

文章编号: 1001-1595(2011)05-0592-06

## 基于有理多项式系数模型的物方面元最小二乘匹配

张 过<sup>1,2</sup>, 陈 钊<sup>3</sup>, 潘红播<sup>1</sup>, 江万寿<sup>1</sup>

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;
2. 国家测绘局 卫星测绘应用中心, 北京 100083;
3. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079

### Patch-based Least Squares Image Matching Based on Rational Polynomial Coefficients Model

ZHANG Guo<sup>1,2</sup>, CHEN Tan<sup>3</sup>, PAN Hongbo<sup>1</sup>, JIANG Wanshou<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Satellite Surveying and Mapping Application Center, State Bureau of Surveying and Mapping, Beijing 100083, China;
3. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Since patch-based least squares image matching only applies to the production of regional DSM that based on single-center projection with frame imaging, patch-based least squares image matching based on rational polynomial coefficients(RPC) model is proposed, with multi-center parallel projection in the matching region and RPC-based projection equation constructed, which extends patch-based least squares image matching from single-center projection with frame imaging to stereo-matching of multi-center projection with push-broom imaging, and the algorithm is proved by the experiment with SPOT5-HRG, GeoEye and IKONOS stereo images. The experimental results show that RPC model can be used in patch-based least squares image matching with high matching accuracy maintained to improve its applications and value.

Key words: image matching; least squares; rational polynomial coefficients model; small patch

摘 要: 针对物方面元最小二乘匹配仅适用于单中心投影框幅式成像的匹配制作区域 DSM 问题, 提出基于有理多项式系数(RPC)模型的物方面元最小二乘匹配算法, 结合匹配窗口区域内多中心平行投影方式, 构建 RPC 模型下的投影方程, 将物方面元最小二乘匹配算法从适用于单中心投影框幅式成像扩展到适用于多中心投影推扫式成像的立体匹配, 并用 SPOT 5-HRG、GeoEye、IKONOS 立体影像进行试验验证。试验表明, RPC 模型能用于物方面元最小二乘匹配且不损失匹配精度, 增加了物方面元最小二乘匹配的应用范围和价值。

关键词: 影像匹配; 最小二乘; 有理多项式系数模型; 小面元

中图分类号: P237

文献标识码: A

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAB01B01); 国家自然科学基金(40930532); 国家 863 计划(2008AA121203)

## 1 引 言

最小二乘影像匹配方法<sup>[1]</sup>因为具有灵活、可靠和高精度的特点得到了很快的发展, 推广到多点<sup>[2]</sup>和多片<sup>[3]</sup>情况, 包括基于 SIFT 的宽基线立体影像最小二乘匹配<sup>[4]</sup>以及共线条件约束的多片最小二乘影像匹配算法 MPGC<sup>[3]</sup>等。为了改进 MPGC 算法中多幅待匹配影像间存在独立变形参数这一不足, 文献[5]提出基于物方面元的最小二乘影像匹配, 该算法利用共线条件方程作为几何约束关系, 利用物方面元参数以及单中心投影的投影方程消除参与匹配的各片之间独立的变形系数, 减少未知数个数, 同时得到空间面元的法向量。综上所述, 多点或多片最小二乘匹配若有几

何约束, 均为共线条件方程, 尤其是基于物方面元的最小二乘匹配同时用到共线条件方程和单中心投影框幅式成像的投影方程, 因此该算法只能针对框幅式影像的处理, 不适用于多中心投影的推扫式成像传感器。考虑到应用需求, 如何让该算法适用于多中心投影推扫式成像成为急需解决的问题。

针对星载推扫式传感器获取的影像, 其几何模型一般为严密成像几何模型和通用传感器几何模型, 其中有理多项式系数(rational polynomial coefficients, RPC)模型作为一种通用传感器几何模型在航天影像中得到了广泛的应用。RPC 模型不仅可以替代星载光学(包括国产星载光学影像)和星载 SAR 影像的严密成像几何模型<sup>[7-10]</sup>, 还可以替代星载光学和星载 SAR 中系统几何校

