引文格式：赵浩博. 拼接型航测相机影像仿真方法研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 14-17. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.08.004

拼接型航测相机影像仿真方法研究

赵浩博[1]
（1. 中国石油大学（北京）克拉玛依校区，新疆 克拉玛依 834000）

摘　要：幅宽是航空测绘相机的重要技术指标，视场拼接是航测相机获得大幅宽的有效技术手段。拼接型测绘相机在生产前按相机参数进行航空影像的仿真，预估对测绘成图的影响，对评价测绘相机设计参数的合理性十分必要。为模拟拼接型航测相机宽幅遥感影像，从航空摄影测量基础入手，提出了一种三相机外视场拼接型航测相机的影像仿真方法，首先选取待仿真区域的DSM和DOM数据，并设置影像的内、外方位元素；其次依据共线方程和对应区域的DSM数据，计算影像上每一个像素点的像点坐标；最后在DOM上获取灰度值，并赋给影像像素。相比机载实际宽幅遥感影像，仿真图像具有真实模拟航摄参数影响，高分辨率、宽视场仿真等特点，仿真方法可为机载测绘相机的研制提供准确的数据支撑。

关键词：拼接型测绘相机；航空影像；摄影测量；共线方程；仿真
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）08-0014-04

Research on Image Simulation Method of Stitched Aerophotogrammetry Camera

ZHAO Haobo[1]
(1. China University of Petroleum-Beijing, Karamay 834000, China)

Abstract: The width is an important technical index for aerophotogrammetry camera, and field of view stitching is an effective technical means for aerophotogrammetry cameras to obtain large widths. Before production, a stitched mapping camera performs aerial image simulation based on camera parameters to estimate the impact on mapping, which is essential for evaluating the rationality of the design parameters of the mapping camera. In order to simulate the wide-range remote sensing image of a mosaic aerial camera, we proposed animage simulation method for a three-camera external field of view mosaic aerial camera by starting with the fundamentals of aerophotogrammetry. Firstly, we selected DSM and DOM data of area to be simulated and set the internal and external orientation elements of image.Then, we calculated the image coordinates of each pixel on the image based on the collinear equation and the DSM data of corresponding region. Finally, we obtained grayscale values on the DOM and assigned to image pixels. Compared to actual airborne wide-range remote sensing images, simulated images have the characteristics of truly simulating the effects of aerophotogrammetry parameters, high resolution and wide field of view simulation. Therefore, this simulation method can provide accurate data support for the development of aerophotogrammetry camera.

Key words: stitched aerophotogrammetry camera, aerial image, photogrammetry, collinear equation, simulation

航空测绘相机是基础地理信息数据获取的重要设备之一，相机系统的指标参数设计和生产水平，直接影响航空摄影测量的应用效果[1-3]。采用视场拼接实现大幅宽是有效的技术途径[4]，仿真拼接型航测相机在内、外方位元素作用下的航摄成像效果，对相机指标的合理性进行评价，辅助验证所能达到的测绘精度具有重要实用价值。本文针对三相机外视场拼接型航测相机，基于仿真区域内的数字表面模型（DSM）和数字正射影像（DOM），采用基础影像结合相机参数、作业参数和内外方位元素的多参数结合方式仿真，通过影像仿真为航空测绘相机的研制提供仿真数据支撑。

1　多面阵外视场拼接设计

航空面阵测绘相机不断向高分辨率、宽视场方向发展，要求相机幅宽不断增大[5-6]。为增大幅宽设计了一种三相机外视场拼接成像方式，系统由三台独立的量测型面阵相机组成，每台相机经过实验室精密单相机检校。单台相机焦距135 mm，像元数14 204×10 652，像元尺寸3.76 μm，拼接后虚拟单中心影像幅面设计为38 000×10 652。

在理论上多面阵相机外视场拼接将会出现多个投影中心，为减少由多中心投影向单中心投影转换引起的误差，设计中使各相机投影中心之间距离尽可能最

收稿日期：2023-02-27；修回日期：2023-04-21。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（42171448）。
作者简介：赵浩博（2002—），研究方向为计算机软件及数据仿真技术，E-mail：zhaohaobo20220917@163.com。

