

融合共线方程和多项式修正的遥感影像正射校正

王春媛¹, 张晔¹, 吴扬², 刘丕刚¹

(1. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 150001, 哈尔滨; 2. 上海卫星工程研究所, 200240, 上海)

摘要: 针对线阵推扫式遥感影像正射校正中飞行方向校正误差较大和扫描方向校正误差不均匀的问题, 提出一种融合共线方程和多项式残差修正的高精度正射校正新算法(CPOR). 该算法首先在传统共线方程的基础上增加一个循环迭代步骤对每扫描行的外方位元素进行精确解算, 然后对像平面坐标进行初次校正估计; 之后利用控制点处的估计偏差构造多项式误差方程, 对每个像坐标进行残差估计并修正, 最终完成正射校正过程. 实验结果表明, CPOR 算法经过循环迭代求解外方位元素和多项式修正估计残差, 使校正误差在行方向和列方向都呈均匀分布, 并使整体校正误差小于2个像元, 平均校正误差较之其他传统校正方法提高了5~6像素.

关键词: 遥感影像; 正射校正; 共线方程; 多项式; 外方位元素; 控制点

中图分类号: TN391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)12-0049-06

An Ortho-Rectification Algorithm Based on Collinearity Equation and Polynomial Error Modification for Remote Sensing Imagery

WANG Chunyuan¹, ZHANG Ye¹, WU Yang², LIU Pigang¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: The existing ortho-rectification algorithms for linear-pushbroom scanning imagery generally result in the high correction error in flight direction and the uneven correction error of quite big breadth image in the scanning direction. A new algorithm based on amalgamation of collinearity equation and polynomial (CPOR) is proposed for highly accurate ortho-rectification. Iterations are conducted as an additional step in the traditional collinearity equation to improve the calculating precision of orientation parameters of each scan line and to estimate image coordinates. Then a polynomial error equation is constructed using estimated errors of control points to modify the error of each coordinate. Experimental results show that the rectification errors of the CPOR algorithm in both the flight direction and the scanning direction distribute more uniformly. The overall errors are less than 2 pixels, and the average errors are improved by 5-6 pixels compared with the traditional methods.

Keywords: remote sensing imagery; ortho-rectification; collinearity equation; polynomial; orientation parameter; control points

图像校正是一切多源图像信息处理中必不可少的一个基本环节^[1]. 卫星遥感影像的正射校正是生产高精度系统几何校正产品的关键技术^[2]. 利用数

字高程模型(DEM)进行正射校正是消除影像几何变形的重要方法, 传统的正射校正算法有多项式、直接线性变换、有理函数和共线方程等^[3-5]. 多项式变

收稿日期: 2012-03-08. 作者简介: 王春媛(1983—), 女, 博士生; 张晔(通信作者), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972143).

网络出版时间: 2012-09-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120923.1734.001.html>

换对控制点数量和质量有较高要求,通常在地势起伏较大的山区校正时精度不高^[6].直接线性变换未考虑外方位元素随时间变换的特点,将动态推扫式影像等同于静态画幅式影像进行处理,显然与实际不符^[7].有理函数能够取得较高的校正精度,但由于未知系数多达78个,需要至少39个控制点才能解算,计算过程较复杂且容易陷入病态^[8].共线方程是摄影测量处理的理论基础,其通过数学关系式严格给出了成像瞬间地面坐标和影像坐标的几何对应关系,所以目前认为是校正精度最高的校正方法^[9-10].

为保证共线方程方法的高精度校正结果,需要对成像传感器外方位元素进行高精度求解.但是,利用共线方程实际计算时,在卫星GPS数据间隔时间较长的情况下,只能近似表达外方位元素,不能准确求得外方位元素的表达式,同时当卫星存在较大成像侧摆角、成像幅宽较大时,远离星下点的地区投影误差比较大,单纯利用共线方程对垂直飞行方向几何变形的校正精度并不理想.因此,共线方程的校正精度并不显著^[11].

