

文章编号 1004-924X(2017)01-0236-09

正则化总体最小二乘用于光学线阵遥感影像定位

郭文月^{1,2}, 余岸竹^{1,2*}, 刘海砚¹, 姜 挺¹, 魏祥坡¹

(1. 信息工程大学 地理空间信息学院, 河南 郑州 450001;

2. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:针对光学线阵遥感影像几何定位中,系统误差改正参数对应系数矩阵存在误差的问题,提出了一种基于正则化总体最小二乘的光学线阵遥感影像定位方法。首先依据有理函数模型的定义,构建共线条件方程,利用线性化构建光学线阵影像定位方法和系统误差改正方法,然后依据 EIV 模型的定义和性质构建相应的优化目标函数,并引入正则化项,依据 Lagrange 条件极值原理推导基于正则化总体最小二乘的系统误差参数迭代估计方法。实验结果表明:与经典的最小二乘平差算法相比,该方法的总体定位精度提高了 11.61%,且比 Tikhonov 正则化法的定位精度平均提高了 6.06%。本文提出方法在不增加任何额外控制信息的情况下,是提高光学线阵影像定位精度的有效途径。

关键词:线阵 CCD 影像;定位;总体最小二乘;正则化;广义交叉验证

中图分类号:TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172501.0236

Regularized total least squares used in remote sensing image positioning of optical line array

GUO Wen-yue^{1,2}, YU An-zhu^{1,2*}, LIU Hai-yan¹, JIANG Ting¹, WEI Xiang-po¹

(1. *Institute of Surveying and Mapping,*

Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. *State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China)*

** Corresponding author, E-mail: anzhu_yu@126.com*

Abstract: In geometric positioning of optical line array remote sensing image, as it exists error on system error correction parameters corresponding coefficient matrix, a geo-positioning method of remote sensing image of optical line array based on regularized total least squares was proposed in this paper. Firstly, the collinear equation was constructed based on the definition of rational function model, Secondly, the geo-positioning and systematic error correction methods were derived by linearization. Then, the corresponding optimal objective function was constructed based on the definition of the EIV model with a regularization term introduced. The iterative solution method of system error parameters based on regularized total least squares solver was deduced by the Lagrange conditional extremum. Experiment results indicate that, the geo-positioning accuracy of this method is increased by 11.61% compared with the classical least squares adjustment algorithm, and it is

收稿日期:2016-07-13;修订日期:2016-09-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41471387;No. 41301526);地理信息工程国家重点实验室开放基金资助项目(No. SKLGIE2015-M-3-1)

increased by 6.06% in contrast to Tikhonov regularization geo-positioning accuracy. The proposed method in this paper can increase the geo-positioning accuracy of linear array CCD images effectively without any extra information.

Key words: linear array CCD images; geo-positioning; regularized total least squares; regularization; generalized cross validation

1 引言

利用高分辨率线阵卫星光学遥感影像进行立体定位,是目标三维重建和地形图测绘的关键技术手段^[1],其基本思想是利用光学线阵遥感卫星在同轨或异轨所拍摄的多视立体影像,依据成像时刻传感器与地面三维点之间的位姿关系,恢复同名像点的同名光线,按空间前方交会求解地面点的三维坐标。近些年,随着国产线阵光学传感器的日渐成熟^[2-7]，“天绘一号”^[8]和“资源三号”^[9-10]三线阵立体测绘卫星取得了巨大的成功,应用国产光学卫星影像进行立体定位,成为近些年摄影测量和计算机视觉领域共同关注的热点问题^[11-13]。

相比于传统面阵光学影像,线阵 CCD 光学卫星属于推扫式成像,其严格的几何关系较为复杂,因而大多数卫星制造方利用通用成像模型(Rational Function Model, RFM)描述影像与所摄区域之间的几何关系,并提供与之对应的 RPC(Rational Polynomial Coefficients)参数代替严格的几何关系,用以降低用户应用难度,同时实现星上传感器参数和安置关系的隐藏。该模型于 1999 年被开放地理空间协会(Open Geospatial Consortium, OGC)列为标准遥感产品之一^[14]。近几年,国内外许多学者都针对 RPC 的定位问题进行了研究:Fraser 等^[15]针对 RPC 参数中存在系统误差的现象,提出了基于像方补偿的 RPC 定位方法,即将理想光线与利用 RFM 所构成的光线之间的不一致性描述为像方的多项式形式,并利用地面控制点求解多项式系数,实现了系统误差改正与几何定位精度的提升;之后,Tong 等^[14]进一步讨论了 RPC 系统误差改正与参数重生方法,并针对 QuickBird 光学影像进行了实验验证;Li 等^[16]引入最小二乘配置理论,将像方的系统误差描述为随机部分与非随机部分,更为合理地描述了像方的系统误差,该方法相比于传统最

小二乘估计方法,有更高的定位精度与稳定性;Li 和 Tang 等^[17]在 RPC 光束法区域网平差过程中,引入了测高数据进行联合平差计算,实现了无地面控制点的高精度 RPC 几何定位。

