

航空线阵摆扫式相机成像仿真

莫德林^{1,2}, 张永生¹, 王涛¹, 张艳³

¹信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450001;

²地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054;

³信息工程大学数据与目标工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 成像仿真是相机研制必不可缺的步骤。航空线阵摆扫式相机具有距离远、成像倾角大的特点, 容易导致成像仿真过程中坐标投影计算迭代不收敛。针对这一问题, 提出一种视向量分段迭代的坐标投影计算方法。首先将迭代窗口内的视向量进行分段, 根据像点坐标和其所在扫描行的外方位元素计算各分段处的高程与对应的地面点的高程之差, 寻找差值最小的分段; 然后在该分段处继续构建迭代窗口进行计算, 直至高程差值的最小值小于给定的阈值, 得到像点坐标对应的地面点三维坐标; 最后将该地面点对应的正射影像上的灰度值赋予模拟影像的像点, 生成仿真影像。通过三组不同地形的实验数据成像仿真结果表明, 该方法成像仿真的精度高于 0.005 pixel, 且其稳健性较高, 能够适用于大倾角成像方式的成像仿真。

关键词 遥感; 坐标投影; 线阵摆扫; 成像仿真; 视向量分段

中图分类号 P236

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0728002

Imaging Simulation of Airborne Linear Whiskbroom Camera

Mo Delin^{1,2}, Zhang Yongsheng¹, Wang Tao¹, Zhang Yan³

¹*Institute of Geographical Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China;*

²*State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an, Shaanxi 710054, China;*

³*Institute of Data and Target Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China*

Abstract Imaging simulation is an essential step in camera development. The aerial linear whiskbroom camera has the characteristics of long distance and large imaging angle, which easily leads to the coordinate projection calculation in the imaging simulation process is iteratively non-convergence. To solve this problem, a new iterative coordinate projection calculation method based on visual vector segmentation is proposed. Firstly, the visual vector is segmented in the iteration window, and then the elevation difference between each segmentation and the corresponding ground point is calculated according to the coordinates of the image point and the exterior orientation element of the scan line. The segmentation of minimum elevation difference is found. Then the iterative window continually built at the segmentation is calculated until the minimum elevation difference is less than the given threshold, thus the image coordinates corresponding to three-dimensional coordinates of the ground point are obtained. Finally, the gray value of the orthographic image is given to the simulated pixel point corresponding to the ground point to generate simulation images. The imaging simulation results of the experimental data from three different terrains show that the accuracy of this imaging simulation method is higher than 0.005 pixel. Its robustness is higher and it can be applied to the imaging simulation of large-angle imaging method.

Key words remote sensing; coordinate projection; linear whiskbroom; imaging simulation; visual vector segmentation

OCIS codes 280.4788; 010.0280; 010.7295

收稿日期: 2018-01-22; 收到修改稿日期: 2018-03-05

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(GFZX04032201-1-1)、地理信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目(SKLGIE2017-M-3-6)

作者简介: 莫德林(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事航空航天相机几何处理方面的研究。

E-mail: steven.mo@whu.edu.cn

导师简介: 张永生(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事航空航天摄影测量与遥感方面的研究。

E-mail: yszhang2001@vip.163.com

1 引 言

传感器成像仿真技术是评价传感器成像质量的重要手段,是新型传感器研制的重要内容之一。为了对新型传感器的成像能力进行评价,在其设计论证和后续数据处理、应用阶段,都需要对传感器的成像进行仿真^[1-2]。通过新型传感器的成像仿真,能够预先构建其应用模型,进行新应用领域的探索和应用技术的预先研究^[3-4]。新型传感器成像仿真的重要性使其成为国内外研究人员关注的热点问题。国外对该问题的研究起步较早,自20世纪中期就开始进行传感器物理仿真方法的研究。20世纪80年代以来,计算机技术的快速发展推动了传感器成像仿真技术的进步,市场上涌现了一批较为成熟的商业成像仿真软件,如DIRSIG^[5-7]、SENSOR^[8]、Vega^[9]等系列仿真模块,但这些软件的具体技术细节并未对外公布,难以获取相关信息。国内对传感器成像仿真技术的研究起步较晚,总体来说现阶段与国外还有一定的差距^[10]。

目前,对于线阵传感器的成像仿真研究主要针对推扫式成像传感器,如文献[2]和文献[11]分别对航天、航空推扫式三线阵相机立体影像模拟方法进行了研究,文献[12]模拟了MOMS-02三线阵传感器影像,文献[13]模拟了IKNOS线阵传感器影像。现有传感器成像仿真方法大致可以分为两类:一是通过地物场景建模,利用已有的经验模型,通过输入当地的地形地物信息以及查找地物波谱库进行成像仿真,其效率和精度通常较低;二是利用已有遥感影像和地形数据进行成像仿真,改进了经验模型的不足之处,特别是在构建地表辐射场时,准确性和效率都得到提升,因其操作简单、精度较高而被广泛使用^[14]。

近年来,随着“高分辨率、大视场”技术指标^[15]的提出,通过线阵摆扫式成像来扩大视场从而获取更大范围的地面影像的这种方式受到越来越多研究者的关注。航空线阵摆扫式相机是我国正在发展的一类高分辨率航空相机,目前国内对于这类相机的研究主要集中在相机的物镜设计^[15]、扫描稳像和像移补偿^[16-18]、检焦调焦^[19]等方面,但对其成像仿真方面的研究较少。航空线阵摆扫式相机是在飞行过程中沿穿轨方向进行扫描成像,其成像几何关系较复杂,相机内部存在多部件运动,不能简单套用传统线阵推扫式相机的成像仿真方法。此类相机成像仿真的首要问题是其成像几何关系的仿真,即像点与物点之间严格几何关系的模拟。由于其距离远、成

