

一种基于姿态关联帧的星敏感器标定方法

刘 宇, 戴东凯*, 马丽衡, 伏思华, 王省书

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 提出了一种基于姿态关联帧的星敏感器标定方法, 该方法通过外场天文观测即可实现标定。首先, 利用与星敏感器捷联安装的陀螺组提供的精度角度信息, 实现了多帧星图的关联叠加, 然后构建多帧星图之间恒星与像点的成像映射模型, 最后采用最小二乘法实现了星敏感器内参数的全局优化。仿真结果表明, 相比基于星角距的标定方法, 所提方法标定精度更高、稳健性更佳, 且能同时标定出星敏感器相对陀螺组合体的安装矩阵, 因此其适用于船载和机载惯性/天文组合导航系统的参数标定。

关键词 传感器; 星敏感器标定; 姿态关联; 安装矩阵

中图分类号 V241.62+3 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1128003

A Star Sensor Calibration Method Based on Attitude Correlated Frame

Liu Yu, Dai Dongkai, Ma Liheng, Fu Sihua, Wang Xingshu

*College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract A star sensor calibration method based on the attitude correlated frame (ACF) is proposed, which can realize the calibration by the astronomical observation outdoors. First, the correlated superposition among the multi-frame star maps is achieved by utilizing the high accuracy angle information provided by the gyro unit which is installed in a strapdown manner with the star sensor. Then, the imaging mapping model between the star and the image point among the multi-frame star maps is established. Finally, the global optimization of the intrinsic parameters for the star sensor is realized by using the least square algorithm. The simulation results show that the proposed method is more precise and robust than the calibration method based on the interstar angles. Moreover, the installation matrix between the star sensor and the gyro unit can be calibrated simultaneously by this method, and thus it is suitable for the parameter calibration of the shipboard, airborne inertial/celestial integrated navigation systems.

Key words sensors; star sensor calibration; attitude correlation; installation matrix

OCIS codes 280.4788; 120.4640; 150.1488

1 引 言

星敏感器是一种以恒星为参照物的高精度姿态测量设备, 它通过解算恒星在天球惯性坐标系和星敏感器坐标系下的参考矢量与观测矢量之间的姿态方程, 确定星敏感器本体坐标系相对于惯性坐标系的三轴姿态^[1-5]。恒星在星敏感器坐标系下的观测矢量是由其在星敏感器像面上的像点坐标计算得到的, 而星敏感器的内参数则是实现该计算的关键参数, 因此在使用星敏感器前必须对其内参数进行精确标定。

星敏感器的标定方法根据其参数求解的数学模型可分为两类: 依赖姿态解算的标定方法^[6-11]与不依赖姿态解算的标定方法^[12-16]。依赖姿态解算的标定方法的基本原理是: 根据星敏感器成像映射模型, 确定观测矢量在星敏感器像面上的理论坐标值, 然后计算多个观测矢量的实际像点坐标与理论坐标间的偏差, 采用最

收稿日期: 2017-06-14; 收到修改稿日期: 2017-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(61573368)

作者简介: 刘 宇(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事星敏感器方面的研究。E-mail: 842129443@qq.com

导师简介: 伏思华(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事图像测量方面的研究。E-mail: fusihsua2002cn@aliyun.com

* 通信联系人。E-mail: daidongkai@nudt.edu.cn

小二乘算法进行求解,最终实现星敏传感器内参数的标定。该方法在实际操作中一般需要借助单星模拟器模拟星光,利用高精度二轴转台实现观测矢量的精确可控转动,在理论上是最优估计,标定精度高,已经成为星敏传感器标定的一种标准方法,但它需要在实验室环境下并依赖于昂贵的标定设备完成标定,操作繁琐,效率较低^[6,10]。不依赖姿态解算的标定方法则是直接利用恒星对之间的星角距正交变换不变原理,该方法不求解星敏传感器的姿态参数,因此对星敏传感器的运动状态无特殊要求,只需在大气环境良好的地点对晴朗夜空进行恒星拍摄即可实现标定。但由于星角距观测模型具有非线性特性,故在采用最小二乘法估算求解时,受其线性化近似误差的影响,该方法无法实现最优估计,标定精度不高。

为降低星敏传感器标定的设备成本,简化标定流程,提高标定效率,保证标定精度及在轨标定能力,本文提出了一种基于姿态关联帧(ACF)的星敏传感器标定方法。该方法利用与星敏传感器捷联安装的陀螺组合体提供的姿态变化信息,实现了多帧动态星图的关联叠加,并构建了多帧动态星图的恒星与像点的成像映射模型,最后根据最小二乘法优化估计原理,采用两步迭代法实现了星敏传感器内参数的标定。