以上方法虽然都取得了较好的结果,但是这些方法均采用最小二乘法进行参数求解,其应用前提是误差的函数模型为 Gauss-Markov 模型,即假定函数模型已知、非随机,且观测值中仅含有随机误差^[18]。但是该条件在光学影像立体定位中并不严格成立,因为方程按照 Taylor 展开线性化后,系统误差参数对应的系数矩阵中,不仅包含非随机量,同时也包含像点观测值等随机量,即 Gauss-Markov 模型并不严格成立。尽管在工程应用中利用最小二乘进行误差估计切实可行,但是并不够严密。

本文将针对以上问题,拟引入可同时顾及观测向量和系数矩阵中随机误差的 EIV(errors-in-variables)模型^[19],来描述线阵光学影像几何定位的函数模型,并推导基于该模型的影像定位方法。首先,将依据 EIV 模型的定义与性质,构建立体定位的误差模型,然后针对参数估计中的病态问题,在优化目标函数中引入正则化项,并基于 Lagrange 条件极值原理推导待参数的正则化总体最小二乘解,最后利用国内和国外两景线阵光学卫星影像进行试验验证与分析。

2 线阵光学影像定位模型的建立

2.1 有理多项式模型定位原理

有理多项式模型实质上是利用不超过 3 次的多项式,将影像上任意一点 (r, c) 及其对应的 WGS-84 坐标系的纬度 φ 、经度 λ 和 高程 h 描述为如式(1)所示的既约(有理)分式的形式^[14]:

$$\begin{cases} r_n = F(U, V, W) = \frac{\text{Num}_r(U, V, W)}{\text{Den}_r(U, V, W)} \\ c_n = G(U, V, W) = \frac{\text{Num}_s(U, V, W)}{\text{Den}_s(U, V, W)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\text{Num}_r(U, V, W)$ 、 $\text{Den}_r(U, V, W)$ 、 $\text{Num}_s(U, V, W)$ 和 $\text{Den}_s(U, V, W)$ 均为最大次数为 3 的多项式,且可统一表示为:

$$f(U, V, W) = a_0 + a_1 V + a_2 U + a_3 W + a_4 VU + a_5 VW + a_6 UW + a_7 V^2 + a_8 U^2 + a_9 W^2 + a_{10} UVW + a_{11} V^3 + a_{12} VU^2 + a_{13} VW^2 + a_{14} UV^2 + a_{15} U^3 + a_{16} UW^2 + a_{17} V^2 W + a_{18} U^2 W + a_{19} W^3, \quad (2)$$

式中: $a_i (i=0, 1, \dots, 19)$ 为 RPC 参数; (U, V, W, r_n, s_n) 为归一化的物方坐标和像方坐标,它们可利用 RPC 参数文件中的标准化平移参数 $(\varphi_0, \lambda_0, h_0, r_0, s_0)$ 和比例参数 $(\varphi_s, \lambda_s, h_s, r_s, s_s)$ 表示为:

$$\begin{cases} U = (\varphi - \varphi_0) / \varphi_s \\ V = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_s \\ W = (h - h_0) / h_s \end{cases}, \begin{cases} r_n = (r - r_0) / r_s \\ c_n = (c - c_0) / c_s \end{cases}. \quad (3)$$

为利用 m 幅影像上的同名像点 $p_i (i=1, 2, \dots, m)$ 求解对应地面点坐标 $p_i (\varphi_i, \lambda_i, h_i)$,通常在给定地面点初值 $(\varphi_i^0, \lambda_i^0, h_i^0)$,并利用式(1)计算出对应像点初值 (r_i^0, c_i^0) 的情况下,将式(3)中 r_i 和 c_i 的表达式,带入式(1)左侧,并按 Taylor 展开至一次项为:

$$\begin{cases} r_i \approx r_i^0 + \frac{\partial r_i}{\partial \varphi_i} d\varphi_i + \frac{\partial r_i}{\partial \lambda_i} d\lambda_i + \frac{\partial r_i}{\partial h_i} dh_i \\ c_i \approx c_i^0 + \frac{\partial c_i}{\partial \varphi_i} d\varphi_i + \frac{\partial c_i}{\partial \lambda_i} d\lambda_i + \frac{\partial c_i}{\partial h_i} dh_i \end{cases}, \quad (4)$$

从而可得误差方程为:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{X} - \mathbf{L}_i, \quad (5)$$

其中: $\mathbf{V} = [v_i \quad v_i]^T$; $\mathbf{L} = [r_i - r_i^0 \quad c_i - c_i^0]^T$; \mathbf{A}_i 为各偏导数所构成的系数矩阵,各偏导数值可由式(1)和式(3)利用复合函数微分法则得到。每幅影像上的同名像点均可以由式(5)列出 $2m$ 个误差方程,从而地面点改正数向量可估计为:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{L}), \quad (6)$$

其中: $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1^T \quad \mathbf{A}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{A}_m^T]^T$; $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_1^T \quad \mathbf{L}_2^T \quad \dots$

