

# 基于直线特征的遥感影像自动绝对定向

张祖勋 张宏伟 张剑清

(武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079)

**摘要** 主要研究了道路自动提取和直线空间后方交会在遥感影像自动绝对定向中的应用, 分析了用控制线代替控制点在后方交会中的优点, 详细阐述了直线空间后交的几何关系并扩展了基于“共线方程”形式的误差方程式, 实现了在已有矢量道路网基础上的道路自动提取。通过单幅航空影像绝对定向和高分辨率卫星影像外参数解算试验及精度分析, 证明了本文算法和策略的正确性, 为航空影像自动空中三角测量、多尺度遥感影像的配准提供了一个可行的方向。

**关键词** 直线摄影测量 自动绝对定向 道路提取 主动轮廓线模型(蛇模型)

**中图分类号**: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)02-0213-05

## Automatic Absolute Orientation of Remote Sense Image by Line Photogrammetry

ZHANG Zu-xun, ZHANG Hong-wei, ZHANG Jian-qing

(College of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430070)

**Abstract** This paper introduces an automatic approach for the exterior parameter calculation by matching extracted road from the image against the corresponding objects of an existing vector road map or a GIS database. The advantage of substituting control line for control point was analyzed. We have expatiated perspective geometry and coplanar constraint between the image space linear feature and the object space line segment in detail, and extended error condition equation. Within the study aerial imagery and remote sense image are exemplarily applied, whereas the topographic database of road net is vectored from map with the scale of 1:10 000. The result shows that the registration of image data achieved pixel accuracy. Potential applications of the approach are manifold, like automatic aerotriangulation, multi-scale remote sensing image registration, with some minor modifications.

**Keywords** line photogrammetry, automatic absolute orientation, road extraction, active contour models (snake)

## 1 引言

众所周知,在数字摄影测量工作站上,大多数的摄影测量工作将由计算机来完成。计算机不仅仅要实现摄影测量的计算任务,而且要实现识别和观测功能,例如识别框标和识别同名点等,大大地提高了摄影测量的自动化功能<sup>[1,2]</sup>。但是目前,数字摄影测量工作站流程中只有部分功能实现了自动化。如

表1所示。

绝对定向,即如何获取影像被摄瞬间的外方位元素,一直是摄影测量和遥感工作者所探讨的问题,也是影像正射纠正的必经过程。传统上,外方位元素是以空中三角测量和大量地面控制点进行区域网平差计算出来的。但是随着地图修测的迫切需要,如何由影像与地图直接配准,确定影像的方位元素显得愈来愈重要。由于地图和影像上同名地物表示的方式差异较大,到目前为止对应的控制点仍然需

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40337055)

收稿日期:2003-09-16; 改回日期:2004-09-08

第一作者简介:张祖勋(1937~),男,教授,博士生导师,中国工程院院士、国际欧亚科学院院士。1960年毕业于武汉测绘学院。研究领域为摄影测量、遥感与图像处理等研究领域。发表论文90余篇。

联系人:张宏伟, E-mail: zhwl@yahoo.com.cn

表 1 数字摄影测量流程中自动化程度

Table 1 Status of automation in photogrammetry

操作	描述	举例
内定向	完全自动化操作	VirtuoZo 3.2 for Windows Supresoft inc.
相对定向	完全自动化,有时少量人工修改	VirtuoZo 3.2 for Windows Supresoft inc
空中三角测量	目前控制点仍然靠人工选择	Schickler (1992) Taravudh ipdecho(2002)
DEM 生成	完全自动生成,有时需要少量人工编辑	VirtuoZo 3.2 for Windows Supresoft inc
测图	目前需要大量人工操作,自动算法不成熟	文献[3]