2 标定原理

2.1 依赖姿态解算的标定方法

星敏传感器实际成像模型中主要包含以下误差:焦距偏差 Δf 、主点漂移误差 $(\Delta x_0, \Delta y_0)$ 和光学系统畸变 (dx, dy) 。这些误差的存在会影响星敏传感器的姿态测量精度。因此,在实际使用前,必须对星敏传感器的内参数进行精确标定。图 1 所示为包含上述误差的星敏传感器实际成像模型,其中 $O-X_s Y_s Z_s$ 为星敏传感器坐标系; (x_0, y_0) 、 f 分别为星敏传感器的主点坐标、焦距; O 、 O' 分别为理想和实际主点位置; Q 、 Q' 分别为理想和实际像点位置, P 为恒星。

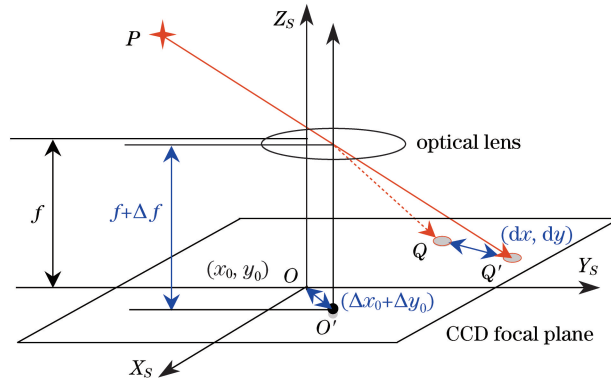


图 1 星敏传感器实际成像模型

Fig. 1 Actual imaging model of star sensor

设恒星 P 在天球惯性系(i 系)下的方向矢量为 \mathbf{r}^i ,在星敏传感器坐标系(S 系)下的方向矢量为 \mathbf{r}^S ,则有

$$\mathbf{r}^S = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{C}_i^S \cdot \mathbf{r}^i = \mathbf{C}_i^S \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \delta \\ \sin \alpha \cdot \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 (α, δ) 为恒星在 i 系下的赤经、赤纬; \mathbf{C}_i^S 表示从 S 系到 i 系的姿态余弦矩阵,用三个姿态欧拉角 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 具体表示为

$$\mathbf{C}_i^S = \mathbf{R}(\varphi_2) \cdot \mathbf{R}(\varphi_1) \cdot \mathbf{R}(\varphi_3), \quad (2)$$

式中余弦变换矩阵

$$\mathbf{R}(\varphi_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 \\ 0 & -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}(\varphi_2) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & 0 & -\sin \varphi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_2 & 0 & \cos \varphi_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}(\varphi_3) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_3 & \sin \varphi_3 & 0 \\ -\sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

当星敏传感器处于静态时,其拍摄的单帧星图的恒星像点理论坐标 (\hat{x}, \hat{y}) 可表示为

$$\begin{cases} \hat{x} = x_0 + f \frac{X}{Z} + dx = F^x(x_0, y_0, f, q_1, q_2, q_3, p_1, p_2, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \\ \hat{y} = y_0 + f \frac{Y}{Z} + dy = F^y(x_0, y_0, f, q_1, q_2, q_3, p_1, p_2, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 F 代表对应的函数; q_1, q_2, q_3 为径向畸变系数; p_1, p_2 为切向畸变系数。

采用的畸变模型为三阶径向畸变加一阶切向畸变^[8,10], 表达式为

$$\begin{cases} dx = p_1(2x^2 + r^2) + 2p_2xy + q_1xr^2 + q_2xr^4 + q_3xr^6 \\ dy = p_2(2y^2 + r^2) + 2p_1xy + q_1yr^2 + q_2yr^4 + q_3yr^6 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $r^2 = x^2 + y^2$ 。

则恒星的实际像点坐标与理论坐标间的偏差可表示为

$$\begin{cases} \Delta x = \bar{x} - \hat{x} \approx \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{R} \\ \Delta y = \bar{y} - \hat{y} \approx \mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{R} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 (\bar{x}, \bar{y}) 为由星点提取算法得到的恒星实际像点坐标; \mathbf{A}, \mathbf{B} 为敏感矩阵, 且 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F^x}{\partial x_0} & \cdots & \frac{\partial F^x}{\partial \varphi_3} \end{bmatrix}$,

