传;
- 4) 视频数据流与 GNSS 脉冲信号同步;
- 5) 下传视频实时拼接,实时输出整体图像,地面定位精度达 100 m;
- 6) 机上二级机械防抖;
- 7) 重量不超过 2.0 kg;

用最小二乘法解此方程组,即可由曝光记录 L 求解得到各像元的灰度值 g 。

1.3 视频相机

本系统设置视频相机的主要目的是获取可实时传输的影像,通过卫通和互联网实时传输到地方政府和中央业务机构,用于救灾应急的现场指挥^[7]。不同于军用查打一体化无人机上的专注地

- 8) 功耗 5 W;
- 9) 工作温度范围-20°~ 55°;
- 10) 通过 3 机组合宽角实现宽视场,无需 3 轴云台装置。

1.4 红外摄像机

红外摄像机用于在夜间替代视频相机获取可实时传输的场景影像。在白天其影像作为辅助数据,用于与组合宽角光学相机影像融合,增强判读能力。

类似于视频相机的设计,本文也用 3 个红外摄像机组构成旁向 70°的视场,以实现大面积覆盖摄影,与 POS 系统集成一体,实现 100 m 精度的地面实时定位。

为保证对夜景成像,红外摄像传感器的感光波段选择 8~12 μm。

满足以上结构功能的器件性能指标为:

- 1) 探测器为非制冷焦平面;
- 2) 工作波段 8~12 μm;
- 3) 旁向视场角为单机≥24°,3 机组合≥70°;
- 4) 噪声等效温差≤50 mK(F/1);
- 5) 视频输出为帕尔制式 25 Hz;

- 6)工作温度范围 $-20^{\circ}\sim 55^{\circ}$;
- 7)重量不超过 2.0 kg;
- 8)功耗 $\leq 6\text{ W}$;
- 9)不需要 3 轴云台装置。

1.5 激光雷达(LiDAR)

本系统中的激光雷达^[8]按以下 4 项功能设计:

- 1)在救灾应急任务中能快速生成高程点云,用以即时计算灾体土石方量。
- 2)在夜间能获取带灾情场景的三维点云,并与红外影像融合,用于现场灾情判读。
- 3)在基础测绘中,获取高精度高程点云,用以与组合宽角光学相机影像融合,实现无地面控制点的高精度地形图快速测绘。
- 4)在地理国情监测中,获取能穿透林木间隙的点云,用以估算林木高度、检测森林生物量变化。

满足以上结构功能的器件性能指标为:

- 1)相对飞行高度 500~3 500 m ;
- 2)作业海拔高度 500~6 000 m ;
- 3)可测地物高差范围 $\geq 1\,500\text{ m}$;
- 4)扫描视场(旁向) $\geq 70^{\circ}$;
- 5)脉冲频率为 50~300 kHz;
- 6)测距精度为优于 5 cm@500 m,优于 20 cm@3 000 m;
- 7)对 POS 系统要求为定位精度 0.05 ~ 0.3 m;
- 8)水平姿态角优于 0.005° ;
- 9)航偏姿态角优于 0.008° ;
- 10)设备重量不超过 20 kg;
- 11)设备功耗 200 W;
- 12)工作温度范围 $-20^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 。

1.6 微波雷达(MiniSAR)

系统中微波雷达采用小型合成孔径雷达(MiniSAR),其功能设计如下。

- 1)不要求与前述 4 种传感器同步作业,但要求在雨天、雾霾天,前 4 种传感器不能作业的条件下,能够获取灾情地区的雷达影像,用于灾情判读。
- 2)能适应地理国情监测的要求,获取大面积微波雷达影像,与前 4 种数据或其他遥感数据融合,进行更全面的地理国情分析,以及满足若干专业分析的用途。

满足以上结构功能的器件性能指标为:

- 1)最大带宽 1 200 MHz;
- 2)分辨率 0.15 ~ 0.2 m;

