



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104931071 B

(45)授权公告日 2017. 12. 26

(21)申请号 201510385934.6

审查员 沈新华

(22)申请日 2015.06.30

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104931071 A

(43)申请公布日 2015.09.23

(73)专利权人 武汉大学

地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山
武汉大学

(72)发明人 王密 程宇锋 李德仁 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 严彦

(51)Int. Cl.

G01C 25/00(2006.01)

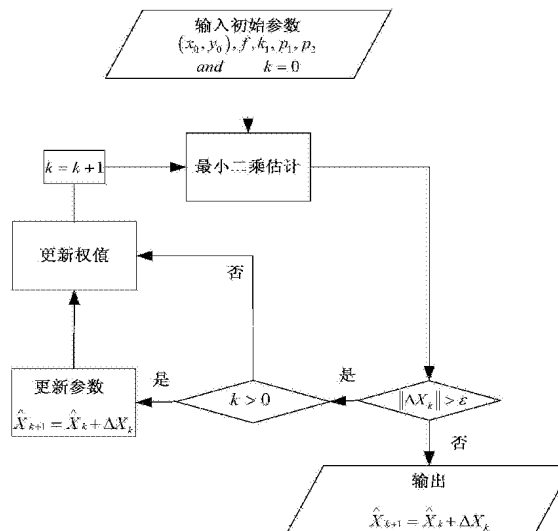
权利要求书5页 说明书11页 附图2页

(54)发明名称

一种基于选权迭代的星敏传感器在轨几何定标方法及系统

(57)摘要

一种基于选权迭代的星敏传感器在轨几何定标方法及系统,利用星敏传感器拍摄多张恒星背景,获取恒星控制点的方向矢量和量测矢量,构建星敏传感器在轨几何定标模型,利用选权迭代与最小二乘方法解算定标参数,获取定标结果。本发明可以有效的抑制由于星敏传感器相机参数存在偏差造成的星图误识别引入的错误恒星控制点信息,有效的提高星敏传感器在轨几何定标的可靠性与稳定性,提高卫星测量精度。



1. 一种基于选权迭代的星敏传感器在轨几何定标方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1,利用星敏传感器拍摄多张恒星背景,获取恒星控制点的方向矢量 v_i 和量测矢量 w_i ;

步骤2,构建星敏传感器在轨几何定标模型如下,

设星敏传感器同一星图内两个星点对应的两个量测所得量测矢量 w_i 和 w_j 之间的夹角 θ_{ij} ,与导航星表中对应恒星的方向矢量 v_i 和 v_j 之间的夹角 θ_{ij} 相等,星敏传感器在轨几何定标模型的公式如下,

$$R_{i,j} = v_i^T v_j - g_{ij}(\hat{X}) = - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \end{bmatrix} \Delta X = A \Delta X$$

其中, $R_{i,j}$ 是余弦的偏差值, $g_{ij}(\cdot)$ 是 $\cos\theta_{ij}$ 的函数表示;

$\hat{X} = (\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{f}, \hat{k}_1, \hat{p}_1, \hat{p}_2)$ 是真值 $X = (x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2)$ 的估计值,估计值 \hat{X} 的改正数用 $\Delta X = (\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta f, \Delta k_1, \Delta p_1, \Delta p_2)$ 表示, (x_0, y_0) 是星敏传感器的主光轴与像平面的交点的地面定标值, f 是星敏传感器的焦距地面定标值, k_1 为光学镜头的径向畸变系数, p_1 和 p_2 为光学镜头的切向畸变系数;

$$\text{矩阵 } A = - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \end{bmatrix};$$

步骤3,利用选权迭代与最小二乘方法解算定标参数,获取定标结果;

步骤3的实现方式如下,

设一共观测了 H 张星图,第 h 张星图中有 n_h 个星点,其中 $h=1,2,\dots,H$,则根据星敏传感器在轨几何定标模型有

$$R^h = A^h \Delta X$$

其中,

$$\text{矩阵 } R^h = \begin{bmatrix} R_{1,2} \\ R_{1,3} \\ \vdots \\ R_{i,j} \\ \vdots \\ R_{n_h-1,n_h} \end{bmatrix}^h, \text{矩阵 } A^h = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{p}_2} \\ \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{p}_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{p}_2} \end{bmatrix}^h,$$

$$i=1,\dots,n_h-1, j=i+1,\dots,n_h;$$

利用观测的 H 张星图,构建超定方程组如下

$$R_k = A_k \Delta X_k$$

其中 k 为迭代次数, ΔX_k 是第 k 次迭代的估计值 \hat{X} 的改正数,

$$\text{且矩阵 } R_k = \begin{bmatrix} R^1 \\ R^2 \\ \vdots \\ R^h \\ \vdots \\ R^H \end{bmatrix}_k, \text{ 矩阵 } A_k = \begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \\ \vdots \\ A^h \\ \vdots \\ A^H \end{bmatrix}_k,$$

执行以下步骤，

步骤3.1, 输入参数 $x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2$ 的初始值, 令 $k=0$;

步骤3.2, 进行最小二乘估计如下,

$$\Delta X_k = (A_k^T P_k A_k)^{-1} A_k^T P_k R_k.$$

其中, 矩阵 $P_k = \text{diag}(p_1, p_2 \cdots p_t \cdots p_{\text{Row}(A)})_k$ 且 $t=1, 2 \cdots, \text{Row}(A)$, $\text{Row}(A)$ 表示中矩阵 A_k 行数, 是夹角观测值的数量, p_t 为第 k 次迭代时对应夹角观测值的权, P_k 的初始值为单位阵;

步骤3.3, 判断是否 $\|\Delta X_k\| > \varepsilon$, ε 为预设的正数值;

否则输出 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$, 结束流程; 其中, \hat{X}_k 是第 k 次迭代的估计值 \hat{X} , \hat{X}_{k+1} 是第 $k+1$ 次迭代的估计值 \hat{X} ;

是则进入步骤3.4;

步骤3.4, 判断是否 $k > 0$,

是则更新参数 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$, 然后进入步骤3.5;

否则直接进入步骤3.5;

步骤3.5, 采用选权迭代的方式更新各权值 p_t , 令 $k=k+1$, 然后返回步骤3.2,

步骤3.5中, 采用选权迭代的方式更新各权值 p_t 实现如下,

设 $g_{ij}(\hat{X})$ 满足标准正态分布, l_t 是各个夹角观测值的多余观测分量, u_t 是各个夹角观测值的残差, $t=1, 2 \cdots, \text{Row}(A)$,

$$p_t = \begin{cases} 1, & T_t < F \\ \frac{\hat{\sigma}_0^2 l_t}{u_t^2}, & T_t \geq F \end{cases}$$

