

相机阵列在空间目标初轨确定中的应用

杨彪**, 李迎春*, 张廷华

航天工程大学电子与光学工程系, 北京 100000

摘要 将由商业相机组成的相机阵列应用于空间目标的初轨确定。介绍了相机阵列的系统概况, 结合相机阵列的技术特点, 从空间目标探测能力、定位精度、初轨确定算法改进三方面分析了将相机阵列应用于空间目标初轨确定的可行性, 提供了主要流程, 进行了实验验证。实验结果初步展示了相机阵列系统在提高极限探测星等和初轨确定精度方面的能力。

关键词 探测器; 相机阵列; 初轨确定; 天文定位

中图分类号 V423.6

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0204002

Application of Camera Array in Initial Orbit Determination of Space Targets

Yang Biao**, Li Yingchun*, Zhang Tinghua

Department of Electronics and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 100000, China

Abstract A camera array system composed of commercial cameras is applied in the initial orbit determination of space targets. The overview of the camera array system is introduced. Based on the technical characteristics of the camera array, the feasibility for the application of the camera array in the initial orbit determination is analyzed from three aspects: detection capability of space targets, positioning accuracy and improvement of initial orbit determination algorithm. The main process and the experimental verification are provided. The experimental results preliminarily demonstrate the ability for the camera array system to improve the accuracy of initial orbit determination and the detection magnitude of limit exploratory.

Key words detectors; camera array; initial orbit determination; astronomical positioning

OCIS codes 040.1240; 040.1490; 280.4788; 350.1260

1 引 言

随着航天科技的发展,越来越多的卫星被送入太空,目前可跟踪的空间目标个数超过 14000^[1],这些空间目标在军事、经济、政治上扮演着重要的角色。因此,确定这些空间目标的轨道显得十分重要。轨道确定通常涉及两个概念:初轨确定和轨道改进^[2]。轨道改进需要较长弧段的测量数据,同时还需要具有一定精度的初始信息;而初轨确定主要基于目标的短弧资料,不需要任何初始信息,具有重要意义^[3-4]。

人类对空间目标的初轨确定最早依赖于光学手段,光学观测具有直观性强、不受地面杂波干扰影响等优势^[5],但由于光学系统本身的性能限制,当目标

超过系统可探测的极限星等或极限分辨率时将无法被观测。此外,系统对目标的测角精度在很大程度上影响了初轨确定的精度。

为了提高光学系统的空间目标观测能力,多国都建立了庞大的地基光学监测系统。早期具有代表性的地基光学监测系统有美国星火靶场的 3.5 m 口径望远镜系统、美国毛伊岛的 3.67 m 口径毛伊先进光电系统等^[6],这些系统均取得了良好的监测效果,但是建设成本非常高。目前,大部分空间目标监视的发展趋势为项目更小、花费更少^[7]。

商业相机由于其成熟的生产线以及大资本研发的投入,比同等性能的科研相机要便宜很多。此外,相机阵列在提高分辨率、扩大视场、提高可探测星等等方面具有优势^[8-10],由商业相机组成的

收稿日期: 2018-07-10; **修回日期:** 2018-07-20; **录用日期:** 2018-09-29

基金项目: 国家重点研发计划

* **E-mail:** 13910953181@139.com; ** **E-mail:** 237768543@qq.com

相机阵列系统还将拥有低成本、系统可复制、操作方便、系统兼容性与可维护性高等优点。因此,研究商业相机阵列在空间目标初轨确定中的应用具有重要意义。

本文对相机阵列应用在空间目标初轨确定中的各个环节进行了研究与分析,梳理了主要流程,并从极限探测星等、空间目标定位精度、初轨算法三个方面进行了实验分析,验证了相机阵列应用于空间目标初轨确定的可行性,明确了下一步的研究方向。

2 系统简介

相机阵列系统主要由相机分系统和跟踪伺服分系统组成。相机分系统由4个相机成像单元构成,成像单元包括商业光学镜头、成像探测器和连接机构,主要用于对空间目标的探测成像。选用日本佳能公司生产的EOS-1D C型机身及焦距为400 mm、F数为2.8的LISIUSM型镜头。曝光40 ms时,单相机的探测能力可以达到10.224 MV,视场达到 $5.15^\circ \times 3.5^\circ$,总像素数为 5184×3456 ,单个像素的角分辨率约为4"。系统可工作在同视场模式和拼接视场模式。为使拼接视场最大,采用方形排布方式,镜头与外框的连接机构可微调,以实现同视场成像或大视场拼接成像两种模式的切换。镜头之间预留

