

文章编号 1004-924X(2020)06-1254-11

载机飞行参数对倾斜成像重叠率影响及补偿

李 军^{1,2*}, 黄厚田¹, 修吉宏¹, 李 彬¹, 张 赫¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:针对飞机姿态角、速度、高度对重叠率影响进行分析并给出了补偿方法。以图像目标直接地理定位方法为基础,给出了大倾斜成像重叠率的基于坐标变换分析方法;对飞行参数单变量影响给出了几何分析及计算公式,两种方法结果是一致的。对于载机姿态角综合作用影响,利用基于坐标变换的方法给出了载机姿态角波动在 1° 范围内,分析了图像目标区域与预期区域偏离的结果,同时提出了使用相机位角和俯角对飞机姿态角影响进行补偿的方法,并给出了基于坐标变换方法的相机位角和俯角补偿量计算公式;基于几何分析结果,提出了通过调整拍照周期对载机速度和载机高度波动影响进行补偿方法,并给出拍照周期的计算公式。仿真结果和实际飞行数据表明,使用相机位角和俯角进行载机姿态补偿,同时调整拍照周期,可以很好抑制航拍过程中飞机参数波动对重叠率影响,在小视场角 0.88° 时,在平坦地区重叠率均值与预期值偏差为 1% 。

关键词:重叠率;载机参数;倾斜成像;坐标变换;拍照周期

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202806.1254

Effect and compensation of overlap influenced by flight parameter of oblique aerial camera

LI Jun^{1,2*}, HUANG Hou-tian¹, XIU Ji-hong¹, LI Bin¹, ZHANG He¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

** Corresponding author, E-mail: junly8076@163.com*

Abstract: This study analyzes The effects of aircraft's attitude, speed, and height on the overlap of an oblique aerial camera was analyzed in this study, and a corresponding compensation method was developed. The calculation of oblique imaging overlap using coordinate transformation was introduced based on a geo-location algorithm and the Gauss-Kruger projection. In the case of single parameter variations, different formulas were provided by the geometric method, and the results were consistent between coordinate transformation and geometric methods. In the case where the three parameters vary simultaneously, the geometric method did not work adequately, and the coordinate transformation method should be used. In the case where the varied angle value of the aircraft attitude was below 1° ,

收稿日期:2019-11-04;修订日期:2019-12-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61675202)

the deviating value between real covered area and expected area was attained by the coordinate transformation method. The usage of camera's azimuth and pitch angles to compensate the effect of aircraft attitude on overlap was introduced. For the variation of aircraft speed and height, changing the imaging period according to the aircraft real time values was suggested, and a new formula regarding imaging period was provided. The validity of the compensation algorithm was verified by simulation and real flight. The result shows that when the camera's field of view is below 0.88° , the deviation between mean and expected values of real overlap is approximately 1%, if the target area is flat.

Key words: overlap; flight parameter; oblique imaging; coordinate transformation; imaging period

1 引言

航空成像具备机动性强、特定地区重访周期高的优势,在情报获取、减灾救援、农业调查等方面均有广泛应用^[1]。为了扩大成像范围并能在边境线附近对邻国的军事目标进行侦察,侦察相机通常采用大斜视摆扫成像工作方式^[2-3]。大斜视成像相机一般焦距较长,视场角较小,分析并抑制载机飞行参数影响并进行补偿是大斜视航空成像需要解决的一个重要问题。

杨秀彬、王亚敏等在垂轨凝视搜索成像分析^[4-5]中简单介绍了凝视成像的重叠率结果,并未详细给出重叠率分析过程,且所指重叠率为凝视地区图像重叠情况,与航空相机中的重叠率含义有所不同。周刚等在航空相机扫描角研究中仅分析了扫描角对重叠率影响,未涉及载机参数方面研究^[6]。万磊等在飞行器姿态对航空相机影响中未研究重叠率问题^[7]。

本文在乔川等给出的大倾斜成像航空相机对地目标定位^[8]的基础上给出了基于坐标变换的重叠率计算方法;针对载机的航向角、俯仰角、横滚角、飞行速度变化、飞行高度变化等参数单变量影响,通过几何方法进行分析,并给出了与坐标变换方法的对比结果;针对同时存在航向角、俯仰角、横滚角影响的情况,给出了基于坐标变化方法的重叠率影响结果及对应的相机位角、俯角的补偿量;基于载机飞行速度和航高的影响,给出了调整拍照周期的补偿方法。

2 基于坐标变换的重叠率计算

2.1 重叠率定义

航空相机结构如图 1 所示^[8],相机安装在飞

机上相机,相机位角轴对应内框架转轴,相机俯角轴对应外框架转轴,俯角轴与载机横滚轴一致,初始时内框架转轴与载机俯仰轴平行,在成像过程中可调节相机位角轴和俯角轴控制相机视轴指向。

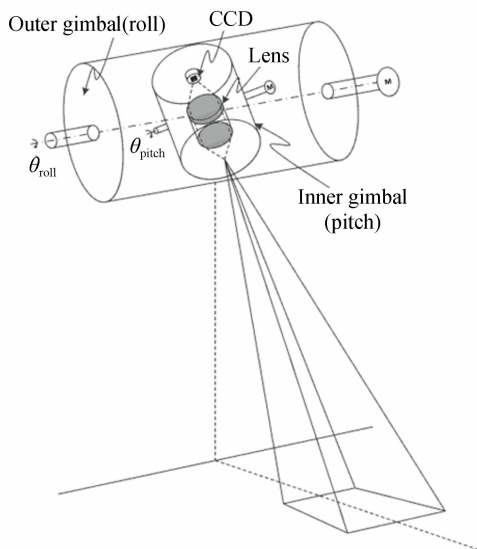


图 1 航空相机结构示意图

Fig. 1 Diagram of aerial camera structure

随飞机飞行相机在图 2 中 A, B 点进行扫描成像,要求相邻两个条带图像具有一定的重叠区域,如阴影区域所示。对倾斜成像而言,条带图像中靠近机下点的一端图像定义为近地点图像。图像重叠率随着相机倾斜角变大逐渐增加,近地点图像重叠率最小。因此,本文讨论近地点图像的重叠率。

在飞机姿态角较小时,单幅图像飞行方向覆盖长度为:

$$L_{single} = \frac{2H_c}{\cos \theta} \tan\left(\frac{\omega}{2}\right), \quad (1)$$