正产品的三维几何模型<sup>[10-11]</sup>, 并且 RPC 模型在星载光学影像的区域网平差中也已得到应用<sup>[12-16]</sup>。

相对于框幅式影像, 星载推扫式传感器的投影方式由单中心投影转换成多中心投影, 成像模型从共线条件方程转换成 RPC 模型。但是 RPC 模型中不存在显式的投影中心, 基于物方面元的最小二乘影像匹配应用于星载推扫式传感器影像的高精度匹配存在问题。

针对上述问题, 提出匹配窗口区域内多中心平行投影方式, 构建 RPC 模型下的投影方程, 将基于共线条件方程和投影方程的物方面元最小二乘匹配从适用于单中心投影框幅式成像推广到多中心投影推扫式成像, 从而提高物方面元最小二乘匹配的应用潜力和价值。

## 2 基于 RPC 模型的物方面元最小二乘匹配

多片最小二乘影像匹配中, 由于每点均是对应地面点的成像, 每幅影像均是对应地面区域的成像, 故各影像之间的变形不是相互独立的, 而是地面模型的反映。因此, 从物方面元的思想出发, 建立新的最小二乘匹配模型, 结合物方面元信息和 RPC 模型, 推导出基于 RPC 模型的物方面元最小二乘匹配算法。本文以三幅影像为例介绍该算法。

如图 1, 假设  $P$  点为物方地面上一点, 其在三幅影像上的成像分别为点  $p_0, p_1, p_2$ , 则以  $p_0, p_1, p_2$  为中心的影像窗口是以  $P(X_c, Y_c, Z_c)$  点为中心的某个物方面元  $f$  的投影。当匹配完成时,  $p_0(s_0, l_0)$  与  $p_1(s_1, l_1), p_2(s_2, l_2)$  即为同名像点,  $P(X_c, Y_c, Z_c)$  为同名点对应的物方坐标。物方面元  $f$  可以是平面元、斜面元、二次曲面等。当面元为斜面元时, 相当于最小二乘影像匹配中采用的仿射映射模型<sup>[5]</sup>。

### 2.1 影像间的辐射关系

如图 1, 以第一幅影像作为基准影像, 匹配窗口中心点  $p_0(s_0, l_0)$  为待匹配点。首先将该点投影到物方面元  $f$  上得到斜面元中心点  $P$  点的空间三维坐标  $P(X_c, Y_c, Z_c)$ , 再将  $P$  点反投影到两幅待匹配影像上得到对应的像点  $p_i(s_i, l_i) (i=1, 2)$ 。匹配窗口内的辐射变换采用不考虑随机噪声的线性变换。

$$g^0(s_0, l_0) = h_{0i} + h_{li} \cdot g_i(s_i, l_i) \quad (1)$$

式中,  $h_{0i}, h_{li}$  为基准影像与第  $i$  幅待匹配影像间

的辐射变形参数;  $g^0(s_0, l_0)$  为基准影像在点  $(s, l)$  处的灰度;  $g_i(s_i, l_i)$  为第  $i$  幅待匹配影像上对应同名点的灰度。

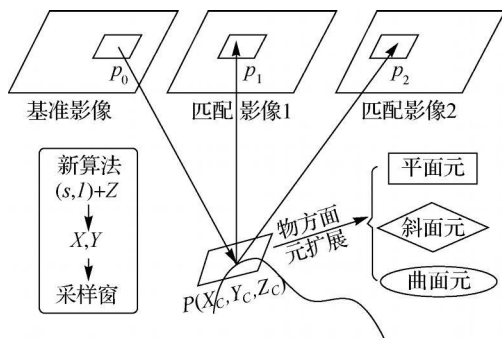


图 1 基于物方面元的多片最小二乘影像匹配<sup>[5]</sup>  
Fig. 1 Patch-based multi-photo least squares image matching

### 2.2 成像模型的几何约束条件

图 2 表示物方面元与基准影像间的投影关系。 $p_0$  为待匹配点,  $p_0$  通过 RPC 模型参数在物方斜面元  $f$  上得到对应的物方点  $P$  点。