$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F^y}{\partial x_0} & \cdots & \frac{\partial F^y}{\partial \varphi_3} \end{bmatrix}$; 星传感器内外参数的偏移误差 $\Delta \mathbf{R} = [\Delta x_0 \quad \cdots \quad \Delta \varphi_3]^T$ 。将星图上所有星点代入(5)

式, 采用最小二乘算法处理, 即可求得内外参数的偏移误差 $\Delta \mathbf{R}$ 。

2.2 基于 ACF 的标定方法

由 2.1 节的分析可知, 依赖姿态解算的标定方法也可以应用于外场标定实验数据的处理, 但通常为了减少待求解姿态参数的个数、降低求解过程的不稳定性, 需要保证星传感器处于静止状态(即保持姿态不变)。然而, 在静态条件下, 星传感器拍摄的星图上的星点分布不均匀, 且难以覆盖整个像面, 不利于畸变参数的求解, 标定精度较差。故为了解决星点分布不均与待求解姿态参数过多的矛盾, 提出一种基于 ACF 的标定方法。通过旋转星传感器使拍摄的星点均匀地分布在像面上, 利用陀螺短时间内提供的高精度角度信息, 将不同时刻的星传感器姿态与某个特定时刻的姿态相关联^[17-18], 从而减少了待求解姿态参数的个数, 以下将详细推导其数学模型。

不同时刻的星传感器姿态可以通过陀螺提供的姿态变化信息实现关联:

$$\mathbf{C}_i^{S_k} = \mathbf{C}_i^{S_1} \cdot \mathbf{C}_i^{S_1} = (\mathbf{C}_b^S \cdot \mathbf{C}_{b_1}^{b_k} \cdot \mathbf{C}_S^b) \cdot \mathbf{C}_i^{S_1}, \quad (6)$$

式中 $\mathbf{C}_i^{S_k}$ 为拍摄第 k (k 为正整数) 帧星图时星传感器的姿态余弦矩阵; $\mathbf{C}_i^{S_1}$ 为从第 1 帧星图变化到第 k 帧星图时星传感器的姿态变化余弦矩阵; $\mathbf{C}_i^{S_1}$ 为拍摄第 1 帧星图时星传感器的姿态余弦矩阵; $\mathbf{C}_{b_1}^{b_k}$ 为陀螺组合体的姿态变化余弦矩阵; \mathbf{C}_b^S 为星传感器相对于陀螺组合体的安装矩阵, \mathbf{C}_S^b 为 \mathbf{C}_b^S 的转置矩阵; b 系表示陀螺组合体传感器轴所构成的坐标系。

结合(1)、(6)式可得

$$\begin{cases} \mathbf{r}^{S_1} = \mathbf{C}_i^{S_1} \cdot \mathbf{r}^{i_1} \\ \mathbf{r}^{S_2} = \mathbf{C}_i^{S_2} \cdot \mathbf{r}^{i_2} = (\mathbf{C}_b^S \cdot \mathbf{C}_{b_1}^{b_2} \cdot \mathbf{C}_S^b) \cdot \mathbf{C}_i^{S_1} \cdot \mathbf{r}^{i_2} \\ \vdots \\ \mathbf{r}^{S_k} = \mathbf{C}_i^{S_k} \cdot \mathbf{r}^{i_k} = (\mathbf{C}_b^S \cdot \mathbf{C}_{b_1}^{b_k} \cdot \mathbf{C}_S^b) \cdot \mathbf{C}_i^{S_1} \cdot \mathbf{r}^{i_k} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{r}^{S_k}, \mathbf{r}^{i_k}$ 分别为第 k 帧星图上的恒星在 S 系和 i 系下的方向矢量。

将(7)式中各个子等式左右两侧分别叠加, 可得

$$[\mathbf{r}^{S_1} \quad \mathbf{r}^{S_2} \quad \cdots \quad \mathbf{r}^{S_k}] = \mathbf{C}_b^S \cdot [\mathbf{C}_{b_1}^{b_1} \quad \mathbf{C}_{b_1}^{b_2} \quad \cdots \quad \mathbf{C}_{b_1}^{b_k}] \cdot \mathbf{C}_S^b \cdot \mathbf{C}_i^{S_1} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{r}^{i_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{r}^{i_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{r}^{i_k} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中等号左侧相当于将各帧星图上的星点叠加在一张星图上, 从而得到一张具有大量星点数且均匀分布在像面各个区域的组合关联星图, 其过程如图 2 所示。