像倾角大的特点导致其在仿真成像过程中的坐标投影阶段容易出现迭代不收敛的问题,使得仿真影像上出现漏洞。因此,本文提出一种视向量分段迭代坐标投影计算方法,它能够解决坐标投影迭代不收敛的问题,生成完整无漏洞的仿真影像,用于相机成像能力的评估,为后续几何检校和几何处理提供数据基础。

2 线阵摆扫式相机成像仿真

对线阵摆扫式相机进行成像仿真,可使用表示被摄地区真实状况的数字正射影像模型(DOM)和数字高程模型(DEM)来表达成像时获取的地物反射率信息和物方三维坐标信息。线阵摆扫式相机成像仿真主要涉及以下两个方面的内容:一是相机严格成像模型的构建,即确定像方二维坐标与物方三维坐标之间的映射关系;二是仿真影像的生成,即逐点计算仿真影像上的像素灰度值。

2.1 线阵摆扫式相机严格成像模型

线阵摆扫式相机的成像过程如图1所示,其具有与传统测绘相机不同的特点,因此需要对其结构和成像原理进行分析,构建与其相适应的严格成像模型。与固定的推扫式成像扫描角不同,摆扫式成像的扫描角是随着相机摆扫轴的转动而发生变化的。因此,在构建线阵摆扫式相机的严格成像模型时,其总体旋转矩阵应包含扫描角的旋转矩阵:

$$R' = R(\varphi, \omega, \kappa)R(\alpha) \quad (1)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_i \cdot i$$

式中, R' 为总体旋转矩阵, $R(\varphi, \omega, \kappa)$ 、 $R(\alpha)$ 分别为姿态角和扫描角对应的旋转矩阵, α 为扫描角, α_0 为起始摆扫角度, α_i 为扫描角变化率, i 为扫描行的编号。

线阵摆扫式影像的每一扫描行满足严格的中心投影关系,在获取总体旋转矩阵后,共线条件方程的正解和反解形式可以表示为:

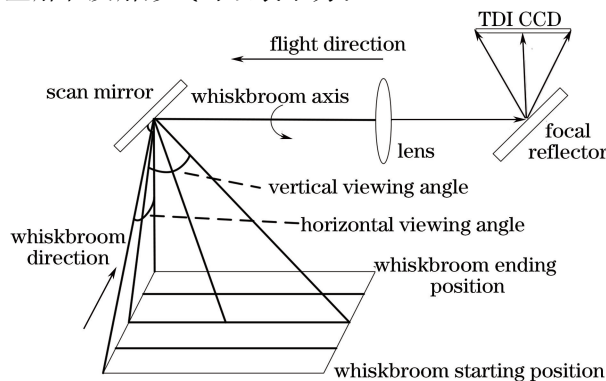


图1 线阵摆扫式相机成像示意图

Fig. 1 Schematic of linear whiskbroom camera imaging

$$\begin{cases} x=0 = -f \frac{a_{1i}(X-X_{Si}) + b_{1i}(Y-Y_{Si}) + c_{1i}(Z-Z_{Si})}{a_{3i}(X-X_{Si}) + b_{3i}(Y-Y_{Si}) + c_{3i}(Z-Z_{Si})} \\ y = -f \frac{a_{2i}(X-X_{Si}) + b_{2i}(Y-Y_{Si}) + c_{2i}(Z-Z_{Si})}{a_{3i}(X-X_{Si}) + b_{3i}(Y-Y_{Si}) + c_{3i}(Z-Z_{Si})} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} X = X_{Si} + (Z - Z_{Si}) \frac{a_{1i}x + a_{2i}y - a_{3i}f}{c_{1i}x + c_{2i}y - c_{3i}f} \\ Y = Y_{Si} + (Z - Z_{Si}) \frac{b_{1i}x + b_{2i}y - b_{3i}f}{c_{1i}x + c_{2i}y - c_{3i}f} \end{cases}, \quad (3)$$

式中, (x, y) 为像点的像平面坐标, f 为相机焦距, X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si} 为第 i 条扫描行对应的外方位线元素, $a_{1i}, b_{1i}, \dots, c_{3i}$ 为旋转矩阵 R' 的元素, (X, Y, Z) 是物方点坐标。

2.2 仿真影像生成

利用 DOM 与 DEM 进行成像仿真是 DOM 生成的逆过程, 一般采用间接法, 即已知像点坐标利用 (3) 式计算其对应的物方三维坐标。分析共线条件方程可以发现, 若已知地面点的三维坐标, 则利用 (2) 式可计算出其对应的二维像点坐标; 反之, 若已知二维像点坐标, 却不能直接计算得到其对应的地面点三维坐标。这是因为从三维空间(地面)到二维空间(影像)的映射并不是可逆的, 由三维到二维伴随着信息的损失, 而由二维到三维则必须补充相应的信息^[20]。因此, 从影像的二维平面投影到物方三维空间, 需要首先给定一个高程值, 然后利用共线条件方程进行迭代求解, 直到投影光线上的高程值与 DEM 上该处的高程值之差小于一定阈值为止。这个方法称为迭代摄影测量方法^[21-22], 也可以称之为常规迭代计算方法, 其原理如图 2 所示, 其基本流程如下:

- 1) 设某一像点 (x, y) 对应的地面点高程近似值为 Z_0 ;
- 2) 代入 (3) 式, 求出 (X, Y) ;
- 3) 由 (X, Y) 从 DEM 中内插得到 Z_1 ;
- 4) 将 Z_1 作为初值, 重复步骤 1) ~ 3), 直至 $Z_{i-1} - Z_i < \Delta Z$ 为止;
- 5) 输出最后计算结果 (X, Y, Z) 。

常规迭代计算方法在垂直摄影情况下或地形起伏不大的地区通常能够收敛。然而, 以下两种情形会导致迭代计算过程的不收敛: 情形一[如图 3 (a) 所示], 当投影光线的倾斜度 α (投影光线与水平面的夹角) 与地面坡度 θ 相等时, 迭代计算将陷入死循环而无法跳出, 此时前后两次求出的地面点正好分别位于一个矩形的对角线顶点; 情形二[如图 3 (b)

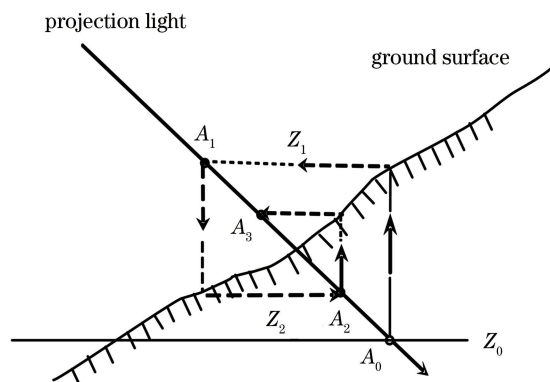


图 2 迭代摄影测量法计算过程
Fig. 2 Calculation process of iteration photogrammetry method

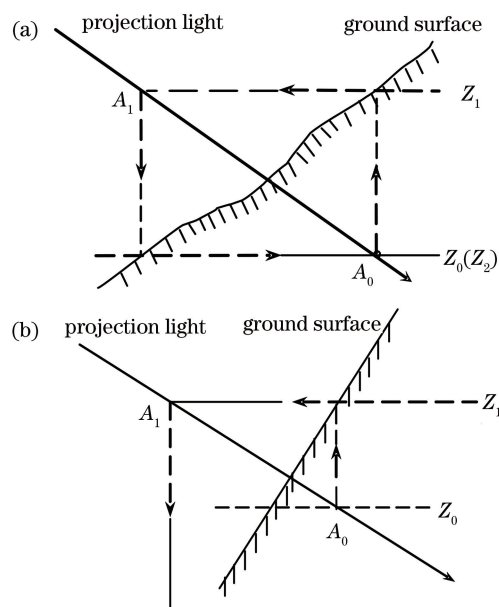


图 3 坐标投影计算时迭代不收敛的情形。
(a) $\alpha = \theta$; (b) $\alpha < \theta$

Fig. 3 Situation of iterative non-convergence of coordinate projection calculation. (a) $\alpha = \theta$; (b) $\alpha < \theta$

所示], 当投影光线的倾斜度 α 小于地面坡度 θ 时, 迭代计算将无法趋于目标位置而发散, 或随地面高程变化产生无规则摆动从而不能收敛。

针对迭代计算不收敛的情形, 文献^[23]提出一种改进的迭代计算方法, 如图 4(a) 所示, 求 DEM 上 1 号点和 2 号点的连线与投影光线的交点, 此点将更逼近待求的目标点。过 1, 2 点直线方程为:

$$\begin{cases} X - X_1 = (Z - Z_1) \frac{X_2 - X_1}{Z_2 - Z_1} \\ Y - Y_1 = (Z - Z_1) \frac{Y_2 - Y_1}{Z_2 - Z_1} \end{cases} \quad (4)$$

消去 Z 得:

$$\begin{aligned} (Y_2 - Y_1)X - (X_2 - X_1)Y = \\ (Y_2 - Y_1)X_1 - (X_2 - X_1)Y_1. \end{aligned} \quad (5)$$

将(3),(5)式联立,可得交点的平面坐标 (X, Y) ,然后根据此 (X, Y) 值在 DEM 中内插得出相应的高程值,接着重复 1,2 点的方法得到 3,4 点,计算这两点连线与投影光线的交点,继续进行迭代计算,直到收敛或迭代次数超过某个数值。这种方法在 DEM 坡度与投影光线正向时是有效的,但当 DEM 坡度与投影光线背向时,如图 4(b)所示,投影光线与 1,2 点连线的交点将远离待求的目标点,从而导致该方法无法收敛。

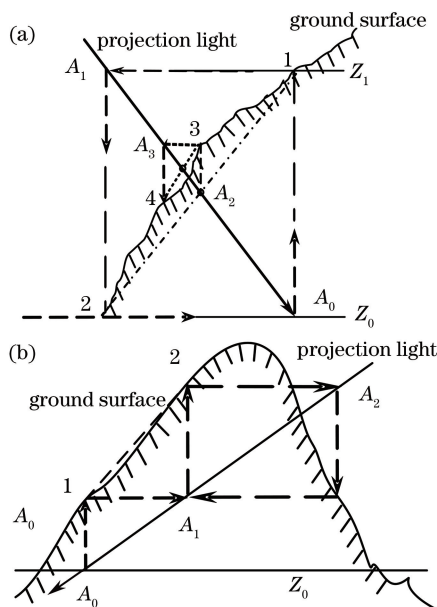


图 4 改进的迭代计算方法。(a)收敛的情况;
(b)非收敛的情况

Fig. 4 Improved iterative calculation method.

