

文章编号 1004-924X(2017)06-1679-09

## 多传感器的天文标定与空间配准

张廷华<sup>1,2\*</sup>, 高 昆<sup>1</sup>, 倪国强<sup>1</sup>, 卢 岩<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 装备学院 光电装备系, 北京 101416)

**摘要:** 为了实现共平台的多个空间观测成像系统的空间配准, 对多个相机进行天文标定和姿态测量, 提出一种基于星图模拟的星图识别和姿态解算算法。首先, 建立共平台的多传感器天文观测模型, 并产生模拟星图, 将星点之间的特征转换为图像特征; 其次, 根据四边形对角线的共线不变性特征, 对相机观测星图和模拟星图进行特征匹配, 提取相机内参数的初始值; 然后, 利用星点坐标矩阵奇异值不变性, 自动匹配剩余星点并求解姿态矩阵的初始值; 最后, 对相机内参数和姿态矩阵进行非线性优化求解。实验结果表明, 在未精确标定光学系统内外参数的情况下, 星点正确识别率大于 97.4%, 相机像元角分辨率为  $3.9'' \times 3.4''$ , 最后计算得出的投影误差低于 1 个像素, 满足多传感器空间观测系统空间配准的精度和鲁棒性要求。

**关键词:** 天文标定; 空间配准; 星图识别; 姿态测量; 星图模拟

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1679

## Astronomical calibration and spatial registration of multi-sensor

ZHANG Ting-Hua<sup>1,2\*</sup>, GAO Kun<sup>1</sup>, NI Guo-Qiang<sup>1</sup>, LU Yan<sup>1</sup>

(1. School of Optics and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. Department of Optical and Electronic Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

\* Corresponding author, E-mail: zth-gd@163.com

**Abstract:** In order to achieve the spatial registration of multi-sensor on the same platform for astronomical observation, a camera calibration and attitude measurement algorithm was proposed based on the star image simulation which includes four steps. Firstly, according to star observation model and star catalogue, the simulated star image was produced in order to transform constellation features into image features. Then, based on the invariant collinearity of quadrilateral diagonal, image features between the observed star map and the simulated star image were matched, consequently, the initial values of the camera parameters could be extracted. Through using the singular value decomposition method, all the remaining control points were matched automatically and the attitudes of cameras were calculated. Finally, a complicated nonlinear optimization on camera intrinsic parameters and attitude matrix was required for this algorithm. The experimental result indicates that the re-projection error between different cameras is better than 1 pixel, and the correct recognition rate is more than 97.4% when the calibrations of optical system parameters are imprecise. This method can meet the requirements of accuracy and robust in registration of multi-sensor astronomical observation system.

收稿日期: 2016-10-18; 修订日期: 2016-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61340018)

**Key words:** astronomical calibration; spatial registration; star pattern recognition; attitude measurement; star image simulation

## 1 引言

多传感器组成的阵列观测系统是空间观测的重要手段之一。利用共平台的多传感器组成相机阵列,通过视场拼接可以实现对广域星空的监视,如英国的 SuperWASP 项目<sup>[1]</sup>和匈牙利的 HAT-South 项目。也可以采用多个传感器对同一空域进行观测,通过图像叠加提高图像的信噪比和极限探测能力<sup>[2]</sup>,类似的项目有美国的泛星计划。

多传感器阵列观测系统进行空间观测的前提是确定系统中每个传感器的相对位置,并将其统一在一个全局坐标系下,才能实现多传感器之间的精确空间排布和图像配准融合<sup>[3]</sup>。现有的多传感器测量系统多采用全局标定方法,利用控制线或全局特征点,求取局部坐标系与全局坐标系的转换关系,但只能针对有限的工作距离进行标定,难以满足远距离空间观测的要求<sup>[4-5]</sup>。

恒星的定位精度较高,可以达到角秒量级,因此可以利用天文观测实现光学系统的标定和姿态解算<sup>[6]</sup>。文献<sup>[7]</sup>采用天文标定方法实现了高精度的相机姿态测量,以星点作为控制点求解相机内外参数和进行姿态解算,标定的重投影误差达到 $[0.26\ 0.31]$ 像素,航向角和俯仰角姿态解算重复性优于 $10''$ ,满足天文标定和高精度姿态测量需求。利用天文观测实现多个传感器的标定和空间配准,需要建立多个传感器的恒星观测和转换矩阵求解模型,利用星图识别算法提取出作为控制点的星点之间的特征,以此作为多个传感器空间配准的依据。

现有的星图识别算法主要分为子图同构类算法和模式识别类算法<sup>[8]</sup>。其中以三角形算法为代表的子图同构类星图识别算法,利用星与星之间的相互位置关系组成特征进行识别,算法简单直观,易于实现,因而得到广泛应用。但算法中三角形特征维数较低,容易造成冗余匹配和错误识别,改进的三角形星图识别算法主要利用增加观测星或几何关系等约束条件增加星图的识别成功率<sup>[9,10]</sup>。但现有星图识别算法大多针对单个传感器,如直接将其应用于多传感器的空间配准,导致