$\mathbf{L}_m^T]^T$ 。由于 \mathbf{A}_i 中各值中亦包含地面坐标,因而求解式(6)需要按照迭代进行,直至第 k 次和第 $k+1$ 的参数估计值小于给定限差阈值为止。

2.2 像方系统误差的改正模型

线阵光学影像的 RPC 参数,通常依据卫星所配备的 GPS 和星敏感器的观测量,经内插和转化后,按地面无关策略解算得到,因此, RPC 参数中通常会包含定轨和定姿设备观测量中的误差和地形拟合误差。如不在定位之前对系统性误差进行消除,则定位精度会受到一定的影响^[16]。

惯用方法是将系统误差表示为像方的多项式形式,即将式(1)改写为:

$$\begin{cases} r + \Delta r = r_s \cdot F(U, V, W) + r_0 \\ c + \Delta c = c_s \cdot G(U, V, W) + c_0 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: Δr 和 Δc 为系统误差改正多项式,可表示为:

$$\begin{cases} \Delta r = e_0 + e_1 r + e_2 c + e_3 r^2 + e_4 c^2 \dots \\ \Delta c = f_0 + f_1 r + f_2 c + f_3 r^2 + f_4 c^2 \dots \end{cases}. \quad (8)$$

由于当前卫星平台成像过程较为稳定,因而在一景影像成像时间间隔内,像方的系统误差中主要为低频系统误差,通常可取式(8)中 e_0, e_1, e_2, f_0, f_1 和 f_2 作为系统误差参数,用于描述常差和一阶线性偏移量。

为求解这 6 个参数,在引入地面控制点 (Ground Control Points, GCP) 的基础上,对式(7)中各参数求微分,得到误差方程为:

$$\mathbf{V}_A = \mathbf{C} \mathbf{Y} - \mathbf{L}_A, \quad (9)$$

其中: \mathbf{V}_A 表示残差向量; $\mathbf{Y} = [e_0 \quad e_1 \quad e_2 \quad f_0 \quad f_1 \quad f_2]^T$ 为未知数矩阵;常数向量 $\mathbf{L}_A = [\Delta r_1^0 \quad \Delta c_1^0 \dots \Delta r_m^0 \quad \Delta c_m^0]^T$ 为控制点对应像点的计算值与真实值之差,即:

$$\begin{cases} \Delta r_i^0 = F(U_i, V_i, W_i) r_s + r_0 - r_i \\ \Delta c_i^0 = G(U_i, V_i, W_i) c_s + c_0 - c_i \end{cases}. \quad (10)$$

下标 i 为控制点序号。系数矩阵的表达式为:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & r_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & r_1 & c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & r_m & c_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & r_m & c_m \end{bmatrix}. \quad (11)$$

常规方法是利用最小二乘 (Least Squares, LS) 来估计式(9),然后利用估计出来的参数值对像点坐标进行改正,然后利用式(6)迭代求解地面坐标,从而实现系统误差的改正和定位精度的提高。

显然,矩阵 \mathbf{C} 由像点观测量组成,其包含测量引起的偶然误差。Gauss-Markov 模型并不严格成立,直接利用最小二乘进行求解虽然在应用中有效,但是理论上并不严密。因此,本文将引入 EIV 模型重新描述式(9)的函数模型,并推导出相应的参数估计方法。

3 未知参数的解算

本节将首先利用 EIV 描述函数模型,并构造

参数估计的目标函数,然后引入正则化项,以克服弱交会条件下误差方程的复共线性引起的参数求解不稳定问题,并基于 Lagrange 条件极值原理推导相应的未知数估计公式,从而构建基于正则化总体最小二乘的线阵光学影像几何定位方法。

3.1 EIV 模型下的平差模型构建

根据 EIV 模型原理,当系数矩阵中含有误差时,可引入残差矩阵 \mathbf{E}_C 来描述 \mathbf{C} 中的偶然误差,因而式(9)的 EIV 可表示为:

$$\mathbf{V}_A + \mathbf{L}_A = (\mathbf{C} + \mathbf{E}_C)\mathbf{Y}. \quad (12)$$

欲由上式估计出未知数向量 \mathbf{Y} ,需按照残差平方和最小的原则构造出目标函数,因而需将矩阵 \mathbf{E}_C 向量化为 $\mathbf{V}_C = \text{vec}\mathbf{E}_C$,向量化运算符 vec 表示将 \mathbf{E}_C 按列取出,并按下标顺序合并为一个列向量 \mathbf{V}_C 。从而可根据 Lagrange 条件极值原理,构造以残差平方和最小的目标函数:

$$\min: \Phi = \mathbf{V}_A^T \mathbf{V}_A + \mathbf{V}_C^T \mathbf{V}_C + 2\lambda^T (\mathbf{V}_A + \mathbf{L}_A - (\mathbf{C} + \mathbf{E}_C)\mathbf{Y}). \quad (13)$$

