

doi:10.3788/gzxb20154409.0923002

基于最小损失函数法进行三视场天文 定位定向的误差分析

王昊京¹, 王建立¹, 吴量^{1,2}, 李正炜¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 1300332)

(2 中国科学院大学, 北京 130033)

摘 要:研究了基于最小损失函数法的三视场定位定向中各个误差源对定位定向准确度的影响. 给出了基于最小损失函数进行三视场天文定位定向的数学模型, 结合模型归纳了定位定向的误差源及其特性, 分析了误差源对定位定向信息对的影响. 最后, 建立了定位定向误差仿真模型, 并利用蒙特卡罗法进行误差仿真分析. 仿真结果表明系统的定位准确度为 88.1 m, 定向准确度为 3.0". 分析指出定位定向主要的误差源是水平测量误差, 其次是垂线偏差数据误差. 野外实验表明, 该系统的定位准确度为 163.0 m, 定向准确度为 3.5", 水平测倾角的误差对定位定向结果的影响较大.

关键词:误差分析; 损失函数; 定位定向; 三视场; 天文导航

中图分类号: U675.6; P128.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)09-0923002-9

Error Analysis of Three FOVs Celestial Positioning and Orientation with Minimum Loss Function

WANG Hao-jing¹, WANG Jian-li¹, WU Liang^{1,2}, LI Zheng-wei¹

(1 *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The influence of each error source on the position and orientation determination accuracy in three fields of view celestial positioning and orientation method based on minimum loss function was researched. Firstly, the mathematical model of celestial positioning and orientation of three fields of view based on the minimum loss function was proposed. Secondly, the characteristic and the probability distribution of error source were summarized, the impact of error sources on positioning and orientation information pair was analyzed. Finally, the position and orientation error simulation model was established, and the error simulation was done by using Monte Carlo method. The simulation results show that the mean of position accuracy is 88.1 m, and the mean of orientation accuracy is 3.0". We point out that dominant error source is horizontal measurement error, and next one is vertical deviation data error. Outdoor experiments show that the mean of positioning accuracy is 163.0 m, the mean of orientation accuracy is 3.5", and the horizontal measurement error is the main influence on the overall result.

Key words: Error analysis; Loss function; Position and orientation determination; Three fields of view; Celestial navigation

OCIS Codes: 230.2090; 230.0230; 200.4740; 350.1260

基金项目: 中科院国防科技创新基金(No. CXJJ-10-M53)资助

第一作者: 王昊京(1983-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为图像处理、导航光电系统设计. Email: wanghaojing@vip.qq.com

收稿日期: 2015-04-27; 录用日期: 2015-06-19

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

天文导航是古老而基本的定位定向方式,以其准确度高、隐蔽性好、可靠性优、自主性强等优势,在导航中占有重要地位^[1].为了改善天文导航系统的可靠性,提高导航准确度,基于多视场光电探测系统的天文导航成为新的发展方向.国外已经研发出相关的产品,如美国 Trex 公司的多视场恒星跟踪器,可全天时为航海提供定位定向信息^[2];法国 SODERN 公司三视场结构的 HYDRA 星敏感器,可应用于航天器的姿态测量领域^[3-4].国内在多视场天文导航方面起步较晚,北京航空航天大学^[5-6],清华大学^[7],以及中科院长春光机所^[8,11-12]等单位对于多视场天文导航系统的工作模式进行了研究,但均未涉及到定位定向误差源的研究.

现有误差分析研究多是基于高度差法进行的,而关于垂线偏差、极移误差、大气折射等误差源对定位定向准确度影响的研究则较少涉及.文献[10]指出定位定向准确度分析中水平测量准确度越高,则定位准确度越高,但并未进行定量分析,也没有探讨定向准确度受到的影响及其他误差源对定位定向准确度的影响.文献[9]给出一种非迭代的月球车天文定位方法,实质上是用解析几何法进行定位定向,但其同样未对影响定位定向准确度的误差源做出全面分析.文献[11]指出了所有误差源的组成,但并未定量分析垂线偏差误差对定位定向的影响.由于没有使用垂线偏差数据库^[2,6,8,11],定位定向结果停留在天文学意义上,即使少部分学者测量出实验地点的垂线偏差数据,进行地理学上的定位定向实验,但由于缺少完善的数据,难以分析垂线偏差误差在全球范围内对定位定向准确度的影响.

本文以三视场定位定向设备本身作为研究载体,建立了基于最小损失函数法进行定位定向的原理模型,结合原理模型给出影响定位定向准确度的误差源及其特性,并建立定位定向误差模型.采用蒙特卡罗法分析各个误差源对定位定向准确度的影响,结合实验结果区分主要、次要误差源.最后,通过野外实验验证了高精度定位定向的可行性,并证实主要的误差源.

1 三视场定位定向的原理模型

1.1 定位定向的概念

图 1 是三视场天文导航设备的结构框图.它由三个小视场星敏感器构成,三个光学视场的光轴在载体坐标系 C_B 中的水平投影均匀分布,水平投影夹角为 120° ,并且三个光学视场的光轴在载体坐标系中具有相同的高度角.

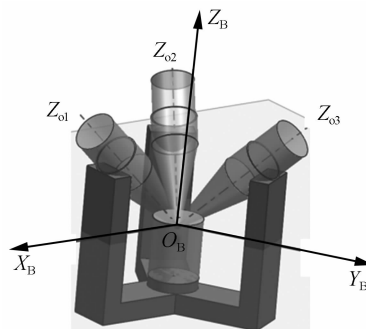


图 1 三视场定位定向设备结构框图

Fig. 1 Structural diagram of celestial navigation by three apertures

定位主要是确定设备在 WGS-84 坐标系内的经纬度.将一个地理位置标记为 $Loc(\lambda, \varphi, h)$,其中 h 为海拔(单位:m); λ, φ 分别为经度、纬度(单位:°).海拔可由海拔仪测定,定位是求解载体的经纬度信息. λ, φ, h 通过公式可以获得它在国际地球参考系 C_{ITRS} 内的矢量表示,即 V_{Loc} .