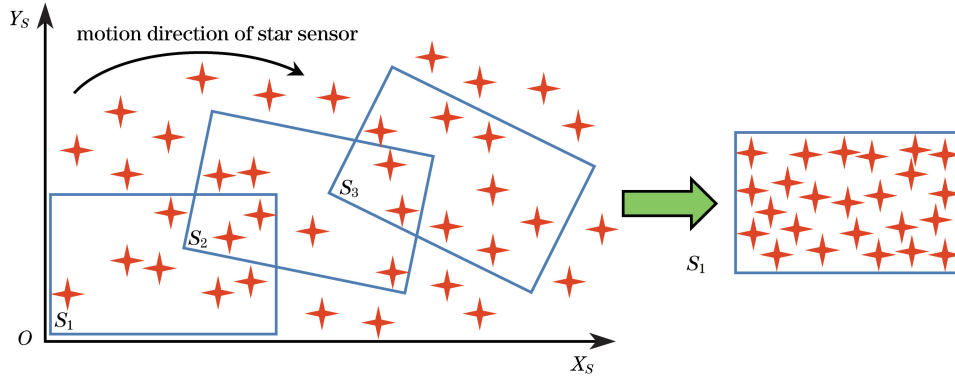


图 2 多帧星图关联示意图

Fig. 2 Schematic of correlation among multi-frame star maps

由上述分析可知,多帧动态星图上恒星的理论坐标可表示为

$$\begin{cases} \hat{x}_{k,l} = x_0 + f \frac{X_{k,l}}{Z_{k,l}} + dx_{k,l} = F_{k,l}^x(x_0, y_0, f, q_1, q_2, q_3, p_1, p_2, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3) = F_{k,l}^x(\mathbf{p}) \\ \hat{y}_{k,l} = y_0 + f \frac{Y_{k,l}}{Z_{k,l}} + dy_{k,l} = F_{k,l}^y(x_0, y_0, f, q_1, q_2, q_3, p_1, p_2, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3) = F_{k,l}^y(\mathbf{p}) \end{cases}, \quad (9)$$

式中 $(\hat{x}_{k,l}, \hat{y}_{k,l})$ 表示第 k 帧星图上第 l 颗恒星的理论坐标; $(dx_{k,l}, dy_{k,l})$ 为其对应的光学系统畸变; $[X_{k,l} \ Y_{k,l} \ Z_{k,l}]^T$ 为该恒星在 S 系下的方向矢量; \mathbf{p} 为星敏感器的内外参数矢量, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别为星敏感器相对于陀螺组合体的三个安装角。

由 2.1 节可知,第 k 帧星图上恒星的实际像点坐标与理论坐标间的偏差可表示为

$$\begin{cases} \Delta x_k \approx \mathbf{A}_k \cdot \Delta \mathbf{p} \\ \Delta y_k \approx \mathbf{B}_k \cdot \Delta \mathbf{p} \end{cases}, \quad (10)$$

式中 $(\Delta x_k, \Delta y_k)$ 为第 k 帧星图上所有恒星的真实像点坐标与理论坐标间的偏差量,且 $\Delta \mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \Delta x_{k,1} \\ \vdots \\ \Delta x_{k,l} \\ \vdots \\ \Delta x_{k,N_k} \end{bmatrix}$,

$$\Delta \mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} \Delta y_{k,1} \\ \vdots \\ \Delta y_{k,l} \\ \vdots \\ \Delta y_{k,N_k} \end{bmatrix}; N_k \text{ 为第 } k \text{ 帧星图上的总星点数; } \mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k \text{ 为对应的敏感矩阵,且 } \mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{k,1}^x}{\partial x_0} & \cdots & \frac{\partial F_{k,1}^x}{\partial \theta_3} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_{k,l}^x}{\partial x_0} & \cdots & \frac{\partial F_{k,l}^x}{\partial \theta_3} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_{k,N_k}^x}{\partial x_0} & \cdots & \frac{\partial F_{k,N_k}^x}{\partial \theta_3} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{k,1}^y}{\partial x_0} & \cdots & \frac{\partial F_{k,1}^y}{\partial \theta_3} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_{k,l}^y}{\partial x_0} & \cdots & \frac{\partial F_{k,l}^y}{\partial \theta_3} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_{k,N_k}^y}{\partial x_0} & \cdots & \frac{\partial F_{k,N_k}^y}{\partial \theta_3} \end{bmatrix}; \text{内外参数的偏移误差 } \Delta \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \vdots \\ \Delta \theta_3 \end{bmatrix}.$$

将拍摄的全部星图上的所有星点坐标代入(10)式,采用最小二乘法求解,即

$$\Delta p = (\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H})^{-1} \cdot \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{G}, \quad (11)$$

