



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107941201 B

(45)授权公告日 2019.08.02

(21)申请号 201711053332.6

(22)申请日 2017.10.31

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 107941201 A

(43)申请公布日 2018.04.20

(73)专利权人 武汉大学  
地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山

(72)发明人 曹金山 袁修孝 龚健雅

(74)专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务  
所(特殊普通合伙) 42222  
代理人 张火春

(51)Int.Cl.  
G01C 11/00(2006.01)  
G06F 17/11(2006.01)

(56)对比文件

CN 107144293 A,2017.09.08,  
CN 105761248 A,2016.07.13,  
US 2014191894 A1,2014.07.10,  
US 2012063668 A1,2012.03.15,

审查员 裴芳莹

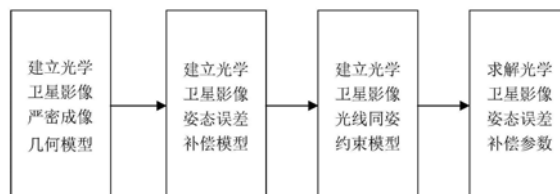
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

## (54)发明名称

光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法及系统

## (57)摘要

本发明公开了一种光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法及系统,所述方法包括:S1根据瞬时投影中心、地面点及其对应像点的三点共线原理,建立光学卫星影像的严密成像几何模型;S2在卫星姿态测量值的基础上引入卫星姿态的平移项和漂移项,构建光学卫星影像的姿态误差补偿模型;S3根据同一条带内相邻两景影像上像点所对应的成像光线在该相邻两景影像中描述的姿态角相同,构建光学卫星影像的光线同姿约束模型;S4采用最小二乘法求解姿态误差补偿参数。本发明利用相邻影像间的连接点,通过影像之间固有的光线同姿约束,将所有零交会影像连接成一个整体,从而在少量地面控制点的情况下,同时实现所有零交会光学卫星影像的精确定位。



1. 光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法,其特征是,包括:

S1根据瞬时投影中心、地面点及其对应像点的三点共线原理,建立光学卫星影像的严密成像几何模型;

S2在卫星姿态测量值的基础上引入卫星姿态的平移项和漂移项,构建光学卫星影像的姿态误差补偿模型;所述平移项和漂移项构成光学卫星影像的姿态误差补偿参数;

S3根据同一条带内相邻两景影像上像点所对应的成像光线在该相邻两景影像中描述的姿态角相同,构建光学卫星影像的光线同姿约束模型;

S4采用最小二乘法求解姿态误差补偿参数,具体为:

4.1根据同一条带内的第1景影像和最后1景影像上的各地面控制点,利用严密成像几何模型和姿态误差补偿模型分别建立第1景影像和最后1景影像的误差方程式;

4.2根据同一条带内相邻两景影像间的各连接点,利用相邻两景影像间的光线同姿约束模型,分别建立各相邻两景影像间的误差方程式;

4.3基于子步骤4.1和子步骤4.2所建立的误差方程式,根据最小二乘平差原理建立法方程;

4.4迭代求解法方程,获得姿态误差补偿参数。

2. 如权利要求1所述的光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法,其特征是:所述姿态误差补偿模型为:

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_0 + a_\varphi + b_\varphi \cdot (l - l_0) \\ \omega = \omega_0 + a_\omega + b_\omega \cdot (l - l_0); \\ \kappa = \kappa_0 + a_\kappa + b_\kappa \cdot (l - l_0) \end{cases}$$

其中,  $(\varphi, \omega, \kappa)$  表示卫星姿态;  $(\varphi_0, \omega_0, \kappa_0)$  表示卫星姿态测量值;  $(a_\varphi, a_\omega, a_\kappa)$  表示卫星姿态的平移项;  $(b_\varphi, b_\omega, b_\kappa)$  表示卫星姿态的漂移项;  $l$  和  $l_0$  分别表示像点和中心扫描行影像在像平面坐标系下的行坐标;

且所述光线同姿约束模型为:

$$\begin{cases} \varphi_0^i + a_\varphi^i + b_\varphi^i \cdot (l^i - l_0^i) = \varphi_0^{i+1} + a_\varphi^{i+1} + b_\varphi^{i+1} \cdot (l^{i+1} - l_0^{i+1}) \\ \omega_0^i + a_\omega^i + b_\omega^i \cdot (l^i - l_0^i) = \omega_0^{i+1} + a_\omega^{i+1} + b_\omega^{i+1} \cdot (l^{i+1} - l_0^{i+1}); \\ \kappa_0^i + a_\kappa^i + b_\kappa^i \cdot (l^i - l_0^i) = \kappa_0^{i+1} + a_\kappa^{i+1} + b_\kappa^{i+1} \cdot (l^{i+1} - l_0^{i+1}) \end{cases}$$

其中,  $(\varphi_0^i, \omega_0^i, \kappa_0^i)$  和  $(\varphi_0^{i+1}, \omega_0^{i+1}, \kappa_0^{i+1})$  分别表示成像光线在第  $i$  景和  $i+1$  景影像中描述的卫星姿态测量值;  $(a_\varphi^i, a_\omega^i, a_\kappa^i, b_\varphi^i, b_\omega^i, b_\kappa^i)$  和  $(a_\varphi^{i+1}, a_\omega^{i+1}, a_\kappa^{i+1}, b_\varphi^{i+1}, b_\omega^{i+1}, b_\kappa^{i+1})$  分别表示成像光线在第  $i$  景和第  $i+1$  景影像中描述的姿态误差补偿参数;  $l^i$  和  $l^{i+1}$  分别表示像点在第  $i$  景和  $i+1$  景影像的像平面坐标系下的行坐标;  $l_0^i$  和  $l_0^{i+1}$  分别表示第  $i$  景和  $i+1$  景影像的中心扫描行影像在各自像平面坐标系下的行坐标; 第  $i$  景和  $i+1$  景影像为同一条带内相邻两景影像。