100 mm的距离以适应各镜头光轴夹角的调节。

跟踪伺服系统主要负责控制相机分系统的运动,使其能够完成对空间目标的跟踪观测,它是设备跟踪目标的执行机构,主要完成系统视轴指向的精密测量和仪器的精确指向等。

系统在工程化的过程中会面临一系列问题,如多相机的天文标定^[11]、光轴指向校准(同视场模式下的光轴平行度校准和拼接视场模式下的光轴夹角校准)^[12]、系统零方位校准、多路相机时钟同步等,解决这些问题是系统探测能力的基础保证。

3 理论分析

3.1 极限探测星等

首先从理论上分析相机阵列对系统极限探测极限星等的影响。

单个相机探测器信噪比模型^[13]为

$$R_{SN} = \frac{S}{\sqrt{(S + N_{background}) + N_{readout}^2 + N_{dark}^2}}, \quad (1)$$

式中: S 为探测器产生的目标信号电子数; $N_{background}$ 为背景噪声; $N_{readout}$ 为读出噪声; N_{dark} 为暗噪声。

将 K 个相机获取的 K 帧图像配准叠加,则目标信号电子数与天空背景产生的电子数均变为原来的 K 倍,配准叠加后的图像信噪比 R_{SN1} 表示为

$$R_{SN1} = \frac{KS}{\sqrt{K(S + N_{background}) + KN_{readout}^2 + KN_{dark}^2}} = \sqrt{K}R_{SN}, \quad (2)$$

即信噪比将变为原来的 \sqrt{K} 倍,利用4个相机观测,理论上可以将信噪比提高2倍,探测星等将提高0.756^[14]。

3.2 空间目标定位

3.2.1 图像预处理

电荷耦合元件(CCD)图像的特有噪声会对星点提取及空间目标定位等产生难以预测的不良影响,因此在使用系统拍摄的图像前必须进行预处理。结合系统实际,CCD成像过程^[15]可简化为

$$I(t_0, x, y) = \int [S_{source}(t_0, x, y) + S_{sky}(t_0, x, y)] \times S_{flat}(t_0, x, y) dt + S_{bias}(t_0, x, y) + S_{dark}(t_0, x, y), \quad (3)$$

式中: I 为观测后探测器的二维输出; t_0 为观测时刻; x, y 为像素坐标; S_{source} 和 S_{sky} 分别为单位时间内CCD采集的天体和天光背景辐射的强度; S_{flat} 为CCD芯片本身的量子响应函数分布; S_{bias} 和 S_{dark} 分

别为本底场和暗场的灰度值; t 为时间。

1) 本底场处理。本底场是相机在积分时间为零的情况下得到的一幅图像,它相当于图像采集系统的零点分布。本底场一般比较稳定,但仍存在着不可预测的系统零点漂移,因此,可靠的做法是在观测当夜拍摄多幅本底场图像,求其平均后作为当夜的本底场。

2) 暗场处理。暗场是指关闭相机快门时CCD积分一段时间后暗电流分布的图像。暗场的处理主要是为了扣除图像中可能出现的“热点”。

3) 平场处理。平场反映了CCD器件灵敏度的不均匀性。当一束完全均匀的光照射在CCD上时,每个像元的响应并不完全相同,而且与入射光的波段相关。平场处理的结果在很大程度上取决于光源的均匀性。均匀光源的获得多采取三种方法:一是无亮星天区的天光,二是晨昏的太阳散射光,三是经望远镜观测室圆顶后的灯光的漫反射光。由于系统

所使用的相机视场较大,且实验条件有限,因此采取第二种方法获取系统的平场图像。

预处理过程可表示为

$$I_{\text{out}}(t_0) = \frac{I_{\text{initial}}(t_0) - I_{\text{dark}}(t_0)}{I_{\text{flat}}(t_0) - I_{\text{dark}}(t_0)} \times \frac{\sum_{i=1}^n [I_{\text{flat}}(t_i) - I_{\text{dark}}(t_i)]}{n}, \quad (4)$$

式中: $I_{\text{out}}(t_0)$ 为预处理后输出的图像; $I_{\text{initial}}(t_0)$ 为系统拍摄得到的图像; $I_{\text{flat}}(t_i)$ 和 $I_{\text{dark}}(t_i)$ 分别为系统在不同时刻 t_i 得到的平场和暗场图像; n 为图像拍摄次数。