3.2 正则化总体最小二乘估计

为使航天线阵光学影像有一定的地面覆盖能力(幅宽)和与之匹配的地面采样间隔,通常要使相机的焦距较长,CCD 的尺寸较小,从而保证成像瞬时视场角较小,但这样定向参数之间通常有较强的相关性,误差方程呈现严重的病态,造成方差膨胀,从而引起参数估计精度下降及求解不稳定问题。为克服这种情况,本文在式(13)中引入正则化项^[20]:

$$\min: \Phi = \mathbf{V}_A^T \mathbf{V}_A + \mathbf{V}_C^T \mathbf{V}_C + \alpha \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} + 2\lambda^T (\mathbf{V}_A + \mathbf{L}_A - (\mathbf{C} + \mathbf{E}_C)\mathbf{Y}), \quad (14)$$

式中 α 为正则化参数。根据 Kronecker 积的性质可知:

$$\mathbf{E}_C \mathbf{Y} = (\mathbf{Y}^T \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{V}_C, \quad (15)$$

其中 \mathbf{I}_n 为 n 阶单位阵。对式(14)中各随机向量求偏导数,并取为 $\mathbf{0}$ 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{V}_A} = 2\mathbf{V}_A^T + 2\lambda^T = \mathbf{0} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{V}_C} = 2\mathbf{V}_C^T + 2\lambda^T (\mathbf{Y}^T \otimes \mathbf{I}_n) = \mathbf{0} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} = 2(\mathbf{V}_A + \mathbf{L}_A - (\mathbf{C} + \mathbf{E}_C)\mathbf{Y}) = \mathbf{0} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{Y}} = 2\alpha \mathbf{Y}^T - 2\lambda^T (\mathbf{C} + \mathbf{E}_C) = \mathbf{0} \end{cases}. \quad (16)$$

联立式(15)、式(16),消去 \mathbf{V}_A 、 \mathbf{V}_C 和 λ 可得:

$$(\mathbf{C}^T \mathbf{C} + \alpha \mathbf{I}_n - \alpha \mathbf{I}_n) \mathbf{Y} = \mathbf{C}^T \mathbf{L}_A, \quad (17)$$

其中: $u = (\mathbf{L}_A - \mathbf{C}\mathbf{Y})^T (\mathbf{L}_A - \mathbf{C}\mathbf{Y}) / (1 + \mathbf{Y}^T \mathbf{Y})$ 。从而待估参数 \mathbf{Y} 的估计公式为:

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C} + \alpha \mathbf{I}_n - \alpha \mathbf{I}_n)^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{L}_A, \quad (18)$$

式中:正则化参数 α 是方程求解的关键因素,很多学者针对该问题进行了研究,发展出很多方法。本文采用广义交叉验证 (Generalized Cross-Validation, GCV) 方法^[20] 确定参数 α 。由于式(18)两端均包含待估参数 \mathbf{Y} ,本文将按如下步骤进行迭代求解:

Step 1 按最小二乘求解式(9),并给定迭代初值 $\mathbf{Y}^0 = \mathbf{Y}_{LS}$;

Step 2 按 GCV 确定参数 α ; 给定迭代限差 ϵ ;

Step 3 计算残差向量 $\mathbf{I}^{(i)} = \mathbf{L}_A^{(i)} - \mathbf{C}^{(i)} \mathbf{Y}^{(i)}$ 和 $u^{(i)} = \mathbf{I}^{(i)T} \mathbf{I}^{(i)} / (1 + \mathbf{Y}^{(i)T} \mathbf{Y}^{(i)})$,其中 i 为迭代次数。

Step 4 利用式(18)估计第 $i+1$ 次迭代的未知数向量为:

$$\mathbf{Y}^{(i+1)} = (\mathbf{C}^{(i)T} \mathbf{C}^{(i)} + \alpha \mathbf{I}_n - u^{(i)} \mathbf{I}_n)^{-1} \mathbf{C}^{(i)T} \mathbf{L}_A^{(i)}.$$

Step 5 重复 Step 3 和 Step 4,直到满足条件 $\|\mathbf{Y}^{(i+1)} - \mathbf{Y}^{(i)}\|_2 < \epsilon$ 时,停止迭代。

本文将使用上述正则化总体最小二乘法求解 RFM 的系统误差改正参数,对像点观测量进行更新及改正之后利用式(6)迭代求解地面坐标。从而提高定位精度。

4 实验与分析

为了验证本文方法的正确性和有效性,将利用两幅资源三号三线阵 CCD 光学影像进行实验验证。第一景影像(Dataset I)成像于 2012 年,为资源三号卫星在国内所摄影像数据,覆盖河南登封地区约 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ 的范围,影像内分布 20 个地面控制点(图 1(a)),其物方坐标利用 DGPS 野外测量得到,像方坐标由人工测量得到,精度优于 1 像元。第二景影像(Dataset II)成像于 2014 年,为资源三号卫星所摄境外地区影像数据,所摄区域位于法国的 Sainte-Maxime 地区,影像范围内共有 12 个地面控制点(图 1(b)),其物方坐标及像方坐标均由国际摄影测量与遥感协会 (International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS) 提供。