小。理论推导表明，多相机外视场拼接方式投影转换过程对精度影响较小，对硬件的加工精度要求相对较低[7-8]。系统采用的三台相机按一定的几何结构固定，然后同步拍摄，利用处理软件和检校参数将获取的影像拼接成一幅完整的虚拟影像。

三相机外视场拼接成像具有飞行旁向幅宽大，飞行航向视场窄的特点。在突破高帧频大重叠度成像、小基高比高精度匹配、跨航带立体测图等关键技术的基础上，具备获取测绘精度高、正射质量高的测绘产品的能力。与更大幅面相机相比，三相机拼接系统低成本、轻量化、高集成度，搭载于中型无人机平台可开展高效率航摄作业。但三相机系统拼接几何连接条件弱于SWDC等四相机拼接形式，会累积误差，对检校及后续数据处理有较高要求。因此，研究拼接型航测相机影像仿真技术，使用高还原度的仿真影像开展弱几何条件的高精度仿真具有重要意义。主要针对该航测系统设计，开展影像仿真研究，直观预估航摄参数，内、外方位元素等参数变化对最终影像的影响。

2　多参数仿真方法

为了实现航空测绘相机影像仿真，设计了基于多参数的航摄影像仿真方法，具体仿真流程如图1所示。

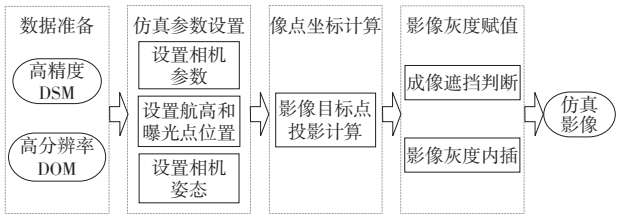


图1　航摄影像仿真流程

2.1　仿真参数

仿真参数包含相机和航摄参数，以及内、外方位元素。相机参数包括像元尺寸、单相机像素数，航摄参数需设定航摄比例尺、相对航高、航向、航向重叠度及旁向重叠度等。

内方位元素包含主点、主距和畸变。主点主距作为仿真的输入参数，畸变则在仿真过程中计算。外方位元素参数涉及因素较多[9-10]，主要包含组合式相机整体外方位元素、组合式相机各子相机相对外方位元素、组合式相机各子相机外方位元素。各子相机相对外方位元素根据相机设计模型参数作为输入条件，相机整体外方位元素、各子相机外方位元素在仿真过程中求解。

1）相机内方位元素。外视场拼接相机为3个设计相同的独立相机，仿真中3个相机主距、主点相同，主点用像素坐标 (x_0, y_0) 表示，相当于影像整体平移，主距用 f 表示。畸变是指光学系统对物体所成的像相对于物体本身而言的失真程度，是光学透镜的固有特性，主要包括径向畸变与切向畸变[11-12]，仿真中3个相机畸变模型相同，径向畸变模型如式（1）所示，切向畸变模型如式（2）所示。

$$\begin{cases}\Delta x_{RD}=(x-x_0)\left(k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6\right)\\ \Delta y_{RD}=(y-y_0)\left(k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6\right)\end{cases}\tag{1}$$

$$\begin{cases}\Delta x_{TD}=2p_1(x-x_0)(y-y_0)+p_2\left[r^2+2(x-x_0)^2\right]\\ \Delta y_{TD}=p_1\left[r^2+2(y-y_0)^2\right]+2p_2(x-x_0)(y-y_0)\end{cases}\tag{2}$$

式中，$r^2=x^2+y^2$，k_1、k_2、k_3、p_1、p_2 为畸变参数，可根据选用镜头设置。Δx_{RD}、Δy_{RD}、Δx_{TD}、Δy_{TD} 为像元（x，y）处的改正值，（x，y）为仿真图像像元坐标。