为了克服传统方法对上述问题的校正精度不足,本文提出一种融合共线方程和多项式残差修正的正射校正算法(CPOR).该算法首先增加一个循环迭代的步骤精确解算每扫描行的外方位元素,由共线方程引入DEM对像平面坐标进行初次校正估计,之后基于初次校正结果利用控制点处的估计偏差构造多项式误差方程来修正每个像坐标估计残差,最终完成整个正射校正过程.通过对卫星影像的校正实验表明,CPOR算法比传统方法在校正精度和误差均匀性方面都有大幅提高.

1 传统的共线方程校正方法及不足

基于共线方程原理进行校正估计的关键是共线方程的构造,即对外方位元素的解算^[12].对于线阵推扫式成像模式,图像上每一行都有自己的外方位元素.设飞行方向为 y , x 垂直于 y 方向.由于CCD仅一行,故 $y=0$,可得共线方程为

$$\left. \begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X-X_s) + b_1(Y-Y_s) + c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s) + b_3(Y-Y_s) + c_3(Z-Z_s)} \\ 0 &= -f \frac{a_2(X-X_s) + b_2(Y-Y_s) + c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s) + b_3(Y-Y_s) + c_3(Z-Z_s)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: (X, Y, Z) 为大地投影坐标; (X_s, Y_s, Z_s) 为传感器在地面坐标系中的位置坐标; (x, y) 为像平面坐标; f 为等效焦距;参数 a_i, b_i, c_i ($i=1, 2, 3$)由该

影像的外方位角元素所确定,具体代数式如文献[12]中所示.

传感器在高轨道飞行时,由于像平面行坐标 y 记录的是时间序列,所以外方位元素可近似表示成时间 y 的线性函数

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 + \varphi_1 y \\ \omega &= \omega_0 + \omega_1 y \\ \kappa &= \kappa_0 + \kappa_1 y \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} X_s &= X_0 + X_1 y \\ Y_s &= Y_0 + Y_1 y \\ Z_s &= Z_0 + Z_1 y \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: φ, ω, κ 表示该影像的外方位角元素; $\varphi_0, \omega_0, \kappa_0, X_0, Y_0, Z_0$ 表示影像首行的外方位元素; $\varphi_1, \omega_1, \kappa_1, X_1, Y_1, Z_1$ 表示外方位元素的一阶变化率.以上为影像的12个外方位元素,由GPS提供的影像首、末行卫星位置和姿态数据,代入式(2)中可求得12个外方位元素的初始值.

假设有 n 个地面控制点,可由控制点列出误差方程,由最小二乘原理得

$$\mathbf{P} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{L}$ 为影像坐标误差向量; $\mathbf{A}$ 为共线方程线性化后的系数矩阵; $\mathbf{P}$ 为由外方位元素构成的向量.线阵CCD外方位元素之间存在很强的相关性,还需采用岭估计等进行相关性克服.

共线方程的应用前提是:假设成像传感器、地面点和相应像点位于一条直线上.实际工程应用中,受卫星运行速度、姿态和大气状况等各种因素的影响,用一次线性函数近似表达外方位元素不满足共线方程成立的前提,因此飞行方向的校正误差很大.同时,卫星存在的较大成像侧摆角会产生扫描方向校正误差不均匀现象.为了精确解算每扫描行的外方位元素和提高远离星下点地区的校正精度,本文提出了融合共线方程和多项式修正的正射校正CPOR算法.

2 CPOR 算法

2.1 算法的基本原理

首先基于共线方程对遥感影像进行校正估计:先采用传统的线性函数方法拟合外方位元素,基于控制点求解外方位元素初始值,再利用本文增加的循环迭代步骤对每扫描行的外方位元素进行精确求解,之后构造共线方程对像平面坐标进行初次校正估计;然后利用初次校正结果计算控制点处像平面坐标估计值和真实值的偏差,采用多项式对估计偏

差进行最小二乘拟合,利用拟合系数求取每个地面点相应的像平面坐标估计偏差,遍历每个坐标进行修正便得到高精度的正射校正影像.本文提出的 CPOR 算法包含 2 个关键技术,即采用循环迭代法对外方位元素精确求解和构造误差多项式修正估计偏差.本文算法的原理流程如图 1 所示.