其中, T_t 为统计信息, F 是预设的阈值, $\hat{\sigma}_0^2$ 为 $g_{ij}(\hat{X})$ 的单位权方差的估计值。

2. 如权利要求1所述基于选权迭代的星敏感器在轨几何定标方法, 其特征在于: 所述恒星控制点的方向矢量如下,

$$v_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix}$$

其中, α_i 和 δ_i 分别为恒星控制点的赤经和赤纬。

3. 如权利要求1或2所述基于选权迭代的星敏感器在轨几何定标方法, 其特征在于: 设恒星控制点通过星敏感器成像以后在像平面上的坐标为 (x_i, y_i) , 星敏感器的主光轴与像平

面的交点的地面定标值为 (x_0, y_0) ，则星像点对应的量测矢量如下，

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - \Delta x - x_0)^2 + (y_i - \Delta y - y_0)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_i - \Delta x - x_0) \\ -(y_i - \Delta y - y_0) \\ f \end{bmatrix}$$

其中， Δx 与 Δy 为像平面上的坐标 (x_i, y_i) 处的畸变误差。

4. 一种基于选权迭代的星敏感器在轨几何定标系统，其特征在于，包括以下模块：

恒星控制点提取模块，用于利用星敏感器拍摄多张恒星背景，获取恒星控制点的方向矢量 v_i 和量测矢量 w_i ；

模型构建模块，用于构建星敏感器在轨几何定标模型如下，

设星敏感器同一星图内两个星点对应的两个量测所得量测矢量 w_i 和 w_j 之间的夹角 θ_{ij} ，与导航星表中对应恒星的方向矢量 v_i 和 v_j 之间的夹角 θ_{ij} 相等，星敏感器在轨几何定标模型的公式如下，

$$R_{i,j} = v_i^T v_j - g_{ij}(\hat{X}) = - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \end{bmatrix} \Delta X = A \Delta X$$

其中， $R_{i,j}$ 是余弦的偏差值， $g_{ij}(\cdot)$ 是 $\cos\theta_{ij}$ 的函数表示；

$\hat{X} = (\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{f}, \hat{k}_1, \hat{p}_1, \hat{p}_2)$ 是真值 $X = (x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2)$ 的估计值，估计值 \hat{X} 的改正数用

$\Delta X = (\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta f, \Delta k_1, \Delta p_1, \Delta p_2)$ 表示， (x_0, y_0) 是星敏感器的主光轴与像平面的交点的地面定标值， f 是星敏感器的焦距地面定标值， k_1 为光学镜头的径向畸变系数， p_1 和 p_2 为光学镜头的切向畸变系数；

$$\text{矩阵 } A = - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \end{bmatrix};$$

定标模块，用于利用选权迭代与最小二乘方法解算定标参数，获取定标结果；

定标模块的实现方式如下，

设一共观测了 H 张星图，第 h 张星图中有 n_h 个星点，其中 $h=1, 2, \dots, H$ ，则根据星敏感器在轨几何定标模型有

$$R^h = A^h \Delta X$$

其中，

$$\text{矩阵 } R^h = \begin{bmatrix} R_{1,2} \\ R_{1,3} \\ \vdots \\ R_{i,j} \\ \vdots \\ R_{n_h-1,n_h} \end{bmatrix}^h, \text{矩阵 } A^h = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{12}}{\partial x_0} & \frac{\partial g_{12}}{\partial y_0} & \frac{\partial g_{12}}{\partial f} & \frac{\partial g_{12}}{\partial k_1} & \frac{\partial g_{12}}{\partial p_1} & \frac{\partial g_{12}}{\partial p_2} \\ \frac{\partial g_{13}}{\partial x_0} & \frac{\partial g_{13}}{\partial y_0} & \frac{\partial g_{13}}{\partial f} & \frac{\partial g_{13}}{\partial k_1} & \frac{\partial g_{13}}{\partial p_1} & \frac{\partial g_{13}}{\partial p_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_{ij}}{\partial x_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial y_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial f} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial k_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial p_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial p_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial x_0} & \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial y_0} & \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial f} & \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial k_1} & \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial p_1} & \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial p_2} \end{bmatrix}^h,$$

$i = 1, \dots, n_h - 1, j = i + 1, \dots, n_h;$

利用观测的H张星图,构建超定方程组如下

$$R_k = A_k \Delta X_k$$

其中k为迭代次数, ΔX_k 是第k次迭代的估计值 \hat{X} 的改正数,

$$\text{且矩阵 } R_k = \begin{bmatrix} R^1 \\ R^2 \\ \vdots \\ R^h \\ \vdots \\ R^H \end{bmatrix}_k, \text{矩阵 } A_k = \begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \\ \vdots \\ A^h \\ \vdots \\ A^H \end{bmatrix}_k,$$

执行以下步骤,

步骤3.1,输入参数 $x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2$ 的初始值,令 $k = 0;$

步骤3.2,进行最小二乘估计如下,

$$\Delta X_k = (A_k^T P_k A_k)^{-1} A_k^T P_k R_k.$$

其中,矩阵 $P_k = \text{diag}(p_1, p_2 \dots p_t \dots p_{\text{Row}(A)})_k$ 且 $t = 1, 2 \dots, \text{Row}(A)$, $\text{Row}(A)$ 表示中矩阵 A_k 行数,是夹角观测值的数量, p_t 为第k次迭代时对应夹角观测值的权, P_k 的初始值为单位阵;

步骤3.3,判断是否 $\|\Delta X_k\| > \varepsilon$, ε 为预设的正数值;

否则输出 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$, 结束流程; 其中, \hat{X}_k 是第k次迭代的估计值 \hat{X} , \hat{X}_{k+1} 是第k+1次迭代的估计值 \hat{X} ;

是则进入步骤3.4;

步骤3.4,判断是否 $k > 0$,

是则更新参数 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$, 然后进入步骤3.5;

否则直接进入步骤3.5;

步骤3.5,采用选权迭代的方式更新各权值 p_t , 令 $k = k + 1$, 然后返回步骤3.2;