- 3)作业高度 200 ~ 3 500m;
- 4)作用距离 0.5 ~ 6 km;
- 5)测绘带 0.5 ~ 3 km;
- 6)极化方式为 HH/HV/VH/VV;
- 7)重量不超过 5.5 kg;
- 8)功耗 $\leq 80\text{ W}$;
- 9)工作温度范围 $-20^{\circ}\sim 55^{\circ}$;
- 10)与前 4 种传感器共用统一的 POS 系统。

1.7 测姿定位系统(POS)

测姿定位系统(POS)由卫星定位(GNSS)和惯性测量(IMU)两种装置组联合构成,其功能如下:

- 1)实现各种传感器动作时间基准一致,全部统一到 GNSS 的时钟基准;
- 2)实现各种传感器测量基准的一致,全部统一到 GNSS 的坐标基准和 IMU 的姿态基准;
- 3)实现对激光雷达和微波雷达的扫描控制,使之形成高精度图像;
- 4)实现对视频影像和红外影像的无需地面控制点的直接定位,达到 100 m 的实时定位精度。

满足以上结构功能的器件性能指标为:

- 1)定位系统(GNSS)后处理定位精度为 0.05 ~ 0.3 m;
- 2)测姿系统(IMU)后处理的姿态角精度为水平角优于 0.005° ,航偏角优于 0.008° ;
- 3)向 5 种传感器提供 GNSS 时间脉冲;
- 4)实现对 5 种传感器的空间基准检校。

2 系统集成实验

2.1 飞行平台

按照国家航空应急测绘系统建设规划,将主被动多传感器组合宽角成像系统集成到中航时固定翼无人机上。

本次实验采用中航工业集团贵州飞机公司生产的鹞鹰固定翼无人机,主要性能指标如下。

- 1)飞机主机:机长 6.08 m,翼展 10.0 m,机高 2.34 m,最大起飞重量 750 kg,最大燃油重量 145 kg,任务载荷 70 kg,最大航速 230 km/h,海拔升限 7 500 m,机场起降。飞机机型来自过去的有人侦察机,空气动力学特性经风洞试验和多年军用实践验证,安全可靠,飞机主机正常寿命 15 a。
- 2)动力系统:三叶螺旋桨,ROTAX-914F 发动机,功率 85 kW,平均耗油率 276 g/(kW · h),使用 97 # 无铅汽油,发动机寿命 2 000 h(可更换),为确保安全,设计了发动机空中停车的自动

再启动装置。

3)导航与飞控系统:导航采用卫星定位加惯性导航组合,飞行中可选 3 种导航方式,其中,惯性+DGNSS 为主模式,次之为惯性+GNSS,再次之为短周期纯惯性导航;飞控系统采西安 618 所产品,由飞控计算机、伺服动作设备和飞参记录仪组成,其中飞控计算机和备份计算机互为热备份,形成双余度安全保障。

4)测控与信息传输系统:设置了视距通信和卫星通信两条链路,前者通讯距离范围为 200 km,后者为 2 000 km。

5)地面指挥控制系统(地面操控站):通过无线电测控链路与机载飞行控制系统一起构成“人在环”的无人机综合控制系统。地面指挥控制系

统接收、处理下行遥测信号和视频图像,对无人机平台和任务设备进行实时监控,从而实现对整个飞行过程的管理操控和信息处理功能。

6)空管系统:装载空管应答机,与国际民用航空公约附件 10 的民用航空交通管制雷达信标系统相兼容。

7)卫星通信系统:Ku 工作频段,发射 14.0~14.5 GHz,接收 12.25~12.75 GHz,上行信号传输功率 6.4 kb/s,下行信号传输功率 256 kb/s 或 2 Mb/s。