3. 如权利要求1所述的光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法,其特征是:子步骤4.1所建立的误差方程式为:

$$V_1 = A_1 X_1 - L_1$$

$$V_k = A_k X_k - L_k$$

其中,向量 $V_1$ 和 $V_k$ 分别表示第1景影像和最后1景影像上像点坐标观测值的改正数;矩阵 $A_1$ 和 $A_k$ 分别表示第1景影像和最后1景影像的姿态误差补偿参数的偏导数构成的设计矩阵,该设计矩阵根据严密成像几何模型和姿态误差补偿模型得到;向量 $X_1$ 和 $X_k$ 分别表示第1景影像和最后1景影像的姿态误差补偿参数的改正数;向量 $L_1$ 和 $L_k$ 分别表示第1景影像和最后1景影像上像点坐标的残差。

4.如权利要求1所述的光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法,其特征是:子步骤4.2所建立的误差方程式为:

$$V_{i,i+1} = B_i^{i(i+1)} X_i - B_{i+1}^{i(i+1)} X_{i+1}$$

其中,向量 $V_{i,i+1}$ 表示相邻两景影像 $i$ 和 $i+1$ 间的光线姿态不符值的改正数,所述光线姿态不符值表示同一成像光线在相邻两景影像中描述的卫星姿态的差值;向量 $X_i$ 和 $X_{i+1}$ 分别表示相邻两景影像 $i$ 和 $i+1$ 的姿态误差补偿参数的改正数; $B_i^{i(i+1)}$ 和 $B_{i+1}^{i(i+1)}$ 分别表示相邻两景影像 $i$ 和 $i+1$ 中影像 $i$ 和 $i+1$ 的姿态误差补偿参数的偏导数构成的设计矩阵,该设计矩阵根据光线同姿约束模型得到。

5.光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差系统,其特征是,包括:

严密成像几何模型建立模块,用来根据瞬时投影中心、地面点及其对应像点的三点共线原理,建立光学卫星影像的严密成像几何模型;

姿态误差补偿模型建立模块,用来在卫星姿态测量值的基础上引入卫星姿态的平移项和漂移项,构建光学卫星影像的姿态误差补偿模型;所述平移项和漂移项构成光学卫星影像的姿态误差补偿参数;

光线同姿约束模型建立模块,用来根据同一条带内相邻两景影像上像点所对应的成像光线在该相邻两景影像中描述的姿态角相同,构建光学卫星影像的光线同姿约束模型;

姿态误差补偿参数求解模块,用来采用最小二乘法求解姿态误差补偿参数;

所述姿态误差补偿参数求解模块进一步包括:

第一误差方程建立模块,用来根据同一条带内的第1景影像和最后1景影像上的各地面控制点,利用严密成像几何模型和姿态误差补偿模型分别建立第1景影像和最后1景影像的误差方程式;

第二误差方程建立模块,用来根据同一条带内相邻两景影像间的各连接点,利用相邻两景影像间的光线同姿约束模型,分别建立各相邻两景影像间的误差方程式;

法方程建立模块,用来基于第一误差方程建立模块和第二误差方程建立模块所建立的误差方程式,根据最小二乘平差原理建立法方程;

迭代求解模块,用来迭代求解法方程,获得姿态误差补偿参数。

## 光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于摄影测量与遥感技术领域,特别涉及一种光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法及系统。

### 背景技术

[0002] 高分辨率卫星遥感对地观测技术已成为人类获取地球空间信息的重要手段之一,由高分辨率卫星影像生产的一系列地理空间信息产品(如数字高程模型、数字正射影像)已被广泛应用于地形测绘、土地利用调查与更新、地质勘探、农林业资源调查、抗震救灾等应用领域。为更快地实现高分辨率卫星影像的产品化,更好地服务于我国社会经济和国防建设,更多地创造社会和经济效益,必须先解决高分辨率卫星影像精确目标定位问题,影像定位精度直接决定了地理空间信息产品的精度。

[0003] 为了提高影像定位精度,高分辨率光学卫星上通常搭载有GPS接收机、星敏感器和陀螺仪,用于确定卫星影像采集时卫星的位置与姿态。然而,受卫星定轨测姿设备性能的影响,卫星位置与姿态测量值不可避免地包含测量误差。在无地面控制点的情况下,高分辨率光学卫星影像仍难以获得最优的定位精度。目前,为了消除这些误差对影像定位的影响,以获得最优的定位精度,地面控制点仍是必不可少的。众所周知,野外采集地面控制点需要投入大量的人力、物力与财力,特别是在高分辨率光学卫星影像所覆盖的大区域范围内。对于天绘一号、资源三号等三线阵立体测绘卫星,可以从不同角度获取覆盖同一地区的前视、下视和后视影像。充分利用三视影像之间的几何约束,进行传统光束法区域网平差处理,即可在少量地面控制点的辅助下,实现三线阵立体卫星影像精确定位。然而,对于高分一号、高分二号、高景一号等单线阵光学测绘卫星,只能通过推扫模式采集沿轨方向的单视条带影像,并将该条带影像切分成若干具有一定重叠的标准影像分发给用户。将条带影像切分成若干标准影像后,相邻标准影像之间的同名光线实质上是同一根光线,其交会角为 $0^{\circ}$ (即零交会)。受零交会问题的影响,同一条带内相邻标准影像难以构成理想立体像对,无法满足传统光束法区域网平差中“良好交会条件下同名光线对对相交”这一基本几何约束。也就是说,对于同一条带内的零交会光学卫星影像,难以利用传统光束法区域网平差方法,实现少量地面控制点辅助的卫星影像精确定位。