要人工量测。无论在野外还是在室内地图上量测控制点都是一件耗时、耗人力物力的繁冗工作,而且不容易准确量测,这越来越成为地图修测中全自动空中三角测量的瓶颈。虽然近几年随着 GPS 全球定位系统和 IMU 惯性测量装置的应用,地面控制点可以大大减少,但在目前国内甚至国外还没有大规模成熟应用,而且无控制点时存在系统误差<sup>[4]</sup>。Taravudh 提出根据地图中房屋的角点或道路的交叉口在已有正射影像上生成理想图像模板,和原始图像进行自动匹配进行图像和地图的配准,但图像由于成像条件和周围地物环境的不同,道路和房屋的图像特征变化较大,用单一模板进行匹配失败率较高<sup>[5]</sup>。针对这种情况,一些文献研究利用高级几何特征地物,如直线和曲线代替点作为控制要素进行自动绝对定向,这不仅为自动绝对定向提供了一个方向,而且增加了观测值的冗余度和平差时的几何约束条件,改进了绝对定向的精度和可靠性<sup>[6]</sup>。从几何角度看,直线的另一个优点是物方直线在影像上对应的直线不要求完全看得见,而且物方和像方所对应的直线端点不要求是同名点。随着遥感影像地物自动(半自动)提取的发展,特别是道路网的自动(半自动)提取,给利用直线进行后方交会自动计算外方位元素提供了“自动化”的可行途径。本文通过分析物方空间上的直线与相应影像上直线的成像几何关系,利用自动道路提取的结果,为直线后方交会提供观测值,进而进行了自动单像绝对定向。Heuvel 先后提出了利用物方空间两组共面的平行线,以及利用物方直线和对应的像方直线共面的条件进行绝对定向和建筑物重建,并充分利用建筑物边缘和平面的几何约束来增强条件方程的稳定性。在建筑物近景影像中这样的观测值很容易找到,但在普通中、小比例尺的航片中则很难实现<sup>[7,8]</sup>。本

文的算法主要得益于文献[8]~[11],并对基于共面条件的后方交会算法进行了扩展,方便了点线混合平差计算,并引申到卫星影像的外参数解算,所需要的观测值是遥感影像中比较常见的自由曲线(道路或者河流)。

## 2 道路段自动提取

从遥感影像上自动提取道路是摄影测量与遥感领域的难题和重点,它对于摄影测量和遥感影像分析自动化起到至关重要的作用<sup>[12]</sup>。虽然遥感影像上道路特征比较明显,不过由于受周围地物(田埂、建筑物、树木等)的影响,影像上的道路并不是完全地具有平行反边缘的均一化亮度条带,因此道路段提取时不仅考虑道路本身的辐射信息(边缘、亮度),还要考虑道路的几何结构信息,甚至还要考虑周围其他地物信息,使之在提取过程中相互约束,提高提取的准确度和可靠性。由于比较实用地直接从影像上自动提取道路算法至今还不成熟,因此提出了利用已有的矢量地图中的道路网作为影像上道路自动提取的已知信息(初值),根据影像特征逐级优化,大大提高了提取的可靠性,而且矢量地图提供了物方地理坐标,这些数据又是后面基于直线后方交会所需要的观测值。首先将已有的矢量化地图中的道路网通过粗略的 3 个控制点进行仿射变换,把变换的结果叠加到新的航空影像上(如图 1 的虚线部分)。把变换后的道路网作为初始值,采用基于最小二乘 B 样条的主动轮廓线模型(LSB-Snake)进行结果优化。Snake 模型是一种综合道路曲线内外张



图 1 基于 LSB-Snake 模型的航空影像道路自动提取结果  
(图中虚线表示已有的道路网数据,实线为自动提取的结果)

Fig. 1 Road extract by LSB-Snake model

(The black dash lines are initial value provided by vector road mapthe black solid lines are road lines extracted by LSB-Snake model)

力和图像特征的能量极小化模型,它把道路的初级信息(辐射信息)和中级信息以及高级信息(形状、拓扑关系和先验知识)有机地结合在一起,通过调节各能量函数的系数来分配各个影响因素的权重。其模型数学表达形式为

$$E_{snake}(v(s)) = \int_0^1 \lambda_1 E_{int}(v(s)) + \lambda_2 E_{image}(v(s)) + \lambda_3 E_{model}(v(s)) ds \quad (1)$$

其中,  $E_{int}$  表示轮廓的内部能量,主要表达了道路曲线的连续性和曲率约束(几何属性),  $E_{image}$  表示影像特征能量,它吸引初始值向影像上道路特征移动,如果以边缘作为特征则  $E_{image} = -|\nabla I(x, y)|$ ,  $E_{model}$  表示外部能量,主要施加外部因素约束(如范围),  $v(s)$  是道路形状的表达式,根据道路的形状采用参数化的 B 样条函数,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为权函数。