其存在以下缺陷:首先,这些算法中采用的特征不变量及其计算过程大多依赖成像系统的参数值,如常用的角距依赖于光学系统的焦距;其次,算法通常对所有星点采用相同的模式和特征识别处理,需要建立全天的模式识别库和遍历搜索;最后,多个传感器的空间配准是以共同观测的恒星作为同名点,如果以星图模式作为特征,需要多次求取图像坐标和天球坐标之间的映射关系,配准过程中易引入计算误差。

针对以上问题,本文提出了一种基于天文标定的多传感器空间配准方法,该方法利用测站、平台和观测时间等信息获取局部模拟星图,将星图特征转化为图像中星点的几何特征,加快空间配准速度;采用四边形对角线的简比不变性作为星图识别的基本特征,辅助四边形对角线长度等信息提高星图识别的正确率;利用模拟星图和观测星图之间的匹配识别提取相机内外参数的初始值,再通过非线性优化实现星点的自动匹配和多传感器之间的转换关系求解,提高算法的精度和鲁棒性;通过模拟星图和观测星图的匹配识别,估计出传感器的内外参数后,将其作为非线性优化的初始值,加快其它传感器的配准和姿态解算速度。实验结果表明该算法具有较高的配准精度和鲁棒性。

## 2 多传感器成像模型及空间配准方法

共平台的多个传感器指向相同的空域,拍摄局部星图,其对应的观测星图之间为仿射变换。在相机没有经过严格标定的情况下,可以利用其标称值产生局部模拟星图,通过观测星图和模拟星图之间恒星的匹配识别,得到当前传感器参数的最优估计,进而得到多个传感器之间的转换函数,实现空间配准。该方法的关键是依据成像模型生成模拟星图和星点之间的自动匹配。

### 2.1 成像模型及模拟星图生成

模拟星图的生成依据是成像模型,与星敏感器等单传感器的成像模型不同,多传感器成像包括恒星由天球坐标系到地平坐标系的旋转变换,地平坐标系到多个相机坐标系的旋转变换,图像

坐标系到相机坐标系的透视投影变换,最终求取的是多个传感器之间的仿射变换。

观测的恒星坐标可以采用第一赤道坐标系的时角坐标(LHA, δ)或(GHA, δ)和第二赤道坐标

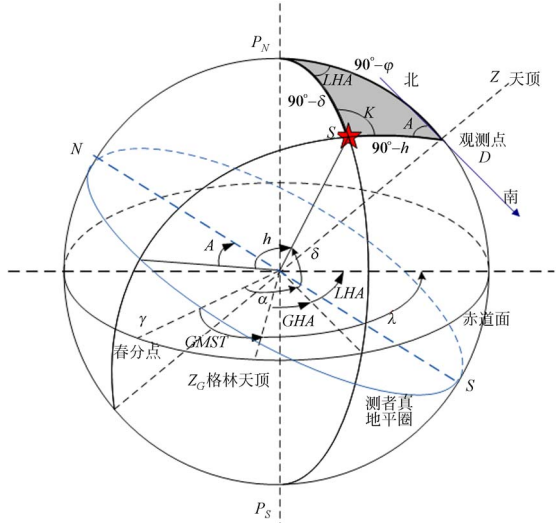


图 1 天球坐标和地平坐标系转换示意图

Fig. 1 Conversion between celestial coordinate and horizontal coordinate

系赤经赤纬坐标(α, δ)表示,观测点坐标用经度和纬度(λ, φ)表示,恒星在大地坐标系下的坐标用高度角和方位角(h, A)表示。各坐标系之间的关系如图 1 所示。利用球面三角形的正余弦公式可以得出不同坐标之间的转换关系,图中阴影部分为球面三角形 P<sub>N</sub>DS,由球面正弦定理可得:

$$\frac{\sin(LHA)}{\sin(90^\circ - h)} = \frac{\sin A}{\sin(90^\circ - \delta)}. \quad (1)$$

由球面余弦定理可得两组方程:

$$\cos(90 - h) = \cos(90 - \varphi) \cdot \cos(90 - \delta) +$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\theta \mathbf{R}_\gamma \mathbf{R}_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \phi + \sin \gamma \sin \theta \sin \phi & -\cos \gamma \sin \phi + \sin \gamma \sin \theta \cos \phi & -\sin \gamma \cos \theta \\ \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi & \sin \theta \\ \sin \gamma \cos \phi - \cos \gamma \sin \theta \sin \phi & -\sin \gamma \sin \phi - \cos \gamma \sin \theta \cos \phi & \cos \gamma \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{R}_\theta, \mathbf{R}_\gamma, \mathbf{R}_\phi$  分别表示坐标系绕着 z, y, x 依次旋转 φ, γ, θ 角, φ, γ, θ 表示相机的姿态角。

