

# 铅垂线辅助的大比例尺城区空三自动转点

张剑清<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:** 利用城区航空影像中存在的大量铅垂线, 提出了一种铅垂线辅助的多影像匹配算法。该算法应用于大比例尺城区的空三自动转点, 大大提高了自动转点的成功率。

**关键词:** 铅垂线; 灭点; 空中三角测量; 多影像匹配

**中图法分类号:** P231.5

在传统的空中三角测量作业过程中, 连接点的观测一直是最耗时、最繁重的工作。自动空中三角测量的主要标志之一就是使用影像匹配技术替代人工量测同名点, 包括从影像中提取特征点和在相邻影像间自动匹配同名点等。然而, 对于城区大比例尺航空摄影来说, 虽然影像具有很高的地面分辨率, 可以清晰地判读出各种地物信息, 但是也给自动空三转点, 特别是航带间的转点, 带来了许多困难<sup>[8]</sup>。航带间连接点比航带内连接点可以提供更多的多余观测, 有助于建立一个稳健的测区几何关系。因此, 航带间连接点的数量就成为衡量测区像点网连接强度的重要指标, 同时也是衡量一个空三软件自动性能的重要指标<sup>[2]</sup>。

本文主要针对大比例尺城区的空中三角测量, 利用城区航空影像中存在的大量铅垂线, 提出了一种应用于大比例尺城区的空三自动转点铅垂线辅助的多影像匹配算法。

## 1 铅垂线辅助空三自动转点算法

本文主要针对大比例尺城区的空中三角测量, 利用城区航空影像中存在的大量铅垂线观测, 提出了一种铅垂线辅助的多影像匹配算法。算法流程图如图 1 所示。

### 1.1 像底点观测的误差方程式

对于中心投影而言, 物方空间的一组平行线在影像平面上的投影汇交于一点, 该点即所谓的灭点<sup>[3]</sup>。对于航空摄影来说, 物方空间的铅垂线

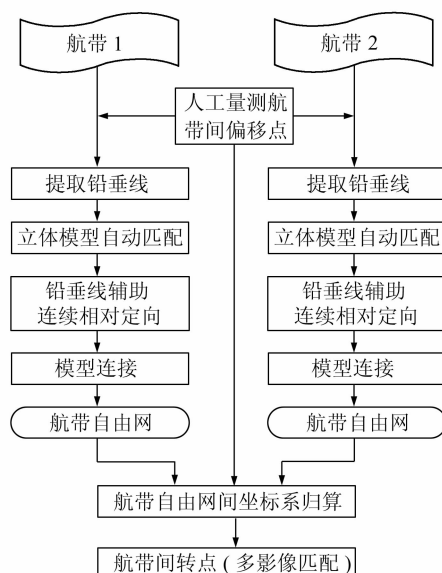


图 1 铅垂线辅助的空三自动转点算法  
Fig. 1 Vertical Lines Supported Ties Auto Transferring Strategy

也是一组平行线, 它们在像平面上的投影同样汇交于一点, 该点又称作像底点。设  $f$  为航空影像的摄影机焦距, 影像的旋转矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

可以求得影像像底点的坐标<sup>[4,5]</sup>:

$$x^0 = -f \cdot \frac{c_1}{c_3}, y^0 = -f \cdot \frac{c_2}{c_3} \quad (2)$$

将式(2)线性化后可以得到像底点观测的误差方程为:

$$\begin{aligned}
 v_x = & -f \frac{a_1 c_3 - c_1 a_3}{c_3^2} \cdot \Delta\varphi - \\
 & f \frac{c_3 \cos\varphi \cos\omega \sin\kappa + c_1 \cos\varphi \sin\omega}{c_3^2} \cdot \Delta\omega - \\
 & f \frac{c_2}{c_3} \cdot \Delta\kappa - l_x \\
 v_y = & -f \frac{a_2 c_3 - c_2 a_3}{c_3^2} \cdot \Delta\varphi - \\
 & f \frac{c_3 \cos\varphi \cos\omega \cos\kappa + c_2 \cos\varphi \sin\omega}{c_3^2} \cdot \Delta\omega + \\
 & f \frac{c_1}{c_3} \cdot \Delta\kappa - l_y
 \end{aligned} \tag{3}$$