在能量极小化(优化)过程中将式(1)改写成间接平差形式的误差方程,由于是非线性形式,通过 Taylor 多项式展开取一次项近似进行迭代运算求解,因此称作 LSB-Snake<sup>[3,13]</sup>。由于仿射变换的结果和影像上道路特征差距较大(约 20~30 像素),而 LSB-Snake 模型只能实现局部最优化,考虑采用多尺度策略,先在金字塔影像上进行优化,然后把金字塔上优化的结果作为下级金字塔上的初值逐级优化直至到原始影像,道路提取的结果如图 1 所示。

### 3 数学模型

在直线摄影测量中,共面条件是其最基本的概念,影像上的直线位于过其对应的空间直线与摄影中心的平面内,下面对框幅式航空影像的共面条件方程进行分析和扩展,使其适用于推扫式线阵 CCD 卫星影像。

#### 3.1 框幅式航空影像

由文献[8]~[11]可知,地面直线 PQ 和对应影像上直线 pq 之间的共面,即满足误差方程式

$$\begin{pmatrix} u_p & v_p & w_p \\ X_p - X_s & Y_p - Y_s & Z_p - Z_s \\ X_q - X_s & Y_q - Y_s & Z_q - Z_s \end{pmatrix} = F_X = 0 \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} u_p = a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3 f \\ v_p = b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3 f \\ w_p = c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3 f \end{cases}$$

其中,  $x_0$  和  $y_0$  表示像主点坐标;  $f$  是相机焦距,  $a_1,$

$a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$  为外方位角元素余弦值。

限于篇幅,误差方程式(2)的线性化及各项系数从略。除了上述的 S、p、P、Q 4 点的共面方程外,还有 S、q、P、Q 4 点的共面方程,其线性化形式与上述方程式类似。另外为了和利用控制点所列出的误差方程(间接平差)联合参与平差,  $d_{x_p}$  和  $d_{y_p}$  ( $d_{x_p}, d_{y_p}$  为像方观测值的残差)任取一个,当影像上直线接近垂直时取  $d_{x_p}$ ,相反当影像上直线接近平行时取  $d_{y_p}$ 。

为了方便,可以将共面方程简化为共线方程,这样可以利用惯用的共线条件方程作为误差方程式参与平差解算。物方直线的端点 P、Q 投影到影像上,仅取它与对应直线上沿 x 或 y 方向的距离  $d_x$  或  $d_y$  (视该直线方向而定)作为残差,如图 2 所示。因此,一条直线,两个端点,只有两个误差方程式,这是它与一般共线方程式唯一的差别。

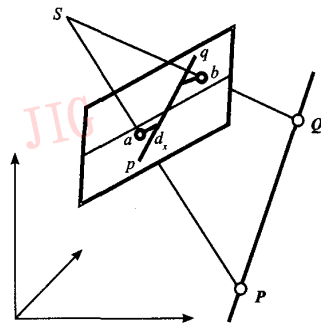


图2 将“共面”条件归化为“共线”条件

Fig.2 The coplanar condition is transformed to the collinear condition in perspective geometry

误差方程式为

$$\begin{cases} v_x = a_{11}\Delta X_s + a_{12}\Delta Y_s + a_{13}\Delta Z_s + a_{14}\Delta\varphi + a_{15}\Delta\omega + a_{16}\Delta\kappa - l_x \\ \text{或} \\ v_y = a_{21}\Delta X_s + a_{22}\Delta Y_s + a_{23}\Delta Z_s + a_{24}\Delta\varphi + a_{25}\Delta\omega + a_{26}\Delta\kappa - l_y \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} l_x = (y - y_a) \times (x_b - x_a) \div (y_b - y_a) + x_a - x \\ l_y = (x - x_a) \times (y_b - y_a) \div (x_b - x_a) + y_a - y \end{cases}$$

$x$  和  $y$  表示用各待定外方位元素的近似值代入共线条件方程求出的像点坐标计算值;  $\Delta X_s, \Delta Y_s, \Delta Z_s, \Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa$  表示影像外方位元素的改变量;  $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}, a_{16}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{25}, a_{26}$  的推导见文献[14]。