如图 2 所示,对第 i 颗恒星在图像坐标系中的坐标(X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub>),由相机的中心投影模型可得到:

$$\sin(90 - \varphi) \cdot \sin(90 - \delta) \cdot \cos(LHA). \quad (2)$$

$$\cos(90 - \delta) = \cos(90 - \varphi) \cdot \cos(90 - h) +$$

$$\sin(90 - \varphi) \cdot \sin(90 - \delta) \cdot \cos A, \quad (3)$$

其中,时角 LHA 可以由格林尼治恒星时 GAST、赤道经度以及地理经度表示:

$$LHA = GAST - \alpha + \lambda = GHA - \lambda, \quad (4)$$

$$GAST = 280.460\ 618\ 37 + 360.985\ 647\ 366\ 29 \cdot$$

$$T \cdot 36\ 525.0 + 0.000\ 387\ 933 \cdot T^2 -$$

$$T^3 / 38\ 710\ 000 + \Delta\Psi \cdot \cos \epsilon, \quad (5)$$

其中, T 为儒略世纪数, ΔΨ 为黄经章动, ε 为真黄赤交角。

将(1)(2)式带入(3)可得:

$$\tan A = \frac{\cos \varphi \cos \delta \sin(LHA)}{\sin \delta - \sin^2 \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \varphi \cos \delta \cos(LHA)} = \frac{\sin(LHA)}{\cos \varphi \tan \delta - \sin \varphi \cos(LHA)}. \quad (6)$$

通过上面的推导,利用已知测站天文坐标(λ, φ)、恒星第二赤道坐标(α, δ)和格林尼治恒星时 GAST,通过公式(1)(4)(6)可以求取恒星的地平坐标(h, A),其对应的地平坐标系下方位矢量为:

$$\mathbf{r} = \rho(\cos h \cos A, \cos h \sin A, \sin h)^T, \quad (7)$$

其中 ρ 为恒星到观测点的距离,由于恒星到观测点的距离 ρ 可认为是无穷远,因此平移向量可以忽略。

假设第 i 颗恒星在相机坐标系中的坐标为(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>),其与地平坐标的关系为:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \mathbf{R}^T \begin{bmatrix} \cos h \cos A \\ \cos h \sin A \\ \sin h \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中,相机坐标系与地平坐标系之间的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  的表达式为:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中,(u<sub>0</sub>, v<sub>0</sub>)为相机的主点, f 为等效焦距。

则恒星在相机中的成像模型为:

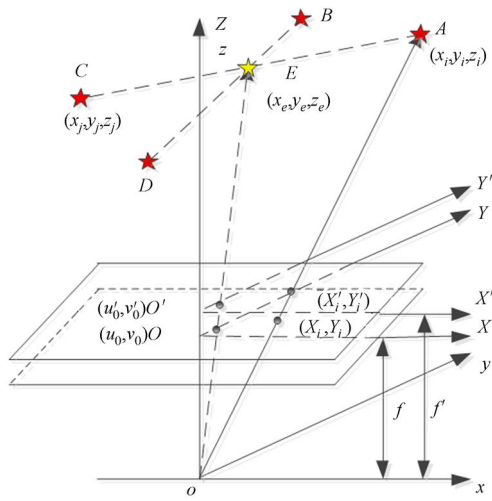


图 2 相机观测恒星成像模型

Fig. 2 Imaging model of stellar observation by camera

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \frac{1}{s} \mathbf{K} \mathbf{R}^T \begin{bmatrix} \cos h \cos A \\ \cos h \sin A \\ \sin h \end{bmatrix} \quad (11)$$

内参数矩阵  $\mathbf{K}$  中的主点偏移和缩放因子可以用下面公式近似获得:

$$\begin{cases} \Delta u \approx u_0' - u_0 \\ \Delta v \approx v_0' - v_0 \end{cases}, \quad (12)$$

$$s_0 \approx \frac{f}{f'} \approx \left( \frac{\| (X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 \|}{\| (X_i' - X_j')^2 + (Y_i' - Y_j')^2 \|} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

其中  $\Delta u, \Delta v$  为图像间的主点偏差, 四边形的对角线交叉点越靠近图像中心, 则近似值越接近真实值。恒星的图像坐标之间的对应关系依靠局部星图识别算法获得。

通过以上求解过程可以得到相机的内外参数值, 以这些参数值为初值, 利用非线性优化算法 (Levenberg-Marquardt, L-M) 对目标函数式进行全局优化, 可以得到各个参数的最优解。目标函数式为:

$$F = \sum_i \| m_i - \hat{m}_i(\phi, \gamma, \theta, u_0, v_0, f) \|^2, \quad (14)$$

由于共平台的多个具有相同标称值的光学系统间参数的真实值存在一定的差异, 在未进行事先精确标定的情况下, 利用相机的标称值, 根据依巴谷星表获得的恒星天球坐标和跟踪转台的天文

坐标和指向, 利用上述公式(1)~(11)产生局部模拟星图, 经过星图识别后, 利用 L-M 算法对参数初值进行最优估计。

同理, 可以求取另外一个传感器参数的最优估计  $(\phi', \gamma', \theta', u_0', v_0', f')$ , 其对应的内参数矩阵和旋转矩阵分别设为  $\mathbf{K}'$  和  $\mathbf{R}'$ 。则对应星表中同一颗恒星时, 其图像坐标与相机 1 图像坐标存在以下映射关系:

$$\begin{bmatrix} \cos h \cos A \\ \cos h \sin A \\ \sin h \end{bmatrix} = s \mathbf{R} \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} = s' \mathbf{R}' (\mathbf{K}^{-1})' \begin{bmatrix} X_i' \\ Y_i' \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