其中: H_c 为飞机相对目标点的高度, θ 为相机俯角与地面垂直方向夹角, ω 为相机飞行方向的视场角。

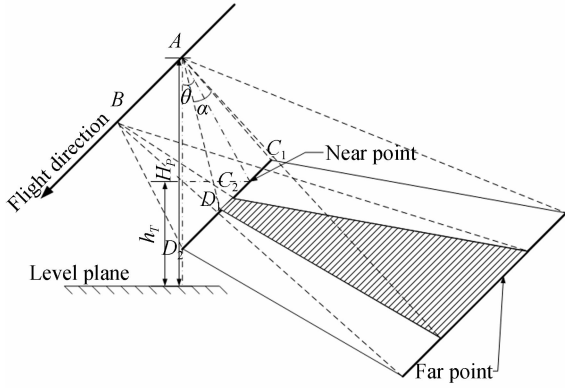


图 2 飞行方向重叠率示意图

Fig. 2 Overlap of flight direction

相邻条带载机步进距离 $C_1C_2=L_{\text{step}}$, 相邻条带图像重叠区 $C_2D_1=L_{\text{single}}-L_{\text{step}}$ 重叠率表达式为:

$$\rho = \frac{L_{\text{single}} - L_{\text{step}}}{L_{\text{single}}} \quad (2)$$

2.2 坐标系建立

大倾斜远距离成像无法使用激光测距进行目标定位^[9], 先采用直接地理定位方法确定目标位置^[8,10-11], 再将目标换算到平面直角坐标系下进行重叠率分析。文中涉及到的坐标系包括建立分析所需的地心直角坐标系 (Earth-Centered, Earth-Fixed, ECEF)、地理坐标系 (North East Down, NED)、载机坐标系 (AC)、相机坐标系 (S)、高斯-克吕格坐标系。其中文献^[8]给出了除高斯-克吕格坐标系外的其他坐标系间转换关系的推导过程, 此处只引用其主要结论。

相机坐标系定义——相机俯角轴定义为 X_s 轴, 指向相机头方向为正, 位角轴定义为 Y_s 轴, 指向相机右侧为正, Z_s 轴指向相机视轴向下方向为正。其中相机俯角为 θ , 位角转角为 φ , 当 θ, φ 为零时, 相机坐标系与飞机坐标系完全重合。飞机坐标系到相机坐标系的转换公式为:

$$\mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{S}} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

飞机坐标系定义——横滚轴定义为 X_{AC} 轴, 指向飞机头方向为正, 俯仰轴轴定义为 Y_{AC} 轴, 指向飞机右侧为正, Z_{AC} 轴向下方向为正。飞机横滚角为 α 、俯仰角为 β 、航向角为 λ , 飞机地理坐标系到飞机坐标系的转换公式为:

$$\mathbf{C}_{\text{P-NED}}^{\text{AC}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 & 0 \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

地心直角坐标系——为原点处于地球质心, X_{ECEF} 轴指向本初子午线与赤道的交点, Z_{ECEF} 轴指向地理北极, Y_{ECEF} 轴与其他两轴组成右手坐标系。WGS-84 标准定义的地球椭球模型^[6]在地心直角坐标系下可表述为:

$$\frac{x_E^2}{R_E^2} + \frac{y_E^2}{R_E^2} + \frac{z_E^2}{R_P^2} = 1, \quad (5)$$

其中: R_E 为地球长半轴, R_P 为地球短半轴。

大地坐标系采用 WGS84 标准, 目标的纬度为 B , 经度为 L , 大地高位 H , 大地坐标系到飞机地理坐标系的转换公式为:

$$\mathbf{C}_{\text{EARTH}}^{\text{NED}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_N + H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sin B & 0 & \cos B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\cos B & 0 & -\sin B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos L & \sin L & 0 & 0 \\ -\sin L & \cos L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_{\text{NE}e_1} \sin H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中: 目标经度为 L , 纬度为 B 和大地高信息为 H , 地球椭球第一偏心率 e_1 , 目标对应卯酉圈的曲率半径为 R_N 。

大地坐标系到地心直角坐标系坐标变换公式为:

$$\begin{bmatrix} x_A^E \\ y_A^E \\ z_A^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_N + H) \cos B \cos L \\ (R_N + H) \cos B \sin L \\ (R_N (1 - e^2) + H) \sin L \end{bmatrix}. \quad (7)$$

地心直角坐标系到大地坐标系坐标变换迭代

公式(8)所示:

$$\begin{cases} N_0 = R_E \\ h_0 = [(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2 + (z_T^E)^2]^{\frac{1}{2}} - (R_E R_p)^{\frac{1}{2}} \\ \varphi_0 = \tan^{-1} \left[\frac{z_T^E}{\sqrt{(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2}} \left(1 - \frac{e^2 N_0}{(N_0 + h_0)} \right)^{-1} \right] \\ N_i = R_E (1 - e^2 \sin^2 B_{i-1})^{\frac{1}{2}} \\ h_i = \frac{\sqrt{(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2}}{\cos B_{i-1}} - N_i \\ \varphi_i = \tan^{-1} \left[\frac{z_T^E}{\sqrt{(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2}} \left(1 - \frac{e^2 N_i}{(N_i + H_i)} \right)^{-1} \right] \end{cases}. \quad (8)$$

目标经度信息由式(9)给出:

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{y_T^E}{x_T^E} \right), \quad (9)$$

其中:当 $x_T^E > 0$ 时, $\lambda_T = \lambda$; 当 $x_T^E < 0$ 且 $\lambda < 0$ 时, $\lambda_T = \lambda + \pi$; 当 $x_T^E < 0$ 且 $\lambda > 0$ 时, $\lambda_T = \lambda - \pi$.