[0004] 为了实现同一条带内零交会光学卫星影像精确定位,需要在每一景影像上均匀布设一定数量的地面控制点,这在实际处理过程中往往是难以满足的。主要原因有两点:一是单景高分辨率光学卫星影像的地面覆盖范围通常可达 $20 \times 20 \text{km}^2$ 至 $50 \times 50 \text{km}^2$ ,在每一景影像上均匀布设地面控制点需要大量的成本投入;二是受云层遮挡、森林覆盖、纹理匮乏等因素的影响,难以在每一景影像上都获得均匀分布的控制点。因此,如何在少量地面控制点的辅助下,实现零交会光学卫星影像精确定位,对充分发挥我国高分一号、高分二号、高景一号等单线阵卫星影像的应用价值有着重要的意义。

## 发明内容

[0005] 针对同一条带内多景零交会光学卫星影像精确定位需要大量地面控制点的现状，本发明提出了一种光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法及系统，本发明充分利用光线同姿约束，来实现少量地面控制点辅助的零交会光学卫星影像的精确定位。

[0006] 本发明提供的一种光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法，包括：

[0007] S1根据瞬时投影中心、地面点及其对应像点的三点共线原理，建立光学卫星影像的严密成像几何模型；

[0008] S2在卫星姿态测量值的基础上引入卫星姿态的平移项和漂移项，构建光学卫星影像的姿态误差补偿模型；所述平移项和漂移项构成光学卫星影像的姿态误差补偿参数；

[0009] S3根据同一条带内相邻两景影像上像点所对应的成像光线在该相邻两景影像中描述的姿态角相同，构建光学卫星影像的光线同姿约束模型；

[0010] S4采用最小二乘法求解姿态误差补偿参数，具体为：

[0011] 4.1根据同一条带内的第1景影像和最后1景影像上的各地面控制点，利用严密成像几何模型和姿态误差补偿模型分别建立第1景影像和最后1景影像的误差方程式；

[0012] 4.2根据同一条带内相邻两景影像间的各连接点，利用相邻两景影像间的光线同姿约束模型，分别建立各相邻两景影像间的误差方程式；

[0013] 4.3基于子步骤4.1和子步骤4.2所建立的误差方程式，根据最小二乘平差原理建立法方程；

[0014] 4.4迭代求解法方程，获得姿态误差补偿参数。

[0015] 进一步的，所述姿态误差补偿模型为：

$$[0016] \begin{cases} \varphi = \varphi_0 + a_\varphi + b_\varphi \cdot (l - l_0) \\ \omega = \omega_0 + a_\omega + b_\omega \cdot (l - l_0) \\ \kappa = \kappa_0 + a_\kappa + b_\kappa \cdot (l - l_0) \end{cases}$$

[0017] 其中， $(\varphi, \omega, \kappa)$  表示卫星姿态； $(\varphi_0, \omega_0, \kappa_0)$  表示卫星姿态测量值； $(a_\varphi, a_\omega, a_\kappa)$  表示卫星姿态的平移项； $(b_\varphi, b_\omega, b_\kappa)$  表示卫星姿态的漂移项； $l$  和  $l_0$  分别表示像点和中心扫描行影像在像平面坐标系下的行坐标；

[0018] 且所述光线同姿约束模型为：

$$[0019] \begin{cases} \varphi_0^i + a_\varphi^i + b_\varphi^i \cdot (l^i - l_0^i) = \varphi_0^{i+1} + a_\varphi^{i+1} + b_\varphi^{i+1} \cdot (l^{i+1} - l_0^{i+1}) \\ \omega_0^i + a_\omega^i + b_\omega^i \cdot (l^i - l_0^i) = \omega_0^{i+1} + a_\omega^{i+1} + b_\omega^{i+1} \cdot (l^{i+1} - l_0^{i+1}) \\ \kappa_0^i + a_\kappa^i + b_\kappa^i \cdot (l^i - l_0^i) = \kappa_0^{i+1} + a_\kappa^{i+1} + b_\kappa^{i+1} \cdot (l^{i+1} - l_0^{i+1}) \end{cases}$$

[0020] 其中， $(\varphi_0^i, \omega_0^i, \kappa_0^i)$  和  $(\varphi_0^{i+1}, \omega_0^{i+1}, \kappa_0^{i+1})$  分别表示成像光线在第  $i$  景和  $i+1$  景影像中描述的卫星姿态测量值； $(a_\varphi^i, a_\omega^i, a_\kappa^i, b_\varphi^i, b_\omega^i, b_\kappa^i)$  和  $(a_\varphi^{i+1}, a_\omega^{i+1}, a_\kappa^{i+1}, b_\varphi^{i+1}, b_\omega^{i+1}, b_\kappa^{i+1})$  分别表示成像光线在第  $i$  景和第  $i+1$  景影像中描述的姿态误差补偿参数； $l^i$  和  $l^{i+1}$  分别表示像点在第  $i$  景和  $i+1$  景影像的像平面坐标系下的行坐标； $l_0^i$  和  $l_0^{i+1}$  分别表示第  $i$  景和  $i+1$  景影像的中心扫描行影像在各自像平面坐标系下的行坐标；第  $i$  景和  $i+1$  景影像为同一条带内相邻两景影像。