3.2.2 星点提取算法

星点提取是计算图像中星点质心的像素坐标,并以此来表示该星点在图像坐标系中的位置。主要的质心计算方法有 Gauss 函数拟合法、中值方法和二维修正矩方法^[16]。

1) Gauss 函数拟合法

Gauss 函数拟合法一直被作为星点提取的标准算法,其本质是拟合一个高斯曲面:

$$I(x, y) = B + H \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2R^2}\right], \quad (5)$$

式中: B 为背景; H 为 Gauss 函数的峰值; R 为与某一时刻的大气稳定状态有关的参数; (x_0, y_0) 为所要求的质心坐标。可以通过牛顿非线性方程组求解方程,在此不予赘述。

2) 中值方法

中值方法提取的星点质心为将星点记录数据分成两半时的值,即在质心点左右星点轮廓所包含的面积相等,也称面积相等法。

以计算质心的 x_0 坐标为例,首先计算星点在 x 方向上的累计分布函数 $Q(x)$:

$$Q(x) = \sum_0^x M(x) = \sum_x \sum_y I(x, y), \quad (6)$$

式中: $M(x)$ 为该星点包含的所有像素点中,所有横坐标为 x 的像素点的灰度值之和。

搜索 x_0 取值,使得

$$Q(x_0) = \frac{1}{2}(Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}), \quad (7)$$

式中: Q_{max} 为 Q 的最大值; Q_{min} 为 Q 的最小值。求解 y_0 坐标的方法与求解 x_0 的方法相同。

3) 二维修正矩方法

二维修正矩方法因其算法简单、计算量小、计算速度快且精度相对较高,被广泛应用于各种空间目

标观测的场合,其基本公式为

$$x_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n x [I(x, y) - V_{\text{th}}]}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [I(x, y) - V_{\text{th}}]}, \quad (8)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n y [I(x, y) - V_{\text{th}}]}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [I(x, y) - V_{\text{th}}]}, \quad (9)$$

式中: m, n 分别为图像在 x, y 方向上的像素数; V_{th} 为图像的全局阈值,其表达式为

$$V_{\text{th}} = E + \alpha\sigma, \quad (10)$$

式中: α 为与信噪比有关的系数,通常取值为 $3 \sim 5$,随着 α 的增大,阈值增大,对噪声的滤除能力增强,但同时会减弱对暗弱目标的检测能力; E 为图像的灰度期望值, σ 为灰度值均方差,其表达式分别为

$$E = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n I_{xy}}{mn}, \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (I_{xy} - E)^2}{mn - 1}}, \quad (12)$$

式中: I_{xy} 为图像在 (x, y) 坐标处的灰度值大小。

这三种质心提取算法的精度从高到低依次为: Gauss 函数拟合法、二维修正矩方法、中值方法^[17]。其中,二维修正矩方法与 Gauss 函数拟合法的精度差别很小,且其对同一种噪声分布的影响是一样的,但 Gauss 函数拟合法的计算量是二维修正矩方法的 50 倍^[15],故二维修正矩方法在计算效率方面有明显优势。此外,采用二维修正矩方法,还能有效解决多张图像在配准叠加后的噪声问题。图 1(a)所示为单个相机对木星及其卫星观测的局部图像,可以看出,探测到了两颗卫星(图中 1 号和 2 号)。该图像经过 4 路相机图像的配准叠加后的效果如图 1(b)所示,此时可以探测到第三颗卫星(图中 3 号),然而图像的噪声强度增大了,尤其是在木星周围的区域。图 1(c)所示为二维修正矩方法处理后的局部截图,可以看出,星图对比度增大,在保留了星点的同时较好地滤除了噪声,虽然在木星周围有部分噪声干扰,但 3 号卫星的周围背景纯净,仍可以对其进行角度等信息的提取,实现了系统探测能力的提升。

综上所述,推荐以二维修正矩方法作为星点的质心提取算法。

3.2.3 天文定位

系统在制造、装配、标校、安装等环节都会引入

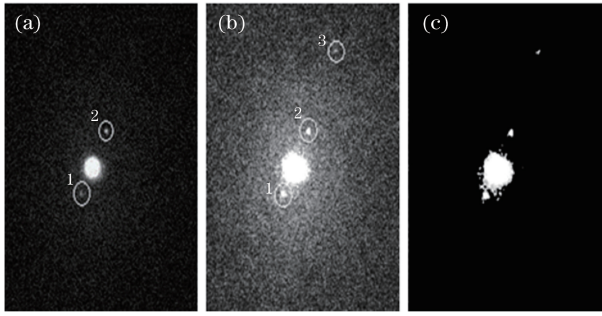


图 1 观测图像。(a)单个相机局部图像;
(b)配准叠加后局部图像;(c)降噪后局部图像
Fig. 1 Observed images. (a) Partial screenshots of single camera; (b) partial screenshot after registration overlay; (c) partial screenshot after noise debasing