步骤3.5中,采用选权迭代的方式更新各权值 p_t 实现如下,

设 $g_{ij}(\hat{X})$ 满足标准正态分布, l_t 是各个夹角观测值的多余观测分量, u_t 是各个夹角观测值的残差, $t = 1, 2 \dots, \text{Row}(A)$,

$$P_i = \begin{cases} 1, & T_i < F \\ \frac{\hat{\sigma}_0^2 l_i}{u_i^2}, & T_i \geq F \end{cases}$$

其中, T_i 为统计信息, F 是预设的阈值, $\hat{\sigma}_0^2$ 为 $g_{ij}(\hat{X})$ 的单位权方差的估计值。

5. 如权利要求4所述基于选权迭代的星敏感器在轨几何定标系统, 其特征在于: 所述恒星控制点的方向矢量如下,

$$v_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix}$$

其中, α_i 和 δ_i 分别为恒星控制点的赤经和赤纬。

6. 如权利要求4或5所述基于选权迭代的星敏感器在轨几何定标系统, 其特征在于: 设恒星控制点通过星敏感器成像以后在像平面上的坐标为 (x_i, y_i) , 星敏感器的主光轴与像平面的交点的地面定标值为 (x_0, y_0) , 则星像点对应的量测矢量如下,

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - \Delta x - x_0)^2 + (y_i - \Delta y - y_0)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_i - \Delta x - x_0) \\ -(y_i - \Delta y - y_0) \\ f \end{bmatrix}$$

其中, Δx 与 Δy 为像平面上的坐标 (x_i, y_i) 处的畸变误差。

一种基于选权迭代的星敏感器在轨几何定标方法及系统

技术领域

[0001] 本发明属于卫星测量精密仪器高精度定标领域,涉及一种基于选权迭代的星敏感器在轨几何定标技术方案。

背景技术

[0002] 星敏感器在卫星的姿态测量和控制系统中起着重要的作用,它以恒星为参考,输出卫星在天球惯性坐标系下的姿态,是目前卫星测量精度最高的一种的定姿设备。星敏感器的定标可以通过地面定标和在轨定标两种方式完成,通过地面上进行的严格定标,可以确定在轨运行的初始参数。但是受卫星发射过程中应力的释放、成像环境的变化以及器件的老化等多种因素的影响,会使得光学系统的参数发生漂移,测量精度下降,因此需要对其进行在轨定标。

[0003] 目前存在的星敏感器在轨定标方法,都是基于星图中的恒星能够正确识别的基础上进行的,然而现有的绝大多数星图识别方法都依赖于星敏感器的相机参数,当相机参数存在较大的偏差时,就会严重影响星图识别的准确性,错误识别的恒星作为星敏感器在轨定标的控制点信息时,会显著影响在轨几何定标中相机参数的解算精度。因此,如何有效地抑制由于相机参数偏差造成的错误识别的恒星对定标精度的影响,是星敏感器在轨几何定标中亟待解决的问题。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的问题是,针对星敏感器,提供一种有效稳健的在轨几何定标技术方案,可以有效抑制错误识别的恒星对定标精度的影响。

[0005] 本发明的技术方案提供一种基于选权迭代的星敏感器在轨几何定标方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤1,利用星敏感器拍摄多张恒星背景,获取恒星控制点的方向矢量 v_i 和量测矢量 w_i ;

[0007] 步骤2,构建星敏感器在轨几何定标模型如下,

[0008] 设星敏感器同一星图内两个星点对应的两个量测所得量测矢量 w_i 和 w_j 之间的夹角 θ_{ij} ,与导航星表中对应恒星的方向矢量 v_i 和 v_j 之间的夹角 θ_{ij} 相等,星敏感器在轨几何定标模型的公式如下,

$$[0009] \quad R_{i,j} = v_i^T v_j - g_{ij}(\hat{X}) = - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \end{bmatrix} \Delta X = A \Delta X$$

[0010] 其中, $R_{i,j}$ 是余弦的偏差值, $g_{ij}(\cdot)$ 是 $\cos\theta_{ij}$ 的函数表示;

[0011] $\hat{X} = (\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{f}, \hat{k}_1, \hat{p}_1, \hat{p}_2)$ 是真值 $X = (x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2)$ 的估计值,估计值 \hat{X} 的改正

数用 $\Delta X = (\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta f, \Delta k_1, \Delta p_1, \Delta p_2)$ 表示, (x_0, y_0) 是星敏感器的主光轴与像平面的

交点的地面定标值, f 是星敏感器的焦距地面定标值, k_1 为光学镜头的径向畸变系数, p_1 和 p_2 为光学镜头的切向畸变系数;

$$[0012] \quad \text{矩阵 } A = - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \end{bmatrix};$$

[0013] 步骤3, 利用选权迭代与最小二乘方法解算定标参数, 获取定标结果。

[0014] 而且, 所述恒星控制点的方向矢量如下,

$$[0015] \quad v_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix}$$

[0016] 其中, α_i 和 δ_i 分别为恒星控制点的赤经和赤纬。

[0017] 而且, 设恒星控制点通过星敏感器成像以后在像平面上的坐标为 (x_i, y_i) , 星敏感器的主光轴与像平面的交点的地面定标值为 (x_0, y_0) , 则星像点对应的量测矢量如下,

$$[0018] \quad w_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - \Delta x - x_0)^2 + (y_i - \Delta y - y_0)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_i - \Delta x - x_0) \\ -(y_i - \Delta y - y_0) \\ f \end{bmatrix}$$

[0019] 其中, Δx 与 Δy 为像平面上的坐标 (x_i, y_i) 处的畸变误差。

[0020] 而且, 步骤3的实现方式如下,

[0021] 设一共观测了 H 张星图, 第 h 张星图中有 n_h 个星点, 其中 $h = 1, 2, \dots, H$, 则根据星敏感器在轨几何定标模型有

$$[0022] \quad R^h = A^h \Delta X$$

[0023] 其中,

$$[0024] \quad \text{矩阵 } R^h = \begin{bmatrix} R_{1,2} \\ R_{1,3} \\ \vdots \\ R_{i,j} \\ \vdots \\ R_{n_h-1,n_h} \end{bmatrix}^h, \text{ 矩阵 } A^h = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{p}_2} \\ \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{p}_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{p}_2} \end{bmatrix}^h,$$

[0025] $i = 1, \dots, n_h - 1, j = i + 1, \dots, n_h$;

[0026] 利用观测的 H 张星图, 构建超定方程组如下

$$[0027] \quad R_k = A_k \Delta X_k$$

[0028] 其中 k 为迭代次数, ΔX_k 是第 k 次迭代的估计值 \hat{X} 的改正数,

[0029] 且矩阵 $R_k = \begin{bmatrix} R^1 \\ R^2 \\ \vdots \\ R^h \\ \vdots \\ R^H \end{bmatrix}_k$, 矩阵 $A_k = \begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \\ \vdots \\ A^h \\ \vdots \\ A^H \end{bmatrix}_k$,

[0030] 执行以下步骤,

[0031] 步骤3.1, 输入参数 $x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2$ 的初始值, 令 $k=0$;

[0032] 步骤3.2, 进行最小二乘估计如下,

[0033] $\Delta X_k = (A_k^T P_k A_k)^{-1} A_k^T P_k R_k$.