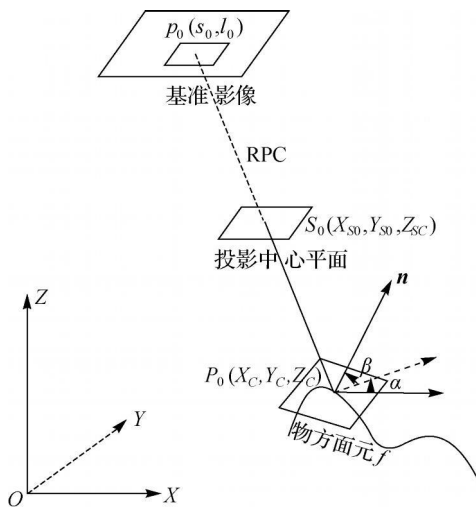


图 2 物方面元与光束的交点<sup>[5]</sup>  
Fig. 2 Intersection of the object patch and the beam

过物点  $P(X_c, Y_c, Z_c)$  的斜面元的法线为  $(a, b, c)$ , 此法线由法线方向角  $(\alpha, \beta)$  决定。斜面元  $f$  的方程<sup>[17]</sup> 为

$$a(X - X_c) + b(Y - Y_c) + c(Z - Z_c) = 0 \quad (2)$$

法线向量与方向角的关系为

$$\left. \begin{aligned} a &= \cos\alpha \cos\beta \\ b &= \sin\alpha \cos\beta \\ c &= \sin\beta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在基于共线条件的物方面元最小二乘影像匹配中, 成像方式为单中心投影框幅式成像, 可以直接列出过待匹配点  $p_0$  的投影方程, 并和斜面元方程联立求解得到投影系数  $\lambda$ 。  $\lambda$  是斜面元的法线向量  $(a, b, c)$  及斜面元中心点高程  $Z_c$  的表达式, 通过投影系数方程可消除参与匹配的各片之间独立的变形系数, 因此投影方程对物方面元最小二乘匹配至关重要。 但对于星载传感器的 RPC 模型, 由于传感器的成像方式是沿着轨道向是平行光投影, 垂直轨道向是行中心投影或者距离投影, 没有显式的投影中心, 为了解决该问题, 提出人造投影中心这一概念仿真多中心平行光投影方式, 即在高于物方斜面元中心点  $Z_c$  一定高程处假定一高程面  $Z_{sc}$ , 该高程面与 RPC 模型的各“投影光线”交点设为点集  $S_0(X_{s0}, Y_{s0}, Z_{sc})$ ,  $S_0$  为匹配窗口内各点对应的人造投影中心, 则在点  $S_0$  和对应地面点之间的一小段“光线”可以近似为平行投影方式, 这样即可在 RPC 模型下得到过投影中心和地面点的投影方程

$$\left. \begin{aligned} X &= X_{s0} + \lambda(X_{0c} - X_{sc}) \\ Y &= Y_{s0} + \lambda(Y_{0c} - Y_{sc}) \\ Z &= Z_{sc} + \lambda(Z_{0c} - Z_{sc}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中,  $(X_{s0}, Y_{s0}, Z_{sc})$  为匹配窗口内各点对应的人造投影中心的物方坐标;  $(X_{0c}, Y_{0c}, Z_{0c})$  为斜面元  $f$  中心点物方坐标的初值;  $(X_{sc}, Y_{sc}, Z_{sc})$  为待匹配像点对应的人造投影中心点的物方坐标;  $(X_{0c} - X_{sc}, Y_{0c} - Y_{sc}, Z_{0c} - Z_{sc})$  即为投影光线方向向量。

过  $S_0$  点和对应地面点的光束和地面斜面元的交点同时满足公式(2)和公式(4), 因此可求得投影系数  $\lambda$ 。 由于物方面元中心点也满足公式(4), 故可得  $\lambda$  与物方面元中心点对应的投影系数  $\lambda_c$  的关系式如下

$$\lambda = \frac{a(X_c - X_{s0}) + b(Y_c - Y_{s0}) + c(Z_c - Z_{sc})}{a(X_c - X_{sc}) + b(Y_c - Y_{sc}) + c(Z_c - Z_{sc})} \cdot \lambda_c \quad (5)$$

物点  $(X, Y, Z)$  到像点  $(s, l)$  满足 RPC 模型<sup>[18]</sup>公式

$$\left. \begin{aligned} s &= F_s(X, Y, Z) \\ l &= F_l(X, Y, Z) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中,  $(s, l)$  为待匹配点的像点坐标;  $F_s, F_l$  为 RPC 模型下像点坐标与对应物方点坐标的转换函数。