误差,导致系统的指向位置与天空中实际方向位置之间存在较大偏差,要修正这一偏差需要长时间的校正,工作量庞大,且随着使用环境的变化其精度并不稳定^[18]。

空间目标的天文定位通过建立 CCD 图像中定标星的像素坐标 (x, y) 和理想坐标 (ξ, η) 两者的映射关系,再结合空间目标的像素坐标 (x', y') 实现对空间目标的定位。

理想坐标平面是一个在焦平面上且与望远镜心射平面在天球上的投影相对应的平面。天体在理想坐标平面上的坐标 (ξ, η) 与其赤道坐标 (α, δ) 是严格对应的^[19],即

$$\begin{cases} \xi = \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)} \\ \eta = \frac{\sin \delta \cos \delta_0 - \cos \delta \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)} \end{cases}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} \tan \delta = \frac{(\eta \cos \delta_0 + \sin \delta_0) \cos(\alpha - \alpha_0)}{\cos \delta_0 - \eta \sin \delta_0} \\ \tan(\alpha - \alpha_0) = \frac{\xi}{\cos \delta_0 - \eta \sin \delta_0} \end{cases}, \quad (14)$$

式中: (α_0, δ_0) 为望远镜光轴指向的赤道坐标。

像素坐标与理想坐标之间的映射是通过底片模型实现的。在相同的观测条件下,像素坐标的测量误差对定位精度的影响远小于底片模型的误差^[15]。因此,只有拟合出最优的底片模型才能充分发挥天文定位的精度,实际应用中常采用以下几种底片模型。

1) 四常数模型:

$$\begin{cases} \xi = ax + by + c \\ \eta = -bx + ay + f \end{cases}, \quad (15)$$

式中: a, b, c, f 为拟合系数。

当 CCD 图像坐标的 x 轴与 y 轴绝对垂直且两个方向上的比例尺完全相等时,采用四常数模型能够满足精度要求,四常数模型的拟合至少需要两颗定标星。

2) 六常数模型:

$$\begin{cases} \xi = ax + by + c \\ \eta = dx + ey + f \end{cases}, \quad (16)$$

式中: d, e 为拟合系数。六常数模型考虑了 CCD 图像坐标的 x 轴与 y 轴互不垂直以及两个方向上比例尺不同的因素,六常数模型的拟合至少需要三颗定标星。

3) 十二常数模型:

$$\begin{cases} \xi = ax + by + c + lx^2 + m'xy + n'y^2 \\ \eta = dx + ey + f + px^2 + qxy + ry^2 \end{cases}, \quad (17)$$

式中: l, m', n', p, q, r 为拟合系数。十二常数模型考虑了大气折射较差、光行差较差及光心偏差等因素的影响,通过不少于 6 颗定标星的观测可以求解出底片常数。

更通用的底片模型可以表示为

$$\begin{cases} \xi = \sum a_{ij} x^i y^j \\ \eta = \sum b_{ij} x^i y^j \end{cases}, \quad (18)$$

式中: a_{ij} 和 b_{ij} 为待拟合参数;上标 i, j 分别为像素坐标 x 和 y 的幂次,对于不同的底片模型其取值范围不同。

3.3 初轨算法

基于测角资料的初轨确定算法实质上可以归纳为 Laplace 法和 Gauss 法两类。以 Gauss 法为例,其基本思想是根据一组光学观测资料确定空间目标两个时刻的向径 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3$,以计算其轨道根数^[20]。

任意时刻的卫星向径 \mathbf{r}_2 可以表达为 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_3 的形式:

$$\mathbf{r}_2 = n_1 \mathbf{r}_1 + n_3 \mathbf{r}_3, \quad (19)$$

式中: n_1, n_3 为待定系数。

根据几何条件得到方程:

$$\mathbf{r}_k = \rho_k \mathbf{l}_k + \mathbf{R}_k, \quad (20)$$

式中: $\mathbf{r}_k (k=1, 2, 3)$ 为卫星的地心矢量; ρ_k 为光学系统到卫星的斜距; \mathbf{R}_k 为光学系统的地心矢量; \mathbf{l}_k 为光学系统到卫星的单位余弦向量。