#### 3.2 推扫式线阵 CCD 卫星影像

目前的高分辨率遥感影像大部分是线阵列

CCD 推扫成像,即在扫描方向是中心投影,在飞行方向每条线上是平行光投影,如 SPOT、IKONOS 和 QUICKBIRD 等。由于传统的遥感影像方位参数之间存在很强的相关性,它们的解算一直是遥感影像几何纠正的关键问题。文献[15]提出了基于平行光投影的三步变换的方法

$$\begin{cases} f - \frac{Z_g}{m \cos \alpha} (x - x_0) = a_0 + a_1 X_g + a_2 Y_g + a_3 Z_g \\ f - (x - x_0) \tan \alpha = a_0 + a_1 X_g + a_2 Y_g + a_3 Z_g \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $X_g, Y_g, Z_g$  为地面坐标,  $x, y$  为对应的像点坐标,  $a_0, a_1, a_2, a_3, \alpha, b_0, b_1, b_2, b_3$  为模型的外参数。

通过试验证明该方法可以解决影像方位参数求解的相关性问题,但是文中试验是用人工选择控制点试验的。本文充分利用线状要素相对于点状要素的优点,以第 2 节提取的道路作为地面控制要素,结合 3.1 节分析的“共线”条件和式(4),实现了线状要素在遥感影像中的应用。具体做法为误差方程式仍采用式(4),在迭代求解的过程中,由于地面直线端点和影像上直线端点不是同名点,像方坐标值采用如下方法计算:如果影像直线接近垂直,由地面直线端点坐标根据参数初值计算近似像方  $y$  坐标,然后代入像方直线方程求  $x$  坐标,如果影像直线接近平行则由地面直线端点坐标根据参数初值计算近似像方  $x$  坐标,然后代入像方直线方程求  $y$  坐标。每条直线有两个误差方程式,理论上大于 5 条不相互

平行的控制线对能够计算出影像的外参数。

## 4 试验结果

按照上面的算法和策略,在成都某地的单幅航空影像上进行了试验,航空影像的比例尺为 1:15 000,扫描分辨率为 0.02ms,已有道路网采用 1:10 000 地形图矢量化结果,高程数据为 DEM 上内插结果。把已有的道路网(仿射变换的结果)和影像上最终提取的结果,用垂直于道路段的方向进行截取(适度长度间隔使截取后的道路段近似为直线)。将提取道路段的像素坐标和已有道路网的物方坐标作为观测值,分别代入式(3),解算出外方位元素。结果表明外方位元素解算过程中迭代收敛速度很快,另外平差过程中采用了丹麦法选权策略,权函数一般可在计算结束时赋予粗差观测值以较小甚至为零的权,从而正确定位了粗差,使绝对定向的结果不致于因少部分复杂的道路段提取错误而受到影响。为了评价绝对定向精度,人工在影像上找了 11 个检查点,把检查点影像坐标作为真值与模型计算坐标计算残差,结果如表 2 所示,可以看出定向的结果基本上可以满足制作正射影像和中小比例尺测图要求。

试验中卫星影像采用国产的全波段影像(成像方式同 SPOT)。DEM 数据由该影像立体像对匹配生成,已有道路网采用 1:10 000 地形图矢量化结果。9 个检查点精度分析结果见表 3。

表 2 航空影像检查点残差

Table 2 Residual error of check points in aerial image

	No.											中误差
	765	766	508	509	510	511	697	699	705	900	903	
$d_x$ (像素)	1.633	-1.628	-1.064	0.596	1.192	1.032	-0.504	-0.056	0.014	-1.340	-0.358	1.021
$d_y$ (像素)	0.899	0.308	-0.416	0.361	0.576	0.885	0.855	-0.135	0.102	0.085	-0.415	0.544

表 3 卫星影像检查点残差

Table 3 Residual error of check points in satellite image

	No.									中误差
	A01	A02	B01	B02	B03	B04	C01	D01	557	
$d_x$ (像素)	0.145	-1.901	0.271	-1.988	0.362	-2.039	0.416	-2.055	0.433	1.403
$d_y$ (像素)	-1.801	0.700	-1.937	0.801	-2.034	0.859	-2.090	0.871	-2.100	1.583