则

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{s'}{s} \mathbf{K} \mathbf{R}^T \mathbf{R}' (\mathbf{K}^{-1})' \begin{bmatrix} X_i' \\ Y_i' \\ 1 \end{bmatrix} = s_0 \mathbf{C} \begin{bmatrix} X_i' \\ Y_i' \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

### 2.2 基于四边形简比不变性的星图识别

由于恒星相对于光学系统而言, 可以近似为无穷远, 因此同一站点的光学系统所成的像可以认为是天球坐标上的平面场景映射到传感器上的平面, 满足仿射变换, 而共线性具有仿射不变性<sup>[11]</sup>。天球坐标上的四颗不共线星构成了四边形, 其对角线的虚拟交叉点可以作为共线点, 而对角线之间满足简比不变性。

假设已知相机 1 上的非共线星点 A、B、C、D, 如果连线 AC 和 BD 之间相交于 E, 则 E 点经过坐标转换后至相机 2 上的星点 E' 也必在共线交叉点上, 且对角线的简比满足仿射不变性, 简比计算公式为:

$$\text{cross} = \frac{\sqrt{(x_i - x_e)^2 + (y_i - y_e)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}. \quad (17)$$

由于四边形的对角线的交点具有仿射旋转不变性, 观测星图中待识别四边形的对角线交点坐标  $(x_e, y_e)$ , 与之匹配的模拟星图中四边形对角线交点  $(x_{e0}, y_{e0})$  之间的偏移可以近似等于主点偏移, 四边形对角线的长度比值可以近似为两个传感器之间的缩放因子。因此采用四边形对角线简比作为不变量可以提取比现有星点之间特征更多的信息。

### 2.3 基于奇异值分解的旋转矩阵求取和星点匹配

根据理想成像模型, 两个传感器之间的转换矩阵由光学系统的内参数矩阵和姿态旋转矩阵决定。姿态旋转矩阵为正交矩阵, 经过正交旋转变

换的矩阵其奇异值保持不变<sup>[12]</sup>,利用这一性质,可以直接将这三个奇异值作为特征进行星图识别。

假设已知相机 1 和相机 2 中  $N$  颗匹配的恒星( $N \geq 3$ ),其对应的坐标矩阵分别为  $\mathbf{W}$  和  $\mathbf{V}$ ,满足:

$$\mathbf{W} = \mathbf{C}\mathbf{V}. \quad (18)$$

对两个矩阵分别进行奇异值分解:

$$\mathbf{V} = \mathbf{P}_v \sum_v \mathbf{Q}_v^T = \sum_{i=1}^3 \mathbf{p}_{vi} \sigma_{vi} \mathbf{q}_{vi}^T, \quad (19)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{P}_w \sum_w \mathbf{Q}_w^T = \sum_{i=1}^3 \mathbf{p}_{wi} \sigma_{wi} \mathbf{q}_{wi}^T$$

其中,  $\mathbf{P}_v, \mathbf{P}_w$  为左奇异向量  $\mathbf{p}_{vi}, \mathbf{p}_{wi}$ , ( $i=1, 2, \dots, N$ )组成的  $3 \times 3$  正交矩阵;  $\mathbf{Q}_v, \mathbf{Q}_w$  为右奇异向量  $\mathbf{q}_{vi}, \mathbf{q}_{wi}$ , ( $i=1, 2, \dots, N$ )组成的  $N \times N$  正交矩阵;  $\sum_v$  和  $\sum_w$  为  $\mathbf{W}$  和  $\mathbf{V}$  奇异值  $\sigma_{vi}, \sigma_{wi}$ , ( $i=1, 2, 3$ )组成的  $3 \times N$  对角矩阵。当  $\mathbf{C}$  为酉矩阵时,  $\mathbf{W}$  和  $\mathbf{V}$  的特征值相等,特征向量只存在符号差异,即  $\mathbf{L} = \text{diag}[\text{sign}(\mathbf{q}_{w1}^T \mathbf{q}_{v1}), \text{sign}(\mathbf{q}_{w2}^T \mathbf{q}_{v2}), \text{sign}(\mathbf{q}_{w3}^T \mathbf{q}_{v3})]$ , (20)

则旋转矩阵  $\mathbf{C}$  的估计值为:

$$\mathbf{C} = \mathbf{P}_w (\mathbf{P}_v \mathbf{L})^T. \quad (21)$$

基于该方法提取的三颗以上恒星的坐标矩阵的奇异值可以作为星图识别的依据,同时可以用于求取两个相机之间的旋转映射矩阵。

### 3 多传感器的空间配准算法实现

#### 3.1 算法的主要步骤

如图 3 所示,该方法通过星表根据二维转台的指向和成像通道的初始参数(包括焦距、视场、探测器尺寸)生成局部模拟星图,依据四边形的简比不变性提取观测星图和模拟星图中匹配的四边形;利用四边形的四个顶点组成的矩阵的奇异值分解算法求取模拟星图和观测星图之间的转换矩阵,并利用奇异值不变性匹配观测星图中提取的所有星点;以模拟星图生成时采用的初始参数和奇异值分解法获得的转换矩阵为初始值,利用 L-M 算法进行非线性优化,求取最优参数解。

算法的主要步骤如下:

步骤 1 特征提取:提取观测星图中星点质心坐标,计算星点间距离,并按距离长度排序,选择

满足对角线交点位于星图中的四边形对角线最长的一个作为待识别四边形。提取待识别四边形的对角线简比和主对角线长度作为待识别特征。

步骤 2 特征匹配:搜索局部模拟星图中所有星点组成的四边形,在满足对角线交点位于星图内的同时,满足公式(22):

$$\min F_1(x) = \min \sum_{i=1}^2 | \text{cross}_i(\mathbf{P}) - \text{cross}_i(\mathbf{W}) | + \lambda_1 | dx(\mathbf{P}) - dx(\mathbf{W}) |, \quad (22)$$

其中,  $\mathbf{W}$  和  $\mathbf{V}$  分别为相机 1 和 2 中四边形四个星点坐标组成的矩阵,  $\text{cross}_i()$  表示四边形对角线的简比,  $dx()$  表示主对角线的长度,  $\lambda_1$  为加权因子,文中取值为 0.005。

步骤 3 求取参数初始值:采用奇异值分解算法求取旋转矩阵  $\mathbf{C}$ ,作为非线性优化的初始值。

步骤 4 匹配所有星点:以观测星图中已识别的四边形主对角线上的两颗星和待识别星构成包含 3 颗星的观测矩阵  $\mathbf{W}$ ;在模拟星图中以与主对角线上星点相匹配的星点寻找和待识别星相匹配的星点,满足以下条件则判定为同一颗星:

$$\min \sum_{i=1}^3 | \sigma_{wi} - \sigma_{vi} | + \lambda_2 \| \mathbf{W} - \mathbf{V}\mathbf{C} \|^2, \quad (23)$$

其中,  $\lambda_2$  为加权因子,此处取值为 0.5;  $\mathbf{C}$  为步骤 3 求取的旋转矩阵初始值。为增加算法的鲁棒性,可以采用四边形的主对角线和副对角线顶点坐标同时验证其奇异值的一致性。

步骤 5 非线性优化:以步骤 3 获得的内外参数为初始值,以步骤 4 获得的所有匹配星点为样本,采用 L-W 优化算法求取最优化参数。优化采用的目标函数为:

$$\min F_2(x) = \min \sum_{i=1}^N \| \mathbf{X}_i' - \mathbf{X}_i \mathbf{C} \|^2, \quad (24)$$

其中,  $N$  为可识别的星点数目;  $\mathbf{X}_i$  为模拟星图中星点坐标  $[x_i, y_i, f]$ ;  $\mathbf{X}_i'$  为观测星图中星点坐标  $[x_i', y_i', f']$ 。通过线性优化获得内外参数和旋转矩阵的最优估计,作为标定和姿态测量的精确值。

利用上述方法实现模拟星图和观测星图之间的配准,可以提取出未严格标定的传感器焦距、主点坐标等参数,并求取姿态角值,这些参数值可作为其它传感器的参数初值,加快最优估计算法的收敛速度。传感器之间的映射矩阵可以通过公式(16)求取。

### 3.2 影响因素分析

以恒星作为控制点进行多传感器的空间配准,其误差主要是由于星点图像坐标提取会受噪声、大气和地球自转等因素的影响,其误差通常可以达到 0.5 个像素左右<sup>[7]</sup>。

模拟星图的产生需要进行恒星自行、岁差、章动、光行差和视差修正。修正后恒星的视位置计算精度可达到角秒量级。为了防止多个传感器之间、传感器与模拟星图之间初始误差所造成的视场不重叠,按照多个传感器共轴机械调整精度,将模拟星图的初始视场放宽。

以上分析未考虑大气蒙气差的影响,目前修正蒙气差的方法均受限于大气情况的复杂性,难以实现精确补偿。蒙气差对星点的俯仰坐标影响较大,对方位角和横滚角影响较小,对于生成的模拟星图和观测星图的视场覆盖有一定影响,而对

多个传感器的空间配准影响较小。标定测量时选择对天顶附近的恒星进行观测,其造成的误差小于 1<sup>′</sup><sup>[13]</sup>,可以通过扩大模拟星图的视场范围加以克服。

关于双星和干扰星问题,双星造成的星点质心提取不准,引起重投影误差变化较大,将其作为异常值剔除;而利用多次观测可去除进入视场的干扰星影响。

### 4 实验验证及分析

为了验证算法的可行性以及星图识别核心算法的有效性,本文通过计算出现双星干扰、质心提取误差、转台指向误差和焦距偏差等情况下,传感器的重投影误差(单位为像素),来验证算法的有效性和鲁棒性。