式中 $\mathbf{H} = [\mathbf{A}_1 \ \cdots \ \mathbf{A}_k \ \cdots \ \mathbf{A}_M \ \mathbf{B}_1 \ \cdots \ \mathbf{B}_k \ \cdots \ \mathbf{B}_M]^T$, $\mathbf{G} = [\Delta x_1 \ \cdots \ \Delta x_k \ \cdots \ \Delta x_M \ \Delta y_1 \ \cdots \ \Delta y_k \ \cdots \ \Delta y_M]^T$, M 为全部星图的总帧数。

结合上述分析,采用两步迭代法完成标定,具体求解过程为:

- 1) 忽略畸变,先估计出星敏感器的主点、焦距和外参数的偏移误差($\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta f, \Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta \theta_3, \Delta \varphi_1, \Delta \varphi_2, \Delta \varphi_3$);
- 2) 将步骤 1)中的估计结果代入(10)式,再利用(11)式对星敏感器所有内外参数进行全局优化,估计出星敏感器的内外参数偏移误差 Δp 。

3 仿真研究

为了验证所提出的基于 ACF 原理的星敏感器标定方法的有效性,在不同星点坐标噪声和陀螺噪声水平下进行仿真。首先利用航迹生成程序获得一组陀螺数据,然后根据陀螺数据和安装矩阵得到相应的星敏感器姿态信息,最后利用星图生成程序得到仿真的导航星图。航迹生成和星图生成程序中设定的陀螺和星敏感器的仿真参数见表 1。

表 1 陀螺和星敏感器的仿真参数
Table 1 Simulation parameters of gyro and star sensor

Gyro parameter	Content	Star sensor parameter	Content
Frequency	100 Hz	Frequency	1 Hz
Angular speed	$0.5(^{\circ}) \cdot s^{-1}$	Resolution	1024 pixel \times 1024 pixel
Initial attitude	[0 0 0]	Image center coordinate	(10 pixel, -10 pixel)
Installation matrix	[2 2 2]	Focal length	25.6 mm
Gyro bias	$0.03(^{\circ}) \cdot h^{-1}$	Radial distortion coefficient	$[2 \times 10^{-4} \ -4 \times 10^{-7} \ 1 \times 10^{-8}]$
Angular random walk error	$0.005(^{\circ}) \cdot h^{-1/2}$	Tangential distortion coefficient	$[2 \times 10^{-4} \ 2 \times 10^{-4}]$

3.1 误差分析

星敏感器的标定精度一般通过星点的重投影误差来进行评估,其计算方法为:利用标定得到的内参数和星点的天球坐标,通过(9)式计算得到星点的理论坐标,再求解该理论坐标与实际提取的星点图像坐标之间的偏差($\Delta x, \Delta y$)。为了方便统计,选定($\Delta x, \Delta y$)的模 $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 作为评价指标。为了研究星点坐标噪声、陀螺噪声对基于 ACF 标定方法的影响,设计了以下仿真实验。

实施方案:先仿真生成 60 帧星图,从中选取 30 幅奇数帧星图,加入相关噪声后用于进行标定计算,再将所得的标定结果用于计算剩余 30 幅未加入噪声的偶数帧星图的星点重投影误差,最后取这些星点重投影误差的模 $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 的均方根值(RMS)作为评价指标;每一种情况均重复标定 100 次,最后取 100 次 RMS 的平均值作为最终结果。

实验 1:在陀螺随机游走误差为 0 的前提下,在仿真平台中先加入陀螺零偏,给定的陀螺零偏为 $0.001 \sim 0.1 (^{\circ}) \cdot h^{-1}$;然后再给仿真生成的星图上的恒星像点坐标逐次加入均值为 0、标准差分别为 0.05, 0.1, \dots , 0.5 pixel 的高斯白噪声,最后按上述实施方案进行处理,其结果如图 3(a)所示。

实验 2:在陀螺零偏为 0 的前提下,在仿真平台中先加入游走范围为 $0.0001 \sim 0.01 (^{\circ}) \cdot h^{-1/2}$ 的陀螺随机游走误差;然后再给仿真生成的星图上的恒星像点坐标逐次加入均值为 0、标准差分别为 0.05, 0.1, \dots , 0.5 pixel 的高斯白噪声,最后按上述实施方案进行处理,其结果如图 3(b)所示。

由图 3(a)、(b)可知,当加入的陀螺零偏或随机游走误差一定时,随着星点噪声的增大,星点重投影误差迅速增大。当加入的星点噪声一定时,随着陀螺零偏或随机游走误差的增大,星点重投影误差也变大,但由陀螺零偏或随机游走误差所造成的星点重投影误差的变化幅度要远小于星点噪声所造成的。以上结果表