高斯克吕格坐标^[12]——以中央经线为纵轴(X_{GK} 轴),赤道为横轴(Y_{GK} 轴),两轴相交为原点。已知大地纬度 B 、经度 L ,则高斯-克吕格投影公式^[13]为:

$$\begin{aligned} x &= X_c + R_{Nt} \cos^2 Bl^2 [0.5 + \\ &\frac{1}{24} (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) \cos^2 Bl^2 + \\ &\frac{1}{720} (61 - 58t^2 + t^4) \cos^4 Bl^4] \\ y &= R_N \cos Bl [1 + \\ &\frac{1}{6} (1 - t^2 + \eta^2) \cos^2 Bl^2 + \frac{1}{120} (5 - 18t^2 + \\ &t^4 + 14\eta^2 - 58t^2 \eta^2) \cos^4 Bl^4] \end{aligned}$$

其中: X_c 为中央子午线弧长, R_N 为卯酉圈曲率半径, $t = \tan B$, $\eta^2 = e_2^2 \cos^2 B$, e_2 为地球椭球第二偏心率, B 为当地纬度, l 为当地经度与中央子午线经度差(单位为弧度)。中央子午线长度计算公式为:

$$\begin{aligned} X &= R_E (1 - e^2) (A_1 B - A_1 \sin(2B) + \\ &C_1 \sin(4B) - D_1 \sin(6B) + E_1 \sin(8B) - \\ &F_1 \sin(10B) + G_1 \sin(12B)), \quad (11) \end{aligned}$$

公式中系数为:

$$\begin{cases} A_1 = 1 + \frac{3}{4} e_1^2 + \frac{45}{64} e_1^4 + \frac{175}{256} e_1^6 + \\ \frac{11\ 025}{16\ 384} e_1^8 + \frac{43\ 659}{65\ 536} e_1^{10} + \frac{6\ 936\ 933}{1\ 048\ 576} e_1^{12} \\ B_1 = \frac{3}{8} e_1^2 + \frac{15}{32} e_1^4 + \frac{525}{1\ 024} e_1^6 + \\ \frac{2\ 205}{4\ 096} e_1^8 + \frac{72\ 765}{131\ 072} e_1^{10} + \frac{297\ 297}{524\ 288} e_1^{12} \\ C_1 = \frac{15}{256} e_1^4 + \frac{105}{1024} e_1^6 + \frac{2\ 205}{16\ 384} e_1^8 + \\ \frac{10\ 395}{65\ 536} e_1^{10} + \frac{1\ 486\ 485}{8\ 388\ 608} e_1^{12} \\ D_1 = \frac{35}{3\ 072} e_1^6 + \frac{105}{4\ 096} e_1^8 + \frac{10\ 395}{262\ 144} e_1^{10} + \\ \frac{55\ 055}{1\ 048\ 576} e_1^{12} \\ E_1 = \frac{315}{131\ 072} e_1^8 + \frac{3\ 465}{524\ 288} e_1^{10} + \frac{99\ 099}{8\ 388\ 608} e_1^{12} \\ F_1 = \frac{693}{1\ 310\ 720} e_1^{10} + \frac{9\ 009}{5\ 242\ 880} e_1^{12} \\ G_1 = \frac{1\ 001}{8\ 388\ 608} e_1^{12} \end{cases}, \quad (12)$$

其中: e_1 为地球椭球第一偏心率, R_E 为地球椭球长半轴;在中国区内,为了避免出现负数,可在 y 方向加上 500 000 m。

2.3 重叠率计算过程

目标在探测器上投影点在相机坐标系下的坐标为:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}'_s &= \\ \left[a \times \left(\frac{M+1}{2} - i \right) \quad a \times \left(j - \frac{N+1}{2} \right) \quad -f \right]^T, \quad (13) \end{aligned}$$

其中: a 为探测器像元尺寸, M 为探测器沿飞行方向总像元数, N 为垂直飞行方向总像元数, (i, j) 为目标在探测器上像元数坐标。

CCD 上的目标投影点 $\mathbf{T}'_s = [x_T^S \ y_T^S \ z_T^S]^T$ 依次经过相机坐标系、飞机坐标系、地理坐标系、大地坐标系变换及公式(4)可获得目标投影点在地心直角坐标系下坐标表达式 $\mathbf{T}'_E = [x_T^E \ y_T^E \ z_T^E]^T$ 。

在地表上的目标 $\mathbf{T}_E = [x_T^E \ y_T^E \ z_T^E]^T$ 与探测器上的投影点 $\mathbf{T}'_E = [x_T^E \ y_T^E \ z_T^E]^T$ 、相机坐标系原点 $\mathbf{T}_s = [x_s^E \ y_s^E \ z_s^E]^T$ 同时满足共线方程:

$$\frac{x_{T_0}^E - x_s^E}{y_{T_0}^E - y_s^E} = \frac{y_{T_0}^E - y_s^E}{y_{T_0}^E - y_s^E} = \frac{z_{T_0}^E - z_s^E}{z_{T_0}^E - z_s^E}, \quad (14)$$

和地球椭球方程：

$$\frac{(x_T^E)^2}{(R_E + h_T)^2} + \frac{(y_T^E)^2}{(R_E + h_T)^2} + \frac{(z_T^E)^2}{(R_P + h_T)^2} = 1. \tag{15}$$

联立式(13)和式(14)即可解得目标在地心直角坐标系下的坐标 $[x_T^E \ y_T^E \ z_T^E]^T$ ，利用迭代方程(8)和方程(9)，可求得目标点的大地坐标 $[B_T \ L_T \ H_T]^T$ ，利用高斯-克吕格投影工作可计算出目标点在高斯-克吕格坐标下的坐标 (x, y) 。

在高斯-克吕格坐标系下，前一条带近地点中心点坐标为 (x_{1np_c}, y_{1np_c}) ，后一条带中心点坐标为 (x_{2np_c}, y_{2np_c}) ，则相邻条带步进距离为：

$$L_{step} = \sqrt{(x_{2np_c} - x_{1np_c})^2 + (y_{2np_c} - y_{1np_c})^2}, \tag{16}$$

利用公式(2)，可计算出重叠率。

综合上述分析，重叠率计算过程如图 3 所示。

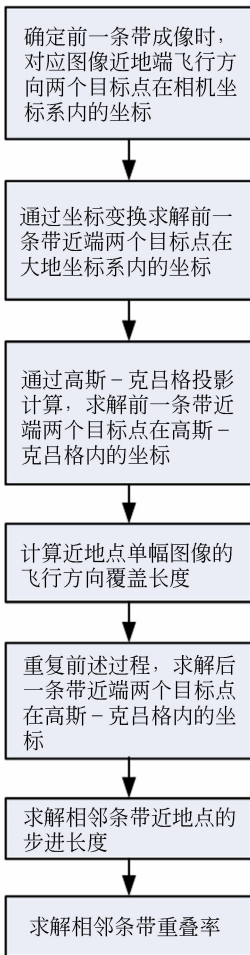


图 3 重叠率计算流程

Fig. 3 Flow chart of overlap calculation

3 重叠率影响及补偿

3.1 飞机姿态角的影响及补偿

首先分析仅存在飞机航向角变化对重叠率的影响。图 4 中前一条带飞机位于位置 P_1 ，对应地面近地端为位置 O_1 ，当不存在飞机航向变化时，后一条带图像飞机位于位置 P_2 ，对应地面近地端为位置 O_2 。如果飞机在 P_2 位置相对 P_1 位置航向角存在 $\Delta\lambda$ 的波动时，相机视轴位于与航向旋转轴夹角为 θ 的圆锥面上运动，视轴与地面交点从 O_2 运到位置 O_3 。 O_5 为飞机位置 P_2 在地面投影点，则 O_5O_2 与 O_5O_3 的夹角也为 $\Delta\lambda$ 。