定向与东北天坐标系 C_{ENU} 相关,其 N 轴即正北方向.定向主要是确定载体坐标系轴 X_B 在水准面 ENO 内的投影 X'_B 与正北方向顺时针的夹角 Azi_B .

1.2 天文定位定向的必要条件——水平信息

完成定位定向的一个必要条件是已知载体平台的水平信息,该信息可以使用地平仪或其他双轴倾角测量设备获取,如图 2, ρ, τ 是载体坐标系 X_B 轴、 Y_B 轴与水平面 EON 之间的夹角(单位:°),在计算分析中是已知量.

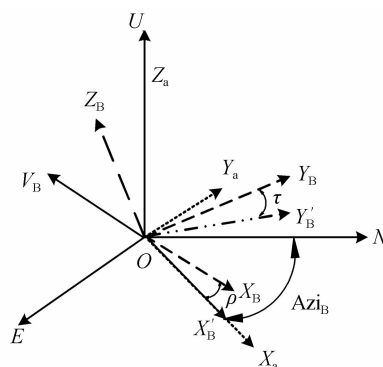


图 2 载体方位角 (Azi_B) 的定义

Fig. 2 The definition of azimuth (Azi_B) of body coordinate

在图 2 中建立辅助坐标系 C_a ,其原点和 C_B 的原点相重合, X_a 轴沿着矢量 X'_B 的方向, Z_a 轴与 C_{ENU} 的 U 轴相重合, Y_a 轴符合右手定则.由图 2 中可知坐标系 C_a 到 C_{ENU} 的转换矩阵满足

$$\mathbf{R}_a^{ENU} = \mathbf{R}_z(90^\circ - Azi_B)^T \quad (1)$$

采用 $\mathbf{R}_{xyz}(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$ 表示旋转矩阵,下标 xyz 表示旋转轴及旋转顺序; $\mathbf{R}_x(\varphi_x)$ 、 $\mathbf{R}_y(\varphi_y)$ 、 $\mathbf{R}_z(\varphi_z)$ 是标准旋转矩阵, $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ 分别是旋转角.

1.3 基于最小损失函数法进行定位定向的原理

1.3.1 定位定向信息对的计算

三视场天文定位定向系统的工作原理如图 3。定位定向是由定位定向信息对 $\{V_{ITRS}, V'_a\}$ 完成的,三个视场内任意一个视场观测到的星象可以通过计算获取其在辅助坐

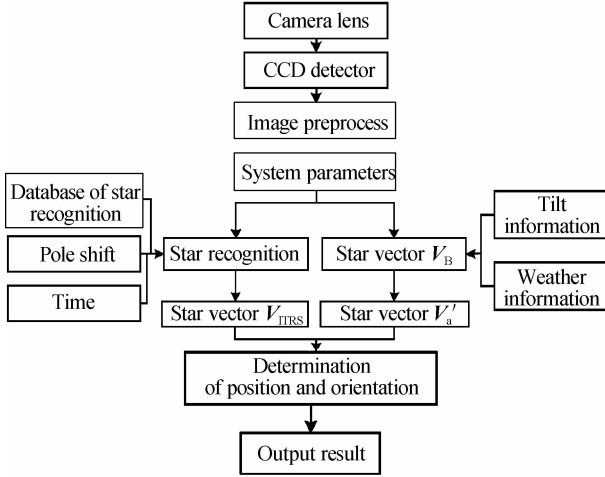


图 3 三视场天文定位定向的原理框图

Fig. 3 The functional block diagram of the three FOVs positioning and orientation equipment

标系内的矢量 V'_a , 而通过星图识别可以得到其对应的恒星在星表中的位置, 并经转换得到其在国际地球参考系的矢量 V_{ITRS} , 具体流程为:

1) 通过系统固有参量计算获得星像在载体坐标系内的位置矢量。星图通过质心提取可获取较高准确度的质心位置。由质心位置 Pt_{img} 、焦距 f_c 、探测器像元尺寸 Siz 、分辨率 Res 、主点 KP 、畸变参量 Dt 、光轴在载体中的单位矢量 $AxiVec_i = [\cos(A_i)\cos(E_i), \sin(A_i)\cos(E_i), \sin(E_i)]^T$ (其中 i 标识视场编号, A_i, E_i 分别是光轴在载体坐标系内的方位角和仰角) 以及探测器安装角 $FixAng$, 结合计算机视觉几何的原理可得第 i 个视场内的星像在载体坐标系中的位置矢量 V_B (如图 2), 满足

$$V_{Op} = fun_1(f_c, Siz, Res, KP, Dt) Pt_{img} \quad (2)$$

$$V_B = R_{zyz}(A_i, 90 - E, -90 - FixAng)^T V_{Op} \quad (3)$$

式中 Pt_{img} 采用点的齐次坐标表示, V_{Op} 是星像在光学坐标系内的位置矢量。

2) 通过水平倾角和气象信息结合星矢量 V_B 可获得星在辅助坐标系内的位置矢量。载体坐标系到辅助坐标系的转换矩阵 R_B^a 与测量角 ρ 和 τ 相关, 记为 $R_B^a(\rho, \tau)$ 。星像在辅助坐标系 C_a 内的位置矢量为

$$V'_a = R_B^a(\rho, \tau) V_B \quad (4)$$

矢量 V'_a 结合气象信息进行蒙气差校正后可得矢量 V'_a 。它是定位定向信息对中的一项目。

3) 对于质心为 Pt_{img} 的星点, 可由星图识别算法识别出星表中编号 p 的恒星 $Star^p$ 。

4) 识别到的恒星 $Star^p$ 结合时间和极移计算得到在国际地球参考系下的位置矢量。由世界协调时经天文计算可得 $Star^p$ 在真春分点赤道坐标系 (简记为 C_T) 的位置矢量 V_T 和格林威治视恒星时。在计算位置矢量 V_T 时, 需考虑自行、光行差、岁差等模型。格林威治视恒星时对应的角度记作 Ang_{GAST} , 则恒星在地球过渡参考坐标系 C_{TIRS} 的位置矢量为

$$V_{TIRS} = R_z(-Ang_{GAST}) V_T \quad (5)$$

坐标系 C_{TIRS} 至 C_{ITRS} 的转换与极移参量 (x_p, y_p) 有关^[13], 该参量可由国际地球自转和参考系服务处提供。恒星在国际地球参考系内的位置矢量可由式 (6) 获取, 即

$$V_{ITRS} = R_{ITRS}^{TIRS} V_{TIRS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & y_p \\ -x_p & y_p & 1 \end{bmatrix} V_{TIRS} \quad (6)$$