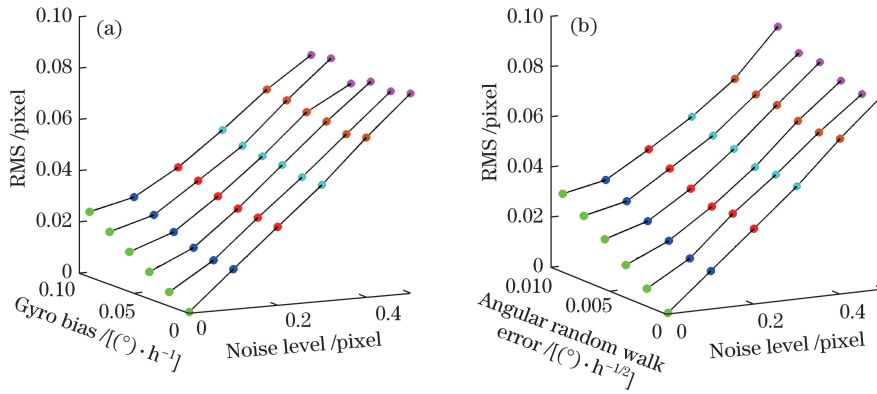


图 3 (a)常值零偏和(b)随机游走时的不同星点噪声下的重投影误差

Fig. 3 Reprojection errors with different star points noises under (a) constant zero bias and (b) random walk condition

明,短时间内陀螺噪声对标定精度的影响有限,而星点像素噪声是影响标定精度的主要因素。若能够保证星点噪声较小,则该标定方法有望达到较高精度。

为了验证这一结论,在仿真平台中同时加入表 1 所示的陀螺误差和均值为 0、标准差为 0.1 pixel 的高斯白噪声,实施方案同上,则所有星点的重投影误差如图 4 所示。

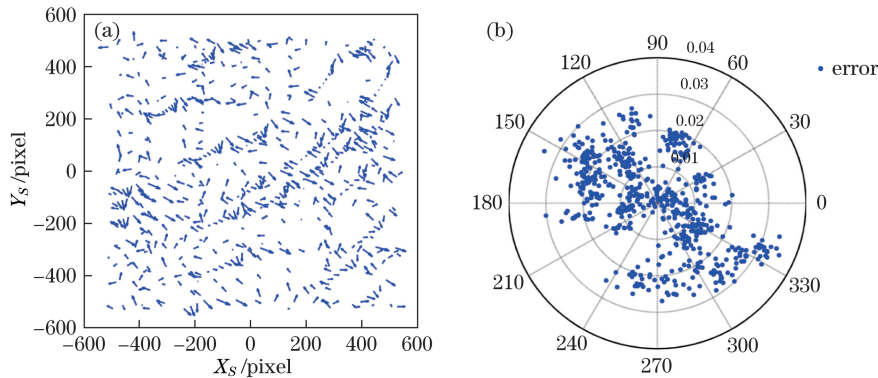


图 4 重投影误差分布。(a)直角坐标系;(b)极坐标系

Fig. 4 Distributions of reprojection errors. (a) Cartesian coordinate; (b) polar coordinate

由图 4(a)可知,标定残余矢量是随机分布的,与仿真环境吻合。经计算,图 4(a)中 X_s 和 Y_s 方向重投影误差的均方根值分别为 0.0132 pixel 和 0.0123 pixel。由图 4(b)可知,星点重投影误差的模均在 0.04 pixel 以内,说明本标定方法确实能够有效估计星敏感器的内外参数误差。本次标定实验中星敏感器内外参数的 100 次平均标定结果见表 2。

表 2 ACF 标定方法的平均标定结果

Table 2 Average calibration results from ACF calibration method

Parameter	x_0 /pixel	y_0 /pixel	f /mm	q_1	q_2	q_3	p_1
Simulation value	10	-10	25.6	2×10^{-4}	-4×10^{-7}	1×10^{-8}	2×10^{-4}
Initial value	0	0	20	0	0	0	0
Calibration value	9.81	-10.51	25.6002	1.96×10^{-4}	-1.84×10^{-9}	-1.72×10^{-8}	1.99×10^{-4}
Error	0.19	0.51	0.0002	4×10^{-6}	-3.98×10^{-7}	2.72×10^{-8}	1×10^{-6}
Parameter	p_2	φ_1	φ_2	φ_3	θ_1	θ_2	θ_3
Simulation value	2×10^{-4}	56.9476°	-1.0046°	-25.3335°	2°	2°	2°
Initial value	0	0°	0°	0°	0°	0°	0°
Calibration value	1.98×10^{-4}	56.9550°	-1.0084°	-25.3325°	2.0019°	1.9950°	2.0001°
Error	2×10^{-6}	$26.64''$	$13.68''$	$3.6''$	$6.84''$	$18''$	$0.4''$

