

文章编号:1671-8860(2009)02-0187-04

文献标志码:A

一种 ADS40 影像物方反投影坐标计算的快速算法

王 密¹ 胡 芬¹ 金淑英¹

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:针对 ADS40 影像的物方空间投影几何约束,提出了一种基于扫描线投影中心平面几何约束的 ADS40 物方反投影坐标计算快速算法,有效地改进了最佳扫描线的搜索效率。实验表明,该算法可以有效地提高 ADS40 影像物方反投影坐标计算的效率。

关键词:ADS40;反投影坐标计算;扫描线投影中心平面

中图法分类号:P237.4; P231.5

ADS40 (airborne digital sensor)是线阵数码航空摄影机的典型代表,获取前视、下视和后视的全色和多光谱条带影像。ADS40 获取影像的质量和效率比传统的面阵航空摄影机具有明显的优势^[1-3],具有十分广阔的应用前景^[4-6]。由物方空间的物点坐标计算摄影时刻对应的像点坐标是摄影测量数据处理的一个最基本的问题。因此,物方反投影坐标计算的效率逐渐成为 ADS40 影像处理效率的瓶颈,能够有效地提高物方反投影坐标计算的效率,就可以有效地提高 ADS40 影像的数据处理效率。当前的各种最佳扫描线搜索算法,如像方顺序搜索^[7]、二分窗口迭代搜索^[8,9],均采取一种基于中心投影共线方程的像方搜索策略,每次迭代都需要共线方程的复杂矩阵计算。一景 ADS40 影像至少包含数万条扫描行,使得像方迭代搜索的计算量很大,计算效率不高。本文提出了一种基于扫描线投影中心平面几何约束的 ADS40 影像物方反投影坐标计算快速算法。实验表明,该算法在保证精度和可靠性的前提下,计算速度比传统算法快 5 倍以上,能够有效地提高 ADS40 影像的处理效率。目前,该算法已成功应用于 ADS40 数据处理模块。

1 算法原理

ADS40 采用高分辨率线阵 CCD 传感器作为探

测器件,镜头采用中心垂直投影设计,焦平面的多条线阵传感器构成对地面前视、下视和后视不同视角的成像格局^[1],ADS40 影像的像点坐标计算见式(1):

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X - X_{s_i}) + b_1(Y - Y_{s_i}) + c_1(Z - Z_{s_i})}{a_3(X - X_{s_i}) + b_3(Y - Y_{s_i}) + c_3(Z - Z_{s_i})} \\ y &= -f \frac{a_2(X - X_{s_i}) + b_2(Y - Y_{s_i}) + c_2(Z - Z_{s_i})}{a_3(X - X_{s_i}) + b_3(Y - Y_{s_i}) + c_3(Z - Z_{s_i})} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,(X, Y, Z)是物点坐标;($X_{s_i}, Y_{s_i}, Z_{s_i}$)为第 i 条扫描行的投影中心坐标; $a_1, a_2, a_3, \dots, c_2, c_3$ 是由对应扫描行 3 个角元素构造的旋转矩阵元素;(x, y)是由第 i 扫描行外方位元素地面点(X, Y, Z)计算的像点坐标; f 为传感器主距。

如图1所示,令扫描线投影中心平面是扫描

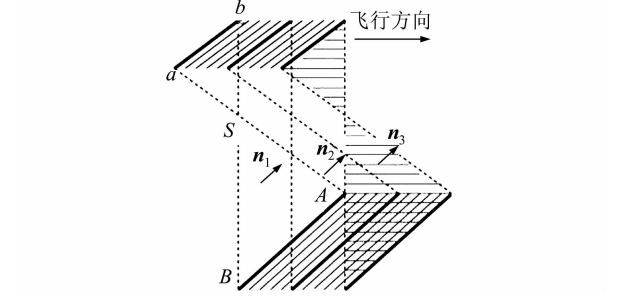


图 1 扫描线投影中心平面及其有效摄影区域
Fig. 1 Scanline and Perspective Central Planes and Effective Imaging Range

行在曝光时刻与其投影中心所构成的空间平面。根据线阵推扫式传感器成像的基本原理,为了保证 ADS40 影像获取的质量,各扫描线投影中心平面在有效摄影区域内互不相交,且相邻扫描线投影中心平面的间隙不会出现明显变化。

