

文章编号 1004-924X(2015)02-0589-11

星空背景下空间目标的快速识别与精密定位

李振伟^{1,2,3*}, 张 涛¹, 孙明国³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 国家天文台 长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117)

摘要: 为了提高光电望远镜系统测量空间目标的实时性和定位精度, 建立了空间目标快速识别与精密定位系统, 讨论了空间目标运动特性、快速识别、星像质心计算和天文定位等算法。首先, 介绍了空间目标光电观测系统的系统构成和工作原理; 深入分析了空间目标在 CCD 视场中的运动特性, 提出了一种空间目标快速识别算法。然后, 结合帧间差分法和数学形态学等, 完成了空间目标的快速识别。最后, 研究了天文定位算法, 采用 Tycho-2 星表, 实现了空间目标的精密定位。实验结果表明: 空间目标快速识别处理时间约为 10 ms, 实时天文定位处理时间约为 25 ms, 实时天文定位精度优于 4"。得到的结果满足空间目标监视技术的实时性好、精度高、稳定可靠等要求。

关键词: 空间目标; 目标识别; 天文定位; 电荷耦合器件

中图分类号: V556.5; P123.46 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0589

Fast recognition and precise orientation of space objects in star background

LI Zhen-wei^{1,2,3*}, ZHANG Tao¹, SUN Ming-guo³

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
3. *Changchun Observatory, National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117, China)*

* *Corresponding author, E-mail: lizw@cho.ac.cn*

Abstract: To improve the real-time performance and positioning accuracy of space object surveillance using an optoelectronic telescope, a fast recognition and precise orientation system for space objects was established. The algorithms for the motion characteristics, fast recognition, star centroid computing, and the astronomical orientation of space objects were investigated. The system constitution and working principle of the opto-electric observing system for space objects were introduced, the motion characteristics of space objects in a visible field of the CCD chip were analyzed and a fast recognition algorithm was presented firstly. Then the fast recognition for space objects was implemented by using the frame subtraction and the mathematical morphology. Finally, the astronomical orientation method

收稿日期: 2013-12-22; 修订日期: 2014-01-10.

基金项目: 中国科学院院级科研装备研制项目 (No. YZ201116)

was investigated and the precise orientation of space objects was realized in the usage of Tycho-2 catalogue. Experimental results indicate that the average processing time of fast recognition and real-time astronomical orientation for space objects is respectively 10 ms and 25 ms, and the precision of real-time astronomical orientation is less than $4''$. It concludes that the results obtained satisfy the requirements of space object surveillance for high real-time, high precision, good stability and reliability.

Key words: space objects; object identification; astronomical orientation; Charge Coupled Device (CCD)

1 引 言

空间目标包括在轨工作航天器和空间碎片。机构间空间碎片协调委员会(IADC)将空间碎片定义为所有在轨运行或者再入大气层的无法继续工作的人造物体。50多年来,世界各国跟踪观测过的空间目标数目已经超过 26 000 个,空间发射次数多于 4 000,大约还有一半的空间目标仍然遗留在空间中并沿轨道飞行。目前,可跟踪的空间目标已超过 14 000 个(含新发现的碎片)。其中,约 840 个空间目标是在轨航天器,其余均为空间碎片^[1]。随着人类航天活动的增加,空间碎片环境日益恶化。若空间碎片与在轨航天器发生碰撞,会直接导致航天器器件损坏或者解体,对在轨航天器的正常运行构成严重威胁。此外,若空间碎片再入大气层将给人类带来不可估量的灾难。

空间目标监测手段主要包括雷达技术和光电技术^[2]。雷达技术的优点为可全天候工作;不足之处为运行成本高、探测距离近、探测精度低、对隐形卫星无法探测,另外,由于其主动发射信号且设备体积庞大,极易被发现。光电技术的优点为运行成本低、探测距离远且可探测对雷达隐形的卫星、测量精度高、对环境无污染、被动式观测,设备体积小且隐蔽性好,不易被发现;不足之处为易受天气影响,一般只能在晴夜工作。由于雷达技术的探测能力与空间目标斜距的四次方成反比,故其主要用于探测低轨道空间目标;而光电技术的探测能力与空间目标斜距的平方成反比,所以光电观测技术在中高轨道空间目标监视中占有重要地位。目前,最先进的空间目标监视系统还是冷战时期美苏两国为监视敌方导弹及间谍卫星而建造的跟踪系统。以美国为例,上世纪 80 年代美国地面光电深空监测系统(GEODSS)能观测到