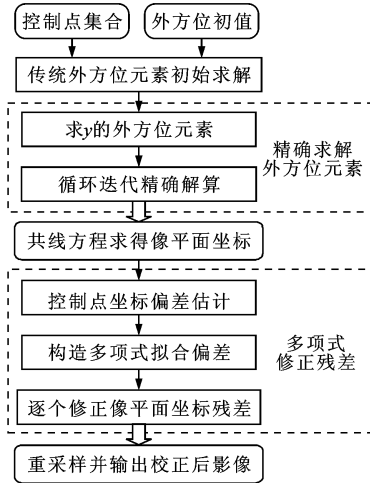


图 1 CPOR 算法原理流程图

2.2 算法实现的关键步骤

2.2.1 用循环迭代法精确求解外方位元素 用第 1 部分的方法对外方位元素进行传统求解可得到式(1),这是基于整图的拟合,用此共线方程进行校正会引起很大误差,因此本文提出循环迭代法对每扫描行的外方位元素进行精确求解.采用牛顿迭代法直接计算的实验表明,迭代计算收敛速度慢,且对初始值敏感,因此本文提出的循环迭代算法如下:将 DEM 投影坐标代入已得的式(1)可以求得像平面行坐标 y ,再根据式(2)、式(3)迭代计算每扫描行的外方位元素.由共线方程知

$$0 = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \quad (5)$$

将式(2)、式(3)代入式(5)化简可得

$$y = \frac{a_2(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + c_2(Z - Z_0)}{a_2X_1 + b_2Y_1 + c_2Z_1} \quad (6)$$

设 DEM 投影坐标为 (X, Y, Z) ,其像平面行坐标初值为 $y = y_0$.将 y_0 代入式(2)、式(3)求得外方位元素,将 (X, Y, Z) 和外方位元素代入式(6)可求得新坐标 $y = y_1$.设定阈值 T ,则迭代运算的终止条件为

$$\Delta y = |y_1 - y_0| < T \quad (7)$$

在求得满足条件的 y 后,将其代入式(2)、式(3)重新计算外方位元素,再代入共线方程,即可求出像平面列坐标 x .至此,像平面坐标即已获得.

2.2.2 构造误差多项式修正估计偏差 经过循环迭代法对外方位元素精确求解,构造共线方程并引入 DEM 对像平面坐标进行初次校正估计,基本上解决了飞行方向校正误差大的问题.此时,尤其在扫描方向的坐标值较大的区域,经共线方程求得的像平面坐标估计值与实际值存在较大误差.为了进一步提高校正精度,利用控制点的估计偏差构造误差多项式,从而对整幅影像的像平面坐标估计偏差并进行修正.

首先将控制点处计算得到的像平面坐标 (x, y) 与其真实值 (x', y') 求差,得到控制点的估计偏差 $(\Delta x, \Delta y)$.假设有 n 个控制点,可以得到 n 个控制点的估计偏差 $(\Delta x_i, \Delta y_i) (i=1, 2, \dots, n)$,其中

$$\Delta x_i = x'_i - x_i \quad (8)$$

$$\Delta y_i = y'_i - y_i \quad (9)$$

利用控制点估计偏差 $(\Delta x_i, \Delta y_i) (i=1, 2, \dots, n)$ 和控制点投影坐标 (X, Y, Z) 构造多项式误差方程,采用最小二乘法分别求出 Δx_i 和 $\Delta y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 关于投影坐标估计偏差的变换关系

$$\begin{cases} \Delta x = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4Y^2 + a_5XY + \dots \\ \Delta y = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4Y^2 + b_5XY + \dots \end{cases} \quad (10)$$