式中 x_p, y_p 的单位为弧度, 该矢量是定位定向信息对的另外一项。

至此可得到某个星象的定位定向信息对 $\{V_{ITRS}, V'_a\}$, 它是进行定位定向的已知条件。

1.3.2 定位定向原理

在忽略垂线偏差时, 矢量 V_{ITRS} 可转换到东北天坐标系内, 即

$$V_{ENU} = R_{ITRS}^{ENU}(\lambda, 90^\circ - \varphi, 90^\circ) V_{ITRS} \quad (7)$$

由式 (7) 可以建立关系式为

$$\begin{cases} V_a = R V_{ITRS} \\ R = R_{ENU}^a(90^\circ - Azi_B) R_{ITRS}^{ENU}(\lambda, 90^\circ - \varphi, 90^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

式中矩阵 R 是带有三个未知量的姿态转换矩阵。假设系统识别出 N 颗星, 则可建立转换关系式为

$$V_B^i = R V_{ITRS}^i, 1 \leq i \leq N \quad (9)$$

一般情况下有多个不平行的星点定位定向信息对可用。当 $N > 3$ 时, 由于星点矢量存在误差, 一般无法解出能够同时满足式 (9) 中所有等式的矩阵 R 。矩阵 R 的求解成为一个“超定”问题。为了充分利用全部的观测数据, 只能利用统计方法, 寻找最优结果。建立损失函数为

$$J(R) = \sum_{i=1}^N |V_B^i - R V_{ITRS}^i|^2 \quad (10)$$

求解满足损失函数最小的矩阵 R , 即为星敏感器定姿应用中经常需要解决的 Wabha 问题, 可通过 q -方法^[14]、QUEST 方法^[15] 等求解。获得满足损失函数最小的矩阵 R , 就可得出满足损失函数最小意义上的定位定向信息。

该方法与高度差法、空间解析几何法等相比, 优势在于: 可同时解算位置和方向, 不需要先定位后定向, 定向结果不受定位误差影响。它将定位定向问题转化为 Wabha 问题求解, 能给出位置和方向信息的最优解, 准确度高。

1.3.3 垂线偏差校正

由于空间测量技术的发展及地球重力模型测量方法的进步,美国国家地理重力模型开发小组发布了全球范围内的垂线偏差数据,可由地理数据共享平台离线获取^[20].

不考虑垂线偏差时,定位定向的结果是天文学意义上的.在考虑垂线偏差时可以获得地理学意义上的定位定向.而式(10)求得的结果实际忽略了垂线偏差的影响,故其求解结果是天文学意义上的经纬度和方向角.

在 WGS-84 坐标系内将垂线偏差的两个分量记作 (η, ξ) ,单位为度,其中 η 是垂线偏差由南向北方向的分量, ξ 是垂线偏差由西向东方向的分量.天文经纬度 (Δ, Φ) 和地理经纬度 (λ, φ) 的关系为^[16]

$$\begin{cases} \varphi = \Phi - \xi \\ \lambda = \Delta - \eta \sec \varphi \end{cases} \quad (11)$$

天文学的定向结果 Az_{iB} 与地理学的定向结果 Az'_{iB} 之间的关系为

$$Az'_{iB} = Az_{iB} - \eta \tan \varphi \quad (12)$$

即完成了地理学上的定位和定向解算.

2 影响定位定向准确度的误差源及其特性

在完成定位定向过程中,涉及众多参量,其中有些是由传感器获取的,有些是标定获取的,有些与物理模型相关.这些误差都将引入计算过程中,最终对定位定向的准确度造成影响.除垂线偏差外,其他类型误差均会对定位定向信息造成影响,进而影响到定位定向结果.各个误差源及其特性见表 1.

表 1 主要误差源的分布特性
Table 1 Distribution characteristics of main errors

Item	Parameters	Parameters description	Error notation	Probability distribution	Types of probability distribution
1	ρ	Measurement error of X axis in the tilt sensor	$\Delta\rho$	$0.005^\circ(\pm 10^\circ), 0.003^\circ(\pm 7^\circ), 0.001^\circ(\pm 3^\circ)$	t distribution
2	τ	Measurement error of Y axis in the tilt sensor	$\Delta\tau$	$0.005^\circ(\pm 10^\circ), 0.003^\circ(\pm 7^\circ), 0.001^\circ(\pm 3^\circ)$	t distribution
3	Temp	Temperature measurement error of meteorological sensors	ΔTemp	$N(0, 0.02^\circ)$	Normal distribution
4	Hu	Humidity measurement error of meteorological sensors	ΔHu	$N(0, 2\%)$	Normal distribution
5	Pr	Pressure measurement error of meteorological sensors	ΔPr	$N(0, 0.3\text{hpa})$	Normal distribution
6	$P_{t\text{img}}$	Error of centroid extraction	$\Delta P_{t\text{img}}$	$N(0, 0.051/\text{Pixel})$	Normal distribution
7	A_{V_B}	Angle errors caused by installation parameters and optical parameters calibration	ΔA_{V_B}	$N(1.710'', 1.153'')$	Normal distribution
8	Z_{V_B}	Azimuth errors caused by installation parameters and optical parameters calibration	ΔZ_{V_B}	$[0, 360^\circ)$	Uniform distribution
9	x_p, y_p	Error caused by ignoring pole shift	$\Delta x_p, \Delta y_p$	$\Delta x_p \in (-0.4'', 0.4''), \Delta y_p \in (-0.3'', 0.6'')$	Uniform distribution
A	η, ξ	Error of deflection of the vertical	$\Delta\eta, \Delta\xi$	$\Delta\eta \sim N(0.663'', 0.723''), \Delta\xi \sim N(0.659'', 0.724'')$	Normal distribution
B	V'_a	Error caused by atmospheric refraction correction model	$\Delta V'_a$	$(-0.9'', 0.9'')$	Uniform distribution