基于这样的空间几何约束条件,若能定位与物方点最邻近的扫描线投影中心平面,则基于物点、投影中心、像点共面的空间几何约束条件,可以内插精确求解最佳扫描线。如图 2 所示,物方点 (X,Y,Z) 的左右最邻近扫描线投影中心平面可以基于距离转换的方式快速定位。距离转换的基本原理为:基于相邻扫描线投影中心平面间隙的概略值,或称为距离比例因子 $scale$,估算物点与任意扫描线投影中心平面之间的扫描线数目。

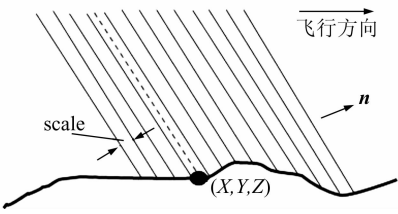


图 2 基于扫描线投影中心平面的最佳扫描线搜索方案

Fig. 2 Best Scanline Searching Strategy Based on Scanline and Perspective Central Planes

以上介绍的扫描线投影中心平面是假定 CCD 严格为一条直线的理想情况。由于 CCD 探元安置误差等方面的原因,同一条 CCD 传感器上的所有探元的坐标连线不可能严格地在一条直线上。图 3 是对 ADS40 相机扫描角为 14° 的后视 CCD 传感器的相机文件分析之后所作的焦平面示意图,虚线为线阵首尾 CCD 探元的连线,用 CCD 探元到该虚线的距离表示 CCD 的偏移量。因此,对于 ADS40 影像物方反投影坐标计算,CCD 线阵不能被作为直线处理^[7,10],这在某种程度上增加了传统扫描线搜索计算的代价。在这种

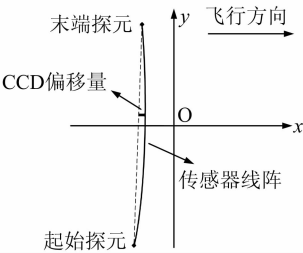


图 3 ADS40 传感器线阵的 CCD 偏移示意图 (ADS40_30027; PANB14A 传感器)

Fig. 3 CCD Deviation Illustration of ADS40 Linear Array Sensor

情况下,严密的扫描线投影中心平面不再是空间平面,如果用曲面来整体拟合扫描线投影中心平面,计算会非常复杂。因此,行之有效的一种方法就是对 CCD 线阵进行分段,对每段之内的 CCD 探元用一条直线段近似表示,这样,每段分别形成一个扫描线投影中心平面;然后,基于物方搜索策略确定与地面点最相邻的扫描线投影中心平面;最后,对于 CCD 探元不是严格在一条直线上的情况,需要通过精确补偿确定像点的精确坐标。

2 算法实现

2.1 CCD 线性度分析与扫描线投影中心平面计算

1) CCD 线性度分析与分段处理。对 ADS40 相机的每一条 CCD 传感器进行线性度分析,根据 CCD 的线性排列情况对 CCD 进行分段处理,每一段认为是一个直线段,具体的分段方法可以采用道格拉斯-普克矢量压缩算法^[11]。同时,估算影像坐标与物方投影平面之间的 6 个全局仿射变换参数,用于确定给定物方坐标所对应的扫描线投影中心平面。

2) 计算扫描线投影中心平面。令 $scanline$ 为影像扫描行的总数,某一 CCD 分段对应的扫描线投影中心平面的平面方程为 $A_iX + B_iY + C_iZ + D_i = 0 (i = 1, 2, \dots, scanline)$ 。参见图 2,令平面法向量为 n_i ,扫描线的投影中心为 S ,线阵分段的首尾 CCD 探元在物方某一高程面上的投影点为 A 和 B ,则有:

$$(A_i, B_i, C_i) = n_i = \overrightarrow{BS} \times \overrightarrow{AS}$$

$$D_i = -A_i \times X_S - B_i \times Y_S - C_i \times Z_S \quad (2)$$

式中, n_i 表示扫描线投影中心平面的法向量; (X_S, Y_S, Z_S) 为点 S 的坐标。

3) 根据式(3)估算距离比例因子 $scale$:

$$scale = \frac{length}{scanline - 1} \quad (3)$$

式中, $length$ 是影像上最后一条扫描行的投影中心到起始扫描线投影中心平面的垂直距离。

2.2 最佳扫描线精确搜索定位

1) 首先基于全局仿射变换估算物点 (X,Y,Z) 的影像坐标 (l,s) ,由 CCD 探元的索引值 s 定位所在的 CCD 分段,选择相应的一组扫描线投影中心平面,作为物方搜索的基准。

