

# 大重叠度影像的相对定向与前方交会精度分析

张永军<sup>1</sup> 张 勇<sup>1</sup>

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘 要:**针对数码相机所拍摄的序列图像具有重叠度高、同名特征的冗余观测值多等特点,分析了大重叠度序列影像在相对定向和前方交会时的精度优势。影像重叠度越大,相对定向的精度越好;而且重叠数目越大,交会角越大,平面和高程(或深度)方向的交会精度和可靠性也越高,实用中可采用 80%重叠度的序列影像进行三维重建等。

**关键词:**序列影像;重叠度;相对定向;前方交会;精度分析

**中图法分类号:**P234;P231.4

利用被摄对象的多幅图像获取其三维几何模型,目的是恢复物体表面形状或恢复场景中摄像机和物体之间的距离<sup>[1]</sup>。在传统的航空摄影测量中,受硬件条件的限制,影像间的航向重叠度一般只有 60%,三度重叠只有 20%。空中三角测量时可以利用三度重叠点,而测图时只能通过两度重叠点进行<sup>[2]</sup>。人眼可以精确地识别影像上的同名特征,几乎不存在误匹配问题,因而可以准确地感知三维世界。但数字摄影测量中在利用计算机匹配替代人眼测定影像同名点时,由于影像间重叠度较小,影像变形大,存在大量的误匹配点,导致高程精度无法满足大比例尺测图的需要,必须采取全野外高程布点及联测<sup>[3]</sup>。

为了提高自动匹配的可靠性,必须增加影像间的重叠度(或者减小立体像对的交会角),但由此会造成产生的交会误差变大,精度变低。为了降低双目匹配的困难,计算机界很早就开始研究三目立体视觉系统、三目机器人视觉系统、多目立体匹配等技术<sup>[4, 5]</sup>,并取得了不少成果,但这些技术并不完全适合于数字摄影测量。

数码相机摄取的图像不仅重叠度高,还具有严格的顺序关系,有利于相关影像的快速检索和同名特征的快速稳定匹配。序列影像对于航空数码相机显得尤为重要。最新的面阵数码相机多为“矩形”,特别是航线方向的摄影基线较短,如按常规 60%航向重叠度构成立体像对,奥地利 Vexcel

公司的 UltraCam 航空数码相机<sup>[6]</sup>交会角仅为 15°,Z/I 公司的 DMC 航空数码相机<sup>[7]</sup>交会角也只有 17.5°。但 UltraCam 所拍摄的影像重叠度较大,每个地面点至少出现在 5 张影像上,因而有可能利用空中三角测量原理对多度重叠点进行基于多条摄影光线的前方交会,这样既能增加观测值数量,有效地解决随机的误匹配问题,又能增加交会角,提高高程测量的精度。

## 1 影像重叠度与相对定向精度的关系

连续像对的相对定向通常是假定左方像片是水平的或已知其方位元素,因而未知数是右方像片的三个角元素  $\varphi'$ 、 $\omega'$ 、 $\kappa'$  和两个基线分量  $b_y$ 、 $b_z$ 。在连续像片衔接的情况下,相对定向的误差方程式为<sup>[2]</sup>:

$$\begin{aligned}v_q &= \Delta b_y + \frac{y'}{f} \Delta b_z + \frac{x'y'}{f} \Delta \varphi' + \left(f + \frac{y'^2}{f}\right) \Delta \omega' + \\&\quad x' \Delta \kappa' - q \\q &\approx y - (y' + b_y)\end{aligned}\tag{1}$$

式中,  $f$  为焦距;  $x'$ 、 $y'$  为右像片的像点坐标;  $q$  为同名点的上下视差;  $\Delta b_y$ 、 $\Delta b_z$ 、 $\Delta \varphi'$ 、 $\Delta \omega'$ 、 $\Delta \kappa'$  为相对定向的未知数。