2.2 系统集成

1)系统结构集成如图 11 所示。

2)系统组装集成如图 12 所示。

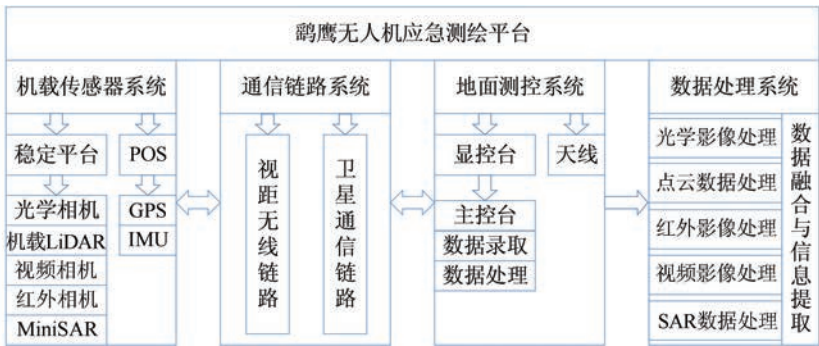


图 11 鹞鹰无人机应急测绘平台系统设计

Fig.11 System Design of Aircraft Emergency Mapping Platform of Hawk UAV



图 12 主被动传感器集成图

Fig.12 Diagram of Active-Passive Sensor Integration

3)系统集成供电设计。飞机提供 28 V 直流电,5 种载荷的控制设备和成像设备用电标准不统一,需要多种转换。以 3 h 为单位进行拷机,精确测定工作瞬时电流和电压,通过地面联调确定供电方案:(1)延时启动;(2)错峰作业;(3)高压送电。

4)系统集成控制设计。控制器接受任务管理计算机的参数指令,接受定位定姿系统的同步指令,触发并记录位姿测量数据,根据位姿信息控制多传感器协调工作。接近计划工作区域,多传感器错峰进入工作状态。控制器根据计算的曝光

点,产生相机组同步工作指令,对多个独立相机高精度同步控制,并回报工作状态给任务管理计算机。

2.3 航飞实验

安顺市位于贵州省中西部,地处乌江流域和北盘江流域的分水岭地带,喀斯特地貌分布广泛,摄区大部分区域以山地和高山地为主,海拔平均在 1 300 m 左右,摄区西北部分布有高山区,最高海拔在 2 000 m 左右。摄区介于 105°08'E~106°30'E, 25°16'N~26°24'N,属高原型湿润亚热带季风气候,旱灾、洪涝和地质灾害较为频繁。

2.3.1 白天航飞实验

1)下午 3 时的组合宽角光学相机影像。图 13 所示为其中一帧影像,幅面 20 928×9 216 像元,像场角 86°(旁向)×40°(航向),像元分辨率 4.2 μm,航高 200 m,GSD=1.7 cm。

2)下午 3 时的 Video+红外影像。图 14 左边为三路视频影像,每秒 30 帧 1 280×720×3 标清影像,旁向视场角 70°,右边为三路红外影像,帕尔制式 25 Hz,旁向视场角 70°。

3)下午 3 时的 LiDAR 点云。图 15 为 LiDAR 高程分色点云,可清楚识别地面各类景观。

2.3.2 夜间航飞实验

1)晚 7 时的组合宽角光学相机影像。图 16 为傍晚 7 时的影像,由于 200 m 低航高,虽然影像曝光有些不足,但大景物尚可识别。

2)晚 7 时的 Video+红外影像。图 17 为傍晚 7 时的视频与红外影像。

3)晚 7 时的 LiDAR 点云。图 18 为傍晚 7 时的 LiDAR 点云,从图 18 中可以识别出停车场的汽车数量。

2.3.3 工程任务影像^[9-10]