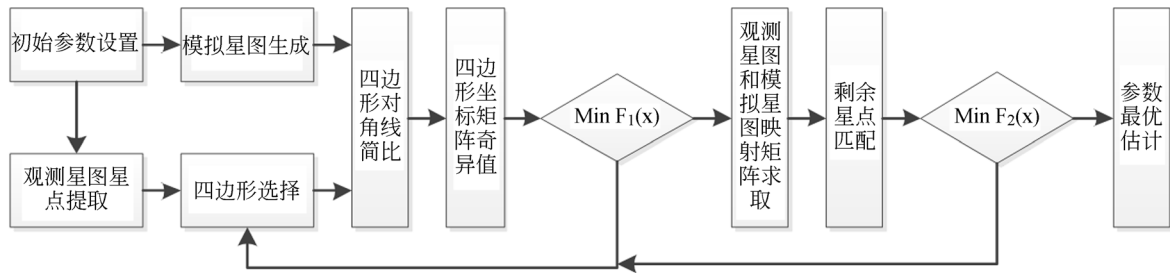


图 3 多传感器空间配准流程

Fig. 3 Process of multi sensor spatial registration

实验中采用的系统如图 4 所示,其相机型号为佳能 1DC,镜头型号为 EF400 mm f/2.8L IS II USM,标称焦距 400 mm,视场范围为 3.5°×5°,传感器像元数为 4 608×3 702,像元尺寸为 6.5 μm×6.5 μm;二维跟踪转台静态指向精度为 7",最大跟踪误差为 3',随机误差为 30"。

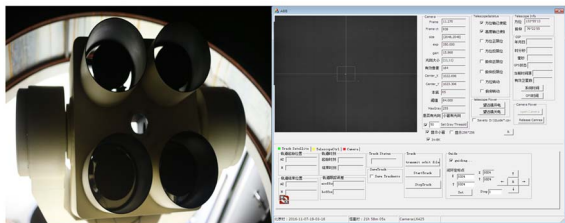


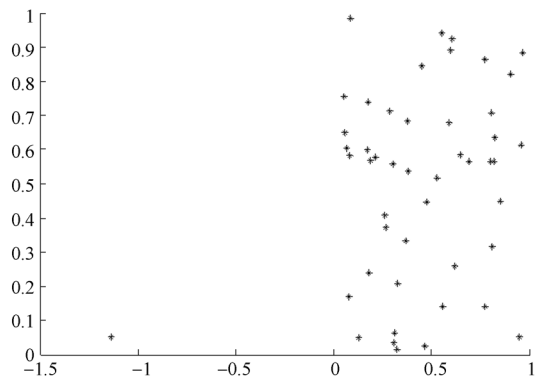
图 4 多传感器空间观测系统实物及控制图

Fig. 4 The multi-sensor astronomical observation system

关于质心提取误差对算法的影响分析,考虑一种存在双星的极端情况,某一颗星的质心计算

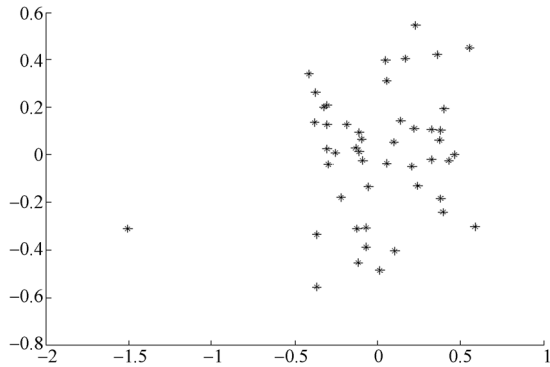
出现了较大偏差,如图 5(a)所示,此时重投影误差出现异常值,如图 5(b),将异常值去除后,对其它星点的计算影响较小。

因共平台的多个传感器观测空间目标时,受跟踪转台的指向误差和相机装调误差的影响,得



(a)质心提取偏差

(a)Centroid extraction error

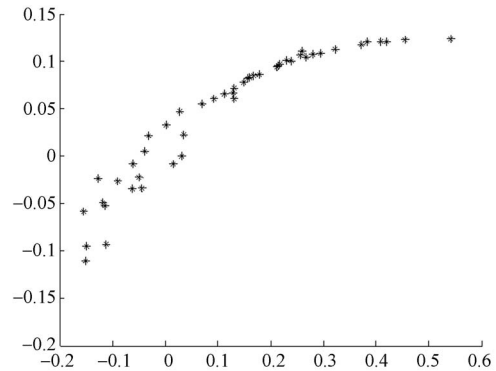


(b)重投影误差

(b)Re-projection error

图 5 质心提取偏差对重投影误差的影响

Fig. 5 Influence of centroid extraction deviation on the re-projection error



(b)方位和俯仰角误差 var=0.05°时

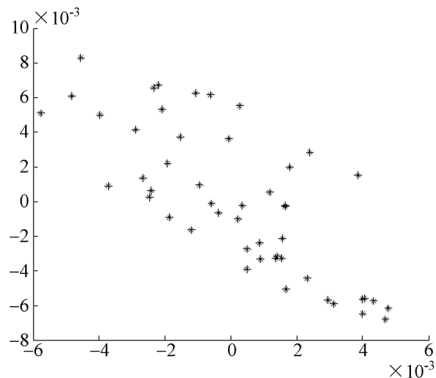
(b)Angle error of azimuth and pitch, var=0.05°