式中: a 与 b 为多项式的待求系数.对每个地面点,首先将其 DEM 投影坐标 (X, Y, Z) 代入共线方程,估计其近似像平面坐标 (x, y) ,然后将 (X, Y, Z) 代入式(10)得到估计偏差 $(\Delta x, \Delta y)$.通过式(10)对 (x, y) 修正得到最终的像平面坐标 (x', y')

$$\begin{cases} x' = x + \Delta x \\ y' = y + \Delta y \end{cases} \quad (11)$$

需要说明的是,用式(10)确定多项式系数所需要的控制点数目需和共线方程所需的控制点数目保持一致.为得到精确的灰度值插值效果,选用 3 次内插法进行影像重采样^[13].本文以共线方程为基础对 1 级遥感影像进行正射校正,计算前后需要转换像平面坐标原点;同时为了一定程度上消除卫星成像侧摆角问题,需将扫描方向坐标进行旋转变换.具体转换过程在此不再赘述.

3 实验结果及分析

为说明 CPOR 算法的优越性,本实验用多项式方程、传统共线方程、经过循环迭代的共线方程(本

文算法步骤之一)以及本文的 CPOR 算法对遥感影像进行校正,并对校正结果进行比较分析.

实验环境为 PC 机,配置为 Intel Xeon 4 CPU 3.0 GHz,内存为 DDR2 800 MHz 4 GB. 实验采用的影像数据为某卫星 CCD 影像实测数据,其控制点基于增强型专题绘图仪(ETM)采集,控制点选取尽量均匀,实验过程选用同样的控制点集合. 影像分辨率为 30 m,成像行频约为 230 行/s,GPS 数据每隔 8 s 提供一次,影像尺寸均超过 12 000×12 000 像素,幅宽超过 360 km,卫星成像侧摆角达到 15°.

为使校正结果更为直观,本文选取上、下和左、右相邻(含有丘陵地区)两景影像进行校正,然后对相邻两景影像中的公共区域进行地物匹配和拼接,结果如图 2 和图 3 所示. 从图 2 中河流和图 3 中道路的拼接处可以明显看出:多项式校正方法匹配程度较差;传统的共线方程方法在飞行方向(行方向)的校正误差比较大,因此产生了较大错位;经过循环迭代的共线方程方法对校正结果有一定改善,但仍然有错位;本文 CPOR 算法的匹配程度最好,反映出本文算法的校正精度最高.

为了定量比较这 4 种方法的校正精度,分别在校正后影像和对应 ETM 影像上选取检验点评价校正误差^[14],由于篇幅所限仅给出图 3 的校正精度结果. 每个检验点的坐标和相应校正误差如表 1 所示,其中检验点 1~8 为平地处,检验点 9~16 为丘陵地带. 同时为了直观比较误差均匀性,将表 1 中的检验点按编号(编号按列序号大小排列)作误差-序列分布图,如图 4 所示.

由表 1 和图 4 可得:多项式方程的平均校正精度最低,尤其在高程地区校正误差比共线方程大很多. 传统共线方程方法在飞行方向的校正误差较大并且误差随机不稳定,这是因为卫星的运动速度和姿态受多种因素影响而导致间隔 8 s 的外方位元素用一次线性函数来表示不够精确,循环迭代的共线方程方法有效地改善了飞行方向的校正误差,使校正精度平均提高了 5 像素左右. 同时可以看出,共线方程方法由于引入了 DEM 信息,对地面高程引起的投影误差比多项式方程有较好的校正效果,但扫描方向误差随着列序号增加而增大,这是由于卫星存在侧摆角,当影像幅宽较大时,列序号越大则误差