(a) Convergent situation; (b) non-convergent situation

线阵摆扫式相机是远距离、成像倾角大的相机,这种成像方式导致在成像仿真时很容易出现上述迭代不收敛的问题,因此下面提出一种视向量分段迭代计算方法,以正确生成仿真影像。

3 视向量分段迭代坐标投影计算方法

对于常规迭代计算方法和改进的迭代计算方法而言,其每次迭代更新的是视向量上的高程值,而迭代计算的目标是寻找某一高程值对应的视向量上的

点与地面点足够靠近。因此,对于迭代不收敛的情况,可以考虑在视向量与地面的交点附近构建一个迭代窗口,对窗口内的视向量进行分段,逐个计算每个分段处视向量上的点与其对应的地面点之间的距离,在距离最小处继续构建迭代窗口,因此经过有限次迭代计算后一定能找到视向量上与地面点的距离满足要求的点。下面详细介绍其原理及实现过程。

3.1 算法原理

视向量分段迭代算法的基本原理如图 5 所示。其基本思想是:构建一个迭代窗口,其高程值范围为 $[Z_{\min}, Z_{\max}]$,对窗口内的视向量按高程间隔 ΔZ 分为 N 段,计算每个分段处视向量上的点与其对应的地面点之间的高程差 Δh ,寻找 Δh 最小的高程值 Z_{new} ,更新迭代窗口,继续进行分段,直至 Δh 小于一定阈值(一般设置为 DEM 网格的十分之一)为止。该算法需要考虑三个方面的问题:初始迭代窗口如何构建,视向量分段数目如何确定,迭代窗口如何更新。

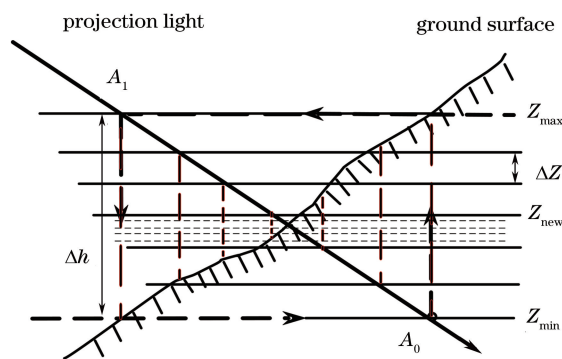


图 5 视向量分段迭代计算基本原理
Fig. 5 Basic principle of visual vector
segmentation iterative calculation

初始迭代窗口需包含视向量与地面的交点,这是算法收敛到正确的点的前提和保证。另一方面,初始迭代窗口的大小关系到算法收敛速度的快慢。构建全局窗口,即将整个 DEM 的高程范围作为迭代窗口,算法能收敛到正确的值,但全局搜索的效率较低,尤其是在高程起伏较大的山区,所需的分段数和迭代次数较多。从改进的迭代计算方法不收敛的情形可见,其都是在视向量与地面交点的上下循环或摆动。因此,可首先按照改进的迭代计算方法进行计算,当迭代超过一定次数 $T(T=30)$ 时,进入视向量分段迭代算法。统计在改进的迭代计算过程中的 DEM 高程最大值和最小值,构建初始迭代窗口 $\Delta H = Z_{\max} - Z_{\min}$ 。这样既可保证算法能收敛到正确的值,也能缩小搜索范围,避免全局搜索效率低下

的问题。

初始迭代窗口确定后以及后续迭代窗口更新后,都涉及到迭代窗口内视向量分段数确定的问题。如何设置分段间隔,决定了需要进行共线条件方程计算的次数,进而影响算法的收敛速度。因收敛阈值设置为 $V_{GSD}/10$,当分段间隔 $\Delta Z \leq V_{GSD}/10$ 时则必然收敛。若使用穷举法(因其在初始迭代窗口内进行穷举搜索,称之为局部穷举法),即直接设置分段间隔为 $V_{GSD}/10$ 进行搜索,则算法必然收敛,但其效率较低,尤其是在初始迭代窗口较大的情况下。为了提高算法的效率,采用由粗到精的分段策略,即首先设置较大的分段间隔,以缩小搜索窗口,然后减小分段间隔,快速找到所求目标的高程位置。然而,由于不同的点其初始迭代窗口大小不一致,迭代窗口更新后其大小也发生变化,因此每次迭代窗口更新后需要自适应地调整分段间隔,通过构建合理的 ΔZ 使得收敛速度最快。可根据以下公式确定分段间隔:

$$\Delta Z = (1/m)^{k-2} V_{GSD}, \quad (6)$$

式中, V_{GSD} 为 DEM 的格网间隔, $m = 1, 2, 3, \dots, 10$

为格网间隔的倍数, $k = 1, 2, 3, \dots$ 为迭代次数。

格网间隔的倍数 m 的取值是影响收敛速度的关键因素。在实际中,初始迭代窗口 ΔH 为格网间隔的 10 至 100 倍。取 $m = 1$ 时,即初始分段间隔使用 1 倍格网间隔,则第一次迭代所需的共线条件方程计算次数为 $N = \Delta H / V_{GSD}$;第二次迭代时窗口宽度为 $\Delta H = V_{GSD}$,此时令 $\Delta Z = V_{GSD}/10$ 可满足收敛条件,两次迭代所需的共线条件方程计算次数共为 $N + 10$ 。虽然迭代次数较少,但当 ΔH 增大时,所需的共线条件方程计算总次数也随之线性增加,达不到快速收敛的目的,因此需要考察 m 取其他值时的情形。取 $m = 2$ 时,第一次迭代所需的共线条件方程计算次数为 $N/2$;第二次迭代时窗口宽度为 $\Delta H = 2V_{GSD}$,此时 $\Delta Z = V_{GSD}$,则第二次迭代所需的共线条件方程计算次数为 2;继续经过 4 次迭代后, $\Delta Z = V_{GSD}/16$,满足收敛条件,所需的共线条件方程计算次数共为 $N/2 + 5 \times 2$ 。同理,可计算 m 取其他值时的共线条件方程计算总次数。表 1 列举了 $N = 1 \sim 9, 10 \sim 100, m = 1 \sim 10$ 时所需的共线条件方程计算总次数。