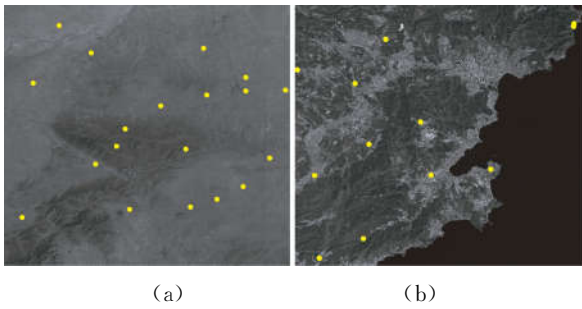


图 1 河南和 Sainte-Maxime 地区资源三号影像控制点分布
Fig1 Distribution of GCPs of ZY-3 images in Henan and Sainte-Maxime

实验中将对比分析本文方法 (Regularized Total Least Squares, RTLS)、经典最小二乘估计 (LS) 和 Tikhonov 正则化最小二乘估计 (Regularized Least Squares, RLS) 在定位结果上的差异, 即分别使用以上 3 种参数估计方法对误差改正参数 $e_0 \sim f_2$ 进行估计, 之后按 RPC 前方交会方法进行定位, 用以分析引入 EIV 模型和正则化项, 对定位结果的影响。实验将分别在前视 (Forward)、下视 (Nadir) 和后视 (Backward) 的三线阵交会和前视、后视的两线阵立体交会两种模式下进行。文中采用 Tikhonov 正则化^[21-23]法作为 RLS 的实现算法。由于 3 种算法对系统误差的改正参数初值没有特殊要求, 因而实验中设所有参数的初值均为零。

在登封地区影像实验中, 分别使用 4 个 (角点)、5 个 (角点 + 中心点) 控制点以及 7 个 (角点 + 中心点 + 2 个边中心点) 控制点参与系统误差改正数的求解。由于法国地区的控制点数量较少, 仅进行 4 个 (角点) 和 5 个 (角点 + 中心点) 控制点的实验验证。对两组数据使用上述 3 种方法进行 RPC 系统误差改正后, 立体定位结果如表 1 和表 2 所示, 参与精度评定的指标为局部切平面坐标系内的平面、高程和总体均方误差; 当 4 个控制点参与平差计算时, 各种方法估计出的系统误差改正数如表 3 和表 4 所示; 图 2(a)~(c) (彩图见期刊电子版) 为登封地区 4 控制点参与运算时, 3 种算法在两线阵交会时的结果, 图中蓝色表示高程残差, 红色表示平面残差; 图 2(d)~(f) 为 Sainte-Maxime 地区 4 控制点参与运算时, 3 种算法按两线阵交会时的结果。

表 1 河南地区影像 3 种方法定位均方差的统计结果

Tab.1 Statistics results of root mean squares for Henan images by three algorithms

控制点数/ 检查点数	交会 方式	解算 方法	均方误差/m			
			平面	高程	总体	
4/16	两视	LS	4.359	4.174	6.035	
		RLS	3.785	4.152	5.618	
		RTLS	3.527	4.152	5.448	
	三视	LS	4.155	4.233	5.931	
		RLS	3.447	4.823	5.928	
		RTLS	3.527	4.160	5.454	
	5/15	两视	LS	4.359	4.174	6.035
			RLS	3.926	4.113	5.686
			RTLS	3.694	3.927	5.391
三视		LS	4.155	4.233	5.931	
		RLS	3.881	4.205	5.722	
		RTLS	3.553	3.967	5.325	
7/13	两视	LS	4.359	4.174	6.035	
		RLS	3.712	2.973	4.756	
		RTLS	3.881	2.502	4.618	
	三视	LS	4.155	4.233	5.931	
		RLS	3.446	2.953	4.538	
		RTLS	3.363	2.460	4.167	

注: 平面精度 $RMS_{XY} = \sqrt{RMS_X^2 + RMS_Y^2}$, 总体精度 $RMS = \sqrt{RMS_{XY}^2 + RMS_Z^2}$ 。

表 2 法国地区影像 3 种方法定位均方差的统计结果

Tab.2 Statistics results of root mean squares for France images by three algorithms

控制点数/ 检查点数	交会 方式	解算 方法	均方误差/m		
			平面	高程	总体
4/8	两视	LS	3.402	4.050	5.289
		RLS	4.251	3.528	5.524
		RTLS	3.360	3.952	5.187
	三视	LS	2.853	4.052	4.956
		RLS	3.851	3.533	5.226
		RTLS	2.840	3.954	4.868
5/7	两视	LS	4.169	4.355	6.029
		RLS	4.404	3.285	5.494
		RTLS	3.972	3.321	5.177
	三视	LS	2.821	4.357	5.191
		RLS	4.106	3.288	5.260
		RTLS	2.771	3.992	4.859

表 3 河南地区两视交会系统误差求解结果(4 控制点)