[0021] 进一步的，子步骤4.1所建立的误差方程式为：

[0022]  $V_1 = A_1 X_1 - L_1$

[0023]  $V_k = A_k X_k - L_k$

[0024] 其中,向量 $V_1$ 和 $V_k$ 分别表示第1景影像和最后1景影像上像点坐标观测值的改正数;矩阵 $A_1$ 和 $A_k$ 分别表示第1景影像和最后1景影像的姿态误差补偿参数的偏导数构成的设计矩阵,该设计矩阵根据严密成像几何模型和姿态误差补偿模型得到;向量 $X_1$ 和 $X_k$ 分别表示第1景影像和最后1景影像的姿态误差补偿参数的改正数;向量 $L_1$ 和 $L_k$ 分别表示第1景影像和最后1景影像上像点坐标的残差。

[0025] 进一步的,子步骤4.2所建立的误差方程式为:

[0026]  $V_{i,i+1} = \mathbf{B}_i^{i(i+1)} \mathbf{X}_i - \mathbf{B}_{i+1}^{i(i+1)} \mathbf{X}_{i+1}$

[0027] 其中,向量 $V_{i,i+1}$ 表示相邻两景影像 $i$ 和 $i+1$ 间的光线姿态不符值的改正数,所述光线姿态不符值表示同一成像光线在相邻两景影像中描述的卫星姿态的差值;向量 $X_i$ 和 $X_{i+1}$ 分别表示相邻两景影像 $i$ 和 $i+1$ 的姿态误差补偿参数的改正数; $\mathbf{B}_i^{i(i+1)}$ 和 $\mathbf{B}_{i+1}^{i(i+1)}$ 分别表示相邻两景影像 $i$ 和 $i+1$ 中影像 $i$ 和 $i+1$ 的姿态误差补偿参数的偏导数构成的设计矩阵,该设计矩阵根据光线同姿约束模型得到。

[0028] 本发明提供的光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差系统,包括:

[0029] 严密成像几何模型建立模块,用来根据瞬时投影中心、地面点及其对应像点的三点共线原理,建立光学卫星影像的严密成像几何模型;

[0030] 姿态误差补偿模型建立模块,用来在卫星姿态测量值的基础上引入卫星姿态的平移项和漂移项,构建光学卫星影像的姿态误差补偿模型;所述平移项和漂移项构成光学卫星影像的姿态误差补偿参数;

[0031] 光线同姿约束模型建立模块,用来根据同一条带内相邻两景影像上像点所对应的成像光线在该相邻两景影像中描述的姿态角相同,构建光学卫星影像的光线同姿约束模型;

[0032] 姿态误差补偿参数求解模块,用来采用最小二乘法求解姿态误差补偿参数;

[0033] 所述姿态误差补偿参数求解模块进一步包括:

[0034] 第一误差方程建立模块,用来根据同一条带内的第1景影像和最后1景影像上的各地面控制点,利用严密成像几何模型和姿态误差补偿模型分别建立第1景影像和最后1景影像的误差方程式;

[0035] 第二误差方程建立模块,用来根据同一条带内相邻两景影像间的各连接点,利用相邻两景影像间的光线同姿约束模型,分别建立各相邻两景影像间的误差方程式;

[0036] 法方程建立模块,用来基于第一误差方程建立模块和第二误差方程建立模块所建立的误差方程式,根据最小二乘平差原理建立法方程;

[0037] 迭代求解模块,用来迭代求解法方程,获得姿态误差补偿参数。

[0038] 本发明具有如下优点和有益效果:

[0039] 本发明从光学卫星传感器的成像机理出发,建立光学卫星影像光线同姿约束模型,并在此基础上,结合光学卫星影像严密成像几何模型和姿态误差补偿模型,提出一种光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法及系统。本发明可以在少量地面控制点的情况下,同时实现同一条带内多景零交会光学卫星影像精确定位,进而为我国单线阵光学

卫星影像的广泛应用提供技术支撑。

### 附图说明

[0040] 图1为本发明实施例的方法流程图；

[0041] 图2为本发明实施例的单线阵条带影像切分示意图；

[0042] 图3为本发明实施例采用的武汉至咸宁试验区内控制点的分布图。

### 具体实施方式

[0043] 为了更清楚地说明本发明实施例和/或现有技术中的技术方案，下面将对附图说明本发明的具体实施方式。显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图，并获得其他的实施方式。

[0044] 下面将结合附图和实施例对本发明作进一步的说明。

[0045] 本发明利用影像之间的连接点，通过光线同姿约束，在逻辑上将同一条带内的所有零交会光学卫星影像连接成一个完整的条带影像，从而在少量地面控制点的情况下，同时实现该条带内所有卫星影像姿态误差补偿参数的联合精确求解。因此，进行同一条带内零交会光学卫星影像精确定位时，充分利用光线同姿约束，有望大大减少地面控制点野外量测所需的经济、人力和物力成本。

[0046] 本发明实施例所提供方法的流程如图1所示，包括步骤：(1) 建立光学卫星影像的严密成像几何模型；(2) 建立光学卫星影像的姿态误差补偿模型；(3) 建立光学卫星影像的光线同姿约束模型；(4) 求解光学卫星影像的姿态误差补偿参数。

[0047] 下面将说明各步骤的具体实施过程。

[0048] 步骤(1)，建立光学卫星影像的严密成像几何模型。

[0049] 设  $(X, Y, Z)$  和  $(X_s, Y_s, Z_s)$  分别为地面点P和瞬时投影中心S的物方空间坐标； $(0, y)$  为地面点P对应的像点p在瞬时影像坐标系下的像方坐标； $(x_0, y_0)$  为像主点坐标； $(\Delta x, \Delta y)$  为相机镜头畸变改正值； $f$  为相机主距； $\lambda$  为比例因子；像点p所在扫描行影像对应的姿态角为  $(\varphi, \omega, \kappa)$ ，由其构成的旋转矩阵为R。