设飞机相对目标高度为 H_e ，则 O_5O_3 的长度为 $L_{O_5O_3} = H_e \tan \theta$ ，飞机航向变化导致目标点在飞行方向的偏差为：

$$L_{O_3O_4} = L_{O_5O_3} \sin \Delta\lambda = H_e \tan \theta \sin \Delta\lambda. \tag{17}$$

飞机航向变化导致目标点在与飞行垂直方向的偏差为 $L_{O_1O_3} = H_e \tan \theta (1 - \cos \Delta\lambda)$ 。

航向变化对重叠率影响公式为：

$$\Delta\rho = \frac{L_{O_3O_4}}{L_{single}} = \frac{\sin \theta \sin \Delta\lambda}{2 \tan(\omega/2)}. \tag{18}$$

从公式(18)中可以看出垂直成像时 $\theta=0^\circ$ ，航向角变化对于重叠率无影响。但对于大倾角成像来说，航向角的变化影响是不可忽略的。

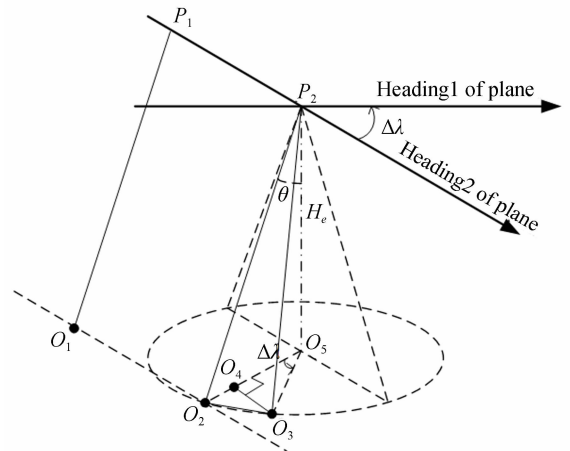


图 4 航向角变化对重叠率影响

Fig. 4 Effect of heading variation for overlap

下面分析 $\theta=74^\circ$ ， $\omega=0.88^\circ$ ，飞机航向角变化 $\Delta\lambda$ 为 $0^\circ \sim 1^\circ$ 时对重叠率影响，表 1 给出了飞机航向角变化对重叠率影响分析结果。分析结果表

明,当航向角变化 0.2° 时重叠率变化量为 21.85% ,影响显著需要对航向角的变化进行补偿。

表 1 航向角变化对重叠率影响

Tab.1 Effect of heading variation on overlap

航向角变化/ $^\circ$	重叠率变化
0	0
0.2	0.218 5
0.4	0.436 9
0.6	0.655 3
0.8	0.873 8
1.0	1.092 0

其次分析仅存在飞机俯仰角变化对重叠率的影响。图 5 中前一条带飞机位于位置 P_1 ,对应地面近地端为位置 O_1 ;当不存在飞机俯仰变化时,后一条带图像飞机位于位置 P_2 ,对应地面近地端为位置 O_2 。如果相对位置 P_1 ,在 P_2 位置飞机俯仰角存在 $\Delta\beta$ 的波动时,相机视轴位于与俯仰轴夹角为 $90^\circ - \theta$ 的圆锥面上运动,线段 O_2O_5 运动到 O_3O_6 , P_2O_3 与地面的交点为 O_4 , P_2O_6 与地面相交于点 O_7 ,连接 O_4O_7 。在飞机俯仰角变化过程中, O_3O_6 始终平行于地平面,因此 O_3O_6 平行于 O_4O_7 , O_2O_5 ,可推导出 O_4O_7 平行于 O_2O_5 ,直线 O_5O_7 为飞机航迹 P_1P_2 在地面投影且 O_5O_7 与

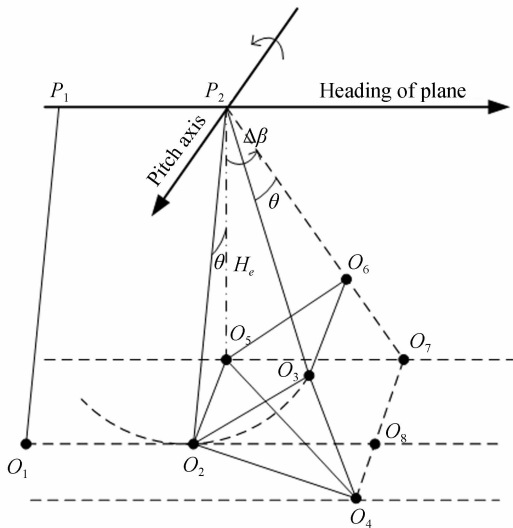


图 5 俯仰角变化对重叠率影响

Fig.5 Effect of pitch variation for overlap

O_1O_2 平行, O_2O_5 与 O_5O_7 垂直,有 O_4O_7 垂直于飞机飞行航线在地面投影 O_1O_2 ,垂足为 O_8 。因此, O_2O_8 长度即为飞机俯仰变化产生的图像实际成像点与目标点偏差, $L_{O_2O_8} = L_{O_3O_7} = H_e \tan \Delta\beta$

对重叠率的影响为:

$$\Delta\rho = \frac{L_{O_2O_8}}{L_{\text{single}}} = \frac{H_e \tan \Delta\beta}{\frac{2H_e}{\cos \theta} \tan(\omega/2)} = \frac{\cos \theta \cdot \tan \Delta\beta}{2 \tan(\omega/2)} \quad (19)$$