[0034] 其中, 矩阵 $P_k = \text{diag}(p_1, p_2 \cdots p_t \cdots p_{\text{Row}(A)})_k$ 且 $t=1, 2, \cdots, \text{Row}(A)$, $\text{Row}(A)$ 表示中矩阵 A_k 行数, 是夹角观测值的数量, p_t 为第 k 次迭代时对应夹角观测值的权, P_k 的初始值为单位阵;

[0035] 步骤3.3, 判断是否 $\|\Delta X_k\| > \varepsilon$, ε 为预设的正数值;

[0036] 否则输出 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$, 结束流程; 其中, \hat{X}_k 是第 k 次迭代的估计值 \hat{X} , \hat{X}_{k+1} 是第 $k+1$ 次迭代的估计值 \hat{X} ;

[0037] 是则进入步骤3.4;

[0038] 步骤3.4, 判断是否 $k > 0$,

[0039] 是则更新参数 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$, 然后进入步骤3.5;

[0040] 否则直接进入步骤3.5;

[0041] 步骤3.5, 采用选权迭代的方式更新各权值 p_t , 令 $k=k+1$, 然后返回步骤3.2。

[0042] 而且, 步骤3.5中, 采用选权迭代的方式更新各权值 p_t 实现如下,

[0043] 设 $g_{ij}(\hat{X})$ 满足标准正态分布, l_t 是各个夹角观测值的多余观测分量, u_t 是各个夹角观测值的残差, $t=1, 2, \cdots, \text{Row}(A)$,

[0044]
$$p_t = \begin{cases} 1, & T_t < F \\ \frac{\hat{\sigma}_0^2}{u_t^2}, & T_t \geq F \end{cases}$$

[0045] 其中, T_t 为统计信息, F 是预设的阈值, $\hat{\sigma}_0^2$ 为 $g_{ij}(\hat{X})$ 的单位权方差的估计值。

[0046] 本发明还相应提供一种基于选权迭代的星敏感器在轨几何定标系统, 包括以下模块:

[0047] 恒星控制点提取模块, 用于利用星敏感器拍摄多张恒星背景, 获取恒星控制点的方向矢量 v_i 和量测矢量 w_i ;

[0048] 模型构建模块, 用于构建星敏感器在轨几何定标模型如下,

[0049] 设星敏感器同一星图内两个星点对应的两个量测所得量测矢量 w_i 和 w_j 之间的夹角

θ_{ij} ,与导航星表中对应恒星的方向矢量 v_i 和 v_j 之间的夹角 θ_{ij} 相等,星敏传感器在轨几何定标模型的公式如下,

$$[0050] \quad R_{i,j} = v_i^T v_j - g_{ij}(\hat{X}) = - \left[\begin{array}{cccccc} \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \end{array} \right] \Delta X = A \Delta X$$

[0051] 其中, $R_{i,j}$ 是余弦的偏差值, $g_{ij}(\cdot)$ 是 $\cos\theta_{ij}$ 的函数表示;

[0052] $\hat{X} = (\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{f}, \hat{k}_1, \hat{p}_1, \hat{p}_2)$ 是真值 $X = (x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2)$ 的估计值,估计值 \hat{X} 的改正

数用 $\Delta X = (\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta f, \Delta k_1, \Delta p_1, \Delta p_2)$ 表示, (x_0, y_0) 是星敏传感器的主光轴与像平面的交点的地面定标值, f 是星敏传感器的焦距地面定标值, k_1 为光学镜头的径向畸变系数, p_1 和 p_2 为光学镜头的切向畸变系数;

$$[0053] \quad \text{矩阵 } A = - \left[\begin{array}{cccccc} \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \end{array} \right];$$

[0054] 定标模块,用于利用选权迭代与最小二乘方法解算定标参数,获取定标结果。

[0055] 而且,所述恒星控制点的方向矢量如下,

$$[0056] \quad v_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix}$$

[0057] 其中, α_i 和 δ_i 分别为恒星控制点的赤经和赤纬。

[0058] 而且,设恒星控制点通过星敏传感器成像以后在像平面上的坐标为 (x_i, y_i) ,星敏传感器的主光轴与像平面的交点的地面定标值为 (x_0, y_0) ,则星像点对应的量测矢量如下,

$$[0059] \quad w_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - \Delta x - x_0)^2 + (y_i - \Delta y - y_0)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_i - \Delta x - x_0) \\ -(y_i - \Delta y - y_0) \\ f \end{bmatrix}$$

[0060] 其中, Δx 与 Δy 为像平面上的坐标 (x_i, y_i) 处的畸变误差。

[0061] 而且,定标模块的实现方式如下,

[0062] 设一共观测了 H 张星图,第 h 张星图中有 n_h 个星点,其中 $h = 1, 2, \dots, H$,则根据星敏传感器在轨几何定标模型有

$$[0063] \quad R^h = A^h \Delta X$$

[0064] 其中,

$$[0065] \quad \text{矩阵 } R^h = \begin{bmatrix} R_{1,2} \\ R_{1,3} \\ \vdots \\ R_{i,j} \\ \vdots \\ R_{n_h-1,n_h} \end{bmatrix}^h, \text{ 矩阵 } A^h = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{12}}{\partial \hat{p}_2} \\ \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{13}}{\partial \hat{p}_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{n_h-1,n_h}}{\partial \hat{p}_2} \end{bmatrix}^h,$$