在实际应用中,首先对影像中的铅垂线束作交会计算确定影像的像底点坐标,然后按照式(3)对每一张影像列出两个附加的条件方程式。

### 1.2 铅垂线辅助连续相对定向

当立体像对是由城区的航空影像构成时,可以在左、右影像中分别量测大量的铅垂线,并将这些铅垂线引入到城区立体像对的相对定向中来。

对于航带中的第一个模型,可以按照下述步骤进行:① 分别使用左、右影像上的铅垂线计算出左、右影像的像底点坐标,其中交会计算采用最小二乘平差方法,并对铅垂线中的粗差观测进行探测和自动剔除,确保像底点坐标的精度;② 利用左影像的像底点坐标,在式(2)中令  $\kappa=0$ ,从而解算出左影像的  $\varphi$  和  $\omega$ ;③ 假定左影像的外方位元素为  $X_s=Y_s=Z_s=\kappa=0$ ,对每一对同名点按照共面条件列出误差方程式(4),并对右影像的像底点坐标,按照方程(3)列出误差方程式,然后将这些方程一起法化并求解右影像的角元素  $\varphi'$ 、 $\omega'$  和  $\kappa'$  以及基线分量  $B_y$  和  $B_z$ 。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F} = & \begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ u & v & w \\ u' & v' & w' \end{vmatrix} = 0 \\
 v_q = & \frac{\partial F}{\partial B_y} \cdot \Delta B_y + \frac{\partial F}{\partial B_x} \cdot \Delta B_x + \frac{\partial F}{\partial \varphi'} \cdot \Delta \varphi' + \\
 & \frac{\partial F}{\partial \omega'} \cdot \Delta \omega' + \frac{\partial F}{\partial \kappa'} \cdot \Delta \kappa' - q
 \end{aligned} \tag{4}$$

对于航带中的后续模型,左影像的姿态角直接使用上一模型中右影像的计算结果即可。

由于在上述相对定向过程中使用了像底点约束条件,所以构建的模型可以保证铅垂线在空间依然是铅垂线,因此模型在空间是已经置平的<sup>[8]</sup>。

### 1.3 创建航带自由网

大比例尺的城区航空影像中有丰富的铅垂

线,在构建航带自由网时采用铅垂线辅助连续相对定向和模型连接。由于铅垂线辅助连续相对定向恢复的模型在空间是置平的,因此构建的自由网在空间同样是置平的。

### 1.4 航带自由网间的坐标系变换

如前所述,使用铅垂线辅助连续相对定向构建的航带自由网在空间是置平的。此时航带自由网与使用控制点绝对定向后的航带网之间的变换将只存在 5 个参数:1 个比例尺系数  $\lambda$ ,3 个坐标平移量( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ )和 1 个绕 Z 轴的旋转角  $\kappa$ 。因此,不同的航带自由网之间的坐标系变换也只存在上述 5 个参数,其变换关系式为:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \lambda \cdot \begin{bmatrix} \cos\kappa & \sin\kappa & 0 \\ -\sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \tag{5}$$

这就意味着在相邻的航带间只用两个点就可以确定相邻航带自由网之间的坐标变换关系。

由此可见,在构建航带自由网中使用铅垂线辅助连续相对定向代替传统连续相对定向后,利用航带间偏移点可以比较严格地确定相邻航带自由网间的坐标变换关系。因此,航带间影像匹配时的点位预测精度也将得到相应提高。

### 1.5 多影像匹配

基于灰度互相关的影像匹配算法经常受到匹配窗口中灰度值变化的影响,而影像灰度的系统变形有辐射畸变和几何畸变<sup>[1]</sup>。在竖直航空摄影的情况下,地形高差则是几何畸变的主要因素,因此,在陡峭的山区和大比例尺的城区的影像匹配要比平坦地区影像匹配困难。

如果要解决影像中几何畸变对灰度互相关匹配的影响,必须设法改正影像中的几何畸变。一般说来,需要已知影像的外方位元素和必要的地形信息<sup>[6]</sup>。在铅垂线辅助的空三自动转点中,这两个条件是可以近似满足的。

首先,在航带间影像匹配之前已经分别建立了空间置平的航带自由网,并且使用航带间偏移点可以将相邻的航带自由网严格归算成一个统一的自由网。其次,在不同航带的影像之间进行连接点匹配之前,可以利用待匹配点在其中一条航带中的观测值(至少两个)计算出待匹配点在自由网中的模型坐标。

基于以上两点,可以使用如图 2 所示的方法在航带间转点之前消除影像中由于地形高差引起的几何畸变。以航带 1 中的连接点  $p$  为例,改正步骤如下:① 计算连接点  $p$  在自由网中的模型坐