下面分析 $\theta=74^\circ, \omega=0.88^\circ$,飞机俯仰角变化 $\Delta\beta$ 为 $0^\circ \sim 1^\circ$ 时对重叠率影响,表 2 给出了飞机俯仰角变化对重叠率影响分析结果。分析结果表明,当俯仰角变化 0.6° 时重叠率变化量为 19.2% ,影响显著需要对航向角的变化进行补偿。

表 2 俯仰角变化对重叠率影响

Tab.2 Effect of pitch variation on overlap

俯仰角变化/ $^\circ$	重叠率变化
0	0
0.2	-0.064 0
0.4	-0.128 0
0.6	-0.192 0
0.8	-0.256 0
1.0	-0.320 0

再分析仅存在飞机横滚波动对重叠率的影响。图 6 中前一条带飞机位于位置 P_1 ,对应地面近地端为位置 O_1 ,当不存在飞机横滚变化时,后

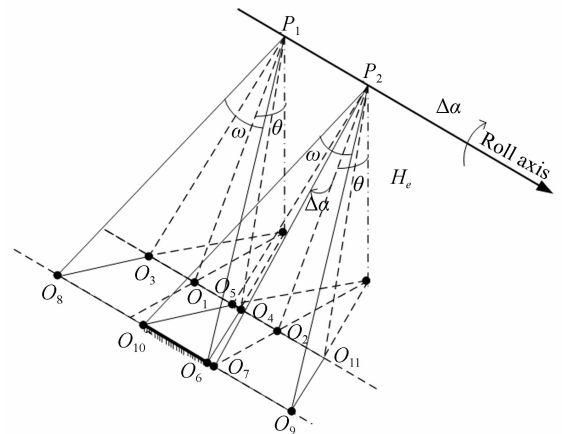


图 6 横滚角变化对重叠率影响

Fig.6 Effect of roll variation on overlap

一条带图像飞机位于位置 P_2 , 对应地面近地端为位置 O_2 , 对应图像重叠区域为 O_4O_5 。如果飞机在 P_2 位置存在横滚角 $\Delta\alpha$ 的波动时, 对应地面近地端为位置 O_7 , 近地端重叠区变为 O_6O_{10} 。横滚角变化改变飞行方向单帧覆盖长度进而对重叠率产生影响。

在视轴指向角为 θ 时, 重叠率表达式为:

$$\rho = \frac{L_{\text{single}} - L_{\text{step}}}{L_{\text{single}}} = 1 - \frac{L_{\text{step}} \cos \theta}{2H_e \tan(\omega/2)}. \quad (20)$$

在相邻条带飞机飞行距离和高度保持不变的情况下, 重叠率随着视轴指向角 θ 的增大而变大。

飞机横滚角变化引起重叠率变化为:

$$\Delta\rho = \frac{L_{\text{step}}}{2H_e \tan(\omega/2)} \cdot (\cos \theta - \cos(\theta + \Delta\alpha))$$

$$L_{\text{step}} = \frac{2H_e \tan(\omega/2)}{\cos \theta} \cdot (1 - \rho_0), \quad (21)$$

其中 ρ_0 为预期的重叠率。因此,

$$\Delta\rho = (1 - \rho_0) \cdot \left(1 - \frac{\cos(\theta + \Delta\alpha)}{\cos \theta}\right). \quad (22)$$

下面分析 $\theta = 74^\circ$, $\omega = 0.88^\circ$, 飞机横滚角变化 $\Delta\alpha$ 为 $0^\circ \sim 1^\circ$ 时对重叠率影响, 表 3 给出了飞机横滚角变化对重叠率影响分析结果。分析结果表明, 当横滚角变化 0.6° 时重叠率变化量为 3.11% , 也需对航向角的变化进行补偿。

表 3 横滚角变化对重叠率影响

Tab. 3 Effect of roll variation on overlap

横滚角变化/ $^\circ$	重叠率变化
0	0
0.2	0.010 4
0.4	0.020 7
0.6	0.031 1
0.8	0.041 5
1.0	0.051 9

在实际成像中飞机的三个姿态角将同时存在, 此时很难通过几何方法进行重叠率分析, 通过坐标变换方法计算仿真飞机姿态角对重叠率的影响更适合。设 T_0 时刻飞机俯仰角和横滚角均为 0° 、航向角为 180° , 相机的位角为 0° 、俯角为 74° 、右倾斜成像; 在 T_1 时刻, 飞机航向、俯仰、横滚角分别为 179° , 1° , 1° , 相机的位角、俯角维持不变。图 7 中点划线为 T_0 时刻成像区域, 实线为预期

的 T_1 时刻图像区域, 角落带点的虚线框为存在飞机姿态角影响的图像区域。可以看出存在飞机姿态角影响时图像成像区域与预期区域相距甚远, 图像将存在拉缝, 需要对飞机姿态角影响进行补偿。

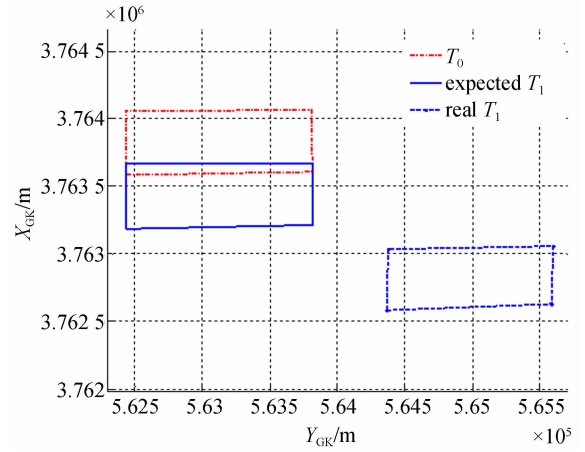


图 7 载机姿态角综合影响

Fig. 7 Synthetic effect of plane attitude

可以通过调整相机的位角和俯角角度抑制飞机姿态角影响, 并通过坐标变换的方法计算相机位角和俯角的补偿量。

视轴在相机坐标系下的坐标为 $\mathbf{LOS}^S = [0, 0, 1]^T$, 在 NED 坐标系下的坐标为:

$$\mathbf{LOS}^{\text{NED}} = \mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{NED}} \mathbf{C}_{\text{S}}^{\text{AC}} \cdot \mathbf{LOS}^S, \quad (23)$$

其中: $\mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{NED}} = (\mathbf{C}_{\text{NED}}^{\text{AC}})^{-1}$, $\mathbf{C}_{\text{S}}^{\text{AC}} = (\mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{S}})^{-1}$ 。