联立上述各方程, 即可列出误差方程。 其中, 未知数为斜面元中心的高程  $Z_c$ , 斜面元的法向量方向角  $\alpha, \beta$ , 第  $i$  幅待匹配影像到基准影像的辐射变形参数  $h_{0i}, h_{1i}$ 。 采用最小二乘方法求解即可。 误差方程为

$$V_{g_0}(s_0, l_0) = dh_{0i} + g_i(s_i, l_i) \cdot dh_{1i} + h_{1i} \left[ \frac{\partial g_i}{\partial s_i} ds_i + \frac{\partial g_i}{\partial l_i} dl_i \right] - (g_0(s_0, l_0) - h_{0i} - h_{1i} \cdot g_i(s_i, l_i)) \quad (7)$$

具体实现时, 先假定初始面元为平面元, 带入初匹配得到的像点和对应地面点坐标的初值, 即可按照上述公式平差解求该点的精确坐标和其他相关未知数<sup>[5]</sup>。

### 3 试验

为了验证算法可行性, 本试验先探讨基于 RPC 模型的物方面元最小二乘匹配算法中初值和参数的选择问题, 包括物方斜面元中心点高程  $Z_c$  初值以及人造投影中心高程  $Z_{sc}$  设置对结果的影响, 并在初值和参数合适的条件下进行单点双片匹配试验, 最后针对算法实现过程中的多中心平行投影近似问题, 比较本算法和直接前方交会间的精度差, 验证算法精度。

试验数据采用 SPOT 5-HRG 异轨数据、GeoEye 同轨数据和 IKONOS 同轨数据。 其中, SPOT 5-HRG 为北京市区影像, GeoEye 和 IKONOS 为澳大利亚 Hobart 地区影像。 各数据均由 1 个立体像对构成, 地形包括平原与丘陵, 影像重叠度大于 90%, 利于影像匹配试验。 各影像参数见表 1。

表 1 试验数据说明  
Tab. 1 Specification of datasets in experiments

影像类型	分辨率/m	卫星轨道高度/km	控制点个数	检查点个数	定向中误差/像素			控制点中误差/m		检查点中误差/m	
					x 方向	y 方向	平面	平面	高程	平面	高程
HRG	5	832	5	2	0.110	0.195	0.224	0.518	1.115	1.985	0.965
GeoEye	0.5	681	9	6	0.413	0.464	0.621	0.599	0.333	0.993	0.348
IKONOS	1	681	7	6	0.354	0.132	0.378	0.643	0.438	1.222	0.675

其中, 控制点和检查点由 GPS 量测获取(高程精度优于 0.5 m)。其定向精度为利用立体像对上若干分布均匀的连接点, 采用基于 RPC 模型的像面仿射变换<sup>[19]</sup>进行定向的中误差。

### 3.1 基于 RPC 模型物方面元最小二乘匹配试验

#### 3.1.1 $Z_c$ 初值对结果的影响

最小二乘影像匹配需要较好的初值, 因此在做匹配前需要用其他匹配算法求得待匹配点和对应地面点坐标的初值, 并假定初始面元为一水平面元( $\alpha=0^\circ, \beta=90^\circ$ ), 按误差方程求解匹配点及对应地面点三维坐标的精确值。

物方斜面元中心点高程  $Z_c$  的初值是求取待匹配点对应物方空间三维坐标的起始数据,  $Z_c$  初值越接近真实值, 匹配效果越好。试验中选取 SPOT 5-HRG 数据中一实际高程约为 46 m 的点进行试验, 并比较当  $Z_c$  初值分别为 40 m、45 m、50 m 时匹配结果的差异。具体见表 2(相关系数最大值由黑体表示)。从表 2 可以看出, 当初值

$Z_c$  和实际值相差较小时, 匹配结果更好, 且收敛更快。

表 2  $Z_c$  初值对结果的影响

Tab. 2 The influence of initial value  $Z_c$  on results

$Z_c/m$	相关系数 $\rho$	迭代次数
45.0	<b>0.978 115</b>	3
40.0	0.978 105	7
50.0	0.978 112	12