图 19~21 为贵州安顺地区执行 1:2 000 航拍生产任务所获得的航空影像。

图 22 为其中一片山地的 LiDAR 高程点云图像,此数据可直接用于体积量算。

2.3.4 MiniSAR 图像

由于工程进展原因,MiniSAR 虽已作了集成设计,但器件加工尚未到位,图 23 是厂商提供的 MiniSAR 所获取的影像样品。



图 13 组合宽角光学相机影像
Fig.13 Mosaic Wide-Angle Optical Camera Image



图 14 Video+红外影像
Fig.14 Video and Infrared Image

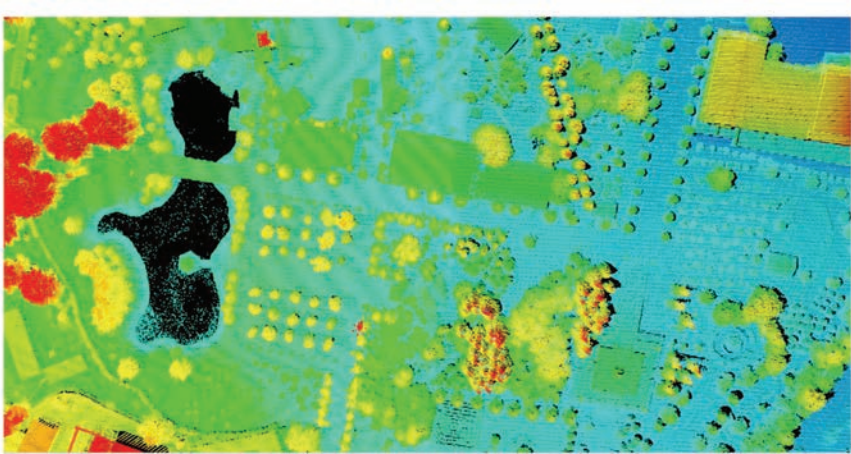


图 15 LiDAR 点云
Fig.15 LiDAR Point Cloud



图 16 组合宽角光学相机影像
Fig.16 Mosaic Wide-Angle Optical Camera Image



图 17 Video+红外影像
Fig.17 Video and Infrared Image

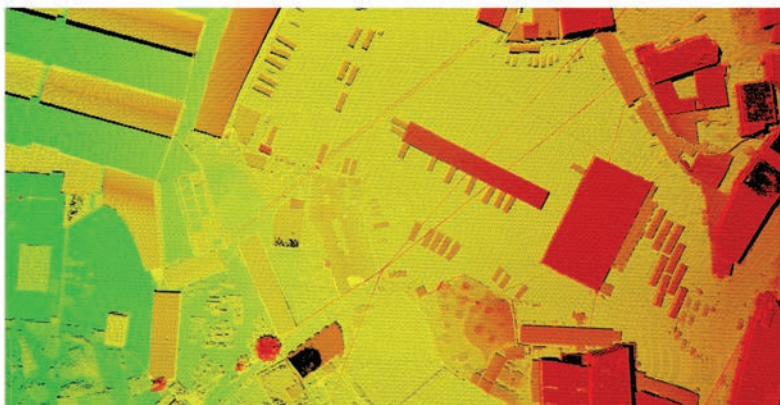


图 18 LiDAR 点云
Fig.18 LiDAR Point Cloud



图 19 贵州安顺地区执行航摄生产任务所获得的航空影像
Fig.19 Aerial Imagery Obtained from Aerial Production Missions in Anshun Area, Guizhou Province