表 1 不同分段间隔所需的共线条件方程计算次数

Table 1 Calculation times of collinear condition equation required for different section intervals

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	$N + 10$	$N/2 + 10$	$N/3 + 15$	$N/4 + 12$	$N/5 + 15$	$N/6 + 18$	$N/7 + 21$	$N/8 + 24$	$N/9 + 27$	$N/10 + 20$
1	11									
2	12	11								
3	13	11	16							
4	14	12	16	13						
5	15	12	16	13	16					
6	16	13	17	13	16	19				
7	17	13	17	13	16	19	22			
8	18	14	17	14	16	19	22	25		
9	19	14	18	14	16	19	22	25	28	
10	20	15	18	14	17	19	22	25	28	21
20	30	20	21	17	19	21	23	26	29	22
30	40	25	25	19	21	23	25	27	30	23
40	50	30	28	22	23	24	26	29	31	24
50	60	35	31	24	25	26	28	30	32	25
60	70	40	35	27	27	28	29	31	33	26
70	80	45	38	29	29	29	31	32	34	27
80	90	50	41	32	31	32	32	34	35	28
90	100	55	45	34	33	33	33	35	37	29
100	110	60	48	37	35	34	35	36	38	30

由表 1 可见,当迭代窗口大小不一致时,迭代收敛速度最快的分段间隔也不一样。分析表 1 的规律:设置每次迭代时的分段间隔为:

$$\Delta Z = \begin{cases} V_{\text{GSD}}/10, & \text{if}(\Delta H \leq V_{\text{GSD}}) \\ V_{\text{GSD}}, & \text{if}(V_{\text{GSD}} < \Delta H \leq 2V_{\text{GSD}}) \\ (1/2)^{k-2}V_{\text{GSD}}, & \text{if}(2V_{\text{GSD}} < \Delta H \leq 10V_{\text{GSD}}) \\ 10V_{\text{GSD}}, & \text{if}(\Delta H > 10V_{\text{GSD}}) \end{cases} \quad (7)$$

值得注意的是,在 $\Delta H > 10V_{\text{GSD}}$ 时,一次迭代完成后需将迭代次数 k 重新设置为 1。

对于如何确定新的迭代窗口的问题,即求得高程差值最小处的分段的高程值 Z_{new} ,是将其作为新的迭代窗口的高程最大值,还是作为高程最小值这一问题,可以通过 Δh 的正负进行判断:若 $\Delta h > 0$,说明投影光线与地面的交点在 Z_{new} 的下方,将其作为新的 Z_{max} ,将其下方分段处的高程值作为 Z_{min} ;若 $\Delta h < 0$,则说明投影光线与地面的交点在 Z_{new} 的上方,将其作为新的 Z_{min} ,将其上方分段处的高程值作为 Z_{max} 。

3.2 算法流程与实现

视向量分段迭代算法的具体流程图如图 6 所示,具体步骤如下:

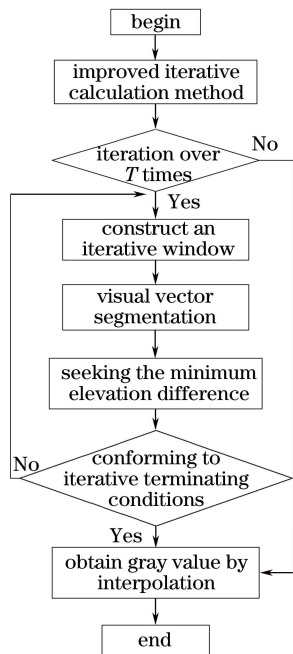


图 6 视向量分段迭代计算流程图

Fig. 6 Flow chart of visual vector segmentation iterative calculation

1) 利用改进的迭代方法进行计算,设置迭代次数为 $T(T=30)$;统计在迭代过程中高程值的最大

值 Z_{max} 和最小值 Z_{min} ;若符合收敛条件,则进入步骤 5);若迭代次数超过 T ,则进入步骤 2);

2) 根据统计的高程最大值 Z_{max} 和最小值 Z_{min} ,根据迭代窗口大小计算 ΔZ ,进而计算高程分段数 $N=(Z_{\text{max}}-Z_{\text{min}})/\Delta Z$,进入步骤 3);

3) 根据各分段处的高程值 $Z_n=Z_{\text{max}}-n\Delta Z$ ($n=1,2,\dots,N$),计算视向量上的平面坐标 (X_n, Y_n) ,从 DEM 中搜索对应的高程 Z_n^{DEM} ,计算差值 $\Delta h=Z_n-Z_n^{\text{DEM}}$,若 $\Delta h < (1/10)V_{\text{GSD}}$,则进入步骤 5);否则统计高程差值最小的分段处作为 Z_{new} ,进入步骤 4);

4) 若 $\Delta h > 0$, $Z_{\text{max}}=Z_{\text{new}}$, $Z_{\text{min}}=Z_{\text{new}}-\Delta Z$;若 $\Delta h < 0$, $Z_{\text{max}}=Z_{\text{new}}+\Delta Z$, $Z_{\text{min}}=Z_{\text{new}}$;进入步骤 2);