2) 以某一扫描线投影中心平面 $A_kX + B_kY + C_kZ + D_k = 0$ (其中 k 为影像扫描行的下标,一般初始化 $k=1$) 为基准面,按式(4)计算 (X,Y,Z)

到基准面的距离 $length$; 然后按式(5) 估算 (X, Y, Z) 与基准面之间的扫描线数目 $line_num$ 。

$$length = \frac{|A_k \times X + B_k \times Y + C_k \times Z + D_k|}{\sqrt{A_k^2 + B_k^2 + C_k^2}}$$

(4)

$$line_num = \text{int}\left(\frac{Length}{scale} + 0.5\right)$$

(5)

当 $line_num > 1$ 时, 如果 $A_kX + B_kY + C_kZ + D < 0$, 则 $k = k - line_num$; 如果 $A_kX + B_kY + C_kZ + D_k > 0$, $k = k + line_num$, 以 $A_kX + B_kY + C_kZ + D_k = 0$ 作为新的基准面, 返回执行式(4)、式(5)。一般这种迭代计算需进行 3 到 4 次, 直到 $line_num \leq 1$ 时, 停止迭代, 执行步骤 3)。

3) 判断 (X, Y, Z) 与扫描线投影中心平面 k 、 $k + 1$ 、 $k + 2$ 或 k 、 $k - 1$ 、 $k - 2$ 的空间关系, 定位最邻近的两个扫描线投影中心平面 i 和 $i + 1$, 然后按式(6)精确内插最佳扫描线投影中心平面 $line$:

$$line = i + \frac{d_1}{d_1 + d_2}$$

(6)

式中, d_1 和 d_2 分别是 (X, Y, Z) 到扫描线投影中心平面 i 和 $i + 1$ 的距离。

4) 基于扫描线 $line$ 的外方位元素, 根据式(1)计算像点焦平面坐标 (x, y) , 其中, 令 y 是沿线阵传感器方向的坐标值。

5) 基于式(7)内插 y 值对应的 CCD 探元素引值 pos :

$$pos = p_0 + (p_n - p_0) \frac{y - y_{p_0}}{y_{p_n} - y_{p_0}}$$

(7)

式中, p_0 、 p_n 为线阵传感器上探元的起、止索引号; y_{p_0} 、 y_{p_n} 分别为其焦平面坐标。

6) 令探元 p 的检校坐标为 (x_s, y_s) , 按式(8)计算最佳扫描线的补偿值 $offset$:

$$offset = \frac{x - x_s}{pixelsize}$$

(8)

式中, $pixelsize$ 为 ADS40 传感器探元的尺寸。

CCD 线阵分段能保证 $offset$ 为小于 1 的值, 即此时扫描线的搜索精度已达到了子像素级。这时, 可以采取像方内插的方式获取更高精度的搜索结果^[9]。

2.3 像点坐标计算

基于最佳扫描行的精确解, 根据式(1)计算物点 (X, Y, Z) 的像点坐标。

3 实 验

选择 ADS40 同一条航带前视、后视、下视 3 张影像作为实验的数据源, 见表 1。实验分别在每幅 L_0 影像上进行, 具体方法为: 取影像上等间隔的 100 万个格网点(1 000 行 \times 1 000 列), 像点坐标为 (S_{0_i}, L_{0_i}) ($i = 1, 2, \dots, 1\,000\,000$), 将这些像点投影到物方任意高程面(平均高程面附近)以模拟 100 万个物方点 (X_i, Y_i, Z_i) ; 然后, 分别基于二分窗口迭代搜索方法和本文提出的物方搜索方法反投影计算它们在 L_0 影像上的像点坐标 (S'_{0_i}, L'_{0_i}) 。最后, 将 (S'_{0_i}, L'_{0_i}) 与原始的坐标 (S_{0_i}, L_{0_i}) 进行比较, 验证两种方法计算结果的准确性和精度。同时, 以二分窗口法迭代搜索的计算结果为依据, 对本文算法结果的精度和效率进行检验。

算法基于 Visual C++ 集成开发环境实现, 所用计算机的操作系统为 Microsoft XP Pro, CPU 为 Inter (R) Celeron(R) 2.80 GHz, 内存容量为 512 MB。实验结果见表 2。

表 1 实验数据参数列表

Tab. 1 Parameters of Experimental Data

影像	扫描角/°	光谱通道	影像大小(行 \times 列)
L_0 级前视	28	全色	40 240 \times 12 000
L_0 级下视	0	绿色	40 216 \times 12 000
L_0 级后视	14	全色	40 232 \times 12 000