标;②在模型坐标空间中取一个高程为  $w_p$  的小平面  $\Gamma_w$ ,利用共线方程将面元  $\Gamma_w$  投影到不同的影像上,例如航带1的第  $k$  张影像和航带2的第  $k$  张影像上的四边形  $\zeta$  和  $\zeta'$ ,用  $\zeta$  和  $\zeta'$  在航带1的第  $k$  张影像和航带2的第  $k$  张影像间定义一个仿射变换;③利用仿射变换将航带2的第  $k$  张影像中的四边形  $\zeta'$  重采样为新的影像窗口  $\zeta''$ 。

$$\begin{aligned} x' &= a_0 + a_1x + a_2y \\ y' &= b_0 + b_1y + b_2y \end{aligned} \tag{6}$$

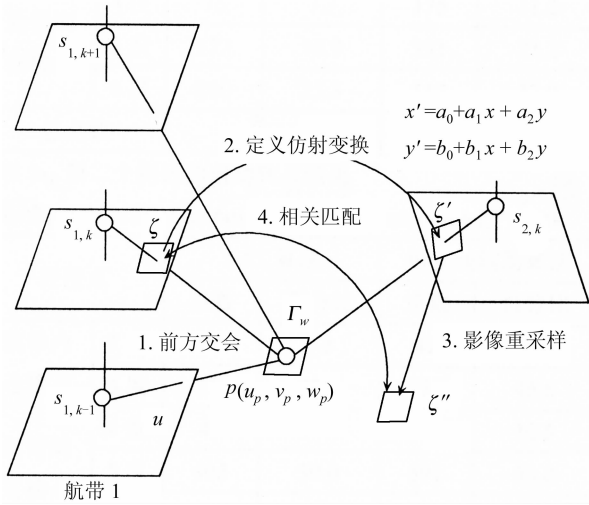


图2 几何畸变改正

Fig. 2 Correction of the Geometric Distortion

在航带间的影像匹配中,还需要充分利用多张影像重叠提供的数据冗余观测来有效地解决灰度互相关的多解问题,从而减少匹配中的粗差观测<sup>[7]</sup>。本文使用的多影像匹配策略如图3所示。

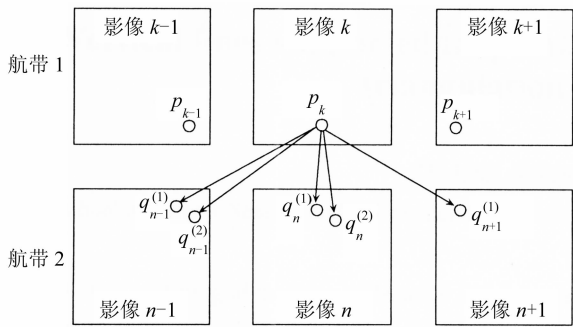


图3 航带间的多影像匹配

Fig. 3 Multi-Image Matching Between Strips

下面以航带1中的连接点  $p$  匹配到航带2为例,介绍航带间多影像匹配转点的过程。假定航带1中连接点的各个观测为固定观测值,而转点过程中任意航带间的影像匹配都需要按照图2所示的方法作几何畸变的预改正。

1) 在航带1中确定基准影像,通常以像点坐

标距离主点最近的影像作为基准影像。在图3中,航带1的第  $k$  张影像被确定为基准影像。

2) 匹配首先在航带1的基准影像和航带2中摄站坐标距离基准影像最近的影像(第  $n$  张影像)之间进行,匹配后通常会获得多个候选匹配点。对于每个候选匹配点,都要计算该匹配点与航带1中其他非基准影像上像点观测值之间的相关系数  $C(p_i; q_n^{(j)})(i=k-1, k, k+1)$ 。那么候选观测  $q_n^{(j)}$  与航带1中连接点  $p$  之间总的相关系数定义为:

$$C(p; q_n^{(j)}) = \frac{\sum_i C(p_i; q_n^{(j)})}{m} \tag{7}$$

其中,  $m$  为固定观测数,即连接点  $p$  在航带1中的观测数,而航带2第  $n$  张影像中的最终匹配结果取相关系数最大的候选点,即

$$C(p; q_n) = \max\{C(p; q_n^{(j)}) \mid j = 1, 2, \dots, l\} \tag{8}$$

式中,  $l$  为航带2第  $n$  张影像中的候选匹配点数。匹配完成后将航带2的第  $n$  张影像中的匹配结果也作为固定观测值。

3) 航带2中其他影像的匹配类似于2),也是首先与基准影像匹配获得多个候选匹配点;然后计算每一个匹配点与其他固定观测值之间的相关系数和总相关系数;最后取相关系数值最大的候选点作为该影像中的最终匹配结果。