Tab. 3 Systematic error parameters estimated using stereo images of Henan(4 GCPs)

参数	前视影像			后视影像		
	LS	RLS	RTLS	LS	RLS	RTLS
e_0	-1.68E+0	-9.92E-4	-6.20E-5	-1.71E+0	-1.24E-3	-4.40E-5
e_1	1.83E-4	7.20E-5	7.10E-5	1.25E-4	8.00E-6	8.00E-6
e_2	6.00E-6	-4.30E-5	-4.30E-5	5.00E-6	-3.90E-5	-3.90E-5
f_0	3.79E-1	2.24E-4	1.40E-5	8.26E-1	5.97E-4	2.10E-5
f_1	-1.14E-4	-8.80E-5	-8.80E-5	8.60E-5	1.43E-4	1.43E-4
f_2	-5.00E-5	-3.90E-5	-3.90E-5	-1.17E-4	-9.50E-5	-9.50E-5

表 4 法国地区两视交会系统误差求解结果(4 控制点)

Tab. 4 Systematic error parameters estimated using stereo images of France(4 GCPs)

参数	前视影像			后视影像		
	LS	RLS	RTLS	LS	RLS	RTLS
e_0	5.33E+0	2.66E+0	5.33E+0	1.40E+0	6.98E-1	1.57E+0
e_1	-1.05E-4	7.50E-5	-1.05E-4	1.02E-4	1.50E-4	3.60E-5
e_2	-1.36E-4	-8.00E-6	-1.36E-4	3.50E-5	6.90E-5	2.70E-5
f_0	2.80E+0	1.40E+0	2.80E+0	3.02E+0	1.51E+0	3.39E+0
f_1	-3.60E-5	5.80E-5	-3.60E-5	6.20E-5	1.67E-4	3.60E-5
f_2	-1.20E-5	5.50E-5	-1.20E-5	-2.00E-6	7.00E-5	-2.00E-5

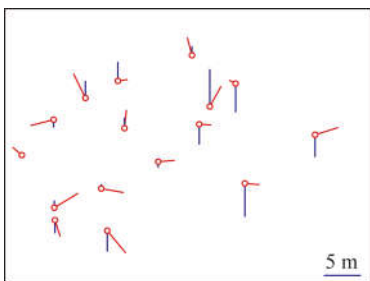
从以上实验结果可以得出以下结论:

(1)从表 1 和表 2 所示的统计结果可以看出,

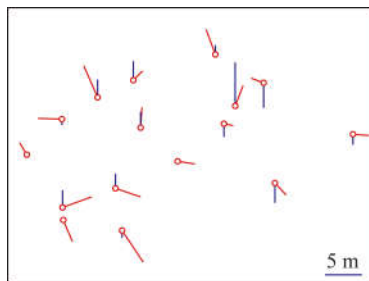
相比于经典 LS 法,由于正则化项的引入,RLS 法和本文所提出的 RTLS 法均可以有效提高定位的总体精度。除法国地区 4 控制点三视情形以外,RLS 法的总体精度均高于 LS 法;在任何情况下,RTLS 法精度均高于其它两种方法,相比于经典方法,其总体精度平均提升了 11.61%,相比于 RLS 法平均提高了 6.06%,这说明本文方法可在不增加任何控制信息的情况下,提高光学影像的定位精度,进一步证明了本文方法的正确性与有效性。

(2)虽然 RLS 法在某些情况下可以获得更高的高程精度,但是平面精度有一定的损失,且总体精度低于 RTLS 法,这是由二者的误差函数模型的差异所引起的,这表明在系数矩阵中引入误差项进行统一平差的正确性,也即 EIV 模型在该问题中有一定的优势。

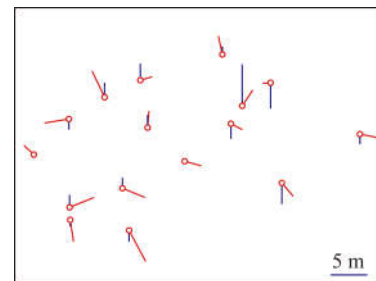
(3)从表 3 和表 4 的结果可知,3 种方法求解出的像方误差改正参数均有较大区别,这是由正则化项的引入和误差模型差异所引起的,但是从图 2(彩图见期刊电子版)的结果可以看出,3 种方法残差分布均没有明显的系统性,因而这 3 种方法都可以对系统误差进行一定的补偿。也表明了 RFM 系统误差改正方法,在本质上是拟合传感器系统误差、RPC 地形拟合误差等诸多因素构成的综合误差,其参数改正值仅限于某景影像的某个传感器使用,针对不同地区、不同成像时间和不同传感器,需要区别对待。