#### 3.1.2 参数 $Z_{sc}$ 对结果的影响

除此之外, 人造投影中心平面高程  $Z_{sc}$  的初值选择也会对结果造成影响。由于  $Z_{sc}$  平面是人为假定用来仿真多中心平行投影的投影中心和投影方程, 为避免给“光线”模拟带来影响,  $Z_{sc}$  与  $Z_c$  的高程差应控制在一定范围之内。试验比较当  $Z_{sc}$  从 100 m 逐步变为 100 000 m 时匹配结果的差异。具体结果见表 3(相关系数最大值由黑体表示)。

表 3 参数  $Z_{sc}$  对结果的影响

Tab. 3 The influence of the parameter  $Z_{sc}$  on results

影像类型	试验点点号	$Z_{sc}/m$			
		100	1 000	10 000	100 000
HRG	1 点相关系数	0.978 088	0.978 097	<b>0.978 122</b>	0.978 105
	迭代次数	4	4	6	9
	2 点相关系数	<b>0.993 160</b>	0.993 158	0.993 135	0.993 032
	迭代次数	9	9	10	16
	3 点相关系数	0.993 665	0.993 549	<b>0.993 696</b>	0.993 680
	迭代次数	8	8	7	8
	4 点相关系数	0.955 753	<b>0.955 759</b>	0.955 740	不收敛
	迭代次数	13	15	11	—
GeoEye	1 点相关系数	0.979 707	0.979 745	<b>0.979 884</b>	不收敛
	迭代次数	7	7	10	—
	2 点相关系数	0.968 185	<b>0.968 283</b>	0.967 911	0.940 003
	迭代次数	5	5	5	6
	3 点相关系数	0.989 159	0.989 183	<b>0.989 227</b>	0.983 713
	迭代次数	12	12	9	12
	4 点相关系数	<b>0.992 753</b>	0.992 747	0.992 611	0.985 227
	迭代次数	6	6	5	11
IKONOS	1 点相关系数	0.995 638	0.995 642	<b>0.995 706</b>	0.993 883
	迭代次数	9	9	9	9
	2 点相关系数	<b>0.972 679</b>	0.972 600	0.971 559	0.938 668
	迭代次数	5	5	6	7
	3 点相关系数	0.996 146	<b>0.996 155</b>	0.995 826	0.957 512
	迭代次数	4	4	5	5
	4 点相关系数	0.989 141	<b>0.989 147</b>	0.989 038	0.984 437
	迭代次数	8	8	8	9

从表 3 可以看出, 当  $Z_{sc}$  增加时, 相关系数略有增加, 但收敛变慢, 当  $Z_{sc}$  平面和斜面元高程  $Z_c$

相差过大(如: 100 000 m)时, 相关系数开始下降, 收敛变慢甚至不收敛。

此外,在高差变化过程中,高差值为 100 m、1000 m、10000 m 时均存在相关系数最大值,但横向比较各点在不同高差条件下获得的相关系数可发现差距(通常在  $10^{-3}$  级)并不大。因此,综合考虑匹配效果与计算效率,当  $Z_{sc}$  平面与  $Z_c$  平面的高程差在 1000 m 左右时最佳。

### 3.1.3 单点双片匹配试验

基于 RPC 模型的物方面元最小二乘单点双片匹配试验结果由匹配评价参数和未知数解算结果组成。其中,匹配评价参数为相关系数  $\rho$ 。图 3 为 SPOT 5-HRG 数据 1 号试验点的匹配结果,十字丝的中心点即为同名点。具体匹配结果见表 4。

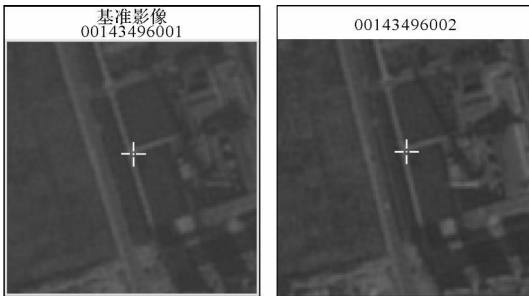


图 3 HRG 影像试验点 1 的匹配结果

Fig.3 The matching result of the experimental point 1 of HRG images

表 4 试验点的匹配结果

Tab.4 The matching result of the experimental points

HRG		GeoEye		IKONOS	
试验点 点号	相关 系数 $\rho$	试验点 点号	相关 系数 $\rho$	试验点 点号	相关 系数 $\rho$
1	0.978 097	1	0.973 535	1	0.985 927
2	0.984 982	2	0.945 151	2	0.995 642
3	0.941 885	3	0.963 302	3	0.953 851