2.1 传感器类误差

1) 水平倾角传感器

水平倾斜角传感器是商用的全温补高准确度数字倾角测量设备.它标称的单轴标准差为 $0.005^\circ(\pm 10^\circ), 0.003^\circ(\pm 7^\circ), 0.001^\circ(\pm 3^\circ)$,由于测量次数不多,应符合 t 分布.水平倾斜角的测量误差会影响到定位定向信息对中 V'_a 的计算准确度.

2) 时间准确度

设备的时间由时间通信系统提供,属于原子时,很稳定.时间通信系统的准确度为 10^{-11} s,而曝光时间锁存的极限误差为 $4.8 \mu\text{s}$.

在真春分点赤道坐标系下 67 ms 的世界协调时误差会引起恒星约 $1''$ 的误差,故上述时间系统误差引起的恒星矢量 V_r 极限误差为 7.2×10^{-5} .恒星矢量由 C_r

到 C_{TIRS} 的转换后,最终对定位定向信息对中 V_{ITRS}^i 的影响在毫角秒级别,其对应的位置误差在 0.1 m 以下。

故在定位定向的仿真分析中可忽略时间误差造成的影响。

3) 大气折射

温湿压传感器用于恒星的大气折射校正时,设备的标称误差为:温度 Temp 的标准差为 0.2℃;湿度 Hu 的标准差为 2%RH;大气压测量 Pr 的标准差为 0.3hPa,参量符合正态分布.大气参量测量的准确度影响大气校正的准确度,对定位定向信息对中 V_{a}^i 造成影响。

4) 质心提取

在信噪比为 10 时,质心定位在 x 、 y 分量方向的标准差为 0.051,符合正态分布.该参量由质心提取标定实验完成,与多数文献的准确度一致^[19].质心提取的准确度影响定位定向信息对中的 V_{a}^i 。

2.2 设备标定误差

光学系统标定参量包括三个视场的焦距 f_{ci} 、主点 KP_i 、畸变参量 Dt_i 、光轴在载体中的方位角和仰角 A_i 、 E_i ,以及探测器安装角 FixAng_i 。

这些参量由标定获取,光学系统参量的标定误差通过式(2)、(3)传递,影响到真值 V_{B} 的计算.标定参量的优化值 $\{f_{\text{ci}}, KP_i, Dt_i, A_i, E_i, \text{FixAng}_i\}'$ 是通过多个星点组成的 $\{\text{Pt}_{\text{img}}, V_{\text{B}}\}$ 通过优化分析得到的,此时由 Pt_{img} 通过式(2)、(3)可以得到估计值 V_{B}' .光学系统标定参量的误差可以由估计值 V_{B}' 与真值 V_{B} 之间关系表示。

通过标定实验数据的合成分析发现:在空间中 V_{B}' 绕着 V_{B} 在其周围随机分布, V_{B} 与 V_{B}' 之间的角距符合正态分布,均值为 1.710",标准差为 1.153"; V_{B}' 相对 V_{B} 的方位角 $[0^\circ, 360^\circ)$ 之间均匀分布.即估计值 V_{B}' 以 V_{B} 为轴,角距差为半径,在其圆周上随机分布.三个视场光轴的相对指向误差(方位角 A_i 和仰角 E_i),最终也反映到设备标定误差($\Delta A_{V_{\text{B}}}$ 、 $\Delta Z_{V_{\text{B}}}$)上。

2.3 其他类型误差

1) 极移

极移参量由国际地球自转和参考系服务处提供,准确度可由其发布的公告 A 给出.公告 A 认为未来 40 天的预测极移极限误差不超过 0.02",将其视为均匀分布.且自观测以来极移参量范围 $x_p \in (-0.4'', 0.4'')$, $y_p \in (-0.3'', 0.6'')$ ^[17-18]。

若无法正确获取公告 A 的内容则需要将极移参量设置为 0,那么式(6)中 C_{TIRS} 至 C_{ITRS} 的转换矩阵为单位矩阵。

若在计算分析中忽略极移,则极移数值也是计算的误差源之一,它影响定位定向信息对中 V_{ITRS}^i 的计算准确度。

2) 垂线偏差

美国国家地理重力模型开发小组发布了地球重力场 EGM2008 的数据,它包含了垂线偏差(η, ξ)的数据,且全球覆盖^[20].其中 η 分量的误差 $\Delta\eta$ 为正态分布,满足 $\Delta\eta \sim N(0.663, 0.723)$; ξ 分量的误差 $\Delta\xi$ 也为正态分布,满足 $\Delta\xi \sim N(0.659, 0.724)$ ^[20]。

3) 大气折射模型的准确度

在计算中采用修正的 Bennett 大气折射校正公式,其极限误差为 0.9"^[21],误差分布没有参考,以均匀分布对待.它主要影响到蒙气差校正后的恒星矢量 V_{a}^i 的准确性.三视场的定位定向设备视场较大,恒星成像为点目标,一般不考虑大气视宁度的影响。