将(20)式代入(19)式,得到

$$-n_1 \rho_1 \mathbf{l}_1 + \rho_2 \mathbf{l}_2 - n_3 \rho_3 \mathbf{l}_3 = n_1 \mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2 + n_3 \mathbf{R}_3. \quad (21)$$

引入辅助矢量 $\mathbf{d}_1 = \mathbf{l}_2 \times \mathbf{l}_3, \mathbf{d}_2 = \mathbf{l}_3 \times \mathbf{l}_1, \mathbf{d}_3 = \mathbf{l}_1 \times \mathbf{l}_2$ 。(21)式两端分别点乘 $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3$,并令 $D =$

$l_1 \cdot d_1 = l_2 \cdot d_2 = l_3 \cdot d_3, D_{IJ} = d_I \cdot R_J, I, J$ 为取值范围为 $[1, 3]$ 的正整数, 得到关于斜距的三个方程:

$$\begin{cases} \rho_1 = -\frac{1}{n_1 D} (n_1 D_{11} - D_{12} + n_3 D_{13}) \\ \rho_2 = \frac{1}{D} (n_1 D_{21} - D_{22} + n_3 D_{23}) \\ \rho_3 = -\frac{1}{n_3 D} (n_1 D_{31} - D_{32} + n_3 D_{33}) \end{cases} \quad (22)$$

对(19)式两端分别用 r_3, r_1 进行叉乘, 得

$$\begin{cases} n_1 = \frac{|\mathbf{r}_2 \times \mathbf{r}_3|}{|\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_3|} = \frac{s_1}{s_2} \\ n_3 = \frac{|\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2|}{|\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_3|} = \frac{s_3}{s_2} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $s_k (k=1, 2, 3)$ 为两地心矢量组成的三角形面积。两个不同时刻的地心矢量和两个时刻间卫星飞行的轨迹共同组成了一个扇形, 在短弧段轨道中, 三角形的面积与相应的扇形面积 $S_k = \eta_k s_k$ 差别很小 (参数 $\eta_k \approx 1$), 与时间间隔成正比, 由此获得 n_1, n_3 的近似值。采用迭代法进行改进, 直到相邻两次迭代的计算结果变化足够小。得到 ρ_k 的改进值后便可利用(20)式得到地心矢量, 最后由两组地心矢量得到目标的轨道根数。

4 实验及分析

为了验证使用相机阵列系统进行空间目标初轨确定的可行性, 利用此设备初步开展了验证性实验, 包括单相机与四相机探测能力实验、空间目标定位实验及空间目标初轨确定实验。

4.1 系统探测能力验证

在光学系统口径及曝光时间不变的情况下, 空间目标在 CCD 上成像的灰度值与其在光学系统入瞳处的照度值呈线性关系^[21]。利用此关系可以得到

$$M_{\text{target}} = A + B \lg \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n G_{(\text{target})xy}, \quad (24)$$

式中: M_{target} 为空间目标的星等; $\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n G_{(\text{target})xy}$ 为阈值分割后成像目标部分共 $m \times n$ 个像点的灰度值之和; A 和 B 为待定常数。在曝光时间为 40 ms 时, 利用多颗恒星的星等和灰度值拟合得到 A 和 B 分别为 13.558 和 -2.492。经实验验证, 系统有效目标检测的最小灰度为 19.9825, 将其代入(23)式, 可得单个相机的可探测极限星等为 10.312。

根据前面的理论分析, K 个相机图像配准叠加时, 信噪比可以提高 \sqrt{K} 倍。采用图像信噪比来衡量探测能力, 将信噪比表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{\frac{1}{mn} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n G_{(\text{target})xy} - E}{\sigma} = \frac{\bar{G}_{\text{target}} - E}{\sigma}, \quad (25)$$