从表 2 可以看出, 本文算法与传统方法搜索的精度是一致的, 在同一个量级。但是, 在效率方面, 本文算法具有明显的优势, 计算时间约是基于二分窗口迭代扫描行搜索的物方反投影坐标计算算法的 1/5。ADS40 影像物方反投影坐标计算的效率与扫描线的分段数目有一定的联系, 但是, 实验分析表明, 分段多少对效率的影响不大。从某种程度上讲, 在相同条件下, 段数越少, 效率越高。实验中, 采用道格拉斯-普克算法的对扫描

表 2 对两种算法效率的对比(点数: 1 000 000)

Tab. 2 Efficiency Comparison of Algorithms

搜索策略	二分窗口法迭代搜索			扫描中心投影面几何约束物方搜索		
CCD 传感器	PANB14A	GRNN00A	PANF28A	PANB14A	GRNN00A	PANF28A
计算时间/ms	140 266	134 531	136 110	24 422	21 328	25 703
共线方程迭代次数	14~18	12~17	14~18	1~2	1~2	1~2
CCD 分段数目	—	—	—	16	2	23
最大误差/像素	0.000 527	0.000 527	0.001 176	0.000 821	0.000 527	0.001 176

线进行分段的阈值为 0.004 mm(约是 0.6 个像元大小,即每一段 CCD 的像元偏差小于 0.6 个像元),此时传感器 PANB14A、GRNN00A、PANF28A 分别被分成了 16、2 和 23 段。

参 考 文 献

[1] Saudau R. Design Principles of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor[C]. ISPRS, Amsterdam,2000

[2] Cramer M. The ADS40 Vaihingen/Enz Geometric Performance Test [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(6): 363-374

[3] Reulke R, Becker S, Haala N, et al. Determination and Improvement of Spatial Resolution of the CCD-line-scanner System ADS40 [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(2): 81-90

[4] 王永平,薛艳丽,陈春祥,等. ADS40 推扫式数字航摄影仪试验研究[J]. 测绘科学,2007,32(1):119-121

[5] 缪剑,杨天克,徐水平,等. 全数字航测相机 ADS40 及其应用初探[J]. 测绘技术装备,2007,9(1): 44-45

[6] 刘军,张永生,范永弘. ADS40 机载数字传感器的摄影测量处理与应用[J]. 测绘学院学报,2002,19(3): 186-188

[7] 赵双明,李德仁. ADS40 影像几何预处理[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(4): 308-311

[8] 刘军,张永生,王冬红,等. INS/DGPS 支持的机载线阵推扫影像几何校正[J]. 遥感学报,2006,10(1): 21-26

[9] 刘军,王冬红. 基于 Level 0 产品的 ADS40 正射影像快速生成[J]. 遥感学报,2007,11(2): 247-251

[10] 赵双明. 机载三线阵传感器影像区域网联合平差研究[D]. 武汉:武汉大学,2007

[11] Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature[J]. The Canadian Cartographer, 1973, 10(2): 112-122

第一作者简介:王密,博士,研究员,博士生导师。主要研究方向为影像匀光处理与质量控制、基于数字摄影测量的立体无缝影像数据库和可量测虚拟现实、基于摄影测量的地理数据快速更新方法以及卫星影像预处理关键技术。
E-mail:wangmi@mail.lmars.edu.cn

Object-Space Back Project Coordinates Calculation
Algorithm for ADS40 Imageries

WANG Mi¹ HU Fen¹ JIN Shuying¹

(1 State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: As a new type of aerial digital camera, the airborne three-line array sensor ADS40 now has been more and more popular in the acquisition of high-quality aerial imageries. The object-space back project calculation referring to image point coordinates calculation of the ground points plays a fundamental part in the processing of photogrammetry data. However, the best scanline search is the foremost issue for the object-space back project coordinates calculation algorithm of ADS40 imageries and has becomes the efficiency bottleneck of the current algorithms. We presented a novel object-space back project algorithm for ADS40 images based on central perspective plane of scanline. Experiments proved the feasibility and efficiency of the algorithm, which has currently been applied in the processing module of ADS40 imageries.

Key words: ADS40; back project coordinates calculation; scanline and perspective central plane

About the first author: WANG Mi, Ph.D., research fellow, Ph.D supervisor. His major researches are image dodging and quality control, stereo seamless image database and measurable virtual reality, geospatial data update based on photogrammetry and key technologies of satellite image preprocess.
E-mail: wangmi@mail.lmars.edu.cn