4) 恒星位置计算误差

使用国际天文联合会维护的标准天文计算软件包 SOFA 进行恒星位置计算^[22].恒星理论位置在国际天文坐标系框架下采用 IAU2000B 的岁差章动模型计算获得,软件包 SOFA 在计算中考虑了自行、岁差章动、光行差等因素的影响.恒星在真春分点赤道坐标系中位置矢量 V_{T} 的计算准确度较好,为 10^{-3} "^[13],故本文忽略恒星矢量 V_{T} 的误差,不考虑恒星位置的计算对定位定向信息对中 V_{ITRS}^i 的影响。

3 定位定向误差的建模分析

表 1 是影响定位定向的主要误差源的分布特性.从误差源及其特性的分析中可以看出:各个误差源对定位定向信息对的影响不同,在定位定向过程的不同步骤中引入不同的误差.由式(8)、(10)可知误差源对定位定向误差造成的影响是非线性的,无法给出明确的数学解析表达式.此时采用理论分析方法区别主要误差源、次要误差源很困难,而采用蒙特卡罗法使用大量随机仿真实验进行误差分析则最为简便、合适,不仅可以定性分析,而且可以给出量化结果。

在不同的随机仿真分析中,首先将某个误差源单独添加进行分析,确定单独误差源的影响;再添加所有误差源进行分析,确定误差源对准确度的总体影响;最后通过对比分析不同误差源对定位定向准确度的影响。

仿真实验中,设置三个视场均为 $[4.5^\circ \ 3.3750^\circ]^\text{T}$,三个光轴的水平投影间隔 120° ,高度角 45° ,CCD 分辨率为 1024×768 ,像素尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$;主点位置在 CCD 的靶面中心,且光学系统无畸变,极限探测能力为 7 等星.采用可见光波段的 Tycho2 星表作为基本星表,其历元为 J2000.0;仿真过程中计算恒星位置时,时间设置为 2014-10-10:0:0;载体平台的倾角为 $(0^\circ, 0^\circ)$,即载体坐标系与水平辅助坐标系重合.图 4 是定位定向误差仿真分析的流程图,其中质心 Pt_{img} 的计算流程如图 5。

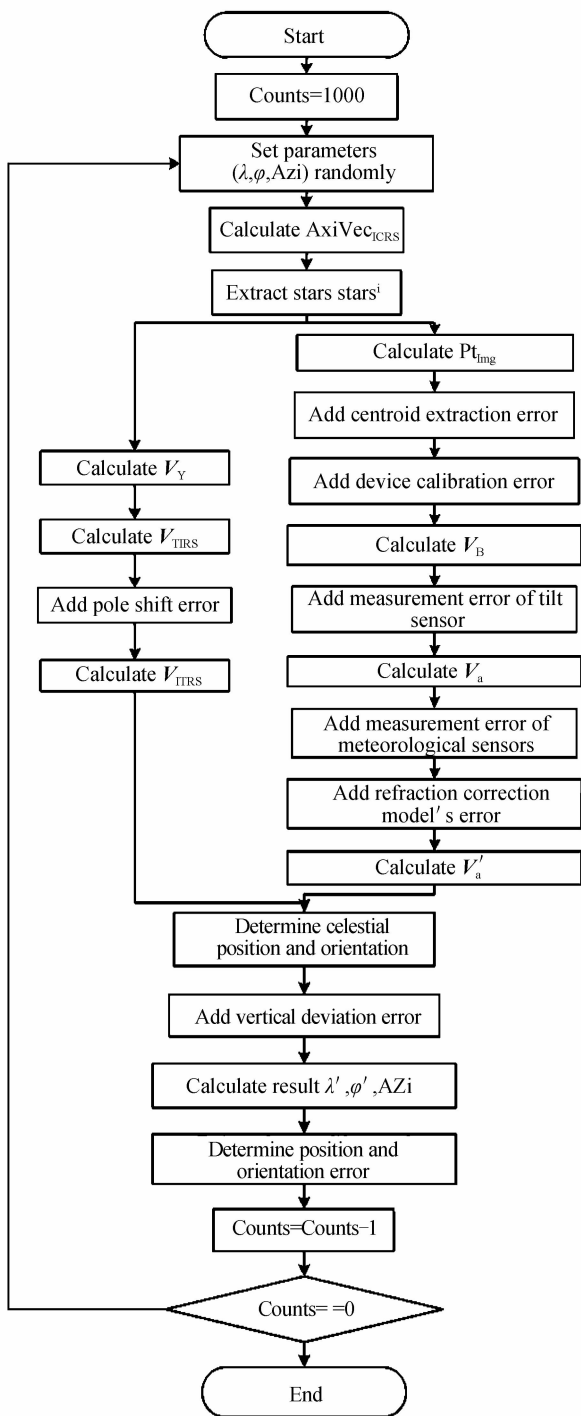


图 4 定位定向误差仿真流程

Fig. 4 Flow chart of positioning and orientation determination

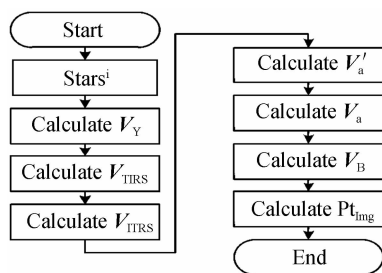


图 5 Pt_{img} 计算流程

Fig. 5 Flow chart of Pt_{img} computation

3.1 定位定向误差建模的流程

1) 设置最大仿真次数 Counts=1000, 每次随机选取载体的理论地理位置和方位角作为定位定向参考真值; 其中, 经度 λ 在 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 上服从均匀分布, 纬度 φ 在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 上服从均匀分布, 方位角 Azi 在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 上服从均匀分布, 海拔设为固定值 200 m.

2) 据地理位置、方位角以及其他设置条件, 通过坐标变换可以得到每个光轴在国际地球坐标系内的单位矢量 $AxiVec_{ICRS}$, 并根据视场大小从星表中提取每个视场内的恒星集合 $Star_i$. 在仿真实验中忽略星图识别的过程. 直接由时间信息获得恒星集合在真春分点赤道坐标系内的位置矢量 V_i , 然后计算恒星在地球过渡参考坐标系中的矢量 V_{ITRS} , 对其添加极移误差计算其在国际地球参考坐标系内的矢量 V_{ITRS} . 它是定位定向信息对的一项.