2）组合式相机整体外方位元素。拼接型相机整体外方位元素包括线元素与角元素。外方位线元素 $T=(X_s, Y_s, Z_s)$，为相机成像中心在物方坐标系下的三维坐标。外方位角元素包括相机方位角 κ、俯仰角 ϕ、横滚角 ω，为计算方便将组合式相机整体外方位元素改写为方向余弦形式。

$$\begin{cases}a_1=\cos\varphi\cos\kappa-\sin\varphi\sin\omega\sin\kappa\\ a_2=-\cos\varphi\sin\kappa-\sin\varphi\sin\omega\sin\kappa\\ a_3=-\sin\varphi\cos\omega\\ b_1=\cos\omega\sin\kappa\\ b_2=\cos\omega\cos\kappa\\ b_3=\cos\omega\cos\kappa\\ c_1=\sin\omega\cos\kappa+\cos\varphi\sin\omega\sin\kappa\\ c_2=-\sin\varphi\sin\kappa+\cos\varphi\sin\omega\sin\kappa\\ c_3=\cos\varphi\cos\omega\end{cases}\tag{3}$$

可以得到相机整体外方位元素旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为：

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}a_1 & a_2 & a_3\\ b_1 & b_2 & b_3\\ c_1 & c_2 & c_3\end{bmatrix}\tag{4}$$

3）组合式相机影像外方位元素模型参数。相机系统由三台同步曝光的独立相机组成，1台相机下视，另外2台相机分别左、右视以拓展幅宽。相机系统3台相机间的相对位置关系是固定的，将组合式相机整体外方位元素参数作为下视相机的外方位元素，左视、右视相机的外方位元素可以根据下视相机的外方位元素计算出来。

下视相机角外方位元素构成的旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_{\text{nadir}}$ 为：

$$\boldsymbol{R}_{\text{nadir}}=\boldsymbol{R}\tag{5}$$

下视相机线外方位线元素 $\boldsymbol{T}_{\text{nadir}}$ 为：

$$\boldsymbol{T}_{\text{nadir}}=\boldsymbol{T} \tag{6}$$

将左视相机与下视相机的相对外方位元素设定为 $\boldsymbol{R}_{\text{left2nadir}}$ 、 $\boldsymbol{T}_{\text{left2nadir}}$ 。其中 $\boldsymbol{R}_{\text{left2nadir}}$ 为左视相机相对下视相机坐标系的旋转矩阵， $\boldsymbol{T}_{\text{left2nadir}}$ 为左相机在下视相机坐标系的平移位置，上述2个参数由三拼测绘相机相对空间位置决定。则左视相机的外方位元素可推导为：

$$\boldsymbol{R}_{\text{left}}=\boldsymbol{R}_{\text{left2nadia}}\cdot\boldsymbol{R}_{\text{nadir}} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{T}_{\text{left}}=\boldsymbol{T}_{\text{nadir}}+\boldsymbol{R}_{\text{nadir}}^{-1}\cdot\boldsymbol{T}_{\text{left2nadir}} \tag{8}$$

式中， $\boldsymbol{R}_{\text{left}}$ 为左视相机角外方位元素构成的旋转矩阵； $\boldsymbol{T}_{\text{left}}$ 为左视相机线外方位线元素矩阵。同理，右视相机的外方位元素为：

$$\boldsymbol{R}_{\text{right}}=\boldsymbol{R}_{\text{right2nadia}}\cdot\boldsymbol{R}_{\text{nadir}} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{T}_{\text{right}}=\boldsymbol{T}_{\text{nadir}}+\boldsymbol{R}_{\text{nadir}}^{-1}\cdot\boldsymbol{T}_{\text{right2nadir}} \tag{10}$$

式中， $\boldsymbol{R}_{\text{right}}$ 为右视相机角外方位元素构成的旋转矩阵； $\boldsymbol{T}_{\text{right}}$ 为右视相机线外方位线元素矩阵。

2.2 计算像点坐标

针对拼接相机中的每台独立相机，当影像内方位元素、外方位线元素、外方位角元素已知时，按照如式（11）所示的共线方程计算出仿真影像对应的像点坐标。

$$\begin{cases} x-x_0+\Delta x_{RD}+\Delta x_{TD}=-f\dfrac{a_1(X-X_S)+b_1(Y-Y_S)+c_1(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S)+b_3(Y-Y_S)+c_3(Z-Z_S)} \\ y-y_0+\Delta y_{RD}+\Delta y_{TD}=-f\dfrac{a_2(X-X_S)+b_2(Y-Y_S)+c_2(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S)+b_3(Y-Y_S)+c_3(Z-Z_S)} \end{cases} \tag{11}$$