图 6 方位和俯仰角偏差对重投影精度影响

Fig. 6 Influence of azimuth and pitch angle errors on precision of re-projection

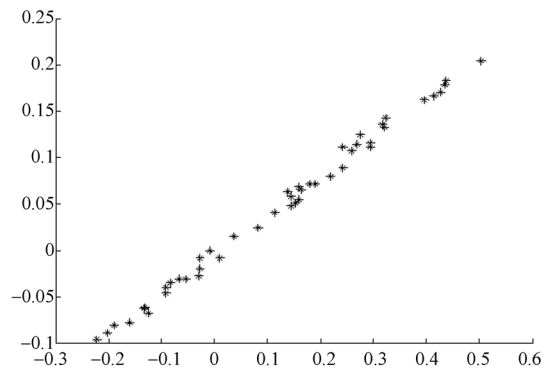
到的模拟星图和观测星图之间存在一定的偏差,对算法的影响较大。结果如图 6 所示。当方位角和俯仰角偏差均小于  $0.05^\circ$  (跟踪系统跟踪误差为  $3'$ , 即  $0.05^\circ$ ), 重投影误差仍优于 1 个像素, 满足系统的使用条件。

由于焦距未经过严格标定, 因此焦距的变化对重投影误差的影响决定了算法的实用性。如图 7 所示, 由于算法会对焦距引起的尺度缩放进行估计, 当虚拟星图中采用的焦距与真实焦距之间的最大偏差小于 7.5 mm 时, 焦距的变化对重投影误差影响较小, 标定的真实焦距为 393.02 mm。针对多幅观测星图, 模拟星图的焦距是在  $[400-7.5, 400+7.5]$  mm 区间以步长为 0.5 mm 变化。这是通过计算模拟星图和观测中星点正确匹配的数量与观测星图中总星点数量的比值得到的。多次测量的结果表明星点的正确识别概率大于 97.4%。



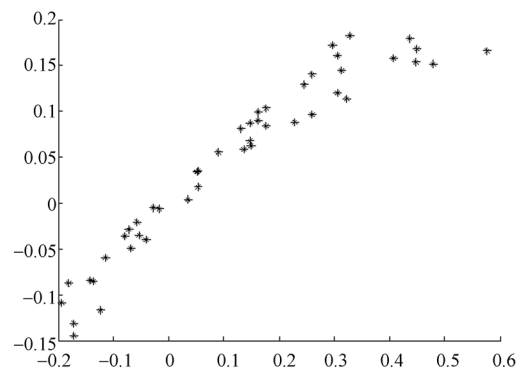
(a)方位和俯仰角误差 var=0.002 5°时

(a)Angle error of azimuth and pitch, var=0.002 5°



(a)方位和俯仰角偏差(var=0.002 5°,焦距偏差为 5 mm时)

(a)Angle error of azimuth and pitch( var=0.002 5°, deviation of focal length is 5 mm)



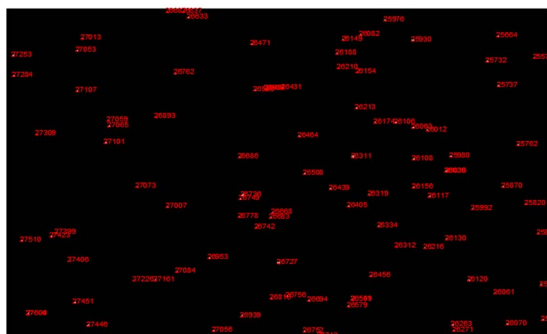
(b)方位和俯仰角偏差(var=0.05°时,焦距偏差为 5 mm)

(b) Angle error of azimuth and pitch (var=0.05°, deviation of focal length 5 mm)

图 7 焦距偏差对重投影精度的影响

Fig. 7 Influence of focal length deviation on precision of re-projection

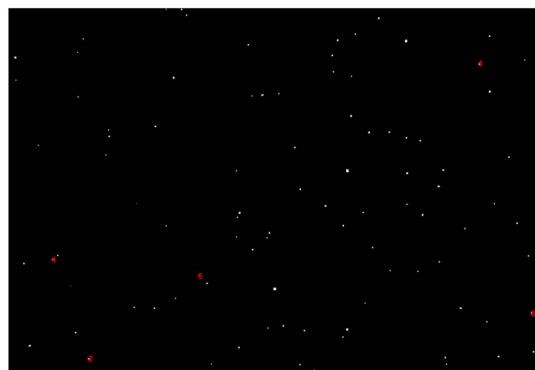
如图 8(彩图见期刊电子版)为利用佳能相机拍摄的真实星图,图中(a)为猎户座的观测图像及星图识别后的星号;(b)为观测星图提取的四边形;(c)为根据依巴谷星表模拟的星图,观测站址



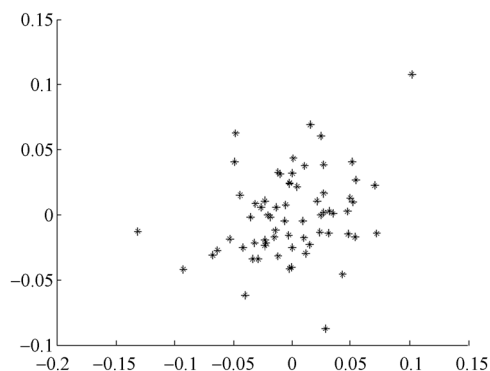
(a) 识别出星号的观测星图  
(a) Identified star in observation of stellar