5) 根据物方坐标 (X, Y) ,在正射影像中内插出该点的灰度值,将其赋予模拟影像 (x, y) 处。

4 实验结果与分析

为验证视向量分段迭代坐标投影计算方法的正确性和有效性,利用河南登封地区的 DOM 和对应的 DEM 进行成像仿真实验。实验环境为 Microsoft Win7 64 位操作系统, CPU 为 Inter(R) Core(TM) 1.70 GHz,内存容量为 8 GB,程序在 VC++ 开发环境下编写实现。

4.1 实验数据

采用三组不同地形的 DEM 数据和 DOM 数据进行实验,表 2 给出了这三个区域的基本信息,图 7 给出了三个实验区 DEM 的概况以及红色方框中 DOM 的局部放大图。因线阵摆扫式相机在可见光成像波段为全色波段,利用 DOM 的 R 波段数据来进行仿真影像的生成。

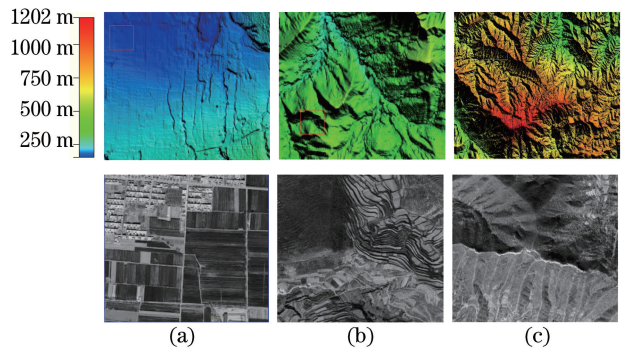


图 7 实验区 DEM 缩略图及 DOM 局部放大图。

(a) 平原; (b) 丘陵; (c) 山脉

Fig. 7 DEM thumbnails and DOM partial enlarged drawing in experimental area.

(a) Plain; (b) hill; (c) mountain

表 2 仿真影像实验区信息

Table 2 Information of simulated image experimental area

Data set	Area	Topographical feature	DEM sampling distance /m	DOM sampling distance /m
1	Dengfeng, Henan	Plain	1	0.5
2	Dengfeng, Henan	Hill	1	0.5
3	Dengfeng, Henan	Mountain	1	0.5

设置仿真影像的列数为 12000, 行数为 40000。飞机飞行高度设为 8000 m, 起始摆扫角度设置为 60° , 从左向右摆扫, 生成三个区域的仿真影像。相机的焦距设为 1600 mm, 像元大小为 $9 \mu\text{m}$, 设置飞机向正北方向匀速飞行, 利用飞机实际飞行中获取的 30 组姿态数据, 根据拉格朗日二阶内插计算得到每一扫描行对应的位置姿态数据。

4.2 实验结果与分析

分别利用常规迭代计算方法、改进的迭代计算方法、局部穷举法和本文方法对三组实验数据进行仿真影像的生成, 其结果局部区域如图 8 所示, 其中 (a)、(b)、(c) 为常规迭代计算方法的结果, (d)、(e)、(f) 为改进的迭代计算方法的结果, (g)、(h)、(i) 为

局部穷举法的结果, (j)、(k)、(l) 为视向量分段迭代坐标投影计算方法的结果。其中, 最大迭代次数设为 30, 收敛阈值设为 0.1 m (DEM 间隔的十分之一), DEM 内插算法选用双线性插值。

为了验证视向量分段迭代坐标投影计算方法的正确性, 在仿真影像上选择均匀分布的一百万个像点, 利用本算法计算其对应的地面点坐标, 然后利用该地面点坐标和像点所在扫描行的位置姿态数据, 根据共线条件方程, 计算其对应的像点坐标, 与仿真影像的像点坐标进行比较, 统计其坐标误差, 结果如表 3 所示。为了验证视向量分段迭代坐标投影计算方法的效率, 分别统计 4 种方法的迭代计算时间 (10 次运算的平均值), 如表 4 所示。