[0066] $i = 1, \dots, n_h - 1, j = i + 1, \dots, n_h;$

[0067] 利用观测的H张星图,构建超定方程组如下

[0068] $R_k = A_k \Delta X_k$

[0069] 其中k为迭代次数, ΔX_k 是第k次迭代的估计值 \hat{X} 的改正数,

$$[0070] \quad \text{且矩阵 } R_k = \begin{bmatrix} R^1 \\ R^2 \\ \vdots \\ R^h \\ \vdots \\ R^H \end{bmatrix}_k, \text{ 矩阵 } A_k = \begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \\ \vdots \\ A^h \\ \vdots \\ A^H \end{bmatrix}_k,$$

[0071] 执行以下步骤,

[0072] 步骤3.1,输入参数 $x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2$ 的初始值,令 $k=0$;

[0073] 步骤3.2,进行最小二乘估计如下,

[0074] $\Delta X_k = (A_k^T P_k A_k)^{-1} A_k^T P_k R_k.$

[0075] 其中,矩阵 $P_k = \text{diag}(p_1, p_2 \cdots p_t \cdots p_{\text{Row}(A)})_k$ 且 $t = 1, 2 \cdots, \text{Row}(A)$, $\text{Row}(A)$ 表示中矩阵 A_k 行数,是夹角观测值的数量, p_t 为第k次迭代时对应夹角观测值的权, P_k 的初始值为单位阵;

[0076] 步骤3.3,判断是否 $\|\Delta X_k\| > \varepsilon$, ε 为预设的正数值;

[0077] 否则输出 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$, 结束流程;其中, \hat{X}_k 是第k次迭代的估计值 \hat{X} , \hat{X}_{k+1} 是第k+1次迭代的估计值 \hat{X} ;

[0078] 是则进入步骤3.4;

[0079] 步骤3.4,判断是否 $k > 0$,

[0080] 是则更新参数 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$, 然后进入步骤3.5;

[0081] 否则直接进入步骤3.5;

[0082] 步骤3.5,采用选权迭代的方式更新各权值 p_t ,令 $k = k + 1$,然后返回步骤3.2。

[0083] 而且,步骤3.5中,采用选权迭代的方式更新各权值 p_t 实现如下,

[0084] 设 $g_{ij}(\hat{X})$ 满足标准正态分布, l_t 是各个夹角观测值的多余观测分量, u_t 是各个夹角观测值的残差, $t=1, 2, \dots, \text{Row}(A)$,

$$[0085] \quad p_t = \begin{cases} 1, & T_t < F \\ \frac{\hat{\sigma}_0^2 l_t^2}{u_t^2}, & T_t \geq F \end{cases}$$

[0086] 其中, T_t 为统计信息, F 是预设的阈值, $\hat{\sigma}_0^2$ 为 $g_{ij}(\hat{X})$ 的单位权方差的估计值。

[0087] 本发明基于恒星控制点的物方和像方信息, 构建星敏传感器在轨几何定标模型, 基于选权迭代定标参数解算, 可以有效的抑制由于星敏传感器相机参数存在偏差造成的星图误识别引入的错误恒星控制点信息, 有效的提高星敏传感器在轨几何定标的可靠性与稳定性。

附图说明

[0088] 图1为本发明实施例的星敏传感器成像模型示意图。

[0089] 图2为本发明实施例的基于选权迭代的定标参数解算方法流程图。

具体实施方式

[0090] 以下结合附图和实施例详细说明本发明具体实施方式。

[0091] 具体实施时, 本发明技术方案可由本领域技术人员采用计算机软件技术实现自动运行流程。本发明实施例提供一种基于选权迭代的星敏传感器在轨几何定标方法, 包括以下步骤:

[0092] 步骤1, 以恒星为控制点, 即为恒星控制点; 利用星敏传感器拍摄多张星图获取恒星控制点的物方矢量与像方矢量, 即方向矢量 v_i 和量测矢量 w_i 。

[0093] 一般可以拍摄10张以上星图, 获取百颗以上恒星作为控制点。具体实施时, 步骤1可采用现有的星图识别方法与星点质心提取方法, 获取恒星控制点的物方矢量 v_i 与像方矢量 w_i 。本步骤可以预先实现。

[0094] 实施例中, 步骤1中通过星图识别的方法获取的恒星控制点的方向矢量如下,

$$[0095] \quad v_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0096] 其中, v_i 表示每个恒星 i 在导航星表中唯一的单位方向矢量, 可以用该恒星的赤经 α_i 和赤纬 δ_i 表示。

[0097] 恒星通过星敏传感器成像以后在像平面上的坐标为 (x_i, y_i) , 设星敏传感器的焦距地面定标值为 f , 星敏传感器的主光轴与像平面的交点的地面定标值为 (x_0, y_0) , 则恒星控制点通过星敏传感器成像所得星像点对应的量测矢量 w_i 如下,

$$[0098] \quad w_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - \Delta x - x_0)^2 + (y_i - \Delta y - y_0)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_i - \Delta x - x_0) \\ -(y_i - \Delta y - y_0) \\ f \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0099] 其中, Δx 与 Δy 为像平面上的坐标 (x_i, y_i) 处像点的畸变误差,可由下式表示

$$[0100] \quad \begin{cases} \Delta x = k_1 x_i r^2 + p_1 (3x_i^2 + y_i^2) + 2p_2 x_i y_i \\ \Delta y = k_1 y_i r^2 + p_2 (3y_i^2 + x_i^2) + 2p_1 x_i y_i \end{cases} \quad (3)$$

[0101] 其中, r 代表像点距离主点的径向,即 $r = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$, k_1 为光学镜头的径向畸变系数, p_1 和 p_2 为光学镜头的切向畸变系数。

[0102] 步骤2,构建星敏感器在轨几何定标模型,如公式(6)所示。

[0103] 实施例中,步骤2构建星敏感器在轨几何定标模型,在理想状况下,星敏感器同一星图内两个星点对应的两个量测矢量 w_i 和 w_j 之间的夹角 θ_{ij} ,与导航星表中对应恒星的方向矢量 v_i 和 v_j 之间的夹角 θ_{ij} 相等,如图1所示, $O-XYZ$ 表示惯性坐标系, $o-xyz$ 表示相机坐标系。同时取矢量夹角的方向余弦,则量测矢量与方向矢量满足:

$$[0104] \quad \cos \theta_{ij} = w_i^T w_j = (M v_i)^T M v_j = v_i^T (M^T M) v_j = v_i^T v_j \approx \hat{w}_i^T \hat{w}_j = g_{ij}(\hat{X}) \quad (4)$$