从表 2 中可看出,ACF 标定方法能够实现星敏感器内外参数的精确标定。

3.2 算法比较

为了验证基于 ACF 的标定方法的优越性,将其与基于星角距不变原理的标定方法^[14-15]进行对比研究。为了方便描述,将此两种标定方法分别简称为姿态关联标定(ACC)方法和星角距标定(IAC)方法。

实施方案:在加入表 1 所示的陀螺噪声的基础上,给 60 幅星图逐次加入均值为 0、标准差分别为 0.05, 0.1, ..., 0.5 pixel 的高斯白噪声,并让 60 幅星图均参与标定,每种情况两种方法均标定 100 次,并对标定结果进行误差统计。其中,主点、焦距统计其 RMS,畸变则以整个 1024 pixel×1024 pixel 像面上残余畸变的模的最大值作为评价指标,所得结果如图 5 所示。

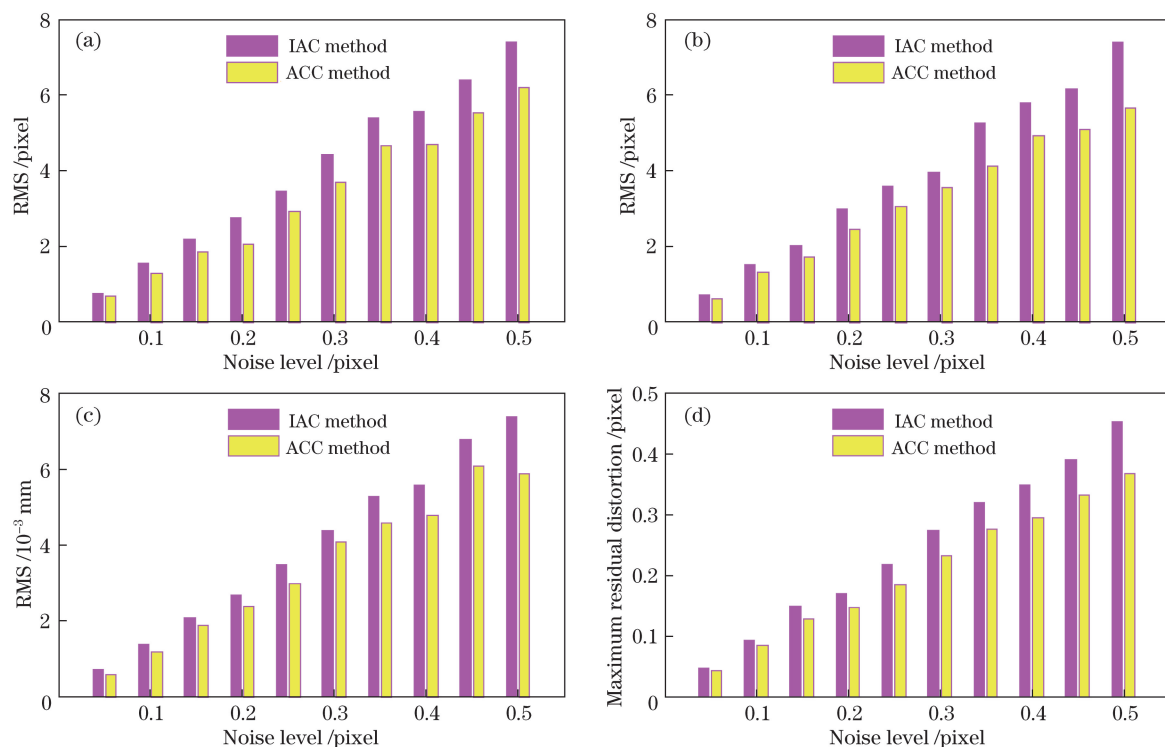


图 5 不同星点像素噪声下内参数的 RMS 误差。(a) x_0 ;(b) y_0 ;(c) f ;(d)最大残余畸变

Fig. 5 RMS errors of intrinsic parameters under different pixel noises of star points.