设前一条带近地端成像 T_0 时刻飞机的航向角、俯仰角及横滚角分别为 $\lambda_0, \alpha_0, \beta_0$, 相机的位角为 φ_0 、俯角为 θ_0 , 后一条带近地端成像 T_1 时刻飞机航向角、俯仰角及横滚角变化量分别为 $\Delta\lambda, \Delta\alpha, \Delta\beta$ 。

利用公式(23)求解 T_0 时刻视轴在 NED 坐标系下的视轴指向 $\mathbf{LOS}_0^{\text{NED}} = [x_0^{\text{NED}}, y_0^{\text{NED}}, z_0^{\text{NED}}]$, 用新的飞机姿态角和原相机位角、俯角求解 T_1 时刻视轴新的指向为 $\mathbf{LOS}_1^{\text{NED}} = [x_1^{\text{NED}}, y_1^{\text{NED}}, z_1^{\text{NED}}]$ 。

在 T_1 时刻需要调整相机的位角和俯角, 使得视轴指向与 $\mathbf{LOS}_0^{\text{NED}}$ 一致。利用公式(24):

$$\mathbf{LOS}^S = \mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{S}} \cdot \mathbf{C}_{\text{NED}}^{\text{AC}} \cdot \mathbf{LOS}^{\text{NED}}. \quad (24)$$

求解新的视轴指向在 T_0 时刻相机坐标系中坐标 $\mathbf{LOS}_1^{\text{S}} = [x_1^{\text{S}}, y_1^{\text{S}}, z_1^{\text{S}}]$

相机位角的修正量 $\Delta\varphi$ 和俯角修正量 $\Delta\theta$ 分

别为式(25)、式(26):

$$\Delta\varphi = -\arctan\left(\frac{x_1^S}{\sqrt{(y_1^S)^2 + (z_1^S)^2}}\right), \quad (25)$$

$$\Delta\theta = -\arctan\left(\frac{y_1^S}{z_1^S}\right). \quad (26)$$

针对图 7 的仿真条件,利用式(25)和式(26)计算的位角修正量为 $\Delta\varphi=0.618^\circ$ 、位角修正量为 $\Delta\theta=-1.016^\circ$,图 8 给出补偿后的结果。可以看出,通过相机位角和俯角补偿后,成像区域几乎与预期一致,仅存在一些投影产生的图像畸变。

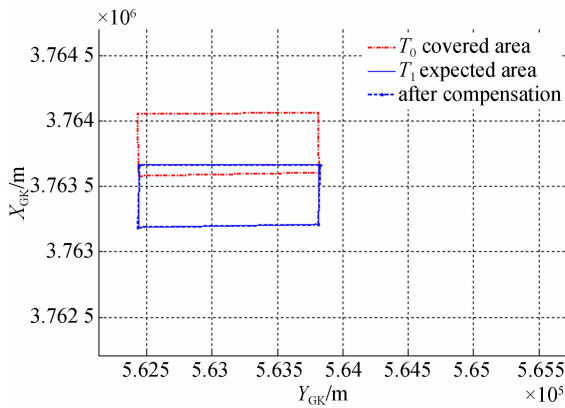


图 8 飞机姿态角影响补偿结果

Fig. 8 Result of compensation for plane attitude

3.2 载机高度变化影响及补偿

对于定焦相机其视场角 ω 是固定的,沿飞行方向单帧覆盖的长度与成像距离成正比。如果 T_1 时刻后一条带图像对应飞机高度 H_{P_2} 与 T_0 时刻前一条带飞机高度 H_{P_1} 相比存在变化,也会对重叠率产生一定的影响。对于重叠率而言,载机高度的变化可等效为地面高度的变化,两者符号相反,即:

$$\Delta H_e = \Delta H_P = H_{P_2} - H_{P_1} = h_{T_1} - h_{T_2} = -\Delta h_T. \quad (27)$$

从图 9 可推算出目标区飞行方向单帧覆盖长度计算公式为 $L = \frac{2H_e}{\cos\theta} \tan\left(\frac{\omega}{2}\right)$,地表高度变换引起的覆盖长度变化为 $\Delta L = -\frac{2\Delta h_T}{\cos\theta} \tan\left(\frac{\omega}{2}\right)$, T_0 时刻覆盖长度为 $L_0 = \frac{2H_{e0}}{\cos\theta} \tan\left(\frac{\omega}{2}\right)$,则载机高度变换引起的重叠率变化为:

$$\Delta\rho = \frac{\Delta L}{L_0} = -\frac{\Delta h_T}{H_{e0}} = \frac{\Delta H_P}{H_{e0}}. \quad (28)$$

当 T_1 时刻后一条带飞机高度与 T_0 时刻比增加时,重叠率相应增加。当 T_1 时刻后一条带成像目标区高度与 T_0 时刻比减小时,重叠率相应减小。

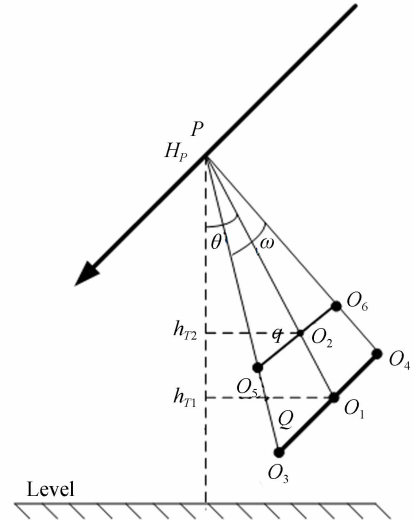


图 9 高度对覆盖长度影响

Fig. 9 Effect of target height variation on cover length

可以通过实时采集判断载机当前位置(含载机高度)、载机速度、视轴指向等信息实时估算出保证图像重叠率下一条带开始时机,据此对相机的拍照周期进行调整,可有效抑制载机或目标高度变化对重叠率的影响。

3.3 飞机飞行速度影响及补偿

相邻条带图像近地点中心距离与飞机飞行的距离是相同的,在飞机飞行高度、速度维持不变的情况下,固定拍照周期即可实现预期的重叠率。相邻条带的拍照周期为:

$$T = \frac{\omega(1-\rho)H_e}{V\sin\theta}, \quad (29)$$

其中: ω 为飞行方向视场角, ρ 为预期重叠率, V 为飞机对地速度, H_e 为飞机对地高度, θ 为扫描成像条带开始位置视轴与水平方向的夹角。此时重叠率为:

$$\rho = 1 - \frac{TV\sin\theta}{H_e\omega}. \quad (30)$$

相邻条带载机的飞行平均速度变化为 ΔV 时,重叠率变化为:

$$\Delta\rho = -\frac{T\left(\frac{\Delta V}{H_e}\right)\sin\theta}{\alpha}. \quad (31)$$