(a)河南地区影像 LS 定位结果



(b)河南地区影像 RLS 定位结果



(c)河南地区影像 RTLS 定位结果

(a)Geopositioning result of Henan by LS

(b)Geopositioning result of Henan by RLS

(c)Geopositioning result of Henan by RTLS

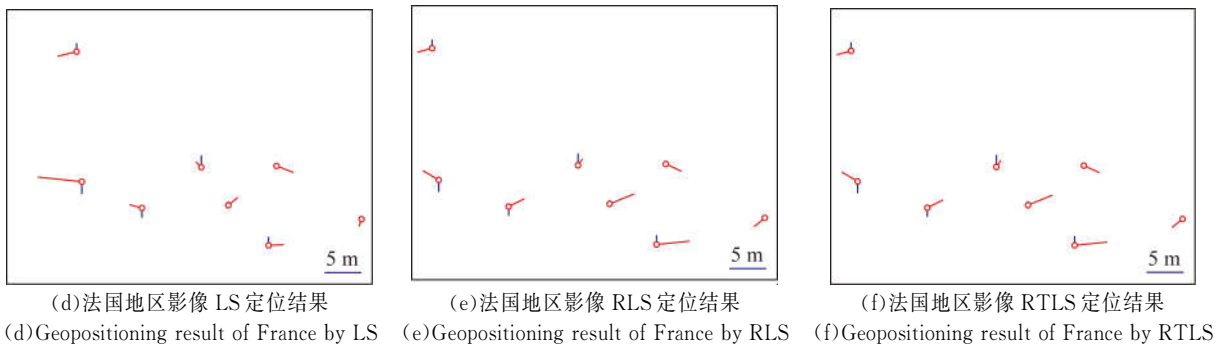


图 2 当 4 控制点参与计算情况下 3 种方法利用两视交会定位残差图

Fig. 2 Residual charts of geo-positioning using forward and backward images with 4 GCPs by three algorithms

5 结 论

本文针对线阵光学遥感影像进行 RFM 定位时,像方系统误差改正参数平差求解过程中,系数矩阵中存在偶然误差的问题,接着,引入了 EIV 模型描述平差解算中的函数模型,引入正则化项,推导了将正则化总体最小二乘用于光学影像立体定位的方法,然后,利用广义交叉验证确定正则化参数,在国内外两个地区的光学线阵卫星遥感影

像上对经典方法、Tikhonov 正则化法和本文提出方法进行了对比实验验证,结果表明,在不增加任何额外信息的情况下,本文所提出的方法可将经典方法的总体定位精度平均高 11.61%,比 Tikhonov 正则化法平均提高 6.06%,是光学线阵遥感影像有控制条件下立体定位的新途径。然而本文方法需要迭代,虽然在实验中该方法的收敛速度较快,但是相比于经典方法,效有所降低。如何进一步提高本文方法的运算效率,将是今后研究的重点内容。

参考文献:

- [1] 李德仁,张良培,夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘[J]. 测绘学报,2014, 43(12):1211-1216.
LI D R, ZHANG L P, XIA G S. Automatic analysis and mining of remote sensing big data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(12): 1211-1216. (in Chinese)
- [2] 万志,李葆勇,刘则洵,等. 测绘一号卫星相机的光谱和辐射定标[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7):1867-1873.
WAN ZH, LI B Y, LIU Z X, *et al.*. Spectral and radiometric calibrations for mapping satellite-1 camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7):1867-1873. (in Chinese)
- [3] 周怀得,刘金国,张立平,等. 线阵-面阵 CCD 三线阵立体测绘相机焦平面组件的研制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7):1492-1499.
ZHOU H D, LIU J G, ZHANG L P, *et al.*. Development of focal plane module for three-line LMC-CD mapping cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1492-1499. (in Chinese)
- [4] 马军,黎明,付跃刚,等. 测绘相机的温度适应性[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6):1175-1181.
MA J, LI M, FU Y G, *et al.*. Temperature adaptation of mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6):1175-1181. (in Chinese)
- [5] 刘则洵,万志,李宪圣,等. 时间延迟积分 CCD 空间相机信噪比的影响因素[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7):1829-1837.
LIU Z X, WAN ZH, LI X SH, *et al.*. Influence factors on SNR of TDICCD space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7):1829-1837. (in Chinese)
- [6] 柳红岩,孙慧婷,李岩,等. 漂移扫描 CCD 星图的 smear 现象快速消除方法研究[J]. 液晶与显示, 2016, 31(3):310-316.
LIU H Y, SUN H T, LI Y, *et al.*. Fast Smear effect removal algorithm of CCD drift-scan star image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3):310-316. (in Chinese)
- [7] 张敏,金龙旭,李国宁,等. 基于 TDICCD 空间相机图像模拟源系统设计[J]. 液晶与显示, 2016, 31(2):208-214.
ZHANG M, JIN L X, LI G N, *et al.*. Design of image simulation system of TDICCD space camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Dis-*