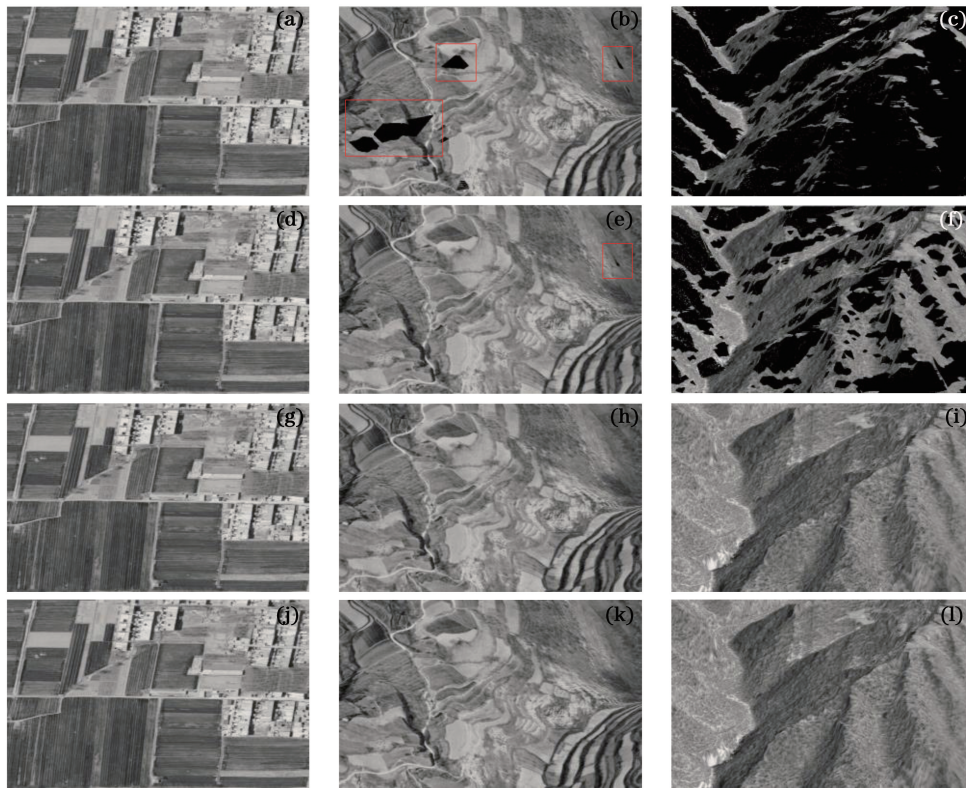


图 8 4 种方法的成像仿真结果。(a)、(b)、(c) 为常规迭代计算方法的结果; (d)、(e)、(f) 为改进的迭代计算方法的结果; (g)、(h)、(i) 为局部穷举法的结果; (j)、(k)、(l) 为视向量分段迭代坐标投影计算方法的结果

Fig. 8 Four methods of imaging simulation results. (a), (b), (c) Result of ordinary iteration calculation method; (d), (e), (f) result of improved iteration calculation method; (g), (h), (i) result of partial exhaustion method; (j), (k), (l) result of visual vector segmentation iteration coordinate projection calculation method

表 3 视向量分段迭代计算像坐标误差统计结果

Table 3 Error statistical results of image coordinate calculated by visual vector segmentation iteration

Data set	<i>x</i> direction		<i>y</i> direction	
	Maximum error /pixel	RMSE /pixel	Maximum error /pixel	RMSE /pixel
1	0.003029	0.001024	0.000021	0.000005
2	0.003268	0.002130	0.000192	0.000119
3	0.002469	0.001864	0.000149	0.000109

表 4 4 种方法迭代时间统计结果

Table 4 Iteration time statistical results of four methods

Data set	Regular iteration time /ms	Improved iteration time /ms	Local exhaustivetime /ms	Proved method time /ms
1	352	389	395	385
2	532	462	559	469
3	3691	5464	157798	8531

根据以上实验结果,可得到以下结论:

1)从图 8(a)、(d)、(g)、(j)可知,对于地形平坦地区,4 种方法都能正确地生成模拟影像,说明这 4 种方法对于平坦地区线阵摆扫式相机成像仿真都是适用的。由图 8(b)、(e)可知,对于地形起伏不大的丘陵地区,由于距离远、成像倾角大导致的迭代不收敛情况使得常规迭代计算方法产生明显的漏洞,如图 8(b)中的红色方框所示;而改进的迭代计算方法虽可改善这一状况,但其结果仍然存在漏洞,如图 8(e)中的红色方框所示。由图 8(c)、(f)可见,对于地形起伏较大的山区,常规迭代计算方法的不收敛状况十分常见,而改进的迭代计算方法漏洞也较为明显,说明这两种方法都不适用于对象是山区的线阵摆扫式相机成像仿真。从图 8(g)、(h)、(i)、(j)、(k)、(l)可见,对于平地、丘陵和山地三种地形,局部穷举法和视向量分段迭代坐标投影计算方法都能正确生成无漏洞的仿真影像,证明了这两种方法对这三种地形的线阵摆扫式相机成像仿真的适用性,且稳健性较高。

2)从表 3 的结果可见,视向量分段迭代坐标投影计算方法计算精度较高,坐标投影计算的像坐标误差均小于 0.005 pixel,完全满足实际使用时的需要。从像方投影至物方,再从物方反投影至像方,得到的像点坐标存在误差的原因是:地形表面无法用数学表达式直接描述,从像方到物方的投影计算得到的并非是解析解,而是数值迭代解,是迭代收敛阈值限制在一定范围内的近似值,其与投影光线和地面交点之间的差别导致产生反投影至像方坐标的误差。

3)从表 3 的结果可见,*x* 方向的精度与 *y* 方向的精度相比较低,其原因是 *x* 方向为摆扫方向,*y*

方向为 CCD 线阵方向,由于线阵摆扫式相机其摆扫角度要远大于 CCD 线阵方向的视场角,因而在迭代收敛阈值约束条件下的物方点位误差投影至像方在 *x* 方向要比在 *y* 方向大。

4)从表 4 的结果可见,在平地区域,4 种方法都能收敛的情形下,常规迭代方法收敛速度较快,所需的时间较少,其他三种方法所需的时间较接近;在丘陵和山地地区,视向量分段迭代坐标投影计算方法由于利用了由粗到精的自适应分段间隔确定方法,所需的时间较局部穷举法大大减少,尤其在常规迭代方法和改进迭代方法出现较多无法收敛的山地地区,本方法效率的提升较明显,比局部穷举法效率提升了 18 倍。

5 结 论

在分析现有坐标投影迭代计算方法的基础上,针对线阵摆扫式相机成像仿真过程中容易出现迭代不收敛的问题,提出一种视向量分段迭代坐标投影计算方法。通过在目标点附近构建迭代窗口,采用由粗到精的分段策略,将迭代窗口按高程进行分段,寻找与对应的地面高程差值最小的高程分段,继续进行分段计算直至高程差值满足一定阈值。三组不同地形数据的成像仿真结果表明,视向量分段迭代坐标投影计算方法可以解决距离远、成像倾角大时迭代不收敛的问题,正确生成完整无漏洞的仿真影像,其仿真精度高于 0.005 pixel,为后续的数据处理与应用提供了仿真数据源,同时也为将来与真实数据进行对比,进而分析误差规律奠定了基础。本文侧重对线阵摆扫式相机进行成像几何仿真,未考虑其辐射方面的影响。进一步的研究包括考虑地物辐射、大气折射等因素对成像仿真的影响,构建全链路仿真系统。