式中: \bar{G}_{target} 为平均灰度值。

利用 4 个相机拍摄同一星空图像, 截取局部图像, 如图 2 所示。

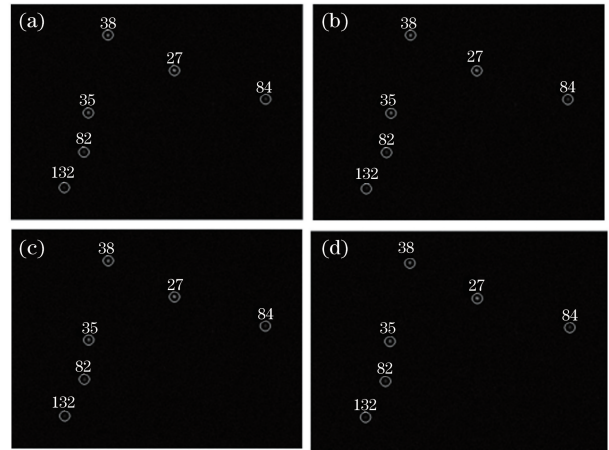


图 2 4 个相机拍摄图的局部截图。(a) 相机 1; (b) 相机 2; (c) 相机 3; (d) 相机 4

Fig. 2 Partial screenshots of four-camera shots.

(a) Camera 1; (b) camera 2; (c) camera 3; (d) camera 4

经配准叠加后得到的图像如图 3 所示。可以看出, 经配准叠加后星点在背景中更加突出。信噪比的变化可以用合并前后信噪比的比值来衡量。统计星点灰度值, 编号为 27, 35, 38 的恒星在叠加后出现了饱和现象, 无法准确衡量其信噪比提高程度, 因此使用编号为 82, 84, 132 的恒星目标进行计算, 计算结果如表 1 所示。

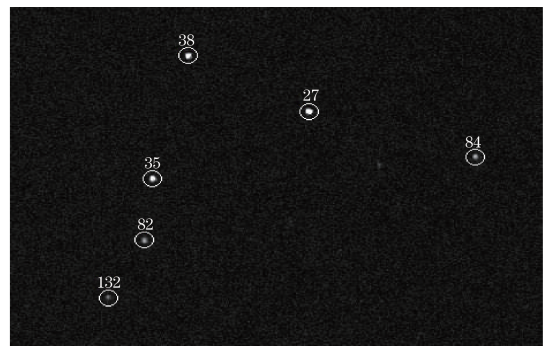


图 3 配准叠加后结果图的局部截图

Fig. 3 Partial screenshot of registration overlay

表 1 信噪比计算结果
Table 1 Calculation results of signal-to-noise ratio

Data source	E	σ	Star number	Number of pixels	\bar{G}_{target}	R_{SN}
Camera 1	5.196	3.403	82	33	25.5454	5.9799
			84	26	27.5384	6.5655
			132	18	19.5023	4.2034
Camera 2	5.188	3.391	82	43	21.5581	4.8275
			84	32	27.6875	6.6351
			132	24	18.7917	4.0117
Camera 3	5.173	3.393	82	39	24.4615	5.6848
			84	26	24.9231	5.8208
			132	26	19.3462	4.1772
Camera 4	5.178	3.404	82	35	25.8857	6.0833
			84	33	26.3030	6.2059
			132	23	18.8698	4.0222
Registration overlay	20.546	7.986	82	43	87.8139	8.4232
			84	35	95.8857	9.4340
			132	30	66.0667	5.7001

可以看出,所选取的星点目标在配准叠加后,信噪比都得到了提高,图像叠加前后信噪比比值的平均值为 1.465,即信噪比提高了 1.465 倍,相当于可探测星等提高了 0.417。单个相机的探测极限星等为 10.31,故在曝光时间为 40 ms 时,经过配准叠加后相机阵列的探测极限星等为 10.729。

4.2 空间目标定位

使用相机阵列系统对猎户座进行了观测,将伺服系统设置为凝视模式,指向参宿二星(HIP 26311),并采集数据。图 4(a)所示为相机 1 拍摄的一帧图像,图 4(b)所示为经过图像预处理以及质心提取后的图像。在距离图像中心 1200 pixel 内按照星等从低到高(从亮到暗)的顺序筛选出 17 颗星作为天文定位时的定标星,通过星图匹配确定其赤道坐标 (α_i, δ_i) 并由(13)式换算出理想坐标 (ξ_i, η_i) ,其中 $i=1, 2, \dots, 17$ 。

得到定标星的像素坐标 (x_i, y_i) 及理想坐标

表 2 各相机使用不同底片常数模型时的定位误差

Table 2 Positioning errors when different constant models for each camera used

Data source	4 constant model	6 constant model	12 constant model	20 constant model	30 constant model
Camera 1	3132	6.48	2.79	0.68	0.60
Camera 2	3240	7.10	2.43	0.73	0.61
Camera 3	3140	5.79	2.31	0.69	0.59
Camera 4	3169	6.23	2.92	0.61	0.63
Registration overlay	2980	6.29	2.22	0.59	0.59