## 2 自动转点试验

使用实际的大比例尺城区测区检测本文提出的算法。测区共有8条航带,119张影像,测区中航向重叠度为65%,旁向重叠度为45%,影像的扫描分辨率为25  $\mu\text{m}$ ,摄影比例尺为1:4 000,像机为LMK像机。

试验中,首先在相邻航带之间人工量测2个航带间的偏移点;然后分别使用VirtuoZo AAT的自动转点算法和本文改进的自动转点算法各自独立进行了自动转点试验。连接点采用5×3布局(即在影像三度重叠区的5个标准点位处,每个点位保留3个连接点)。表1列出了试验测区使用两种转点算法获得的连接点的重叠度的统计结果。

由表1所示的结果可以发现,使用本文提出的铅垂线辅助自动转点算法后,测区的连接点数由1 025提高到1 558,这说明测区自动匹配的成功率都获得了明显提高。另外,测区中航带间连接点的比例由49.5%提高到65.3%,说明新的转

表 1 第一个测区的自动转点结果

Tab. 1 Results of Tie Point Auto Extraction of the 1st Block

连接点	AAT 算法		铅垂线辅助算法		
	点数	百分比	点数	百分比	
航带内连接点	2 度	89	8.7	89	5.7
	3 度	428	41.8	451	28.9
	4 度	75	7.3	175	11.2
航带间连接点	5 度	173	16.9	331	21.2
	6 度	260	25.3	512	32.9
总点数	1 025		1 558		

点算法可以明显改善航带间转点的成功率,提高航带间连接点在整个测区连接点中所占的百分比,从而有助于建立相对稳健的测区几何关系。

### 3 结 语

本文主要针对大比例尺城区的空中三角测量,利用城区航空影像中存在的大量铅垂线观测,提出了一种铅垂线辅助的多影像匹配算法并将其应用于大比例尺城区的空三自动转点,大大提高了大比例尺城区空三自动转点的成功率。

#### 参 考 文 献

- [1] 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,1996
- [2] Buyuksal G, Zhang Li. Practical Experiences with

Automatic Aerial Triangulation Using Different Software Packages[J]. Photogrammetric Record,2003,18(102):131-155

- [3] 乐荷卿. 建筑透视投影[M]. 长沙:湖南大学出版社,1987
- [4] Zhang Jianqing, Zhang Yong, Zhang Zuxun. The Feasibility Study on the Aerial Triangulation over Urban Area Constrained by Vertical Lines[J]. SPIE Proceedings of the 4th SPIE International Symposium Multispectral Image Processing and Pattern Recognition, Wuhan, 2005
- [5] 张剑清,张勇,方芳. 铅垂线辅助城区航空影像的绝对定向[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32(3):197-200
- [6] Gruen A. Adaptive Least Square Correlation: a Powerful Image Matching Technique[J]. South African Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1985, 14(3):175-187
- [7] Gruen A W. Digital Photogrammetric Stations Revisited[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996,31(B2):127-134
- [8] 张勇. 铅垂线辅助空中三角测量的应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2006

第一作者简介:张剑清,教授,博士生导师。现主要从事摄影测量与遥感、计算机视觉研究。代表成果为全数字化摄影测量系统 VirtuoZo 及专著《数字摄影测量学》、《摄影测量学》。  
E-mail:jqzhang@supresoft.com.cn

## Vertical Lines Supported Tie Points Auto Extraction of Large Scale Aerial Triangulation Over Urban Areas

ZHANG Jianqing<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:** Auto matching of the large scale aerial imagery over urban areas is one of the most difficult problems in the auto aerial triangulation. Through the analysis of the auto-extracting tie points strategy of VirtuoZo AAT, the vertical line observations in the large scale aerial imagery over urbans have been introduced into the traditional continuous relative orientation; and then a multi-image matching strategy with the correction of geometric distortion in the images due to the height variance has been prompted to improve the success rate of the auto-matching of images between strips.

**Key words:** vertical lines; vanishing point; aerial triangulation; multi-image matching

**About the first author:** ZHANG Jianqing, professor, Ph.D supervisor. His research field includes photogrammetry, remote sensing and computer vision. His representative achievements are a fully digital photogrammetry system VirtuoZo, literature "Digital Photogrammetry" and "Photogrammetry".

E-mail: jqzhang@supresoft.com.cn