参 考 文 献

- [1] Yue Q X. Research on image simulation of satellite three-line-array TDI CCD camera[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011.
岳庆兴. 卫星三线阵 TDI CCD 相机成像仿真研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [2] Jiang W S, Zhang J Q, Zhang Z X. Simulation of three-line CCD satellite images from given orthoimage and DEM[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(4): 414-419.
江万寿, 张剑清, 张祖勋. 三线阵 CCD 卫星影像的模拟研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(4): 414-419.
- [3] Wang L X, Cui W Y, Yi W N, *et al.* Acquisition method of zero stadia standard image for satellite imaging simulation[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0128002.
汪兰霞, 崔文煜, 易维宁, 等. 卫星成像仿真中零视距标准图的获取方法[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0128002.
- [4] Shi Q S, Lan C Z, Xu Q, *et al.* Real-time imaging simulation of optical earth observation satellites in orbit[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(10): 2535-2540.
施群山, 蓝朝楨, 徐青, 等. 光学对地观测卫星在轨成像实时模拟方法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(10): 2535-2540.
- [5] Sander J S, Brown S D. Utilization of DIRSIG in support of real-time infrared scene generation[J]. SPIE, 2000, 4029: 278-285.
- [6] Arnold P S, Brown S D, Schot J R. Hyperspectral simulation of chemical weapon dispersal patterns using DIRSIG[J]. SPIE, 2000, 4028: 288-298.
- [7] Gasser J, Blonski S, Cao C, *et al.* Nasa's virtual product laboratory: an overview [C]. Las Vegas: Proceedings of the International Symposium on Spectral Sensing Research, 1999: 152-169.
- [8] Anko B, Lorenz W, Keller P, *et al.* SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2001, 55(5): 299-312.
- [9] David C A. Real-time visualization for sensors[J]. SPIE, 1996, 2741: 232-241.
- [10] Gu Y L, Zhang D Y, Yi W N, *et al.* Simulation of space optical remote sensor imaging based on aviation image[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(14): 3730-3732.
顾有林, 张冬英, 易维宁, 等. 基于航空图像的航天光学遥感器成像的仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(14): 3730-3732.
- [11] Xu Y. Research on imaging mechanism and image simulation of airborne three-line scanner[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
许宇. 机载三线阵 CCD 传感器成像机理及影像模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [12] Ebner H, Kornus W, Strunz G, *et al.* Simulation study on point determination using MOMS-02/D2 imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1991, 57(10): 1315-1320.
- [13] Li R, Zhou G, Schmidt N J, *et al.* Photogrammetric processing of high-resolution airborne and satellite linear array stereo images for mapping applications [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(20): 4451-4473.
- [14] Liu S. Selection of optimum resolution of simulation base map from space remote sensing image[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
刘帅. 航天遥感图像仿真底图最佳分辨率的选择[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [15] Miao Z, He B, Wang J Q, *et al.* Modeling of space camera for whiskbroom imaging and analysis of pendulum mirror angular velocity residual[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2015, 36(6): 39-47.
苗壮, 何斌, 王俊琦, 等. 空间相机摆扫成像建模及摆镜角速度残差分析[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(6): 39-47.
- [16] Tian H Y, Liu M. The forward image motion compensating scheme of aerial camera based on scanning mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(9): 20-24.
田海英, 刘明. 基于扫描反射镜的航空相机前向像移补偿[J]. 光电工程, 2014, 41(9): 20-24.
- [17] Zhao J X, Zhang T, Yang Y M, *et al.* Image motion velocity filed of TDI-CCD aerial panoramic camera [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0728003.
赵嘉鑫, 张涛, 杨永明, 等. TDI-CCD 全景航空相机的像移速度场计算模型研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728003.
- [18] Wang P, Tian D P, Xu N, *et al.* Analysis and compensation of image rotation in internally mounted scanning system for aerial electric-optical reconnaissance platform[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0908001.
王平, 田大鹏, 徐宁, 等. 航空光电侦察平台内藏式扫描系统像旋分析及补偿[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0908001.
- [19] Liu B, Jia J Q, Ding Y L, *et al.* Oblique distance defocus compensation for oblique photographic

- airborne camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1274-1279.
- 刘波, 贾继强, 丁亚林, 等. 斜视航空相机的斜距离
焦补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1274-
1279.
- [20] Xing S. Research on the combined location theory of
multi-source remote sensing imagery[D].
Zhengzhou: Information Engineering University,
2008.
邢帅. 多源遥感影像联合定位技术研究[D]. 郑州:
解放军信息工程大学, 2008.
- [21] Sheng Y. Theoretical analysis of the iterative
photogrammetric method to determining ground
coordinates from photo coordinates and a DEM[J].
Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,
2005, 71(7): 863-871.
- [22] Sheng Y. Comparative evaluation of iterative and
non-iterative methods to ground coordinate
determination from single aerial images[J].
Computers & Geosciences, 2004, 30(3): 267-279.
- [23] Guo H T. Research on monolithic mapping and
inspection technology based on satellite remote
sensing image[D]. Zhengzhou: Information
Engineering University, 2002.
郭海涛. 基于卫星遥感影像的单片测图与修测技术
的研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2002.