[0050] 根据瞬时投影中心、地面点P及其对应像点p的三点共线原理，建立用于光学卫星影像精确定位的严密成像几何模型，其数学表达式为：

$$[0051] \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} + \lambda \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 - x_0 + \Delta x \\ y - y_0 + \Delta y \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0052] 步骤(2)，建立光学卫星影像的姿态误差补偿模型。

[0053] 高分辨率光学卫星上通常搭载有GPS接收机、星敏感器和陀螺仪，用于测量  $(X_s, Y_s, Z_s)$  和  $(\varphi, \omega, \kappa)$ 。分析式(1)可知，影响高分辨率光学卫星影像定位精度的误差可以分为两大类：一类是静态误差，主要包括像主点、主距和镜头畸变的误差；另一类是时变误差，主要包括卫星位置和姿态的测量误差。

[0054] 为便于理解，下面将分别介绍各类误差。

[0055] 1) 像主点、主距和镜头畸变的误差。

[0056] 近几年,我国高分辨率光学卫星传感器在轨几何定标技术已经有了质的飞跃。通过周期性在轨几何定标,便可以获得像主点、主距和镜头畸变参数的精确值。因此,在高分辨率光学卫星影像精确定位过程中,像主点、主距和镜头畸变可以当作已知值。

[0057] 2) 卫星位置的测量误差。

[0058] 随着我国光学卫星定轨技术的不断发展,目前我国光学遥感卫星的位置测量精度已可达亚米级甚至更高。因此,在高分辨率光学卫星影像精确定位过程中,卫星位置的测量误差可以忽略不计,或者通过卫星姿态参数进行补偿。

[0059] 3) 卫星姿态的测量误差。

[0060] 目前,我国光学遥感卫星姿态的测量精度只能达到几角秒甚至几十角秒。相比于卫星位置的测量误差,卫星姿态的测量误差对影像定位精度的影响尤为明显。对于卫星姿态测量误差,必须利用地面控制点加以消除,才能获得最优的光学卫星影像定位精度。

[0061] 本发明在卫星姿态测量值 $(\varphi_0, \omega_0, \kappa_0)$ 的基础上引入平移项 $(a_\varphi, a_\omega, a_\kappa)$ 和漂移项 $(b_\varphi, b_\omega, b_\kappa)$ ,建立光学卫星影像的姿态误差补偿模型,即:

$$[0062] \quad \begin{cases} \varphi = \varphi_0 + a_\varphi + b_\varphi \cdot (l - l_0) \\ \omega = \omega_0 + a_\omega + b_\omega \cdot (l - l_0) \\ \kappa = \kappa_0 + a_\kappa + b_\kappa \cdot (l - l_0) \end{cases} \quad (2)$$

[0063] 式(2)中, $l$ 和 $l_0$ 分别为像点 $p$ 和中心扫描行影像在像平面坐标系下的行坐标。

[0064] 步骤(3),建立光学卫星影像的光线同姿约束模型。

[0065] 高分辨率光学遥感卫星上搭载的成像传感器通常为线阵传感器。通过沿轨推扫模式,单线阵传感器可以采集完整的条带影像,如图2所示。图中, $o-1s$ 表示条带影像的像平面坐标系,点 $o$ 定义为第一扫描行的第一个像素点, $l$ 轴沿着卫星轨道方向, $s$ 轴垂直卫星轨道方向。

[0066] 点 $P$ 为物方空间任意一个地面点,点 $p$ 为地面点 $P$ 在条带影像上对应的像点。

[0067] 通常情况下,卫星影像供应商会将完整的条带影像切分成若干具有一定重叠度的标准影像,并将标准影像提供给影像用户。图2中的第 $i$ 景和 $i+1$ 景影像为切分后相邻的两景标准影像, $o_i-1s_i$ 和 $o_{i+1}-1s_{i+1}$ 分别表示第 $i$ 景和 $i+1$ 景影像的像平面坐标系,其定义同 $o-1s$ ;像点 $p$ 位于这两景影像的重叠区域内。

[0068] 事实上,将条带影像切分成标准影像后,第 $i$ 景和 $i+1$ 景影像上的像点 $p$ 仍都是地面点 $P$ 的构像,像点 $p$ 所对应的成像光线 $pP$ 在物方空间坐标系中的姿态并不会发生改变。也就是说,成像光线 $pP$ 在第 $i$ 景影像中描述的姿态角 $(\varphi^i, \omega^i, \kappa^i)$ 与其在第 $i+1$ 景影像中描述的姿态角 $(\varphi^{i+1}, \omega^{i+1}, \kappa^{i+1})$ 是相同的。

[0069] 根据该光线同姿约束,可得:

$$[0070] \quad \begin{cases} \varphi^i = \varphi^{i+1} \\ \omega^i = \omega^{i+1} \\ \kappa^i = \kappa^{i+1} \end{cases} \quad (3)$$

[0071] 将式(2)代入式(3),即建立零交会光学卫星影像的光线同姿约束模型:



$$[0072] \quad \begin{cases} \varphi_0^i + a_\varphi^i + b_\varphi^i \cdot (l^i - l_0^i) = \varphi_0^{i+1} + a_\varphi^{i+1} + b_\varphi^{i+1} \cdot (l^{i+1} - l_0^{i+1}) \\ \omega_0^i + a_\omega^i + b_\omega^i \cdot (l^i - l_0^i) = \omega_0^{i+1} + a_\omega^{i+1} + b_\omega^{i+1} \cdot (l^{i+1} - l_0^{i+1}) \\ \kappa_0^i + a_\kappa^i + b_\kappa^i \cdot (l^i - l_0^i) = \kappa_0^{i+1} + a_\kappa^{i+1} + b_\kappa^{i+1} \cdot (l^{i+1} - l_0^{i+1}) \end{cases} \quad (4)$$