- plays, 2016, 31(2):208-214. (in Chinese)
- [8] 张艳, 王涛, 冯伍法, 等. “天绘一号”海岛(礁)影像稀少控制下的定位技术研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(5):617-623.
ZHANG Y, WANG T, FENG W F, *et al.*. Positioning technology study for mapping satellite-1 islands(Reefs) imagery with scarce controls [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(5):617-623. (in Chinese)
- [9] 朱映, 王密, 潘俊, 等. 利用多光谱影像检测资源三号卫星平台震颤[J]. 测绘学报, 2015, 44(4):399-406.
ZHU Y, WANG M, PAN J, *et al.*. Detection of ZY-3 satellite platform jitter using multi-spectral imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(4):399-406. (in Chinese)
- [10] 曹金山, 袁修孝, 龚健雅, 等. 资源三号卫星成像在轨几何定标的探元指向角法[J]. 测绘学报, 2014, 43(10):1039-1045.
CAO J SH, YUAN X X, GONG J Y, *et al.*. The look-angle calibration method for on-orbit geometric calibration of ZY-3 satellite imaging sensors [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(10):1039-1045. (in Chinese)
- [11] 李德仁. 展望大数据时代的地球空间信息学[J]. 测绘学报, 2016, 45(4):379-384.
LI D R. Towards geo-spatial information science in big data era [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(4):379-384. (in Chinese)
- [12] 余岸竹, 姜挺, 郭文月, 等. 总体最小二乘用于线阵卫星遥感影像光束法平差解算[J]. 测绘学报, 2016, 45(4):442-449.
YU A ZH, JIANG T, GUO W Y, *et al.*. Bundle adjustment for satellite linear array images based on total least squares [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(4):442-449. (in Chinese)
- [13] 余岸竹, 姜挺, 龚辉, 等. 线阵卫星遥感影像外方位元素对偶四元数求解法[J]. 测绘学报, 2016, 45(2):186-193.
YU A ZH, JIANG T, GONG H, *et al.*. Dual quaternion method to solve exterior orientation parameters for satellite linear array images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(2):186-193. (in Chinese)
- [14] TONG X, LIU S, WENG Q. Bias-corrected rational polynomial coefficients for high accuracy geo-positioning of QuickBird stereo imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(2):218-226.
- [15] FRASER C S, HANLEY H B. Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, 71(8):909-915.
- [16] LI C, SHEN Y, LI B, *et al.*. An improved geopositioning model of QuickBird high resolution satellite imagery by compensating spatial correlated errors [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 96:12-19.
- [17] LI G, TANG X, GAO X, *et al.*. ZY-3 Block adjustment supported by glas laser altimetry data [J]. *The Photogrammetric Record*, 2016, 31:88-107.
- [18] 刘经南, 曾文宪, 徐培亮. 整体最小二乘估计的研究进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(5):505-512.
LIU J N, ZENG W X, XU P L. Overview of total least squares methods [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5):505-512. (in Chinese)
- [19] 陶家园, 王克逸, 罗国雄. 用于外场试验的交会测量[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8):2369-2375.
TAO J Y, WANG K Y, LUO G X. Intersection measurement for field tests [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8):2369-2375. (in Chinese)
- [20] 王振杰. 测量中不定问题的正则化解法[M]. 北京:科学出版社, 2006:66-72.
WANG ZH J. *The Regularization Solutions of Ill-Posed Problems in Measurement* [M]. Beijing: Science Press, 2006:66-72. (in Chinese)
- [21] 王雅静, 申晋, 郑刚, 等. Tikhonov 正则化与多重网格技术相结合的动态光散射反演[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5):963-971.
WANG Y J, SHEN J, ZHENG G, *et al.*. Inversion of dynamic light scattering combining Tikhonov regularization with multi-grid technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5):963-971. (in Chinese)
- [22] 胡帅, 高太长, 李浩, 等. 基于近红外体散射数据的气溶胶尺度谱正则化反演方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1):17-26.
HU SH, GAO T CH, LI H, *et al.*. Regularized inversion method for retrieving aerosol size distribution based on volume scattering function data at near-infrared waveband [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1):17-26. (in Chinese)
- [23] 程强, 薛栋林, 张学军. 相位差异的三反光学系统

波前传感技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6):1601-1606.

CHENG Q, XUE D L, ZHANG X J. Wavefront

sensing of three-mirror reflecting optical system phase diversity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6):1601-1606. (in Chinese)

作者简介:



郭文月(1990—),女,辽宁辽阳人,博士研究生,2012年、2015年于信息工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事数字图像处理、时空数据挖掘等方面的研究。E-mail:guowyer@163.com

导师简介:



刘海砚(1971—),男,河北唐山人,博士,教授,博士生导师,1993年、1999年、2002年于解放军测绘学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事数字地图制图、地理信息工程等方面的研究。E-mail:liu2000@vip.sina.com

通讯作者:



余岸竹(1989—),男,湖北罗田人,博士研究生,2011年、2011年于信息工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事数字图像处理、数字摄影测量方面的研究。E-mail:anzhu_yu@126.com

导师简介:



姜挺(1963—),男,山东即墨人,博士,教授,博士生导师,1983年、1987年于解放军测绘学院分别获得学士、硕士学位,1997年于德国慕尼黑国防军大学获得博士学位,主要从事数字摄影测量、遥感图像处理、高分辨率对地观测等方面的研究。E-mail:tjiang@sina.com