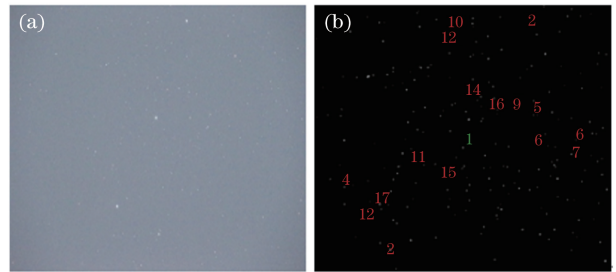


图 4 星图。(a)原始的;(b)处理后的

Fig. 4 Star maps. (a) Original; (b) processed

(ξ_i, η_i) 后,结合不同的底片模型进行最小二乘拟合,拟合出底片模型后再根据待测目标的像素坐标 (x', y') 计算出其理想坐标 (ξ', η') ,最后由(14)式计算出其赤道坐标 (α', δ') 。

以 1~16 号星作为定标星拟合出底片模型,对 17 号星(HIP 26668)进行天文定位,并将结果与星表中的值进行比较得到定位误差,如表 2 所示。

可以看出,总体上底片模型阶数越高,定位精度越高。采用四常数模型时,目标星的定位误差非常大;采用六常数模型时精度有了很大提高,结合底片常数的物理意义,认为造成这种巨大差异的主要原因是 CCD 图像坐标的 x 轴与 y 轴互不垂直以及这两个方向上的比例尺不同。采用十二常数模型后,定位精度得到进一步提升,达到了亚像素级;采用二十常数模型后,定位误差小于 $1''$;继续提高底片模型的阶数对定位精度并无明显改善,相机 4 的定位精度甚至降低了。因此,使用相机阵列系统对空间目标进行天文定位时应选用二十常数模型作为底片模型。

由表 2 还可以看出,使用配准叠加后的星图进行天文定位时精度有小幅提升,其原因是星点信噪比的提高使得星点质心提取的精度提高,故底片常数的拟合精度更高。因此,在空间目标的天文定位中应尽量选择视场中的亮星作为定标星。

4.3 空间目标初轨确定

使用所提系统于 2018 年 5 月 3 日对国际宇宙号(24 号)卫星进行了跟踪,并结合 Gauss 算法对其进行了初轨计算。将解算出的轨道根数与从网站上查询到的参考值进行比较得到定轨误差,用轨道半长轴的精度代表初轨确定的精度,结果如表 3 所示。

表 3 各相机使用不同底片常数模型时的半长轴误差
Table 3 Semi-major axis errors when different constant models for each camera used km

Data source	4 constant model	6 constant model	12 constant model
Camera 1	1001.282	104.187	54.664
Camera 2	1056.562	112.654	59.781
Camera 3	1034.257	102.633	51.222
Camera 4	984.768	89.579	47.257
Registration overlay	739.184	78.659	35.441

分析初轨确定结果可知,初轨确定误差随着采用底片常数模型阶数的增大而减小,经过配准叠加后的定轨结果精度有了一定程度的提高,与之前的定位误差分析结果基本一致。

根据前文的分析,系统在采用二十常数底片模型时精度最高,但定轨过程中最多只采用了十二常数模型。这主要是由于系统工作在同视场状态时定标星数量不足,若使系统工作在拼接视场状态下,可以扩大观测视场,从而增大定标星数量,但如何将不

同视场的定标星拟合到同一底片模型还有待进一步研究。

5 结 论

将相机阵列应用于空间目标的初轨确定,结合相机阵列的技术优势,相对于单个相机,系统对空间目标的探测能力提高了 0.417 个星等,空间目标的定位精度和初轨确定精度在不同阶数的底片模型下也有不同程度的提高。相机阵列在空间目标初轨确定这一领域的潜力仍有待挖掘,因此所得出的一些指标也均有改进的可能。