由表 4 可以看出该算法匹配效果较好,相关系数最高可达 0.99 以上,且当相关系数越大时匹配效果越好。

### 3.2 精度验证试验

本文算法在原理及公式推导过程采用匹配窗口区域内多中心平行投影这一假设,利用直接空间前方交会所得高程  $Z$  和本算法所得物方面元中心点高程  $Z_c$  比较,以高程差  $\Delta Z = Z - Z_c$  验证本算法的精度。具体结果见表 5。

由表 5 可以看出,两种算法得到的高程差均小于  $10^{-3}$  m,证明假设物方小面元近似为多中心

平行投影是可以成立的,不损失匹配精度。

表 5 两种算法的高程结果比较

Tab.5 Comparison of elevation results between two algorithms

影像	试验点 点号	$Z_c$ /m	$Z$ /m	$\Delta Z$ /m	相关系数 $\rho$
HRG	1	46.243 558 46.243 689	- 0.00 013	0.978 097	
	2	41.897 881 41.898 005	- 0.000 124	0.984 982	
	3	31.808 143 31.808 301	- 0.000 158	0.947 190	
GeoEye	1	11.148 877 11.148 890	- 0.000 013	0.973 535	
	2	17.137 301 17.137 318	- 0.000 017	0.945 151	
	3	136.247 990 136.248 001	- 0.000 011	0.963 302	
IKONOS	1	7.435 728 7.435 758	- 0.000 030	0.985 927	
	2	33.769 410 33.769 388	0.000 022	0.995 642	
	3	1 254.333 038 1 254.333 142	- 0.000 104	0.953 851	

## 4 结 论

本文提出多中心投影影像的最小二乘匹配中,采用人造投影中心仿真多中心平行投影成像方式,构建了基于 RPC 模型的投影方程,结合影像间的线性辐射关系和成像模型 RPC 模型的几何约束关系,将物方面元最小二乘匹配从航空框幅式推广到航天推扫式成像,并对算法匹配效果及精度做了试验验证。

从单点多片匹配试验可以看出,本算法相关系数可达 0.99,且当待匹配点物方高程初值较精确时匹配效果好。对于人造投影中心平面高程  $Z_{sc}$ ,当其物方面元中心点  $Z_c$  高差约为 1000 m 时投影光线模拟误差小,从而验证了假设的可行性,证明物方最小二乘匹配是可以推广适用于 RPC 模型的。从精度验证试验结果可以看出,由本算法与空间前方交会求得的物方点高程高差均小于  $10^{-3}$  m,远小于原始数据经平差后检查点的高程中误差,验证了算法的可行性。

本文推导并验证了基于 RPC 模型的物方面元最小二乘匹配算法,将基于共线条件方程和投影方程的物方面元最小二乘匹配从仅适用于单中心投影框幅式成像推广到多中心投影推扫式成像,拓宽了物方面元最小二乘匹配的适用范围,提高了其应用潜力和价值。

## 参考文献:

- [1] ACKERMANN F. High Precision Digital Image Correlation [C] // Proceeding of 39th Photogrammetry Week. Stuttgart: [s. n.], 1983: 231-243.