[0073] 式(4)中,各参数的意义同式(2),上标*i*和*i+1*分别表示第*i*景和*i+1*景影像。

[0074] 更具体的:

[0075] 像点*p*表示同一条带内相邻两景零交会影像间的连接点;

[0076]  $(\phi_0^i, \omega_0^i, \kappa_0^i)$ 和 $(\phi_0^{i+1}, \omega_0^{i+1}, \kappa_0^{i+1})$ 分别表示成像光线*pP*在第*i*景和*i+1*景影像中描述的卫星姿态测量值;

[0077]  $(a_\varphi^i, a_\omega^i, a_\kappa^i)$ 和 $(a_\varphi^{i+1}, a_\omega^{i+1}, a_\kappa^{i+1})$ 分别表示第*i*景和*i+1*景影像的卫星姿态的平移项,  
 $(b_\varphi^i, b_\omega^i, b_\kappa^i)$ 和 $(b_\varphi^{i+1}, b_\omega^{i+1}, b_\kappa^{i+1})$ 分别表示第*i*景和*i+1*景影像的卫星姿态的漂移项;

[0078]  $(a_\varphi^i, a_\omega^i, a_\kappa^i, b_\varphi^i, b_\omega^i, b_\kappa^i)$ 即成像光线*pP*在第*i*景影像中描述的姿态误差补偿参数,  
 $(a_\varphi^{i+1}, a_\omega^{i+1}, a_\kappa^{i+1}, b_\varphi^{i+1}, b_\omega^{i+1}, b_\kappa^{i+1})$ 即成像光线*pP*在第*i+1*景影像中描述的姿态误差补偿参数;

[0079]  $l^i$ 和 $l^{i+1}$ 分别为像点*p*在第*i*景和*i+1*景影像的像平面坐标系下的行坐标;

[0080]  $l_0^i$ 和 $l_0^{i+1}$ 分别为第*i*景和*i+1*景影像的中心扫描行影像在各自像平面坐标系下的行坐标。

[0081] 步骤(4),求解光学卫星影像的姿态误差补偿参数。

[0082] 为简便起见,这里仅以同一条带内相邻的3景(第1景、第2景和第3景)零交会光学卫星影像为例,说明本发明姿态误差补偿参数的求解方法。对于同一条带内的更多景零交会光学卫星影像,可依此类推。其中,地面控制点仅分布于该条带内的第1景(即第1景)影像和最后1景(即第3景)影像上,中间景(即第2景)影像通过连接点与其它影像相连。

[0083] 姿态误差补偿参数的求解过程实现如下:

[0084] 1) 对于第1景和第3景影像上的每一个地面控制点,根据步骤(1)构建的严密成像几何模型和步骤(2)构建的姿态误差补偿模型,分别建立第1景和第3景影像的误差方程式,如下:

$$[0085] \quad V_1 = A_1 X_1 - L_1 \quad (5)$$

$$[0086] \quad V_3 = A_3 X_3 - L_3 \quad (6)$$

[0087] 式(5)~(6)中:

[0088] 向量*V*<sub>1</sub>和*V*<sub>3</sub>分别表示第1景和第3景影像上像点坐标观测值的改正数;

[0089] 矩阵*A*<sub>1</sub>和*A*<sub>3</sub>分别表示第1景和第3景影像的姿态误差补偿参数的偏导数构成的设计矩阵,该设计矩阵根据严密成像几何模型和姿态误差补偿模型得到;

[0090] 向量*X*<sub>1</sub>和*X*<sub>3</sub>分别表示第1景和第3景影像的姿态误差补偿参数的改正数;

[0091] 向量*L*<sub>1</sub>和*L*<sub>3</sub>分别表示第1景和第3景影像上像点坐标的残差。

[0092] 2) 对于第1景和第2景影像间、第2景和第3景影像间的每一个连接点,根据步骤(3)所构建的光线同姿约束模型,分别建立误差方程式,如下:

$$[0093] \quad \mathbf{V}_{1,2} = \mathbf{B}_1^{12} \mathbf{X}_1 - \mathbf{B}_2^{12} \mathbf{X}_2 \quad (7)$$

$$[0094] \quad \mathbf{V}_{2,3} = \mathbf{B}_2^{23} \mathbf{X}_2 - \mathbf{B}_3^{23} \mathbf{X}_3 \quad (8)$$

[0095] 式(7)~(8)中:

[0096] 向量 $\mathbf{V}_{1,2}$ 和 $\mathbf{V}_{2,3}$ 分别为第1景和第2景影像间、第2景和第3景影像间的光线姿态不符值的改正数,所述光线姿态不符值表示同一成像光线在相邻两景影像中描述的卫星姿态的差值;

[0097] 矩阵 $\mathbf{B}_1^{12}$ 和 $\mathbf{B}_2^{12}$ 分别表示第1景和第2景影像的姿态误差补偿参数的偏导数构成的设计矩阵,该设计矩阵根据光线同姿约束模型得到;

[0098]  $\mathbf{B}_2^{23}$ 和 $\mathbf{B}_3^{23}$ 分别为第2景和第3景影像的姿态误差补偿参数的偏导数构成的设计矩阵;