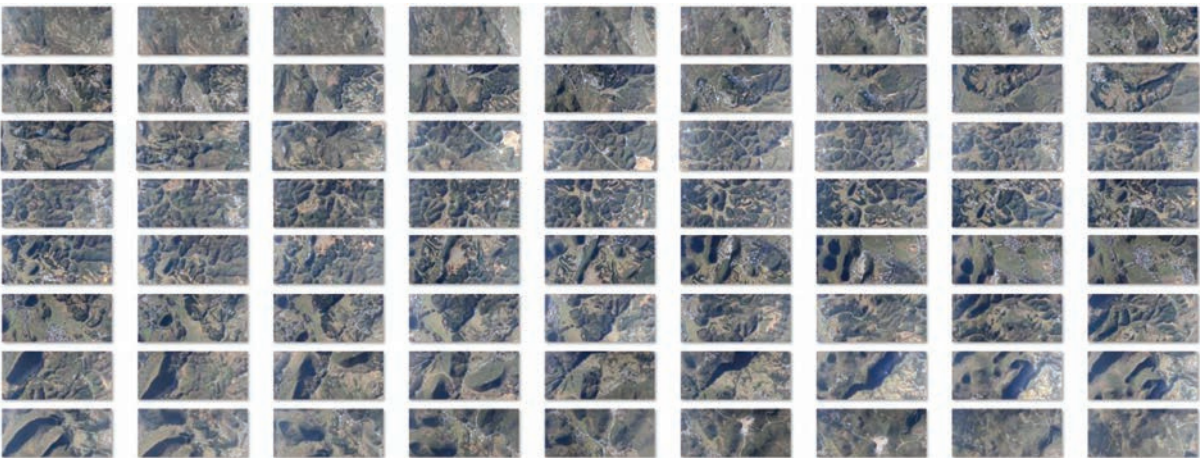


图 20 像幅 20 928×9 216 近 2 亿像素的宽角航摄影像产品
Fig.20 20 928×9 216 Frame Nearly 200 Million Pixels Wide-Angle Aerial Photographic Products

3 结 语

综上所述,本文得出了以下结论。

1)主被动多传感器组合宽角成像系统方案切实可行,能够响应国家航空应急测绘能力建设的

需求。
2)多镜头组合宽角光学相机在成像质量和作业效率上可以达到超过单镜头宽角相机的效果。
3)无论对于救灾应急测绘,还是对于平战结合的日常测绘业务,本文系统提高空域航时的利用率的设计都是很有意义的。

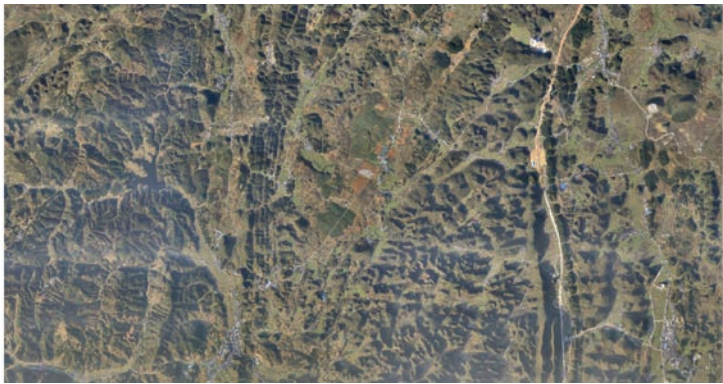


图 21 正射影像

Fig.21 Digital Orthophoto Map

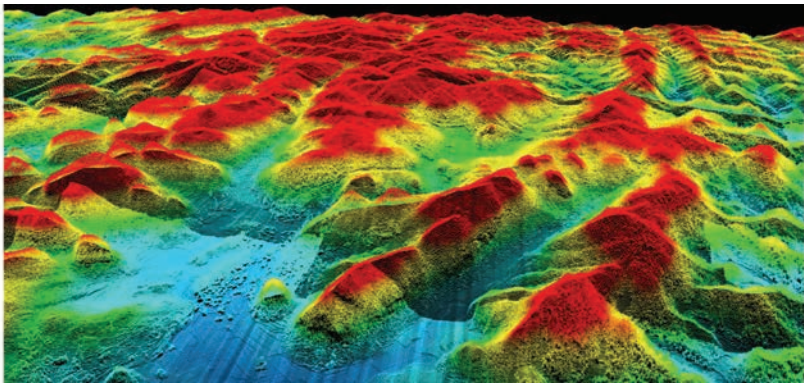


图 22 LiDAR 点云

Fig.22 LiDAR Point Cloud

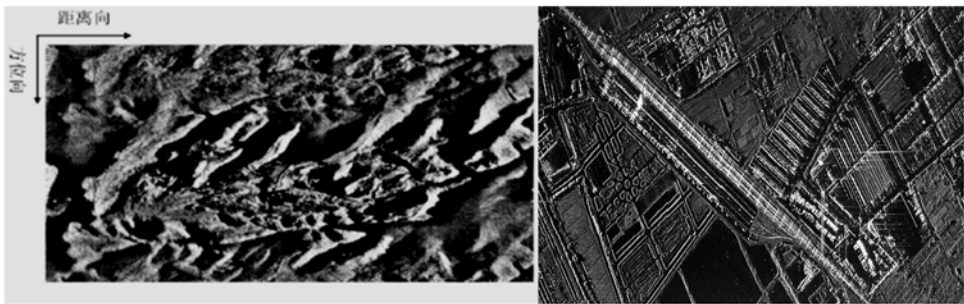


图 23 MiniSAR 影像

Fig.23 Miniature Synthetic Aperture Radar Image

参 考 文 献

[1] Zhang Ji. Methods for Aerial Image Acquisition in Emergency Surveying and Mapping[J]. *Standardization of Surveying and Mapping*, 2015, 31(1): 39-40(张骥. 测绘应急保障中航空影像获取的方法[J]. 测绘标准化, 2015, 31(1): 39-40)