[0105] \hat{w}_i 和 \hat{w}_j 是恒星 i 和恒星 j 的实际量测矢量, M 是惯性坐标系到相机坐标系的旋转矩阵, $g_{ij}(\cdot)$ 是 $\cos \theta_{ij}$ 的函数表示。 $\hat{X} = (x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2)$ 是真值 $X = (x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2)$ 的估计值,估计值 \hat{X} 的改正数用 $\Delta X = (\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta f, \Delta k_1, \Delta p_1, \Delta p_2)$ 表示。

[0106] 由于误差很小,故在估计值处线性化方程得:

$$[0107] \quad v_i^T v_j = g_{ij}(\hat{X}) - \left[\frac{\partial g_{ij}}{\partial x_0} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial y_0} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial f} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial k_1} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial p_1} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial p_2} \right] \Delta X \quad (5)$$

[0108] 构建星敏感器在轨几何定标模型,如下式

[0109]

$$R_{i,j} = v_i^T v_j - g_{ij}(\hat{X}) = - \left[\frac{\partial g_{ij}}{\partial x_0} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial y_0} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial f} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial k_1} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial p_1} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial p_2} \right] \Delta X = A \Delta X \quad (6)$$

[0110] 其中, $R_{i,j}$ 是余弦 $\cos \theta_{ij}$ 的偏差值, g_{ij} 表示 $g_{ij}(\hat{X})$ 的简写;

$$[0111] \quad \text{矩阵 } A = - \left[\frac{\partial g_{ij}}{\partial x_0} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial y_0} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial f} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial k_1} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial p_1} \quad \frac{\partial g_{ij}}{\partial p_2} \right]。$$

[0112] 步骤3,利用选权迭代与最小二乘方法解算定标参数,获取定标结果。

[0113] 实施例中,步骤3利用选权迭代与最小二乘方法解算定标参数,如图2所示:

[0114] 步骤3.1,输入参数 $x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2$ 的初始值,具体实施时可采用地面标定值;令 $k=0$;

[0115] 步骤3.2,进行最小二乘估计,具体实现如以下公式(9);

[0116] 步骤3.3,判断是否 $\|\Delta X_k\| > \varepsilon$, ε 为极小的正数值,具体实施时本领域技术人员可以自行预设取值;

[0117] 否则输出 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$,结束流程;

[0118] 是则进入步骤3.4;

[0119] 步骤3.4,判断是否 $k > 0$,

[0120] 是则更新参数 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$,然后进入步骤3.5;

[0121] 否则直接进入步骤3.5;

[0122] 步骤3.5,更新权值,令 $k=k+1$,然后返回步骤3.2。具体更新采用以下公式(19)实现,更新各个权值 p_t 。

[0123] 具体计算原理解释如下:

[0124] 设一共观测了H张星图,设第h张星图中有 n_h 个星点,其中 $h=1, 2, \dots, H$,则公式(6)可以写作

$$[0125] \quad R^h = A^h \Delta X \quad (7)$$

$$[0126] \quad \text{其中,矩阵 } R^h = \begin{bmatrix} R_{1,2} \\ R_{1,3} \\ \vdots \\ R_{i,j} \\ \vdots \\ R_{n_h-1,n_h} \end{bmatrix}^h, \text{ 矩阵 } A^h = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{12}}{\partial x_0} & \frac{\partial g_{12}}{\partial y_0} & \frac{\partial g_{12}}{\partial f} & \frac{\partial g_{12}}{\partial k_1} & \frac{\partial g_{12}}{\partial p_1} & \frac{\partial g_{12}}{\partial p_2} \\ \frac{\partial g_{13}}{\partial x_0} & \frac{\partial g_{13}}{\partial y_0} & \frac{\partial g_{13}}{\partial f} & \frac{\partial g_{13}}{\partial k_1} & \frac{\partial g_{13}}{\partial p_1} & \frac{\partial g_{13}}{\partial p_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_{ij}}{\partial x_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial y_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial f} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial k_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial p_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial p_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial x_0} & \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial y_0} & \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial f} & \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial k_1} & \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial p_1} & \frac{\partial g_{n_h-1n_h}}{\partial p_2} \end{bmatrix}^h,$$

[0127] $i=1, \dots, n_h-1, j=i+1, \dots, n_h$ 。

[0128] 利用观测的H张星图,构建超定方程组:

$$[0129] \quad R_k = A_k \Delta X_k \quad (8)$$

[0130] 其中 $k=0, 1, 2, \dots$ 为迭代次数, ΔX_k 是第k次迭代的估计值 \hat{X} 的改正数,且矩阵

$$R_k = \begin{bmatrix} R^1 \\ R^2 \\ \vdots \\ R^k \\ \vdots \\ R^H \end{bmatrix}_k, \text{ 矩阵 } A_k = \begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \\ \vdots \\ A^k \\ \vdots \\ A^H \end{bmatrix}_k, \text{ 采用最小二乘的方法解得}$$

$$[0131] \quad \Delta X_k = (A_k^T P_k A_k)^{-1} A_k^T P_k R_k. \quad (9)$$

[0132] 其中,矩阵 $P_k = \text{diag}(p_1, p_2, \dots, p_t, \dots, p_{\text{Row}(A)})_k$ 且 $t=1, 2, \dots, \text{Row}(A)$, $\text{Row}(A)$ 表示公式(8)

中矩阵 A_k 行数,即所有夹角观测值(即夹角 θ_{ij} 的观测值)的数量, p_t 为第 k 次迭代时对应夹角观测值的权, P_k 的初始值为 $P_0=E$, E 表示单位阵。

[0133] 随着迭代, P_k 通过选权迭代的方法进行更新,具体的实施方法如下:

[0134] 假设公式(6)中的 $g_{ij}(\hat{X})$ 满足标准正态分布,并且它的单位权方差为 σ_0^2 ,则单位权方差的估计值 $\hat{\sigma}_0^2$ 为

$$[0135] \quad \hat{\sigma}_0^2 = \frac{U^T P U}{L} \quad (10)$$

[0136] 其中, L 是总的多余观测数, $Col(A)$ 表示公式(8)中矩阵 A_k 的列数,则多余观测数 L 可表示为

$$[0137] \quad L = Row(A) - Col(A) \quad (11)$$

[0138] 设 l_t 是各个夹角观测值的多余观测分量且 $t=1, 2, \dots, Row(A)$

$$[0139] \quad L = l_1 + l_2 + \dots + l_t + \dots + l_{Row(A)} \quad (12)$$

[0140] 在公式(10)中,矩阵 $U = [u_1, u_2, \dots, u_t, \dots, u_{Row(A)}]^T$, u_t 是各个夹角观测值的残差且 $t=1, 2, \dots, Row(A)$, U 可由公式(12)求得,

$$[0141] \quad U = A \Delta X - R$$

$$[0142] \quad = A (A^T P A)^{-1} A^T P R - R \quad (13)$$

$$[0143] \quad = (A (A^T P A)^{-1} A^T - Q) P R$$

[0144] 其中 $Q = P^{-1}$,即 Q 为权矩阵 P 的逆矩阵。

[0145] 根据误差传播定律可以得到 U 的权系数矩阵是

$$[0146] \quad Q_{UU} = Q - A (A^T P A)^{-1} A^T \quad (14)$$

[0147] 每个夹角观测值的方差估计值 $\hat{\sigma}_t^2$ 和对应的多余观测分量 l_t 可以如下求解

$$[0148] \quad \hat{\sigma}_t^2 = \frac{u_t^2}{l_t} \quad (15)$$

$$[0149] \quad l_t = p_t q_{u_t} \quad (16)$$

[0150] 其中, q_{u_t} 是权系数矩阵 Q_{UU} 的对角线元素, p_t 是权矩阵 P 的对角线元素。

[0151] 为了评估方差的正常性,统计信息可以通过以下方式获得,

[0152] 假设:

$$[0153] \quad E(\hat{\sigma}_t^2) = \hat{\sigma}_0^2 \quad (17)$$

[0154] 其中 $E(\hat{\sigma}_t^2)$ 是各观测值方差的均值,即中误差。

[0155] 可得统计信息 T_t :

$$[0156] \quad T_t = \frac{\hat{\sigma}_t^2}{\hat{\sigma}_0^2} = \frac{u_t^2}{\hat{\sigma}_0^2 l_t} = \frac{u_t^2}{\hat{\sigma}_0^2 p_t q_{u_t}} \quad (t=1, 2, 3, \dots, Row(A)) \quad (18)$$

[0157] 如果观测值中不存在粗差,那么假设成立,并且统计信息 T_t 满足高斯正太分布,设 F 是阈值,具体实施时本领域技术人员可自行预设 F 的取值。当 $T_t > F$ 时,可认为方差 $\hat{\sigma}_t^2$ 与其他方差值存在显著的不同,则对应的观测值可能会是粗差值,因此观测值的权应该采用公式(19)进行减小,以减小其对优化结果的影响。

$$[0158] \quad p_t = \begin{cases} 1, & T_t < F \\ \frac{\hat{\sigma}_0^2 l_t}{u_t^2}, & T_t \geq F \end{cases} \quad (19)$$

[0159] 当 $k > 0$ 时,根据公式(8)求得的改正数 ΔX_k ,利用公式(20)对估计值 \hat{X} 进行更新

$$[0160] \quad \hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k \quad (20)$$

[0161] 其中, ΔX_k 是第 k 次迭代 \hat{X} 的改正数, \hat{X}_k 是第 k 次迭代的估计值 \hat{X} , \hat{X}_{k+1} 是第 $k+1$ 次迭代的估计值 \hat{X} 。

[0162] 具体实施时,还可以采用模块化方式提供相应系统。本发明实施例相应提供一种基于选权迭代的星敏感器在轨几何定标系统,包括以下模块:

[0163] 恒星控制点提取模块,用于利用星敏感器拍摄多张恒星背景,获取恒星控制点的方向矢量 v_i 和量测矢量 w_i ;

[0164] 模型构建模块,用于构建星敏感器在轨几何定标模型如下,

[0165] 设星敏感器同一星图内两个星点对应的两个量测所得量测矢量 w_i 和 w_j 之间的夹角 θ_{ij} ,与导航星表中对应恒星的方向矢量 v_i 和 v_j 之间的夹角 θ_{ij} 相等,星敏感器在轨几何定标模型的公式如下,

$$[0166] \quad R_{i,j} = v_i^T v_j - g_{ij}(\hat{X}) = - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \end{bmatrix} \Delta X = A \Delta X$$

[0167] 其中, $R_{i,j}$ 是余弦的偏差值, $g_{ij}(\cdot)$ 是 $\cos \theta_{ij}$ 的函数表示;

[0168] $\hat{X} = (\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{f}, \hat{k}_1, \hat{p}_1, \hat{p}_2)$ 是真值 $X = (x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2)$ 的估计值,估计值 \hat{X} 的改正数用 $\Delta X = (\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta f, \Delta k_1, \Delta p_1, \Delta p_2)$ 表示, (x_0, y_0) 是星敏感器的主光轴与像平面的交点的地面定标值, f 是星敏感器的焦距地面定标值, k_1 为光学镜头的径向畸变系数, p_1 和 p_2 为光学镜头的切向畸变系数;

$$[0169] \quad \text{矩阵 } A = - \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{x}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{y}_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{f}} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{k}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_1} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial \hat{p}_2} \end{bmatrix};$$

[0170] 定标模块,用于利用选权迭代与最小二乘法解算定标参数,获取定标结果。

[0171] 各模块具体实现可参见相应步骤,具体实施时本领域技术人员可以自行设定具体模块中更具体的模块划分,例如定标模块中设置以下子模块:

[0172] 初始化子模块,用于输入参数 $x_0, y_0, f, k_1, p_1, p_2$ 的初始值,令 $k=0$;

[0173] 最小二乘估计子模块,用于进行最小二乘估计如下,

$$[0174] \quad \Delta X_k = (A_k^T P_k A_k)^{-1} A_k^T P_k R_k.$$

[0175] 其中,矩阵 $P_k = \text{diag}(p_1, p_2 \cdots p_t \cdots p_{\text{Row}(A)_k})$ 且 $t = 1, 2 \cdots, \text{Row}(A)$, $\text{Row}(A)$ 表示中矩阵 A_k 行数,是夹角观测值的数量, p_t 为第 k 次迭代时对应夹角观测值的权, P_k 的初始值为单位阵;

[0176] 阈值判断子模块,用于判断是否 $\|\Delta X_k\| > \varepsilon$, ε 为预设的正数值;

[0177] 否则输出 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$, 结束流程;其中, \hat{X}_k 是第 k 次迭代的估计值 \hat{X} , \hat{X}_{k+1} 是第 $k+1$ 次迭代的估计值 \hat{X} ;