(a) x_0 ; (b) y_0 ; (c) f ; (d) maximum residual distortion

由图 5(a)~(d)可知,在同一噪声水平下,ACC 方法的标定精度优于 IAC 方法的,且随着噪声的增大,其标定效果比 IAC 方法的更优,说明 ACC 方法的稳健性更佳。

4 总 结

提出了一种基于 ACF 的星敏感器标定算法,该方法利用 ACF 算法思想,将多帧动态星图关联在某一帧星图上,有效增加了标定的可用星点数,解决了现有依赖姿态解算的标定方法只能进行室内静态标定的问题,并能同时得到星敏感器相对于陀螺组合体的安装矩阵。仿真结果表明,该方法在不借助精密标定仪器的情况下,通过在大气环境良好的地点对晴朗夜空进行恒星拍摄,其标定精度优于基于星角距的标定方法的,稳健性更佳,且操作简单、便于实施、计算速度快,可以为船载、机载惯性/天文组合导航系统的动态标定提供一种可选的解决方案。需要指出的是,由于在室外进行恒星拍摄时,星点的提取精度不高,因此提出的 ACF 标定方法难以达到室内通用标定方法的精度水平,其可作为缺乏高精度标定设备条件下的一种折中标定方案。

参 考 文 献

- [1] Liebe C C. Accuracy performance of star trackers—a tutorial[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2002, 38 (2): 587-599.
- [2] Griffith D T, Singla P, Junkins J L. Autonomous on-orbit calibration approaches for star tracker cameras[J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2002, 112: 39-57.
- [3] Paulsen T E, Maresi L. Calibration and verification of the TERMA star tracker for the NEMO satellite[C]. AIAA Space 2000 Conference & Exposition, 2000: AIAA-2000-5338.
- [4] Zhong Hongjun, Yang Mengfei, Lu Xin. Calibration method of star sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1343-1348.
钟红军, 杨孟飞, 卢欣. 星敏传感器标定方法研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1343-1348.
- [5] Jiao Hongwei, Pan Liang, Zhang Tongshuang. A new atmospheric refraction correction method of star sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0901004.
焦宏伟, 潘良, 张同双. 一种星敏传感器蒙气差修正的新方法[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0901004.
- [6] 张广军, 郝雪涛, 江洁. 一种星敏传感器内外方元素校准方法: CN1949002[P]. 2007-4-18.
- [7] Liu H B, Li X J, Tan J C, *et al.* Novel approach for laboratory calibration of star tracker[J]. Optical Engineering, 2010, 49(7): 1-9.
- [8] Sun T, Xing F, You Z. Optical system error analysis and calibration method of high-accuracy star trackers[J]. Sensors, 2013, 13(4): 4598-4623.
- [9] Li Y T, Zhang J, Hu W W, *et al.* Laboratory calibration of star sensor with installation error using a nonlinear distortion model[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2014, 115: 561-570.
- [10] Wei X G, Zhang G J, Fan Q Y, *et al.* Star sensor calibration based on integrated modeling with intrinsic and extrinsic parameters[J]. Measurement, 2014, 55: 117-125.
- [11] Xiong K, Wei X G, Zhang G J, *et al.* High-accuracy star sensor calibration based on intrinsic and extrinsic parameter decoupling[J]. Optical Engineering, 2015, 54(3): 1-12.
- [12] Samaan M A, Griffith D T, Singla P, *et al.* Autonomous on-orbit calibration of star trackers[C]. Core Technologies for Space Systems Conference, 2001: 1-8.
- [13] Yuan Yanhong, Geng Yunhai, Chen Xueqin. Autonomous on-orbit calibration of star sensor[J]. Aerospace Shanghai, 2008, 25(3): 3-10.
袁彦红, 耿云海, 陈雪芹. 星敏传感器自主在轨标定算法[J]. 上海航天, 2008, 25(3): 3-10.
- [14] Liu H B, Wang J Q, Tan J C, *et al.* Autonomous on-orbit calibration of a star tracker camera[J]. Optical Engineering, 2011, 50(2): 1-8.
- [15] Liu Haibo, Wang Wenxue, Chen Shengyi, *et al.* Star tracker ground calibration based on the invariant of interstar angles[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(6): 48-52.
刘海波, 王文学, 陈圣义, 等. 利用星角距不变性标定星敏传感器内部参数[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(6): 48-52.
- [16] Zhou F Q, Ye T, Chai X H, *et al.* Novel autonomous on-orbit calibration method for star sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67: 135-144.
- [17] Qin S Q, Zhan D J, Zheng J, *et al.* A dynamic attitude measurement method of star sensor based on gyro's precise angular correlation: US14/569209[P]. 2014-12-12.
- [18] Ma L H, Zhan D J, Jiang G W, *et al.* Attitude-correlated frames approach for a star sensor to improve attitude accuracy under highly dynamic conditions[J]. Applied Optics, 2015, 54(25): 7559-7566.