参 考 文 献

- [1] Wu L D. Orbit and detection of satellites and space debris[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011: 158-168.
吴连大. 人造卫星与空间碎片的轨道和探测[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 158-168.
- [2] Liu L, Wang J F. On initial orbit determination[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2004, 23(3): 41-45, 50.
刘林, 王建峰. 关于初轨计算[J]. 飞行器测控学报, 2004, 23(3): 41-45, 50.
- [3] Liu L, Zhang W. Initial orbit determination for different data types[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2009, 28(3): 70-76.
刘林, 张巍. 关于各种类型数据的初轨计算方法[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(3): 70-76.
- [4] Liao Y, Liu G M, Wen Y L, *et al.* Passive tracking technology of non-cooperative space target and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 10-13.
廖英, 刘光明, 文援兰, 等. 空间非合作目标被动跟踪技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 10-13.
- [5] John T M, Mark R A, Jeffrey R P. Angles and range: initial orbital determination with the Air Force Space Surveillance Telescope (AFSST)[C]. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2008: E48.
- [6] Zhang J X. Progress in foreign ground-based optoelectronic detecting system for space target detection[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(1): 10-16.
张景旭. 国外地基光电系统空间目标探测的进展[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(1): 10-16.
- [7] Ackermann M R, McGraw J T, Zimmer P C. An overview of wide-field-of-view optical designs for survey telescopes[C]. Proceedings of the Advanced

- Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2010: E41.
- [8] Son H S, Marks D L, Youn S H, *et al.* Alignment and assembly strategies for AWARE-10 gigapixel-scale cameras[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8836: 88360B.
- [9] Hu J M, Yang H, Zhang J. Flight path measurement technology of takeoff and landing period based on high speed camera array [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2014, 29(6): 523-527.
胡晋铭, 杨号, 张杰. 基于高速相机阵列的起飞着陆段航迹测量技术[J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(6): 523-527.
- [10] Wang M H, Chen T, Wang J L, *et al.* Measurement and analysis of image SNR in binding style telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(1): 92-97.
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.
- [11] Dai D K, Wang X S, Hu C S, *et al.* Camera calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0312005.
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, 32(3): 0312005.
- [12] Liu Y, Dai D K, Ma L H, *et al.* A star sensor calibration method based on attitude correlated frame[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1128003.
刘宇, 戴东凯, 马丽衡, 等. 一种基于姿态关联帧的星敏感器标定方法[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1128003.
- [13] Wang S H, Hu M F, Chen Z P. Noise analysis and the study of SNR model on the astronomical CCD camera [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(5): 731-734.
王书宏, 胡谋法, 陈曾平. 天文 CCD 相机的噪声分析与信噪比模型的研究[J]. 半导体光电, 2007, 28(5): 731-734.
- [14] Zhang K K, Fu D Y, Zhou F, *et al.* The study on detect ability calculation method of space object visible camera [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2006, 27(4): 22-26.
张科科, 傅丹鹰, 周峰, 等. 空间目标可见光相机探测能力理论计算方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(4): 22-26.
- [15] Mao W, Fan J K, Li B H, *et al.* CCD astrophysics [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2003: 43-100.
冒蔚, 季凯帆, 李彬华, 等. CCD 天体测量学[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003: 43-100.
- [16] Xu W. Star fast extraction and high accuracy centroid estimation of star camera[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 33-37.
许威. 星点快速提取与高精度定位技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 33-37.
- [17] Li Z, Peng Q Y, Han G Q. Comparison of digital centering algorithms based on CCD images[J]. Acta Astronomica Sinica, 2009, 50(3): 340-348.
李展, 彭青玉, 韩国强. CCD 图像数字定心算法的比较[J]. 天文学报, 2009, 50(3): 340-348.
- [18] Xie Y M, Zhao Y L. Telescope pointing error analysis and correction method research of satellite laser ranging[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2010, 8(3): 89-92.
谢彦民, 赵永丽. 卫星激光测距望远镜系统指向误差分析及修正方法研究[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(3): 89-92.
- [19] Li Z W, Zhang T, Sun M G. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2): 589-599.
李振伟, 张涛, 孙明国. 星空背景下空间目标的快速识别与精密定位[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 589-599.
- [20] Oliver M, Eberhard G. Satellite orbits: models, methods and applications[M]. Wang J S, Zhu K J, Hu X G, Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 40-44.
门斯布吕克, 吉尔. 卫星轨道——模型、方法和应用[M]. 王家松, 祝开建, 胡小工, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012: 40-44.
- [21] Peng H F, Chen J, Zhang B. Limited magnitude detectivity of space-based opto-electronic telescope[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(8): 1-5.
彭华峰, 陈鲸, 张彬. 天基光电望远镜极限星等探测能力研究[J]. 光电工程, 2007, 34(8): 1-5.