如果有 5 个以上相对定向点,即可按最小二乘法迭代求解未知数。在数字摄影测量中,相对定向点一般远远超过 5 个,从而可以在剔除粗差

的同时求解未知参数,增加相对定向结果的稳定性。可以想象,影像间的重叠度越大,相邻影像间的差异就越小,同名特征的搜索和匹配也就越容易。测试数据为利用直升机航拍的城区数码序列影像,影像物理高度为 9.6 mm,宽度为 5.4 mm,焦距为 17.5 mm,像幅为 1 920×1 080,像元大小为 5 μm,影像地面分辨率为 20 cm。影像的重叠度为 95.7%时,自动匹配了 1 265 对同名点,同名点匹配精度优于 0.1 像素,相对定向的中误差为 0.5 μm。不同影像重叠度的相对定向的中误差如表 1 所示。可以看出,影像的重叠度越大(即

摄影基线越短),自动匹配越容易,匹配点越多,相对定向的精度也越好。随着影像重叠度的减小(即基线变长),匹配的同名点数不断减少,相对定向的中误差逐渐增大,且各相对定向元素的中误差也逐渐增大。由于摄影相当于大比例尺城区摄影,当重叠度较小(如小于 75%)时,由高差引起的几何变形比较严重,增加了匹配的困难,对相对定向结果也有一定的影响。不过由于相对定向点数较多,且采用了最小二乘法进行参数解算,各种重叠度(大于 60%)的相对定向中误差都优于 1/4 像元。

表 1 不同影像重叠度的相对定向中误差  
Tab.1 Precision of Relative Orientation with Different Overlaps

	航向重叠度/%								
	95.7	91.4	87.2	82.9	78.6	74.3	70.2	65.9	61.5
基线 X 分量/mm	0.231	0.462	0.689	0.925	1.156	1.390	1.607	1.843	2.078
定向点数	1 265	1 104	1 055	971	821	788	545	537	527
中误差/μm	0.5	0.6	1.0	1.1	1.0	1.2	1.1	1.4	1.3

2 影像重叠度与前方交会精度的关系

传统摄影测量影像间的航向重叠一般是 60%,三度重叠为 20%,且利用相邻三张影像进行模型连接,利用两张影像进行前方交会并测绘地形图。数码相机的普及促进了序列影像摄影测量的兴起,而序列影像具有重叠度大的优势,一个空间点会同时出现在多张影像上,因而需要从理论上研究多张影像的像点同时参与平差时的精度变化,以便为实际应用奠定基础。

为讨论方便,现假设各张像片的三个旋转角均为 0,  $y_i=0$  且所有像片的  $Z_s$  相等,则共线方程为:

$$x_i = -f \cdot \frac{X - X_s}{Z - Z_s} = -f \cdot \frac{\bar{X}}{Z} \tag{2}$$

式中,  $x_i$  为像点的  $x$  坐标;  $f$  为焦距;  $(X_s, Y_s, Z_s)$  为摄站坐标;  $(X, Y, Z)$  为目标点三维坐标。则相应的误差方程为:

$$v_{x_i} = -\frac{1}{Z} \cdot f \cdot \delta_X - \frac{1}{Z} \cdot x_i \cdot \delta_Z - l_x \tag{3}$$

式中,  $\delta_X, \delta_Z$  为目标点  $X, Z$  坐标的改正数;  $l_x$  为误差方程常数项。相应的法方程系数矩阵为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{Nf^2}{Z^2} & \frac{f}{Z^2} \sum x_i \\ \frac{f}{Z^2} \sum x_i & \frac{1}{Z^2} \sum x_i^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

假设某一目标点同时出现在  $N$  张影像上,需要利用这  $N$  张影像同时进行前方交会获得其三维坐标。图 1 和图 2 分别表示  $N$  是奇数和偶数