(b) 观测星图  
(b) Observation of stellar



(c) 模拟星图及匹配的四边形  
(c) Simulation stellar and matching quadrilatera



(d) 多传感器重投影误差  
(d) Re-projection error of multi sensor

图 8 真实观测星图和模拟星图

Fig. 8 Observation and simulation stellars

为(116. 407 5, 39. 904), 转台指向的方位角为 $146.357 8^\circ$ , 俯仰角为 $43.552 5^\circ$ , 指向横滚角为一 $24.3^\circ$ , 初始视场较相机标称值大 $3'$ ; 图 8(d) 显示多个观测相机之间的重投影误差优于 1 个像素。红色为依据四边形简比不比性自动匹配的星点, 匹配算法不依赖于星等信息, 无需构建模式库, 具有更高的鲁棒性。

## 5 结 论

针对多相机进行天文观测时空配准的需要, 提出一种基于天文观测的相机参数标定和姿态测量方法, 利用星表生成的模拟星图与真实拍摄星图间的四边形简比仿射特征不变性, 对相机内外参数进行标定, 同时求取多个相机间的转换矩阵。实验数据表明, 当多个传感器之间的焦距偏差小于 7.5 mm、跟踪系统指向偏差小于 $0.05^\circ$ 时, 星图中四边形的正确识别概率为 100%, 所有星点的正确识别概率为 97.4%。在不考虑大气和坐标提取误差的条件下, 转换矩阵的重投影坐标误差小于 0.25 个像素; 考虑星点质心提取误差, 相机像元角分辨率为 $3.9'' \times 3.4''$ , 最后计算得出的投影误差低于 1 个像素, 结果显示算法具有较高的鲁棒性。该方法适用于多相机组阵观测空间目标, 也适用于单相机的标定和姿态测量。

## 参考文献:

- [1] SMITH A M S, HEBB L, COLLIER C A, et al. A SuperWASP search for additional transiting planets in 24 known systems [J]. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 2009, 398(4):1827-1834.
- [2] 王鸣浩, 陈涛, 王建立, 等. 捆绑式望远镜图像信噪

- 比测量及分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1):92-97.
- WANG M H, CHEN T, WANG J L, *et al.*. Measurement and analysis of image SNR in binding style telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):92-97. (in Chinese)
- [3] 徐树奎, 张军, 涂丹, 等. 一种多分辨率混合相机系统标定方法[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(9):2073-2078.
- XU SH K, ZHANG J, TU D, *et al.*. A calibration technology for multi-resolution hybrid camera system [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2012, 33(9):2073-2078. (in Chinese)
- [4] LIU Z, ZHANG G, WEI Z. A global calibration method for multi-sensor vision system [C]. *International Symposium on Instrumentation and Control Technology*. USA: *International Society for Optics and Photonics*, 2008:37-40.
- [5] KIM S, SHIN J, PAIK J. Auto calibration for multiple camera-based surveillance system [J]. *Ieek Proc. Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision*. 2005, 1(34):1-9.
- [6] 张磊, 何昕, 魏仲慧, 等. 基于星图识别的空间目标快速天文定位[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11):3074-3080.
- ZHNAG L, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Fast celestial positioning for space objects based on star identification [J]. 2014, 22(11):3074-3080. (in Chinese)
- [7] 戴东凯, 王省书, 胡春生, 等. 基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究[J]. 光学学报, 2012(3):100-104.
- DAI D K, WANG X SH, HU CH SH, *et al.*. Camera calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012(3):100-104. (in Chinese)
- [8] 张广军. 星图识别[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
- ZHANG G J. *Star identification* [M]. Beijing: National defense industry press, 2011. (in Chinese)
- [9] 樊巧云, 陆壮志, 魏新国, 等. 基于惯性比特特征的三角形星图识别算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10):2838-2843.
- FAN Q Y, LU ZH ZH, WEI X G, *et al.*. Triangle star identification algorithm based on inertia ratio [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10):2838-2843. (in Chinese)
- [10] 林涛, 周建林, 等. 四边形全自主星图识别算法[J]. 宇航学报, 2000, 21(2):82-85.
- LIN T, ZHOU J L, *et al.*. All-sky automated quaternary star pattern recognition [J]. *Journal of Astron Autics*, 2000, 21(2):82-85. (in Chinese)
- [11] 王玮. 图像仿射不变特征提取及匹配技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
- WANG W. *Image affine invariant feature extraction and matching* [D]. Changsha: Graduate school of national university of defense technology, 2013. (in Chinese)
- [12] JUANG J N, KIM H Y, JUNKINS J L. An Efficient and Robust Singular Value Method for Star Pattern Recognition and Attitude Determination [J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2003, 115(1):211-220.
- [13] 王海涌, 林浩宇, 周文睿. 星光观测蒙气差补偿技术[J]. 光学学报, 2011, 31(11):7-12.
- WANG H Y, LIN H Y, ZHOU W R. Technology of atmospheric refraction compensation in starlight observation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11):100-104. (in Chinese)

#### 作者简介:



张廷华(1981—),男,吉林通化人,博士研究生,讲师,2007年于装备学院获得硕士学位,现为北京理工大学光电学院在读博士生,主要从事光电信息处理与对抗方面的研究。E-mail: zth-gd@163.com

#### 导师简介:



倪国强(1946—),男,江苏锡山人,博士,教授,1967年于复旦大学获得学士学位,1982年、1989年于北京理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光电成像器件与技术、光学工程、红外成像理论方面研究, E-mail: nigq01@sina.com