3) 使用星图模拟中常用的方法可计算图 4 中提取到的恒星集合 $Star_i$ 在图像坐标系内的质心位置, 计算流程如图 5. 计算过程中使用的极移参量、地理经纬度和方位、大气参量、水平侧倾角、光学标定参量等都是仿真条件中提到的理论值, 没有添加误差, 故得到质心位置是无误差的理论真值.

4) 如图 4, 对计算出的质心位置 Pt_{img} 添加各种误差, 顺次计算得到 V'_a . 它是定位定向信息对的另外一项.

5) 由加入误差的定位定向信息对完成天文定位定向, 并结合垂线偏差数据完成地理学意义上的定位定向, 即求取到经度 λ' , 纬度 φ' , 方位角 Azi'. 它们是真值 λ, φ, Azi 的估计值.

6) 通过式 (13)、(14) 计算定位定向误差, 完成一次仿真.

7) 最大仿真次数减 1, 重复 1)~6) 直至 Counts 为 0, 仿真过程结束.

3.2 定位定向误差的计算方法

每次仿真中设置位置 $Loc(\lambda, \varphi, h)$ 和方位角 Azi, 与仿真定位定向结果 $Loc(\lambda', \varphi', h), Azi'$ 相对应. 其定位的误差 DistErr 和定向的误差 AziErr 为

$$DistErr = |V_{Loc} - V_{Loc'}| \quad (13)$$

$$AziErr = |Azi - Azi'| \quad (14)$$

由大量的定位定向误差实验数值可以获得定位误差的均值 $M_{DistErr}$ 和定向误差的均值 M_{AziErr} , 以及定位误差的平均偏差 $MS_{DistErr}$ 和定向误差的平均偏差 MS_{AziErr} . 其中平均偏差 MS 的定义为

$$MS = \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{X}| / n \quad (15)$$

式中 \bar{X} 是样本 x_i 的均值, 平均偏差与标准差相比对粗大误差的抗干扰能力更强; 在数值上和标准差近似.

4 仿真实验结果

4.1 实验结果

4.1.1 加入所有误差源时的结果

据表 1 中给定的各个误差源,首先添加所有的误差进行综合仿真分析,给出在所有误差源影响下的定位定向准确度.

在分析同时加入所有误差源对定位定向的影响时,水平倾角传感器的测量误差采用单轴标准差 $0.001^\circ(\pm 3^\circ)$,其他数据如表 1. 图 6 和图 7 给出了定位定向误差的仿真结果. 图 6 中定位误差的均值为 88.1 m,平均偏差为 44.0 m;图 7 中定向误差的均值为 $3.0''$,平均偏差为 $2.4''$.

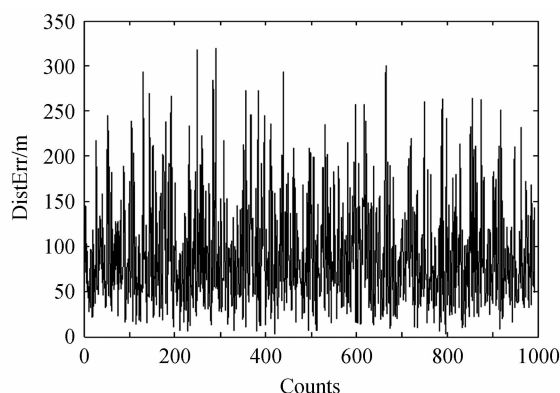


图 6 定位误差的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of position fix error

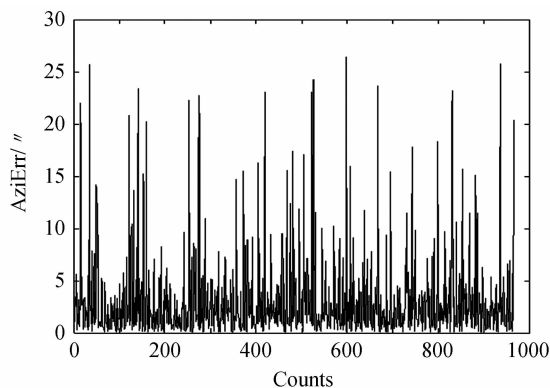


图 7 定向误差的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of azimuth fix error

4.1.2 加入单一误差源时的结果

单独添加各个误差源,测试独立误差源对定位定向结果的影响.

将表 1 中的误差分为 6 项,每项与表中编号对应关系为: I 水平倾角传感器测量误差(1、2)、II 质心提取误差(6)、III 光学系统标定参数的误差(7、8)、IV 气象参量测量及蒙气差校正的误差(3、4、5、B)、V 忽略极移的误差(9)、VI 垂线偏差数据自身的误差(A). 仿真过程中添加的水平倾角传感器单轴标准差为 $0.001^\circ(\pm 3^\circ)$,其它数据如表 1.

表 2 是定位误差的仿真结果. 可以看出水平倾角传感器的测量误差对定位影响最大,其次是垂线偏差数据库中的数据误差. 表 3 是定向误差的结果. 可以看出,水平倾角传感器的测量误差对定向准确度影响最大,光学系统参量标定误差引起的定向误差位居其次,但垂线偏差的数据误差影响也较大.

表 2 单独添加各组误差时定位误差的仿真结果

Table 2 Simulation results of position fix error when adding different group noises separately

Error category	I	II	III	IV	V	VI
$M_{DistErr}/m$	80.1	3.2	6.3	2.0	9.6	34.2
$MS_{DistErr}/m$	42.4	1.4	2.6	1.2	6.7	18.5

表 3 单独添加各组误差时定向误差的仿真结果

Table 3 Simulation results of azimuth fix error when adding different group noises separately

Error category	I	II	III	IV	V	VI
$M_{AziErr}/('')$	2.5	0.2	0.3	0.1	1.0	1.6
$MS_{AziErr}/('')$	1.9	0.1	0.2	0.1	1.1	1.7

4.1.3 水平倾角传感器测量误差对定位定向的影响

水平倾角传感器是最大的误差源,表 4 给出了水平倾角传感器在不同单轴测量误差时的定位定向仿真结果. 可以看出随着单轴测量误差的增大,定位定向误差急剧增大.