时的前方交会( $i=1,2,\cdots,N; \sum_i x_i=0$ )。

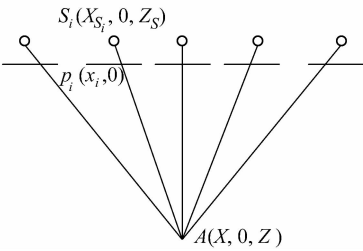


图 1 奇数张像片的前方交会  
Fig.1 Space Intersection with Odd Images

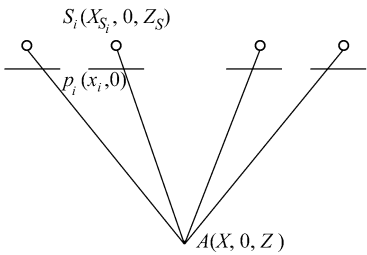


图 2 偶数张像片的前方交会  
Fig.2 Space Intersection with Even Images

可以看出,无论  $N$  是奇数还是偶数,理论上像片都是对称分布的,其共同特点是像片  $x$  坐标的平均值为零,即  $\sum x_i = 0$ ,因而法方程系数矩阵式(4)的非对角线元素为零,则相应的协因数矩阵为:

$$\mathbf{Q}_{xx} = \mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} Z^2 / (Nf^2) & 0 \\ 0 & Z^2 / (\sum x_i^2) \end{bmatrix} \tag{5}$$

由式(5)可知,影像数  $N$  越大,或者说影像重叠数目越大,前方交会的精度就越高;从平差理论来说,就是多余观测数越多,平差结果的精度和可靠性就越高<sup>[8]</sup>。

上述理论分析是在近似公式下进行的,不足以说明问题,需要基于严格公式进行实验分析。实验选取了一组利用数码相机在地面拍摄的石雕影像。所用数码相机的焦距为 10.57 mm,像幅大小为  $1\,280\times1\,024$ ,像元大小为  $7\,\mu\text{m}$ 。摄影距离 10 m 左右,像元的物方分辨率约为 6 mm。采用交向摄影方式围绕该石雕按等间隔共拍摄了 89 幅影像,构成旋转序列影像,相邻两幅影像间的交会角(按两条主光线之间的夹角计算)约为  $4^\circ$ 。

在分析交会精度与影像重叠度的关系时,编制了基于严密共线方程的前方交会程序,并采用连续 9 张像片进行实验,即影像最大为 8 度重叠。按深度方向由远到近选择了 5 个点,5 个点在所有像片上都近似呈均匀分布。其中点 1 离摄站距离最远,约 12 m;点 5 离摄站最近,约 9.5 m。前方交会时,以第一张影像和第九张影像为基准,此时 5 个点的最大交会角均为  $32^\circ$ 。实验时,不断按图 1 和图 2 所示的原理加入两者之间的影像进行前方交会,表 2 给出了 5 个点在不同重叠数目下的深度方向交会精度。

表 2 影像重叠数与深度方向的交会精度/mm  
Tab. 2 Precision of Depth and Image Number

点号	重叠度							
	2	3	4	5	6	7	8	
点 1	8.166	5.740	4.812	4.465	4.550	4.360	4.166	
点 2	7.708	5.366	4.485	4.143	4.206	4.022	3.708	
点 3	6.932	4.840	4.034	3.732	3.791	3.628	3.632	
点 4	6.847	4.801	4.008	3.714	3.782	3.622	3.547	
点 5	5.414	3.735	3.106	2.860	2.897	2.766	2.614	

从表 2 可以看出,随着影像重叠数目的增加,所有点在深度(高程)方向的交会精度均不断提高,其中 2 度重叠到 3 度重叠和 3 度重叠到 4 度重叠时,交会精度迅速提高。从 5 度重叠开始,精度提高变缓,这是由于平差结果的中误差与观测值数量的平方根呈近似反比关系<sup>[8]</sup>。从表 2 还可以看出,在相同的重叠度下,随着目标点离摄站距离的减小,深度方向的交会精度会逐渐提高。