表 1 4 种校正方法的校正误差比较

检验点	ETM 影像坐标 (行,列)	校正误差/像素							
		多项式方法		传统共线方程		迭代共线方程		CPOR 算法	
		行	列	行	列	行	列	行	列
1	(5 559.90, 1 140.63)	6.17	6.73	-6.14	-1.79	-1.47	-1.73	-0.56	0.49
2	(10 829.04, 2 519.84)	-7.34	-6.15	7.96	-1.23	3.96	-1.56	-1.78	-1.09
3	(5 973.51, 3 707.89)	6.29	5.93	-6.54	2.03	-2.18	1.72	1.04	1.13
4	(11 156.39, 4 826.31)	6.62	7.32	7.42	3.32	2.41	2.80	-0.22	1.47
5	(7 569.78, 6 570.72)	7.23	8.42	6.34	-6.84	1.23	-6.67	-0.57	-0.13
6	(10 923.12, 7 347.14)	-8.07	-8.95	7.12	-9.39	2.07	-9.41	0.48	-0.06
7	(8 449.58, 9 533.72)	-7.25	-10.62	8.09	-11.53	2.37	-11.17	0.87	1.09
8	(9 279.44, 11 093.71)	-7.52	-11.31	8.29	-12.41	2.23	-12.49	0.65	-0.47
平地平均校正误差		7.06	8.55	7.24	6.07	2.24	5.94	0.77	0.74
9	(1 029.33, 1 623.06)	6.62	9.14	-10.12	1.62	2.49	1.69	-0.51	0.52
10	(2 571.30, 3 452.84)	8.31	9.52	6.24	-2.25	4.12	-2.32	1.92	-0.93
11	(754.63, 5 086.36)	7.51	10.49	-9.62	2.52	2.31	2.47	0.46	0.92
12	(2 443.62, 6 052.62)	8.27	12.41	6.36	4.73	2.79	4.42	0.23	1.52
13	(4 025.63, 9 221.78)	7.94	13.74	6.31	-8.34	1.72	-7.96	-0.69	-1.75
14	(1 0274.80, 9 934.03)	-8.12	-14.62	-7.63	-9.72	-2.72	-9.89	0.61	1.97
15	(1 844.71, 10 956.93)	-8.92	-15.29	-9.31	-11.02	1.98	-10.89	-0.14	-2.02
16	(5 955.38, 1 1547.32)	-8.49	-16.41	-7.93	12.53	-2.49	12.51	-1.34	2.08
高程平均校正误差		8.02	12.70	7.94	6.59	2.58	6.52	0.74	1.46