表 4 不同水平倾角测量误差时定位定向误差的仿真结果

Table 4 Simulation results of position and azimuth fix error when adding different levels of inclination measurement noises

$\Delta\rho, \Delta\tau/(^\circ)$	0.001	0.003	0.005
$M_{DistErr}/m$	80.1	239.6	404.5
$MS_{DistErr}/m$	42.4	124.9	217.2
$M_{AziErr}/('')$	2.5	6.9	11.8
$MS_{AziErr}/('')$	1.9	4.6	8.3

4.1.4 质心提取误差对定位定向的影响

表 5 给出了三种不同的质心提取准确度时的仿真

表 5 不同质心提取误差时定位定向误差的仿真结果

Table 5 Simulation results of position and azimuth fix error when adding different centroid extraction noises

$\Delta Pt_{img}/pixel$	0.01	0.03	0.051	0.1
$M_{DistErr}/m$	0.9	2.1	3.2	6.0
$MS_{DistErr}/m$	0.6	1.0	1.4	2.5
$M_{AziErr}/('')$	0.0	0.1	0.2	0.3
$MS_{AziErr}/('')$	0.0	0.1	0.1	0.3

结果,可以看出质心提取准确度对定位定向的影响不大.

4.2 实验结论

由仿真分析可知,水平侧倾角的准确度对定位定向的影响最大,选用高准确度的水平倾角测量设备或者水平测量方法是提高导航准确度的关键.

垂线偏差数据对定位定向的准确度影响位居其次. 在实践中,可以忽略极移误差、气象参量测量及蒙气差校正的误差. 质心提取的准确度对定位定向准确度影响有限,但在实践中质心提取的准确度可以

影响星图识别的效率,故需要给予重视.

5 野外实验

图 8 是三视场定位定向设备的实验平台,选择三台单色工业 CCD 相机进行实验.分辨率为 $1\ 024 \times 768$,像素尺寸为 $4.65\ \mu\text{m} \times 4.65\ \mu\text{m}$,光学视场约为 $[4.5^\circ\ 3.3750^\circ]^T$.水平倾角传感器的使用范围为 $\pm 3^\circ$,其他误差源与表 1 基本一致.白天的实验验证需要采用三台大靶面短波红外相机构成红外光学系统,成本高昂,故本实验仅仅选取三台可见光波段 CCD 相机搭建,它具备夜晚实验的能力,可验证系统的可行性,并验证系统主要的误差源.



图 8 三视场定位定向设备简易实验平台

Fig. 8 The experiment platform of the three FOVs position and orientation determination equipment

将平台放置在长春光机所内实验场中进行实验.平台下部有一个转台,三个光轴固定在平台之上,通过控制转台的转动可以随意变换平台的姿态,平台码盘的分辨率为 $1''$,通过调整平台可以使其平台的倾角传感器测量值读数为 $(0'', 0'')$.GPS 的测量位置为 $(125^\circ 24' 16''\text{E}, 43^\circ 50' 45''\text{N}, 201\ \text{m})$,通过北极星校正标校的系统方位角为 64.4367° .

图 9 和图 10 为定位定向结果.实验中每间隔 $1\ \text{s}$ 进行一次定位定向解算,实验过程持续 $1\ 000\ \text{s}$,获取 $1\ 000$ 个结果样本.其中定位误差为 $193.4\ \text{m}$,平均偏差为 $7.1\ \text{m}$,定向误差为 $8.1''$,平均偏差为 $1.9''$.

通过人工精细微调平台,并标定平台水准面.此时水平倾角传感器读数改变了数角秒,再次重复上述实验.经数据分析得出:定位误差为 $163.0\ \text{m}$,平均偏差为 $7.6\ \text{m}$,定向误差为 $3.5''$,平均偏差为 $1.5''$.水平传感器测量误差、EGM2008 数据库中的垂线偏差误差是两次实验中的固定误差,它决定定位定向误差的均值.而质心提取的误差、温度变化造成光学系统参量改变、

平台水平的缓慢改变等因素最终影响了定位定向误差的平均偏差.两次实验中,水平倾角传感器的输出均在 0.001° 范围内,而定位定向的结果与表 4 的仿真数值基本一致.

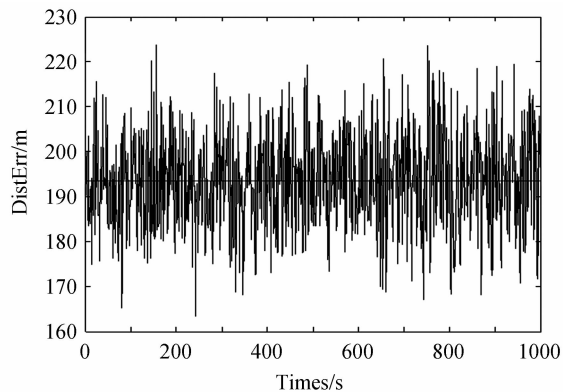


图 9 定位误差的野外实验结果

Fig. 9 Field experiment results of position fix error

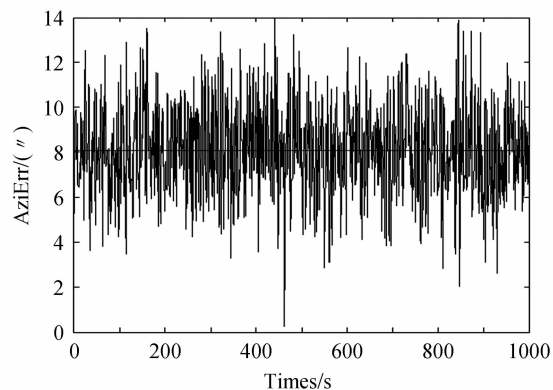


图 10 定向误差的野外实验结果

Fig. 10 Field experiment results of azimuth fix error

显然载体平台水平倾角传感器的测量误差对结果影响很大,显著影响定位定向的准确度.由于实验条件的限制,实验场地无精确的垂线偏差数据,故无法验证垂线偏差误差源对定位定向结果的影响.