3 交会角与前方交会精度的关系

空中三角测量的加密点精度高于测图点的精度,部分原因是由于观测值个数多,还有一个原因

就是交会角的大小不同。在相同的重叠度下,即观测值个数相等时,物点离摄站距离越近,交会精度越高,其关键因素就是交会角的大小不同。

为讨论方便,考虑到竖直摄影的情况,此时各张影像的旋转角均为零(实际并不为零),仍然假设所有像片的  $Z_s$  相等,如图 3 所示,利用两张影像进行前方交会的误差方程式为:

$$\begin{aligned}v_x &= \frac{f}{H}\delta_x + \frac{x}{H}\delta_z - l_x \\v_y &= \frac{f}{H}\delta_y + \frac{y}{H}\delta_z - l_y \\v_{x'} &= \frac{f}{H}\delta_x + \frac{x'}{H}\delta_z - l_{x'} \\v_{y'} &= \frac{f}{H}\delta_y + \frac{y'}{H}\delta_z - l_{y'}\end{aligned}\tag{6}$$

式中,  $f$  为焦距;  $x$ 、 $y$ 、 $x'$ 、 $y'$  分别为左右影像的像点坐标;  $H$  为航高(或地面摄影时的摄影距离);  $\delta_x$ 、 $\delta_y$ 、 $\delta_z$  为目标点三维坐标的改正数;  $l_x$ 、 $l_y$ 、 $l_{x'}$ 、 $l_{y'}$  为误差方程式常数项。法方程系数矩阵为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{2f^2}{H^2} & 0 & \frac{fx + fx'}{H^2} \\ 0 & \frac{2f^2}{H^2} & \frac{fy + fy'}{H^2} \\ \frac{fx + fx'}{H^2} & \frac{fy + fy'}{H^2} & \frac{x^2 + x'^2 + y^2 + y'^2}{H^2} \end{bmatrix}\tag{7}$$

由于  $x+x'=0$ ,而  $y=y'=$  常数,不妨令其等于零,则式(7)中的非对角线元素均为零,因而相应的协因数矩阵为:

$$\mathbf{Q}_{xx} = \mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{H^2}{2f^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H^2}{2f^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H^2}{x^2 + x'^2} \end{bmatrix}\tag{8}$$

由此可见,  $x^2 + x'^2$  越大,  $Z$  方向的交会精度越高。由图 3 可知,交会角  $\beta = \frac{B}{H} = \frac{x}{f} + \frac{-x'}{f}$ ,其中,  $B$  为摄影基线,  $H$  为航高。因而  $x^2 + x'^2$  越大

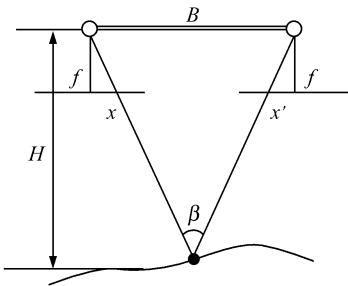


图 3 两张影像前方交会的交会角  
Fig. 3 Intersection Angle of Two Images

(即摄影基线越长), $\beta$ 就越大,高程(或深度)方向的交会精度也就越高。当 $f=x=-x'$ 时,前方交会的误差椭圆变为一个圆球,三个方向的交会精度相等,此时交会角 $\beta$ 为 $90^\circ$ ,这也是交会角的最大限值。

上述理论分析是基于近似公式的,所得结论需要利用严格公式进行分析验证。为了验证交会角越大(最大不超过 $90^\circ$ )、高程(或深度)方向的交会精度越高的结论,利用前述的影像和程序,并采用与§2相同的5个点进行了实验分析。影像数为9张,相邻影像的交会角约 $4^\circ$ ,因而该影像序列的最大重叠度为 $8^\circ$ ,即最大交会角约为 $32^\circ$ ,本文分别采用 $32^\circ$ 、 $24^\circ$ 、 $16^\circ$ 、 $8^\circ$ 和 $4^\circ$ 的交会角进行前方交会,并记录其深度方向的中误差,具体数值见表3。由表3可以看出,交会角越小,深度方向的交会误差就越大,即精度越低。而且,离摄站近的点交会精度高于离摄站远的点,这是由于上述的交会角是指主光轴间的夹角,而实际影像不同位置的像点其交会角也不同,离摄站越近的点(如航空摄影测量中的房顶角点),在不同影像上的左右视差越大,即 $x^2+x'^2$ 越大,由式(8)可知,高程(或深度)方向的交会精度就越高。