[0099] 向量 $\mathbf{X}_2$ 表示第2景影像的姿态误差补偿参数的改正数。

[0100] 3) 基于误差方程式(5)~(8),根据最小二乘平差原理形成法方程:

$$[0101] \quad \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1 + (\mathbf{B}_1^{12})^T \mathbf{B}_1^{12} & -(\mathbf{B}_1^{12})^T \mathbf{B}_2^{12} & \mathbf{0} \\ -(\mathbf{B}_2^{12})^T \mathbf{B}_1^{12} & (\mathbf{B}_2^{12})^T \mathbf{B}_2^{12} + (\mathbf{B}_2^{23})^T \mathbf{B}_2^{23} & -(\mathbf{B}_2^{23})^T \mathbf{B}_3^{23} \\ \mathbf{0} & -(\mathbf{B}_3^{23})^T (\mathbf{B}_2^{23})^T & \mathbf{A}_3^T \mathbf{A}_3 + (\mathbf{B}_3^{23})^T \mathbf{B}_3^{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^T \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_3^T \mathbf{L}_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0102] 4) 迭代求解法方程中的未知数 $\mathbf{X}_1$ 、 $\mathbf{X}_2$ 和 $\mathbf{X}_3$ ,从而获得第1景、第2景和第3景影像的姿态误差补偿参数。

$$[0103] \quad \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1 + (\mathbf{B}_1^{12})^T \mathbf{B}_1^{12} & -(\mathbf{B}_1^{12})^T \mathbf{B}_2^{12} & \mathbf{0} \\ -(\mathbf{B}_2^{12})^T \mathbf{B}_1^{12} & (\mathbf{B}_2^{12})^T \mathbf{B}_2^{12} + (\mathbf{B}_2^{23})^T \mathbf{B}_2^{23} & -(\mathbf{B}_2^{23})^T \mathbf{B}_3^{23} \\ \mathbf{0} & -(\mathbf{B}_3^{23})^T (\mathbf{B}_2^{23})^T & \mathbf{A}_3^T \mathbf{A}_3 + (\mathbf{B}_3^{23})^T \mathbf{B}_3^{23} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^T \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_3^T \mathbf{L}_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0104] 实施例

[0105] 本实施例选用覆盖湖北武汉至咸宁地区的四景资源三号下视影像(影像1、影像2、影像3和影像4)进行了试验,相邻影像之间具有少量重叠,属于同一条带内的零交会光学卫星影像。试验区的基本信息如表1所示,地面控制点分布如图3所示。

[0106] 表1 武汉至咸宁试验区基本信息

参数	影像 1	影像 2	影像 3	影像 4
影像获取时间	2012 年 6 月 20 日			
影像重叠度	3081 像素			
		3081 像素		
			3081 像素	
地形起伏	3 ~ 38 m	4 ~ 33 m	7 ~ 378 m	13 ~ 178 m
控制点数	48	43	24	16

[0108] 为验证本发明的有效性与实用性,本实施例首先利用4个地面控制点分别求解每一景影像的姿态误差补偿参数,并将剩余地面控制点作为检查点,统计影像定位精度,列于表2。

[0109] 表2 资源三号卫星影像定位精度

影像	控制点数	控制点号	检查点数	RMSE (像素)		
				x	y	平面
[0110] 影像 1	4	1, 2, 5, 6	44	0.501	0.514	0.718
影像 2	4	6, 7, 8, 9	39	0.418	0.699	0.814
影像 3	4	10, 11, 12, 13	20	0.554	0.519	0.759
影像 4	4	3, 4, 14, 15	12	0.621	0.483	0.787

[0111] 分析表2中的试验结果可以看出,每一景资源三号卫星影像均获得了优于0.9像素的定位精度。然而,为了获得如此高的影像定位精度,需要在每一景影像上分别均匀布设4个地面控制点。因此,在不考虑零交会光学卫星影像内在几何约束的情况下,当影像数量增加时,影像定位所需地面控制点的数量也会随之增加,这无疑会显著增加地面控制点野外量测的工作量,提高人力与财力成本。而且,受云层遮挡、森林覆盖、纹理匮乏等因素的影响,亦难以在每一景影像上都获得均匀分布的控制点,这就给光学卫星影像精确定位带来了困难。

[0112] 表3列出了利用本发明方法获得的资源三号卫星影像定位精度,即:在同一条带内的第一景影像(影像1)和最后一景影像(影像4)上分别布设2个地面控制点,相邻影像通过连接点连接起来,并进行光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差处理,再将每一景影像上剩余的地面控制点作为检查点,分别统计每一景影像的定位精度。

[0113] 表3 资源三号卫星影像定位精度

影像	控制点数	控制点号	检查点数	RMSE (像素)		
				x	y	平面
[0114] 影像 1	4	1, 2, 3, 4	46	0.499	0.489	0.699
影像 2			43	0.554	0.498	0.745
影像 3			24	0.448	0.548	0.708
影像 4			14	0.515	0.438	0.676

[0115] 分析表3中的试验结果可以看出:利用零交会光学卫星影像之间固有的光线同姿约束,可以在逻辑上将同一条带内的四景卫星影像连接成一景条带影像,仅在第一景和最后一景影像上各分布2个地面控制点的情况下,便可同时实现四景影像精确定位,获得的影像定位精度优于0.8像素。由此可见,本发明方法可以在保证影像定位精度的前提下,大幅度减少零交会光学卫星影像精确定位所需地面控制点的数量,从而有效减少地面控制点野外量测的经济成本。

[0116] 综上所述可以看出,本发明提出的光线同姿约束的零交会光学卫星影像联合平差方法是切实可行的。针对传统零交会光学卫星影像精确定位需要在每一景卫星影像上均匀布设地面控制点的现状,本发明方法仅需在第一景和最后一景影像上均匀布设少量地面控制点,即可同时精确求解出每一景卫星影像姿态误差补偿参数,进而实现零交会光学卫星影像精确定位。