[0178] 是则命令参数更新子模块工作;

[0179] 参数更新子模块,用于判断是否 $k > 0$,

[0180] 是则更新参数 $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \Delta X_k$, 然后命令权值更新子模块工作;

[0181] 否则直接命令权值更新子模块工作;

[0182] 权值更新子模块,用于采用选权迭代的方式更新各权值 p_t , 令 $k = k+1$, 然后命令最小二乘估计子模块工作。

[0183] 本文中所描述的具体实施例仅仅是对本发明精神作举例说明。本发明所属技术领域的技术人员可以对所描述的具体实施例做各种各样的修改或补充或采用类似的方式替代,但并不会偏离本发明的精神或者超越所附权利要求书所定义的范围。

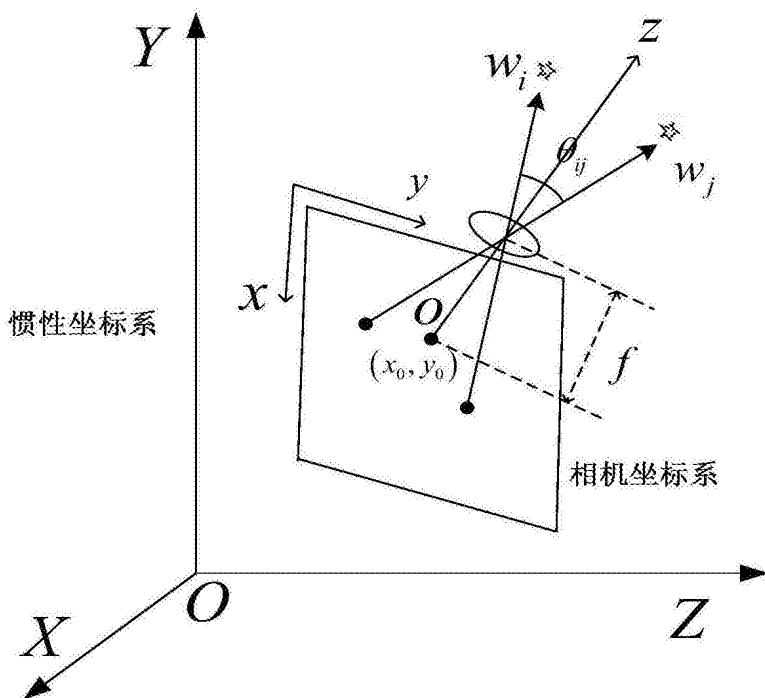


图1

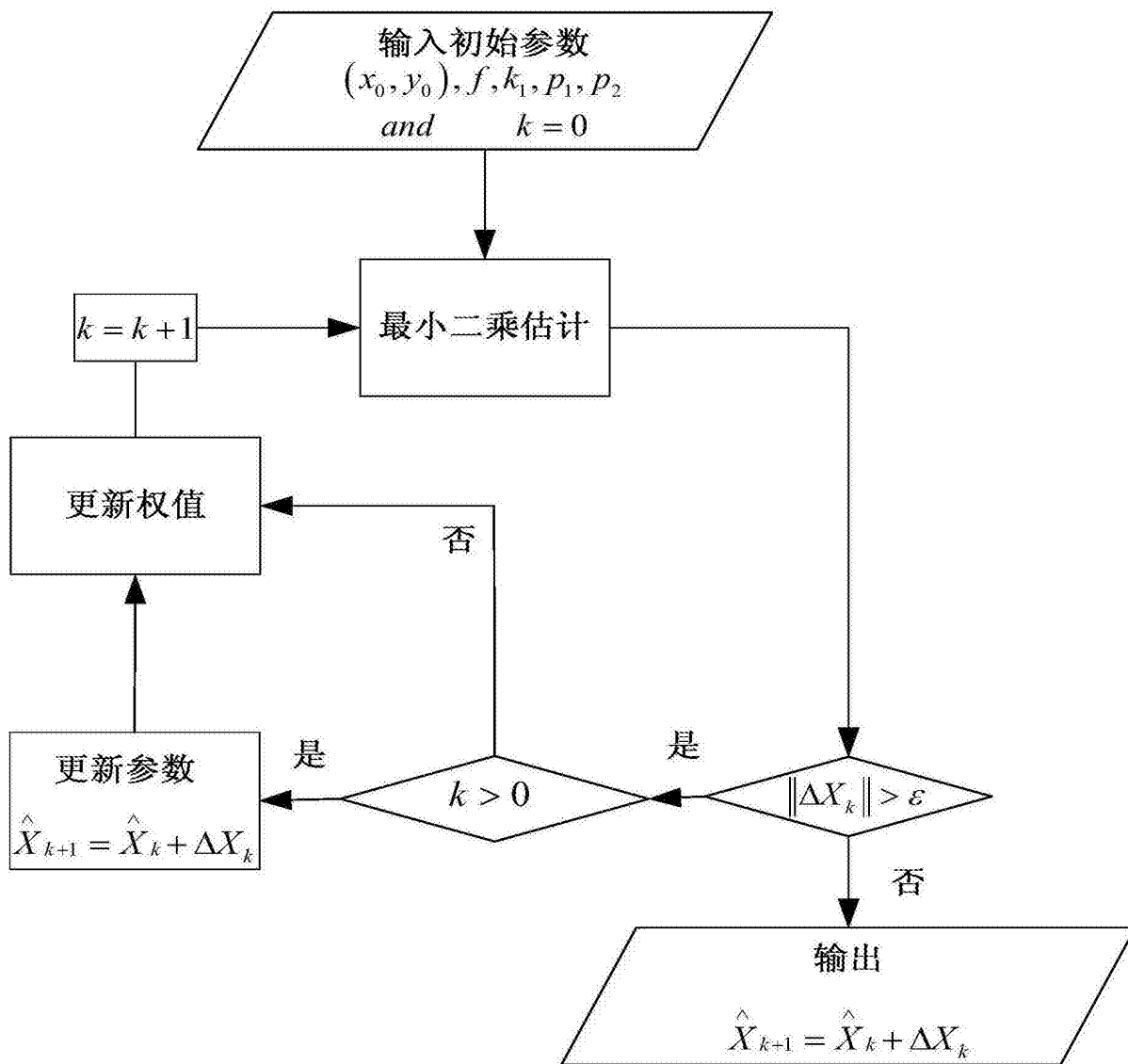


图2