表 3 交会角与深度方向的交会精度/mm					
Tab. 3 Precision of Depth and Intersection Angle					
点号	交会角				
	$32^\circ$	$24^\circ$	$16^\circ$	$8^\circ$	$4^\circ$
点 1	8.166	8.519	12.331	30.043	40.917
点 2	7.708	7.927	10.499	27.229	36.631
点 3	6.932	7.281	10.834	24.171	32.239
点 4	6.847	7.172	10.614	23.897	32.575
点 5	5.414	5.850	9.607	18.451	24.646

## 4 重叠度和交会角对交会精度的共同影响

事实上,前方交会的精度受影像间的重叠度和交会角的共同影响。在传统的摄影测量中,只利用相邻两张影像进行前方交会,因而交会角是由相邻影像的重叠度(或摄影基线的长度)确定的。当影像的重叠度较大时,利用所有影像同时进行前方交会,交会角是由间隔最大的两张影像所确定的,此时交会角必然比传统的相邻两张影像所确定的交会角大,因而前方交会精度也更高。

利用一组由 UltraCam 数码相机按航空摄影方式拍摄的重叠度为 88% 的航带中抽取的影像进行实验分析。影像的实际像幅为  $67.5\text{ mm}\times 103.5\text{ mm}$ ,相机焦距为  $104.40\text{ mm}$ ,像元大小为

$9\text{ }\mu\text{m}$ 。利用从图 4 的航带中抽取的 5 度重叠的小影像块上的特征点进行了前方交会实验,结果见表 4,其中外方位元素为自由网平差结果。利用相邻两张影像进行前方交会时(表 4 中第 1~4 行),交会角为 $5^\circ$ 左右, $Z$ 方向的交会误差最大超过 5 个像素。利用间隔影像进行前方交会时(表 4 中第 5~7 行),交会角为 $10^\circ$ 左右, $Z$ 方向的交会误差最大不超过 3 个像素。而交会角增大到约 $20^\circ$ (表 4 中第 8~10 行)时, $Z$ 方向的误差小于 1 个像素。当重叠度和交会角同时达到最大(表 4 中第 10 行)时,前方交会精度达到最高。从表 4 中还可看出,随着交会角和重叠度的增大,平面方向的前方交会精度也在逐步提高。因而采用所有影像同时进行前方交会,平面和高程(深度)方向的交会精度都会达到最高。实用中考虑到交会精度和成本等综合因素的影响,影像间的重叠度以 80%(也即重叠度约为 5 度)左右为宜。

表 4 影像重叠度和交会角对交会精度的共同影响				
Tab. 4 Precision of Space Intersection and Image Number and Intersection Angle				
交会影像	交会角/ $^\circ$	$m_x/\mu\text{m}$	$m_y/\mu\text{m}$	$m_z/\mu\text{m}$
1-2	4.862	11.6	14.9	47.2
2-3	5.010	6.2	12.1	39.7
3-4	5.178	3.4	12.4	38.2
4-5	5.321	4.1	10.3	34.6
1-3	9.876	3.2	5.7	25.3
2-4	10.139	3.4	7.8	24.9
3-5	10.503	2.3	4.1	13.1
1-5	20.033	1.7	2.8	8.6
1-3-5	20.033	1.5	2.8	8.3
1-2-3-4-5	20.033	1.4	2.6	8.0

## 5 结 语

影像的重叠度越大(也即摄影基线越短),自动匹配越容易,匹配点越多,相对定向的精度也越好。交会角相同时,随着影像重叠数目的增加,平面和深度(或高程)方向的前方交会精度不断提高;与传统摄影测量一样,采用两张影像进行前方交会时,不断增大交会角,深度(或高程)方向的交会精度也不断提高。