[0117] 具体实施时,本发明所提供方法可基于软件技术实现自动运行流程,也可采用模块化方式实现相应系统。

[0118] 上述实施例用来解释说明本发明,而不是对本发明进行限制,在本发明的精神和权利要求的保护范围内,对本发明做出任何的修改和改变,都落入本发明的保护范围。

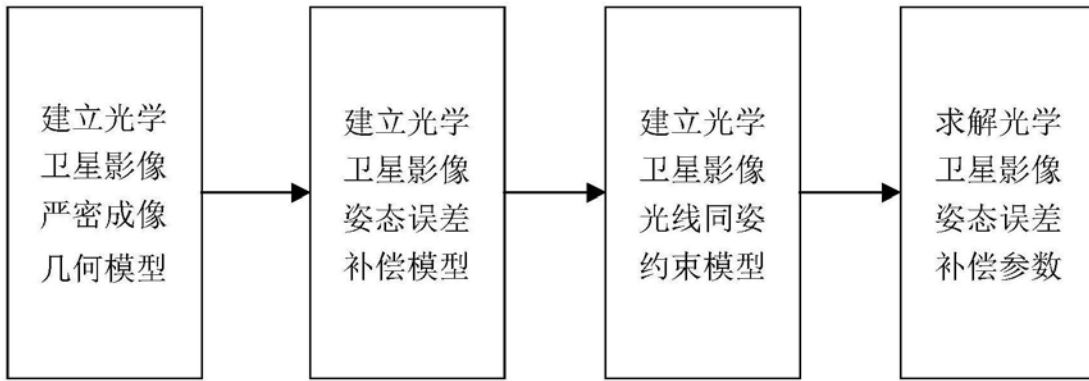


图1

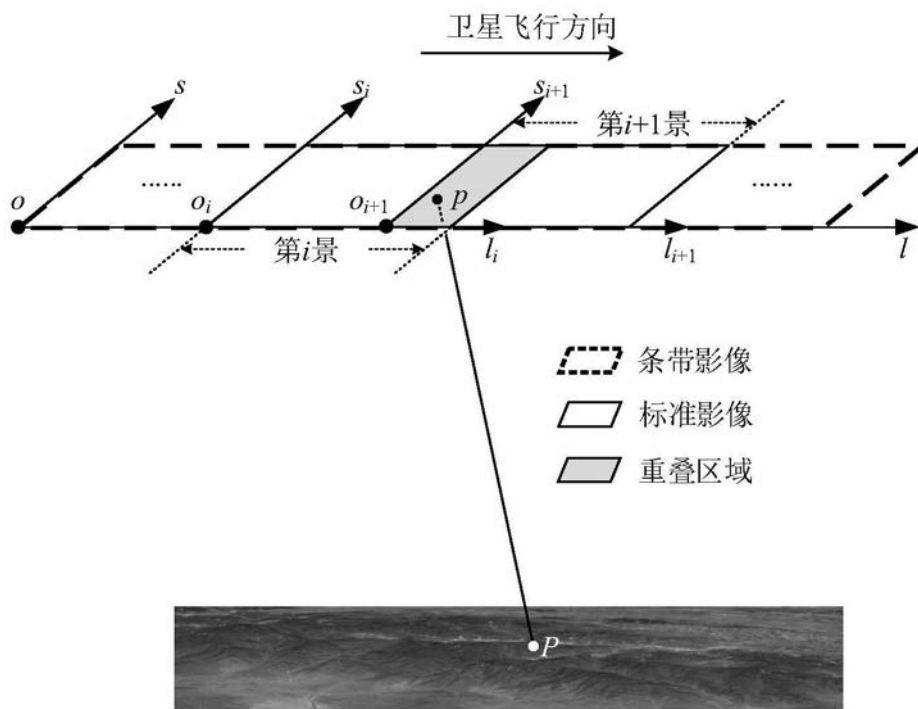


图2

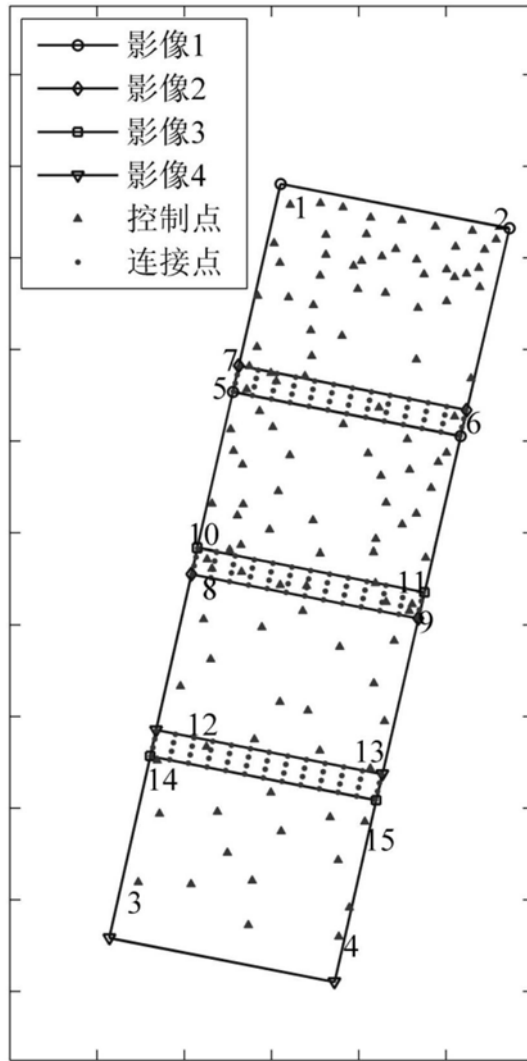


图3