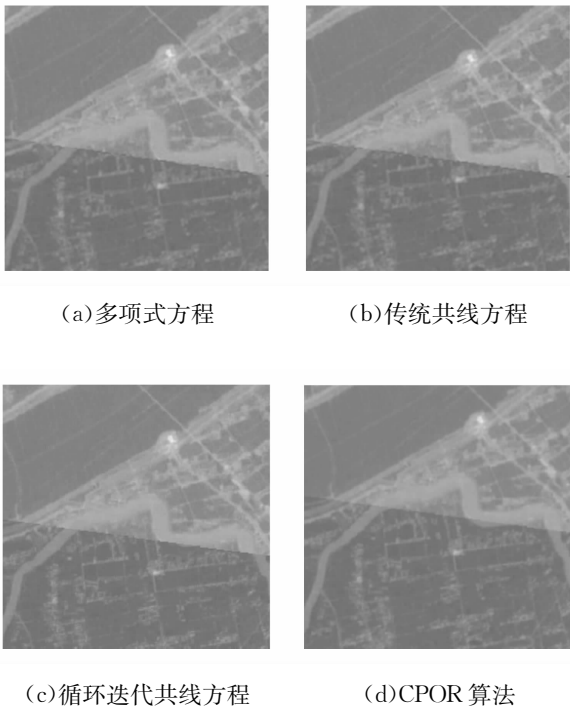


图 2 4 种方法对上、下相邻两景遥感影像的校正结果

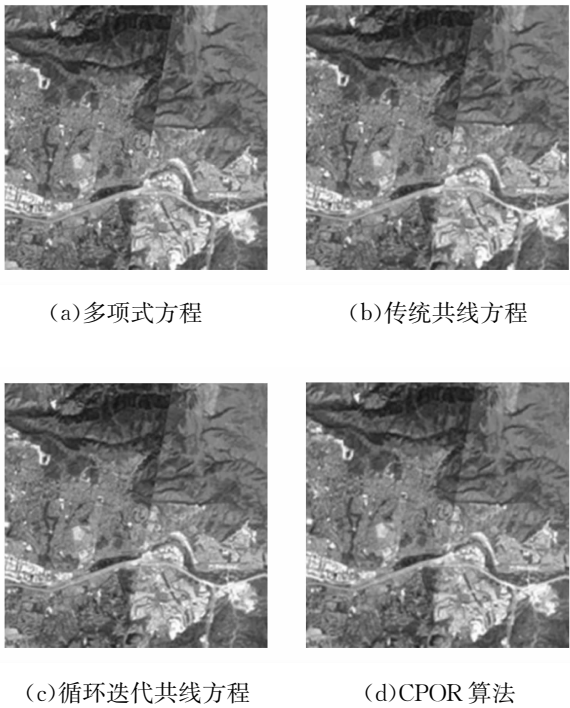


图 3 4 种方法对左、右相邻两景遥感影像的校正结果

越大。本文的 CPOR 算法经过循环迭代求解外方位元素和用多项式修正估计残差,使校正结果无论在行方向还是列方向误差都呈均匀分布,使整体校正误差小于 2 个像元,较之其他方法有了大幅提高。

在校正算法实现方面,对于一幅 $N \times N$ 的遥感影像而言,使用多项式方程校正的计算复杂度为 $(10$

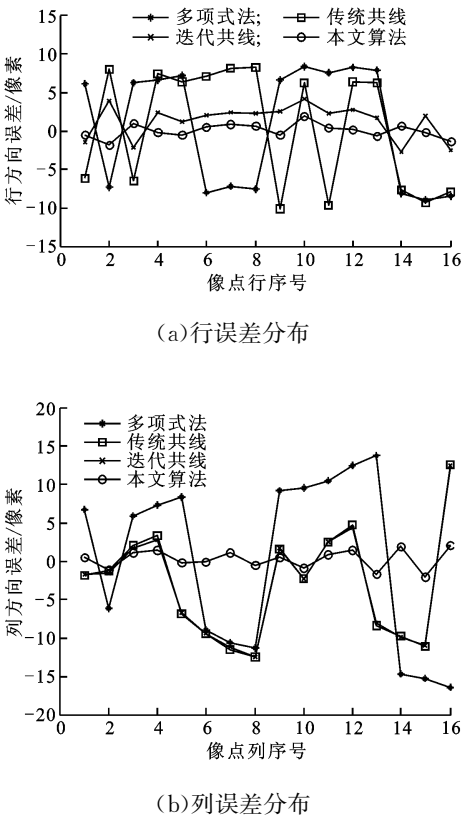


图 4 4 种校正方法的行列误差分布

次加法+16 次乘法) $\times N$,多项式方程不需要已知轨道和传感器参数,但是校正精度比较低;使用共线方程校正的计算复杂度为 $(20$ 次加法+14 次乘法) $\times 7N$,并且需要已知轨道和传感器参数,校正精度相对较高;本文的 CPOR 算法精度最高,校正步骤综合了共线方程和多项式方程,其中在解算共线方程的外方位元素时,为了精确解算还有一个循环迭代的过程,因此很难给出定量的计算复杂度公式。以本文中实验条件和所处理的 $12\,000 \times 12\,000$ 像素大小的遥感影像为例,多项式方程的校正时间为 28 s,传统共线方程的校正时间为 225 s,本文算法的校正时间为 336 s。

4 结 论

理论分析和实验结果表明:本文提出的 CPOR 算法首先循环迭代精确求解外方位元素,由共线方程引入 DEM 进行校正估计,消除了地面高程引起的影像误差,减小了飞行方向的校正误差;然后再利用误差多项式对影像平面内的估计残差进行修正,解决了离星下点远的地区校正误差大的问题,并使得全局校正精度达到 2 像素以内。与传统方法相比较,本文方法的校正精度、误差均匀性都有了很大的

提高.