40 000 km 深空上足球大小的空间目标(相当于 16.5 等),测角精度为 $10''$ 。我国空间目标光电系统主要由小光电和大光电设备组成,其中小光电设备可探测 9~10 等的目标,大光电设备可探测 10~12 等目标,相应的定位精度分别为 $5\sim 10''$ 和 $3\sim 5''$ 。

作为空间目标监视技术中的关键问题,空间目标的识别与定位主要面临着 3 大技术难题:(1)多个空间目标在大视场观测设备中随机出现,而且图像灰度与背景恒星极其相似,区分度较低;(2)空间目标远离大视场光电观测设备,其星像仅占据少量像素,视星等较弱,无纹理特征;(3)CCD 相机所采集的图像包含大量的附加噪声,例如:光子噪声、暗电流噪声和读出噪声等,空间目标的信噪比较低。因此,深入研究空间目标的识别与定位具有重要的现实意义和应用价值。

由于空间目标图像含有大量的附加噪声,难以在单帧图像上识别出空间目标,故需对图像进行滤波处理。常用的滤波方法^[3-5]有光流算法、动态规划算法和轨迹滤波算法等。光流算法对空间目标运动的速度有较高的限制;动态规划算法由于要求空间目标轨迹不能间断,因此对空间目标的信噪比要求较高;轨迹滤波算法只能处理包含空间目标与噪声的图像。对于包含恒星背景的图像,由于恒星与目标在灰度、运动等方面有很多相似性,因此不能有效检测出空间目标。

目前,光电望远镜系统常用的定位方式是轴系定位,其定位精度受一系列因素的影响,包括:望远镜置平及南北指向误差、CCD 视场中心和光轴中心偏差、码盘安装误差、CCD 像元当量不准引起的误差、大气折射改正不严格引起的误差和测站坐标的数据不正确引起的误差^[1,6]。所以,轴系定位结果具有稳定性低、精度低等特点,难以实现空间目标的精密定位。现代天文定位方法最

早由 John 和 Jean 提出,经 Chris 和 Dustin 等人发展形成^[7]。其工作流程主要包括:建立实测星图、建立导星星图和星图匹配。

为适应空间目标监视技术和信息技术等学科的飞速发展,以及满足国防需求,人们对空间目标光电观测系统的实时性和定位精度提出了进一步要求。本文建立了空间目标快速识别与精密定位系统,讨论了空间目标运动特性、快速识别、星像质心计算和天文定位等关键算法。

2 系统构成及其工作原理

2.1 系统构成

该系统由折射光学系统、CCD 相机、望远镜机架、GPS 时钟、位置数显及超速检测机箱、CCD 调焦控制机箱、UMI 接口机箱、功放机箱、稳压电源以及主控计算机等组成,如图 1 所示。

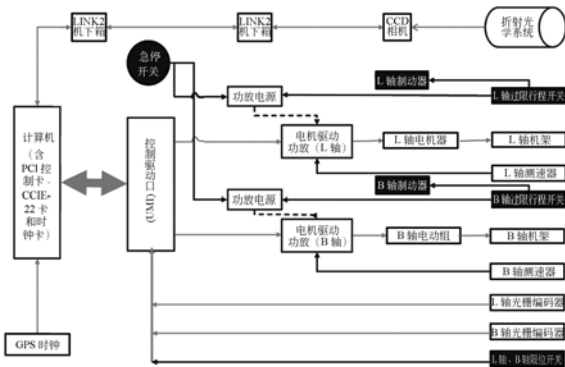


图 1 空间目标监视系统的结构示意图

Fig. 1 Framework of space object surveillance system

2.2 系统工作原理

光电望远镜系统启动后,根据空间目标预报信息,系统观测软件使望远镜提前指向预报位置,以进行空间目标识别。空间目标识别完成后,系统观测软件将测量空间目标的运动速度和脱靶量,并以一定的速率发送给主控计算机。接着,系统观测软件根据 CCD 的图像处理结果,测量背景恒星(定标恒星)和空间目标的量度坐标。然后,根据 CCD 视场内定标恒星的量度坐标和理想坐标之间的映射关系建立底片模型,并联合其量度坐标反算出空间目标的理想坐标,最后,输出空间目标的赤道坐标(J2000.0)。

3 关键算法

3.1 空间目标的运动特性分析

分析 CCD 图像序列可知:在星像大小和灰度分布等方面,空间目标和背景恒星之间的区分度较小,仅通过数字图像的灰度特征难以正确识别空间目标,即使能识别,识别效率也较低。而利用运动特性可以有效识别空间目标^[8]。空间目标主要有以下特点:空间目标主要在地球引力作用下做近圆轨道或者圆轨道运动;空间目标的位置、运动速度和加速度是重要的特征参数,同时也是后续空间目标识别的重要依据;地球自转角速度(15°/s)对于空间目标运动的影响程度很小,故可以忽略。作为典型案例,本文深入研究了圆轨道空间目标的运动特性,如图 2 所示。