[2] Zhang Zuxun, Guo Dahai, Ke Tao, et al. The Use of Aerial Photogrammetry in the Fast Response for China Earthquake Rescue[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008(6): 852-857(张祖勋, 郭大海, 柯涛, 等. 抗震救灾中航空摄影测量的应急响应[J]. 遥感学报, 2008(6): 852-857)

[3] Lin Zongjian. UAV Borne Low Altitude Photogrammetry System[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(1): 5-9(林宗坚. UAV 低空航测技术研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(1): 5-9)

[4] Lin Zongjian, Xie Feifei, Su Guozhong. Accuracy Analysis of Low Altitude Photogrammetry with Wide-Angle Camera[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(10): 991-997(林宗坚, 解斐斐, 苏国中. 宽角相机低空航测的精度分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(10): 991-997)

[5] Nakamura J. Image Sensors and Signal Processing

for Digital Still Cameras[M]. Boca Raton: CRC Press, Inc., 2005

[6] Yang Ying. Research on Key Technologies of Combined Wide-Angle Camera for Low-Altitude Aerial Photogrammetry[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014 (杨应.组合宽角低空航测相机关键技术研究[D].武汉:武汉大学,2017)

[7] Wang Qingyou. Application Technology of Image Sensor[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003(王庆有.图像传感器应用技术[M].北京:电子工业出版社,2003)

[8] Li Menglin, Zhu Jingguo, Meng Ta, et al. Design of Light Weight and Small Sized Airborne Laser Scanner[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015,44(5):1 426-1 431 (李孟麟,朱精果,孟柘,等.轻小型机载激光扫描仪设计[J]. 红外与激光工程, 2015,44(5):1 426-1 431)

[9] Ren Chaofeng. Research on Key Technologies of DOM Generation by Aerial Video[D]. Wuhan: Wuhan University,2014(任超锋. 航空视频影像的正射影像制作关键技术研究[D].武汉: 武汉大学,2014)

[10] Wu Boyi, Su Guozhong. Research on the Key Technology of Large Scale Mapping from Low Altitude Photogrammetry[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016,41(8):138-143(吴博义,苏国中.低空大比例尺地形图航测生产关键技术[J]. 测绘科学,2016,41(8):138-143)

Design and Experiment of An Active-Passive Multi-sensor Combined Wide-Angle Imaging System

LIN Zongjian¹ SU Guozhong¹ SHEN Chaoyong² WU Boyi³

1 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China
2 The Third Surveying and Mapping Institute of Guizhou Province,Guiyang 550004, China
3 Fundamental Geographic Information Institute of Shanxi Province, Taiyuan 030001, China

Abstract: A multi-sensor combined imaging system is proposed based on the aerial survey requirements for national level emergencies. This system integrates digital cameras, video and infrared cameras, LiDAR and MiniSAR into a unified benchmark of space and time. It can perform optical large format imaging, daytime and night video imaging for real time transfer, 3D laser point clouds acquisition, and all-weather microwave sensing respectively and simultaneously on a flying platform. The advantages of combined wide-angle cameras for improving image quality and operation efficiency are described in detail. Based on this design, an experimental system was installed in a medium duration UAV, to make test flights. Observed daytime and night data are shown.

Key words: aerial photography; active-passive multi-sensor; combined wide-angle imaging; aerial survey for national level emergencies

First author: LIN Zongjian, PhD, professor, specializes in photogrammetry and remote sensing. E-mail: lincasm@casm.ac.cn
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41371425.