参考文献:

- [1] GONCALVES H, CORRE-REAL L, GONCALVES J A. Automatic image registration through image segmentation and SIFT [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(7): 2589-2600.
 - [2] INGLADA J, MURON V, PICHARD D, et al. Analysis of artifacts in subpixel remote sensing image registration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(1):254-264.
 - [3] KANG Y S, HO Y S. An efficient image rectification method for parallel multi-camera arrangement [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57(3): 1041-1048
 - [4] MA Jianglin, CHAN J C, CANTERS F. Fully automatic subpixel image registration of multiangle CHRIS/proba data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(7):2829-2839.
 - [5] SHU Lixia, TAN Tieniu. SAR and SPOT image registration based on mutual information with contrast measure [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ, USA;IEEE,2007:429-432.
 - [6] BENTOUTOU Y, TALEB N, KPALMA K, et al. An automatic image registration for applications in remote sensing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(9): 2127-2137.
 - [7] TOUTIN T. Review article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(10):1893-1924.
 - [8] TAO V C, HU Yong. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing [J]. PE & RS, 2001, 67(12): 1347-1357
 - [9] WANG Peng, QU Zhiguo, WANG Ping, et al. A coarse-to-fine matching algorithm for FLIR and optical satellite image registration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 9(4): 599-603.
 - [10] 朱述龙,史文中,张艳,等. 线阵推扫式影像近似几何校正算法的精度比较[J]. 遥感学报,2004,8(3):220-226.
- ZHU Shulong, SHI Wenzhong, ZHANG Yan, et al.

Precision comparison of several algorithms for approximate rectification of linear array push-broom imagery [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(3):220-226.

- [11] 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):35-38.
- ZHANG Guo, LI Fangting, JIANG Wanshou, et al. Study of three-dimensional geometric model and orientation algorithms for systemic geometric correction of push-broom optical satellite image [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1):35-38.
- [12] CHEN Liang-Chien. Rigorous generation of digital orthophotos from SPOT images [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1993, 59(5): 655-661.
- [13] XU Lingfeng, AU O C, SUN Wenxiu, et al. Image rectification for single camera stereo system [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 977-980.
- [14] GONCALVES H, GONCALVES J A, CORRE-REAL L. Measures for an objective evaluation of the geometric correction process quality [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 2(6):292-296.

[本刊相关文献链接]

司刚全,张寅松,娄勇. 考虑自支持度和互支持度的多传感器一致性测度算子. 2012,46(10):20-23.

代亮,许宏科,陈婷. 无线传感器网络可分负载调度算法. 2012,46(6):23-28.

杨艺,韩崇昭,韩德强. 一种多源遥感图像分割的融合新策略. 2010,44(6):88-92.

代亮,沈中,常义林,等. 无线传感器网络多轮任务调度算法. 2010,44(6):27-32.

杨艺,韩崇昭,韩德强. 一种多源遥感图像分割的融合新策略. 2010,44(6):88-92.

曹巨明,吾守尔·斯拉木,梁晋,等. 移动最小二乘增量式多视点云数据融合算法. 2009,43(9):46-50.

梁新合,梁晋,郭成,等. 法向约束的多幅点云数据融合算法. 2009,43(9):71-75.

许学斌,张德运,张新曼,等. 基于特征层和二代曲波变换的多模生物特征融合识别方法. 2009,43(10):32-36.

(编辑 刘杨)