前方交会的精度受影像重叠度和交会角大小的共同影响。在实用中,考虑到交会精度和成本等综合因素的影响,可以拍摄重叠度为 80% 左右的影像,并利用所有重叠影像进行前方交会,这样既可增加重叠数目,又可加大交会角,从而不仅提高了高程(深度)方向的交会精度,也可以提高平面方向的交会精度,并增加结果的可靠性,满足高

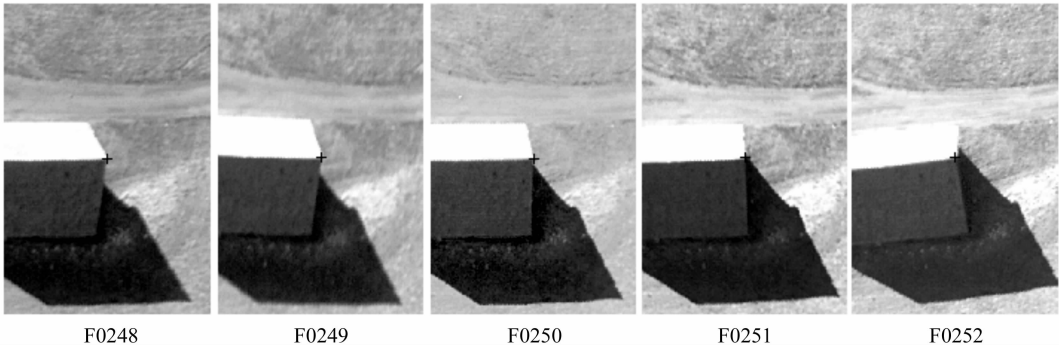


图 4 UltraCam 航空数码相机所拍摄的 5 度重叠影像块

Fig. 4 Image Patches with 5 Overlaps Acquired by UltraCam Aerial Digital Camera

精度三维重建和其他应用的需要。

参 考 文 献

1 张永军. 基于序列图像的工业钣金件三维重建与视觉检测:[博士论文]. 武汉: 武汉大学, 2002

2 李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量学. 北京: 测绘出版社, 1992

3 李卫红, 张宏利, 符名引. 佛山市 1 : 500 航测法数字化成图的方法和精度保障措施. <http://www.fsgh-kc.org.cn/02005003.html>, 1996

4 游素亚, 徐光祐. 立体视觉研究的现状与进展. 中国图像图形学报, 1997, 2 (1): 17~24

5 Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in

Computer Vision. Cambridge: Cambridge University Press, 2000

6 Thurgood J. Technical Specifications of UltraCam-D. <http://www.vexcel.com/products/ultracam.html>, 2004

7 Tang L, Dörstel C, Jacobsen K, et al. Geometric Accuracy Potential of the Digital Modular Camera. IAPRS, Amsterdam, 2000

8 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础. 武汉: 武汉大学出版社, 2003

第一作者简介: 张永军, 讲师, 博士. 现主要从事数字摄影测量和计算机视觉方面的研究。  
E-mail: zhangyj@whu.edu.cn

Analysis of Precision of Relative Orientation and Forward Intersection with High-overlap Images

ZHANG Yongjun<sup>1</sup> ZHANG Yong<sup>1</sup>

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Image sequence acquired by digital cameras has the advantages of high-overlap and redundancy of observations, which makes it more and more popular in 3D reconstruction. Precision of relative orientation and forward intersection with high overlapping image sequence is analyzed. The higher the overlap is, the better the result of relative orientation is. The more images are used, and the bigger the intersection angle is, the higher the precision of forward intersection is. In practice, images with 80 % overlap are optimal for 3D reconstruction and other applications.

**Key words:** image sequence; overlap; relative orientation; forward intersection; precision analysis

About the first author: ZHANG Yongjun, lecturer, Ph.D., majors in digital photogrammetry and computer vision.  
E-mail: zhangyj@whu.edu.cn