维持 ΔVT 不变,则可消除载机速度波动带来的影响。存在载机速度波动时,相邻条带载机飞行距离为:

$$P_{dis} = \int_0^T V dt, \quad (32)$$

公式(30)变为:

$$\rho = 1 - \frac{\left(\frac{P_{dis}}{H_c}\right) \sin \theta}{\omega}. \quad (33)$$

为实现预期重叠率,相邻条带载机飞行距离满足如下关系:

$$P_{dis} = \int_0^T V dt = \frac{H_c \omega (1 - \rho)}{\sin \theta}. \quad (34)$$

通过调整拍照周期 T 来调整相邻条带载机飞行距离,进而解除拍照过程中对飞机速度恒定的限制。

同时考虑载机相对目标高度 H_c 和载机速度 V 实时变化时,公式(33)可描述为:

$$\rho = 1 - \frac{\sin \theta \int_0^T \frac{V}{H_c} dt}{\omega} = 1 - \frac{\sin \theta \int_0^T \xi dt}{\omega}, \quad (35)$$

其中 ξ 为载机相对目标实时速高比,由公式(35)可得:

$$\int_0^T \xi dt = \frac{\omega(1 - \rho)}{\sin \theta}. \quad (36)$$

因此,依据预期重叠率计算实时速高比积分,求解相邻条带拍照周期 T 消除载机速度和相对目标高度的影响,拍照过程中无需限制相机恒速、恒高飞行。

4 重叠率实际飞行结果

对某型航空相机实际飞行数据进行分析。图 10 中 O 标识实线为相邻条带飞机航向角变化角度, Δ 标识实线为飞机横滚角的变化情况, \square 标识实线为飞机俯仰角变化量。

图 11 为平坦地区实际飞行图像的重叠率情况。表 4 为图 11 重叠率结果对应的载机实际飞行参数、相机角度。从实际结果看出,在平坦地区获取图像重叠率均值为 16% 与预期值 15% 相差 1%。

图 12 给出对地表高度起伏比较大的山区进

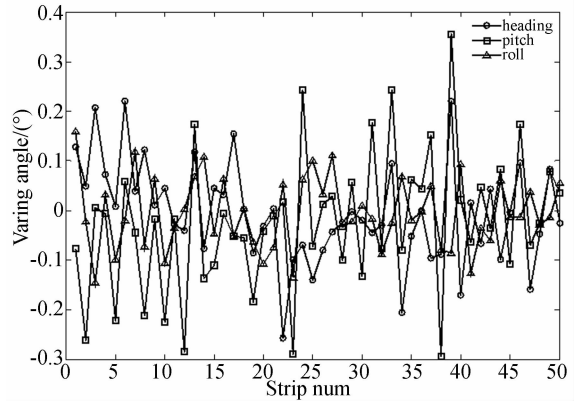


图 10 飞机姿态角波动
Fig. 10 Variation of plane attitude

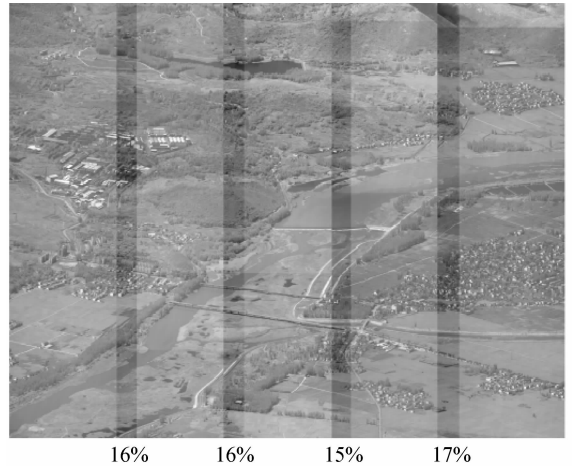


图 11 平坦地区航拍图像
Fig. 11 Flight images of flat area

行成像时重叠率均值为 7%,明显低于预期的 15%。通过查阅 Google 地图并对比相机成像区域分析,预期目标被海拔高度为 1 000 m 左右的高山遮挡,因此实际成像景物海拔高度为 1 000 m,整个飞行任务设置的地面目标高度为 380 m,飞机海拔高度为 8 460 m,实际成像目标的海拔高度大于设置的目标海拔高度对重叠率的影响与飞机高度降低是一样的,依据公式(28)可知,相当于 $\Delta H_p = -620$ m, $H_{c_0} = 8 080$ m,实际重叠率与预期值偏差为 $\Delta \rho = -7.7\%$,重叠率为 7.3%,与实际飞行结果相符。由于目标区高度和载机高度变化对重叠率影响的机理相同,在依据载机高度变换进行拍照周期调整中引入目标区的 DEM 数据^[14],实时估算目标区高度并调整相机的工作参数,将有效降低地表高度变化对重叠率影响。

表 4 实际飞行重叠率结果
Tab. 4 Results of overlap in real flight

条带号		1	2	3	4	5
飞机纬度	$B/(^\circ)$	34.862 798	34.859 568	34.856 361	34.853 151	34.850 027
飞机经度	$L/(^\circ)$	109.511 151	109.513 024	109.514 869	109.516 707	109.518 486
对地高度	He/m	8 143	8 139	8 142	8 139	8 140
载机速度	$V/(km \cdot h^{-1})$	620.09	620.11	620.09	620.21	620.31
航向角	$\lambda/(^\circ)$	159.086	159.214	159.263	159.471	159.543
横滚角	$\beta/(^\circ)$	2.158	2.081	1.82	1.826	1.82
俯仰角	$\alpha/(^\circ)$	3.630	3.789	3.766	3.621	3.652
位角	$\varphi/(^\circ)$	45.415	45.398	45.361	45.235	45.219
俯角	$\theta/(^\circ)$	13.885	13.961	14.216	14.211	14.216
重叠率设定值	$\rho_0/\%$	—	15	15	15	15
重叠率	$\rho/\%$	—	16	16	15	17