式中， (x,y) 为以像主点为原点的像平面坐标系，o−xy 为目标点在仿真影像上对应的像点坐标； (x_0,y_0) 为当前相机的主点坐标； (X,Y,Z) 和 (X_S,Y_S,Z_S) 分别为地面点和相机中心在物方坐标系下的三维坐标； f 为相机主距； Δx_{RD} 、 Δy_{RD} 为像点坐标 (x,y) 的径向畸变修正量； Δx_{TD} 、 Δy_{TD} 为像点坐标 (x,y) 的切向畸变修正量； $a_1\sim c_3$ 为方向余弦，从相机旋转矩阵中获取。

2.3 赋值影像位置参数和灰度

从仿真区域DSM数据中获取影像目标点的位置信息，灰度和纹理信息在对应区域的DOM上获取。建立共线方程的几何模型，按需求的仿真参数生成仿真影像，以模拟航摄拍照的过程。采用直接映射方式将仿真区域DOM的像素投射到仿真影像上，给影像上的每一个像素赋上灰度实现影像的仿真。当仿真影像分辨率高于所使用的DOM时，需要通过插值方式计算影像灰度[12−14]。

仿真中地面位置在构建透视成像过程中存在因地形起伏而相互遮挡[15]的情况，影像仿真过程中需考虑地形起伏对仿真结果的影响。针对这种情况，在被赋值像素存在多个地面对应位置点时，标记每次投影赋值的像素所对应的地面位置点的坐标，并计算其与摄影中心的空间距离，选择距离最短的地面位置点为候选点，并用其DOM上的灰度值作为待赋值像素的灰度值。

候选点距离的计算公式为：

$$d=\sqrt{(X-X_S)^2+(Y-Y_S)^2+(Z-Z_S)^2} \tag{12}$$

式中， (X,Y,Z) 和 (X_S,Y_S,Z_S) 分别为地面点和相机中心在物方坐标系下的三维坐标。

3 仿真实验

对本文提出的仿真方法进行仿真实验。仿真实验数据为2021年12月获取的湖南汨罗区域航摄影像生成的DSM和DOM，区域地貌主要为植被、土壤，包含河流和人工建筑。仿真实验的主要参数为相机主距135 mm，像元尺寸3.76 μm，主点为（0，0），航摄比例尺为1∶2 000。

仿真实验测试了具有代表性的2组数据，针对不同姿态和畸变情况进行组合，主要情况如表1所示。

表1 仿真影像试验概况

试验数据	仿真地形	影像姿态情况	影像畸变
1	丘陵地	无横滚、俯仰	无畸变
2	丘陵地	横滚角20°，俯仰角20°	畸变

3.1 稳态工作影像仿真结果

按照相机参数，对单曝光点的影像进行仿真。其中下视影像俯仰、横滚角均为0°，影像不设置畸变。图2为数据1仿真影像结果。从仿真结果可以看出，下视影像符合水平影像的特征，而左视、右视影像呈现明显的斜视投影的特点。



图2 仿真影像（左、下、右）

为了进一步对比下视、左视、右视图的差异，对数据1同一区域分别仿真了下视、左视、右视影像，从图3中可以看出，下视图整幅画面的比例是一致的，而左视图和右视图存在较明显的左右比例不一致的情况，这与斜视影像呈现的透视效应是相符的。



图3　同区域不同相机仿真结果（左、下、右）

3.2　非稳态工作航测影像仿真

考虑相机成像存在畸变，设 $k_1=5\times10^{-9}$、$k_2=10^{-10}$、$k_3=2\times10^{-10}$、$p_1=5\times10^{-7}$、$p_2=10^{-6}$ 为畸变参数。按照飞机以较大横滚角飞行的工作状态，设置横滚角为20°、俯仰角为20°。