- [2] ROSENHOLM D. Multi-point Matching Using the Least Squares Technique for Evaluation of Three-dimensional Models [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1987, 53(6): 621-626.
- [3] BALTSAVIAS E P. Multiphoto Geometrically Constrained Matching [D]. Zurich: Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH, 1991: 221-229.
- [4] YANG Huachao, ZHANG Shubi, ZHANG Qiuzhao. Least Squares Matching Methods for Wide Base-line Stereo Images Based on SIFT Features [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(2): 187-194. (杨化超, 张书毕, 张秋昭. 基于 SIFT 的宽基线立体影像最小二乘匹配 [J]. 测绘学报, 2010, 39(2): 187-194.)
- [5] JIANG W S. Multiple Aerial Image Matching and Automatic Building Detection [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (江万寿. 航空影像多视匹配与规则建筑物自动提取方法与研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.)
- [6] JIANG W S. Least Square Multiple Image Matching Based on 3D Plane Primitive and Its Application in DSM Generation [C] // M APPS/ ASPRS 2006 Fall Conference. San Antonio: [s. n.], 2006.
- [7] TAO C V, HU Y. A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(12): 1347-1357.
- [8] ZHANG G, FEI W B, LI Z, et al. Evaluation of the RPC Model for Spaceborne SAR Imagery [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2010, 76(6): 727-733.
- [9] ZHU Xiaoyong, ZHANG Guo, QIN Xuwen. The Formulation of RPC for Domestic Optical Satellite Imagery [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2009(2): 32-34. (祝小勇, 张过, 秦绪文. 国产光学卫星影像 RPC 制作 [J]. 国土资源遥感, 2009(2): 32-34.)
- [10] ZHANG Guo, FEI Wenbo, LI Zhen, et al. Analysis and Test of the Substitutability of the RPC Model for the Rigorous Sensor Model of Spaceborne SAR Imagery [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(3): 264-270. (张过, 费文波, 李贞, 等. 用 RPC 替代星载 SAR 严密成像几何模型的试验与分析 [J]. 测绘学报, 2010, 39(3): 264-270.)
- [11] ZHANG Guo, LI Fangting, JIANG Wanshou, et al. Study of Three-dimensional Geometric Model and Orientation Algorithms for Systemic Geometric Correction Product of Push-broom Optical Satellite Image [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 34-38. (张过, 厉芳婷, 江万寿, 等. 推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的三维几何模型及定向算法研究 [J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 34-38.)
- [12] ZHANG Guo, ZHU Yanmin, FEI Wenbo, et al. Study of High-resolution SAR-GEC Image Rigorous Geometrical Model and Its Application [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2009(5): 12-15. (张过, 祝彦敏, 费文波, 等. 高分辨 SAR-GEC 影像严密成像几何模型及其应用研究 [J]. 测绘通报, 2009(5): 12-15.)
- [13] FRASER C S, HANLEY H B. Bias Compensation in Rational Functions for IKONOS Satellite Imagery [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(1): 53-57.
- [14] FRASER C S, HANLEY H B. Bias-compensated RPCs for Sensor Orientation of High-resolution Satellite Imagery [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(8): 909-915.
- [15] GRODECKI J. IKONOS Stereo Feature Extraction-RPC Approach [C] // Proceedings of ASPRS Annual Conference. St. Louis: [s. n.], 2001.
- [16] ZHANG Li, ZHANG Jixian, CHEN Xiangyang, et al. Block Adjustment with SPOT5 Imagery and Sparse GCPs Based on RFM [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4): 302-310. (张力, 张继贤, 陈向阳, 等. 基于有理多项式模型 RFM 的稀少控制 SPOT-5 卫星影像区域网平差 [J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 302-310.)
- [17] LI Deren, ZHANG Guo, JIANG Wanshou, et al. SPOT5 HRS Satellite Imagery Block Adjustment without GCPs or with Single GCP [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(5): 377-381. (李德仁, 张过, 江万寿, 等. 缺少控制点的 SPOT-5 HRS 影像 RPC 模型区域网平差 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(5): 377-381.)
- [18] Mathematics Department of Tongji University. Higher Mathematics [M]. 6th ed. Beijing: Higher Education Press, 2007: 38. (同济大学数学系. 高等数学 [M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2007: 38.)
- [19] ZHANG Guo. Rectification for High Resolution Remote Sensing Image under Lack of Ground Control Points [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005.)
- [20] GRODECKI J, DIAL G. Block Adjustment of High-resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(1): 59-68.

(责任编辑: 雷秀丽)

收稿日期: 2010-08-16

修回日期: 2010-11-02

第一作者简介: 张过(1976—), 男, 博士, 副教授, 从事航天摄影测量的理论与应用研究。

First author: ZHANG Guo (1976—), male, PhD, associate professor, majors in spaceborne photogrammetry.

E-mail: guozhang@whu.edu.cn