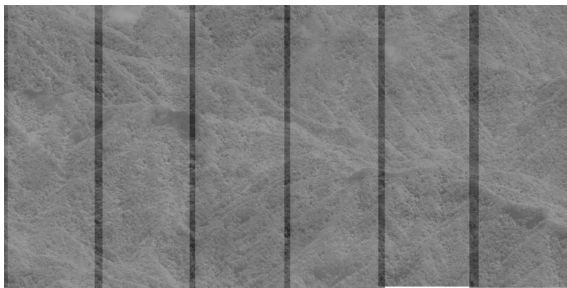


图 12 山区航拍图像

Fig. 12 Flight images of mountain area

5 结 论

针对航拍相邻条带图像间载机的航向角、俯仰角、横滚角、载机飞行高度、飞行速度等 5 个飞行参数变化对重叠率的影响进行了研究,给出了基于坐标变换的大倾斜成像重叠率分析方法。对

于载机姿态角单变量影响情况,通过几何分析方法进行了重叠率影响的定量分析;对于载机姿态角综合作用影响,利用基于坐标变换的方法给出了在波动在 1° 范围内的分析结果,提出使用相机位角和俯角对载机姿态角的影响进行补偿,利用坐标变换的方法给出了相机位角和相机俯角补偿量的计算公式。对于载机速度和载机高度波动给出了基于几何分析方法的重叠率影响定量分析,提出了调整拍照周期进行补偿的方法,并给出了相应计算方法。实际飞行结果表明,在平坦地区,重叠率均值与预期值间相差 1%。在山区,受地表起伏的影响,未进行地表目标高度修正,重叠率小于预期值,偏差为 8%。

提出的基于坐标变换的分析方法可以很好的用于指导大倾斜成像航空相机的重叠率设计及指导实际飞行图像的重叠率分析与修正。另外,相机的位角和俯角控制偏差、目标区地表起伏变化对重叠率也有一定影响,在后续工作中进行研究。

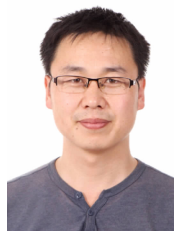
参考文献:

[1] 沈宏海,黄猛,李嘉全,等. 国外先进航空光电载荷的进展与关键技术分析 [J]. 中国光学,2012,5(1): 20-29.
SHEN H H, HUANG M, LI J Q, *et al.*. Recent progress in aerial electro-optic payloads and their

key technologies [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 20-29. (in Chinese)
[2] BRIAN A. GORIN. Side oblique real-time orthophotography with the 9Kx9K digital framing camera [J]. *SPIE*, 2003, 5109: 86-97.
[3] DAVIS LANG, MRINAL IYENGAR, LARRY MAVER, *et al.*. The Goodrich 3rd generation DB-110 system: successful flight test on the F-16

- aircraft[J]. *SPIE*, 2007, 654607, 1~16.
- [4] 杨秀彬,姜丽,王绍举,等. 高分 CMOS 相机垂轨引导凝视搜索成像设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 711002.
YANG X B, JIANG L, WANG SH J, *et al.*. Design of pendulum staring search imaging along the track with high resolution cmos camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 711002. (in Chinese)
- [5] 王亚敏,杨秀彬,金光,等. 高分辨率 CMOS 相机沿轨长条带钟摆式搜索成像设计[J]. *光子学报*, 2017, 46(3): 0311002.
WANG Y M, YANG X B, JIN G, *et al.*. Design of pendulum type searching imaging along the track long-strip with high resolution CMOS camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(3): 0311002. (in Chinese)
- [6] 周刚,翟林培,王德江,等. 全景式航空相机的扫描角研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2473-2478.
ZHOU G, ZHAI L P, WANG D J, *et al.*. Research of scanning angle of panoramic aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2473-2478. (in Chinese)
- [7] 万磊,贾平,张叶,等. 飞行器姿态对 CMOS 航空相机成像的影响[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 203-209.
WAN L, JIA P, ZHANG Y, *et al.*. Effect of aircraft attitude on imaging of CMOS aerial cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 203-209. (in Chinese)
- [8] 乔川,丁亚林,许永森,等. 大角度倾斜成像航空相机对地目标定位[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7): 1714-1726.
QIAO CH, DING Y L, XU Y S, *et al.*. Ground target geo-location using imaging aerial camera with large inclined angle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(7): 1714-1726. (in Chinese)
- [9] 周前飞,刘晶红,熊文卓,等. 机载光电成像平台的多目标自主定位系统研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112005.
ZHOU Q F, LIU J H, XIONG W ZH, *et al.*. Multitarget self-determination orientation system based on airborne photoelectric imaging platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112005. (in Chinese)
- [10] GUO L, ANG H S, ZHENG X M. Ground moving target geo-location from monocular camera mounted on a micro air vehicle[J]. *SPIE*, 2011, 8194: 819419.
- [11] STICH E J. Geo-pointing and threat location techniques for airborne border surveillance[C]. *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on technologies for Homeland Security, IEEE*, 2013: 136-140.
- [12] 袁修孝,张雪萍,付建红. 高斯-克吕格投影坐标系下 POS 角元素的转换方法[J]. *测绘学报*, 2011, 40(3): 338-344.
YUAN X X, ZHANG X P, FU J H. Transformation of angular elements obtained via a position and orientation system in gauss-kruger projection coordinate system[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(3): 338-344. (in Chinese)
- [13] 过家春. 子午线弧长公式的简化及其泰勒级数解释[J]. *测绘学报*, 2014, 43(2): 125-130.
GUO J CH. A simplification of the meridian formula and its Taylor-series interpretation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(2): 125-130. (in Chinese)
- [14] 乔川. 基于数字高程模型的高空远距离航空相机对地目标定位技术研究[D]. 长春: 中国科学与长春光学精密机械与物理研究所, 2019.
QIAO CH. *Research on Ground Target Geo-Location Technology Based on Digital Elevation Model for High-Altitude Long-Range Aerial Camera* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2019.

作者简介:



李 军(1979—),男,辽宁葫芦岛人,博士,副研究员,2012 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事航空成像与测量技术研究。
E-mail: junly8076@163.com



黄厚田(1986—),男,黑龙江绥化人,硕士,副研究员,2011 年于哈尔滨工业大学获硕士学位,主要从事航空成像伺服控制技术研究;E-mail: huanghoutian@sina.com