## 5 结论

本文在已有矢量地图和 DEM 的基础上,通过道路自动提取和基于直线的空间后方交会,对试验区

航空影像和卫星影像进行了单像自动绝对定向。结果表明检查点的精度达到了像素级的精度。对于单幅影像道路不多的情况,可以考虑采用空中三角测量的办法来增加本文介绍的方法的适用性,本文推导的公式很容易扩展成区域网平差的形式,模型

之间的连接点也可以用同名直线替代。当然对于有控制点和连接点的情况,可以不加修改地将传统的基于共线条件误差方程式与本文的误差方程式联合参与光束法区域网平差,增加观测值的冗余度和平差时的几何约束条件,改进绝对定向的精度和可靠性。上述外方位元素解算的过程除了事先粗略找3个控制点外,不需要其他人工作,避免了人工量测地面控制点的繁重工作。

由于在影像与地图上,确定“线特征”远比“点特征”要容易得多,因此在基于传统的“基于点”的摄影测量基础上,再引入“线段匹配”对地图修测的空中三角测量自动化、多尺度遥感影像、以及它们与地图之间的配准自动化都开辟了一条有效的新途径。

### 参考文献(Reference)

- ZHANG Zu-xun, ZHANG Jian-qing, ZHANG Li. The opportunity and challenge in the development of digital photogrammetry [J]. *Transaction of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(1): 7~11. [张祖勋, 张剑清, 张力. 数字摄影测量学发展的机遇与挑战[J]. *武汉测绘科技大学学报*, 2000, 25(1): 7~11.]
- ZHANG Zu-xun, ZHANG Jian-qing. *Digital Photogrammetry* [M]. Press of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, Wuhan, China, 1996: 1~6. [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: 1~6.]
- Gruen A, LI Hai-hong. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSBSnakes [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, 63(8): 985~995.
- Dorota A, Grejner-Brzezinska. Direct Sensor Orientation in Airborne and Land-based Mapping Applications [R]. RTR 461, The Ohio State University, Ohio USA, 2001: 25~30.
- Taravudh Tipdecho. Automatic image registration between image and object spaces [A]. In: *Proceedings of the Open Source GIS-GRASS Users Conference 2002* [C], Trento, Italy, 2002: 11~13.
- Burns J B, Hanson A R, Riseman E M. Extracting straight lines [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(4): 425~445.
- F. A. van den Heuvel. Exterior orientation using coplanar parallel lines [A]. In: *Proceedings of the 10th Scandinavian Conference on Image Analysis* [C], Lappeenranta, Finland, 1997: 71~78.
- F. A. van den Heuvel. A Line-photogrammetric mathematical model for the reconstruction of polyhedral objects [A]. In: *Proceedings of SPIE* [C], San Jose CA, USA, 1999, 3641: 60~71.
- Ayman Habib, Andinet Asmamaw, Devin Kelley, et al. Linear Features in Photogrammetry [R]. TR450, The Ohio State University, 2000: 61~65.
- Kubik K. Relative and absolute orientation based on linear feature [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1991, 46(3): 199~204.
- Zhang Yong-jun. Three Dimensional Reconstruction and Visual Inspection of industrial sheetmetal part with image sequences [D]. Wuhan university, China, 2002: 86~94. [张永军. 基于序列图像的工业钣金件三维重建与视觉检测[D]. 武汉: 武汉大学, 2002: 86~94.]
- HU Xiang-yun, ZHANG Zu-xun, ZHANG Jian-qing. An approach of semiautomated road extraction from aerial image based on template matching and neural network [A]. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII (B3/2) [C], Amsterdam Netherlands, 2000: 994~999.
- Li Hai-hong. Semiautomatic road extract from satellite and aerial images [D]. Dissertation in ETH Switzerland, Zurich; ETH, 1997: 97~117.
- LI De-ren, ZHENG Zhao-bao. *Analytical Photogrammetry* [M]. Press of Surveying and Mapping, Beijing, China, 1992: 19~22. [李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1992: 19~22.]
- ZHANG Jian-qing, ZHANG Zu-xun. Strict geometric model based on affine transformation for remote sensing image with high resolution [A]. In: *International Archives Photogrammetry and Remote Sensing* [C], Graz, Austria, 2002: 309~312.