6 结论

根据基于最小损失函数进行三视场定位定向的原理,采用蒙特卡罗法定量分析了各个误差源对定位定向准确度的影响.较为全面地研究了误差源及其特性,并建立了定位定向误差的仿真模型.除常见的质心误差、水平倾角误差外,还分析了垂线偏差数据误差、极移误差等误差源对定位定向准确度的影响.仿真实验表明载体平台的水平倾角测量误差是定位定向误差的主要来源,垂线偏差对定位定向的影响也十分显著.外场实验结果也表明水平倾角是主要的误差源,使用本文算法的三视场天文定位定向系统的定位准确度约为 $163.0\ \text{m}$,定向准确度约为 $3.5''$,可以实现较高准确度的天文定位定向.

参考文献

- [1] WANG An-guo. Celestial navigation technique in the background of navigation war the history, present situation and developing tendency of celestial navigation technique[J]. *Process in Astronomy*, 2001, **19**(2): 325-330.
王安国. 导航战背景下的天文导航技术——天文导航技术的历史、现状及其发展趋势[J]. *天文学进展*, 2001, **19**(2): 325-330.
- [2] Trex Enterprises Corp. Daytime stellar imager for attitude determination[P]. US, 7,349,803 B2, 2008-3-25.
- [3] Sodern. Star trackers; hydra family. 2009[2014] [EB/OL]. http://www.sodern.com/sites/en/ref/Star-Trackers-HYDRA_51.html
- [4] BLARRE L, PERRIMON N, AIREY S. New multiple head star sensor (HYDRA) description and development status; a highly autonomous, accurate and very robust system to pave the way for gyroless very accurate AOCS systems [C]. Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, san Francisco, California, 2005(8):817 - 825.
- [5] YE Sheng-long, WEI Xin-guo, Fan Qiao-yun, et al. Operation mode design of multi-FOV star sensor[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, **36**(10): 1244-1247.
叶生龙,魏新国,樊巧云,等. 多视场星敏传感器工作模式设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, **36**(10): 1244-1247.
- [6] WANG Zhen, WEI Xin-guo, ZHANG Guang-jun. Structure optimization for multi-FOV star sensors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(12): 2469-2473.
王真,魏新国,张广军. 多视场星敏传感器结构布局优化[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(12): 2469-2473.
- [7] YOU Zheng, XING Fei, DONG Ying. Two FOVs star sensor and it's the star pattern method[P]. Chinese: CN1609549, 2005-04-27.
尤政,邢飞,董瑛. 双视场星敏传感器及利用其进行星图识别的方法[P]. 中国: CN1609549, 2005-04-27.
- [8] GUO Jing-min. Study on ship attitude measurement based on star sensor [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
郭敬明. 基于星敏传感器的船姿测量方法研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.
- [9] YANG Peng. Sun observation image based celestial navigation for lunar rover[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2011.
杨鹏. 基于太阳观测图像的月球车天文导航[D]. 浙江: 浙江大学, 2011.
- [10] ZHANG Sheng-yun, YANG Shi-cai, WANG Lian-zhu. Analytic geometry of space celestial positioning accuracy analysis[J]. *Tian Jin of Navigation*, 2004, **3**(2): 10-12.
张圣云,杨仕才,王连柱. 空间解析几何法天体定位准确度分析[J]. *天津航海*, 2004, **3**(2): 10-12.
- [11] WANG Hao-jing. Study on celestial navigation by three fields of view star recognition[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
王昊京. 三视场恒星识别天文导航方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- [12] WU Liang, WANG Jan-li, WANG Hao-jing, et al. Three FOVs celestial positioning and orientation with minimum loss function[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(3): 903-912
吴量,王建立,王昊京,等. 基于最小损失函数的三视场天文定位定向[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(3): 903-912.
- [13] KAPLAN G H. The IAU resolutions on astronomical reference systems, time scales, and Earth rotation models [J]. arXiv preprint astro-ph/0602086, 2006.
- [14] MARKLEY F L. Attitude determination using vector observation: a fast optimal matrix algorithm[J]. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1993, **41**(2): 261-281.
- [15] SHUSTER M D, OH S D. Three-axis attitude determination from vector observation [J]. *Journal of Guidance and Control*, 1981, **4**(1): 70-77.
- [16] HIRT C, BÜRKI B, SOMESKI A, et al. Modern determination of vertical deflections using digital zenith cameras[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2010, **136**(1): 1-12.
- [17] Earth orientation data. Bulletin A [EB/OL]. http://www.iers.org/nn_10968/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html?_nnn=true.
- [18] Earth orientation data. Polar motion [EB/OL]. 2003[2014] http://www.iers.org/nn_10398/IERS/EN/Science/EarthRotation/PolarMotion.html?_nnn=true.
- [19] WANG Xue-wei, ZHANG Chun-hua, ZHAO Zhao, et al. High accuracy centroid calculation of low SNR star image[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(6): 342-347.
王学伟,张春华,赵钊等. 低信噪比星象质心定位算法分析[J]. *红外技术*, 2009, **31**(6): 342-347.
- [20] NGA EGM development team. Description of files containing propagated error estimates from EGM2008 on global 5' × 5' grids [EB/OL]. 2008 [2014] http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/Error_Grids/README_FIRST.pdf.
- [21] 房建成,宁晓琳. 天文导航原理及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006.
- [22] International Astronomical Union. Standards of fundamental astronomy[EB/OL]. 2002[2014] <http://www.iausofa.org>.