由于引入了镜头畸变，影像呈现出桶形变形，特别是左、右视影像边缘变形明显。一方面由于影像倾斜呈现的梯形变形造成右侧影像压缩，另一方面在径向也存在目标扭曲现象，这与常见的镜头畸变情况相符，表明本文采用的影像仿真结果与实际航摄成图是相符合的。

3.3　地形起伏区域成像遮挡处理情况

采用2.3节所述的方法，在成像角度较大且地形起伏明显区域，能够正确计算地物在同一光线下的遮挡关系。如图4所示，算法正确计算了山坡和背坡方向房屋的遮挡关系，未出现“鬼影”现象。

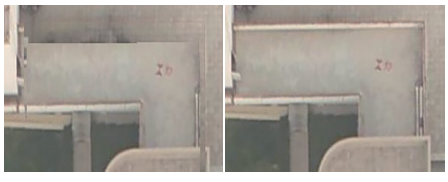


图4　含畸变大横滚角仿真影像（左、下、右）

为进一步显示地形起伏情况下遮挡判断方法的正确性和有效性，采用起伏更为明显的楼房区域影像进行试验，以房屋的三维模型替代DSM数据进行仿真（图5）。图6中左图为未采用遮挡判断的仿真结果，明显可以看出原本属于屋顶围栏的区域被填充了地面的纹理。右图采用了遮挡判断，能够真实的表现出屋顶围栏的信息。



图5　地形起伏区域仿真处理



a 未采用遮挡判断　　b 采用遮挡判断

图6　楼房区域影像的遮挡判断情况

4　结　语

本文提出一种三相机外视场拼接宽幅相机影像仿真方法，该方法应用仿真区域的真实高分辨率DSM和DOM数据进行实验，实验表明采用本文方法生成的仿真影像与真实航空影像具有很强的相似性，有效仿真各种航摄条件下宽幅相机成像效果，以及起伏地形遮挡等情况精细仿真结果。仿真影像的几何参数可控，可预估不同相机参数或复杂条件下的生成影像。该方法为拼接型航测相机提供各种航摄条件下直观仿真影像，为后续成图精度验证提供了较好的数据支撑，在遥感图像仿真领域具有较高的应用价值。

参考文献

[1] 康锋,史凌亚. 倾斜摄影技术在城市三维建模中的应用探讨[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2020,20(2):40-42

[2] 曹亚明,肖奇,杨震. 仿真影像作为模板的遥感影像小目标检测方法[J]. 计算机工程与应用,2022,58(17):115-123

[3] 张剑清,潘励,王树根. 摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2009

[4] 周海岸,黄巧林,林招荣,等. 双镜头航空相机投影转换误差分析[J]. 航天返回与遥感,2017,38(2):86-94

[5] 刘锐. 无人机航空摄影的困境与出路[J]. 地理空间信息,2018,16(4):28-30

[6] Liu S Y, Wu X F, Liu W, et al. Fast Aerial Image Simulations Using One Basic Mask Pattern for Optical Proximity Correction[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2011,29(6):103-106

[7] 刘先林,邹友峰,郭增长,等. 大面阵数字航空摄影原理与技术[M]. 河南:河南科学技术出版社,2013

[8] 张建花,张杰. 基于多视场拼接的飞机偏心定位距精确测量[J]. 应用光学,2018,39(3):379-384

[9] 王慧. 面阵CCD航测相机成像模型与处理技术[D]. 郑州:信息工程大学,2006

[10] 乔瑞亭,孙和利,李欣. 摄影与空中摄影学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2008

[11] Brown D C. Close-range Camera Calibration[J]. Photogrammetric Engineering,1971,37(8):855-866

[12] Kengo F J, Masaki Y, Satoshi M, et al. Aerial Imaging Steganography Method for Aerial Imaging by Retro-reflection with Dual Acrylic Ball[J]. Optical Review, 2022, 29(3):250-260

[13] 徐小芹,沈佳洁,吴友凤,等. 航空遥感影像的变化检测[J]. 地理空间信息,2011,9(2):67-68

[14] 张金玲. 宽场景仿真中的图像配准算法[J]. 微型机与应用,2012,31(18):38-41

[15] 王云丽. 无人机航拍视频正射全景拼图技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2014