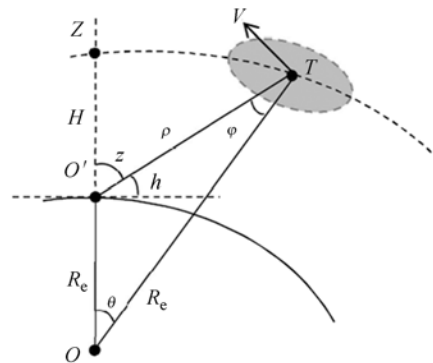


图 2 空间目标运动特性分析示意图

Fig. 2 Motion characteristics of space object

图 2 中,点 Z 为天顶, H 为空间目标的地面高度,点 O' 为光电望远镜系统, R_e 为地球赤道半径(6 378.137 km),点 O 为地球质心,点 T 为空间目标, ρ 为空间目标到光电望远镜系统之间的距离,角 φ 为地球质心与光电望远镜系统在空间目标处的夹角,角 z 为天顶距,角 h 为仰角,角 θ 为光电望远镜系统与空间目标在地球质心处的夹角。由图 2 可知:

$$h + z = 90^\circ, z = \theta + \varphi. \quad (1)$$

空间目标的运动速度(单位为 km · s⁻¹)和地球质心运动角速度(单位为 rad · s⁻¹)的计算公式分别为:

$$v = \sqrt{\mu/r}, n = \sqrt{\mu/r^3}, \quad (2)$$

其中: r = R_e + H 为空间目标到地球质心的距离;

μ 为地心引力常数 $3.986\ 004\ 36 \times 10^5 \text{ km}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ 。

根据正弦定理, 可知:

$$\frac{R_c}{\sin \varphi} = \frac{r}{\sin(180^\circ - z)}, \quad (3)$$

结合式(1)和式(2)可以得到:

$$\theta = 90^\circ - h - \arcsin\left(\frac{R_c}{r} \cosh\right), \quad (4)$$

而光电望远镜系统与空间目标之间的距离为:

$$\rho = \sqrt{r^2 + R_c^2 - 2rR_c \cos \theta}. \quad (5)$$

对于给定的仰角 h 和空间目标地面高度 H , 由于空间目标与测站的相对运动方向不同, 空间目标视运动角速度 ω 和角加速度 a 也是不断变化的, 它们的取值区间分别为 $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ 和 $[a_{\min}, a_{\max}]$ 。 ω_{\min} 、 ω_{\max} 、 a_{\min} 和 a_{\max} 的计算方法如下:

当空间目标 T 的 v 矢量方向垂直于空间目标运动平面与 CCD 像平面的交线时, 空间目标向天顶 Z 运动, 在图像序列中竖直向上运动时, 角速度 ω 取得最小值 ω_{\min} , 而角加速度 a 达到最大值 a_{\max} , 即:

$$\omega_{\min} = \frac{\rho^2 + r^2 - R_c^2}{2\rho^2 r} \sqrt{\mu/r}, \quad (6)$$

$$a_{\max} = \frac{(r^2 - R_c^2) R_c \mu \sin \theta}{\rho^4 r^2}. \quad (7)$$

当空间目标 T 的 v 矢量方向平行于空间目标运动平面与 CCD 像平面的交线, 空间目标在 CCD 像平面内运动至最高点时, 角速度 ω 取得最大值 ω_{\max} , 而角加速度 a 达到最小值 a_{\min} , 即:

$$\omega_{\max} = \frac{1}{\rho} \sqrt{\mu/r}, \quad a_{\min} = 0. \quad (8)$$

在不考虑地球自转角速度影响的前提下, 以轨道高度 H 和仰角 h 为变量, 圆轨道空间目标的视运动角速度和角加速度分布如图 3~图 5 所示。综上所述, 圆轨道空间目标运动特性如下:

(1) 在仰角相同的条件下, 随着轨道高度的增加, 圆轨道空间目标视运动的角速度和最大角加速度逐渐减小;

(2) 对于同一空间目标, 随着仰角的增大, 圆轨道空间目标视运动的角速度也逐渐增大;

(3) 对于同一空间目标, 其角加速度远远小于角速度。在短时间内, 空间目标可以被认为作匀速直线运动。

基于上述分析, 本文提出“基于约束条件的空间目标快速识别算法”对 3 帧连续 CCD 图像进行图像二值化, 帧间差分 and 形态学滤波等处理, 并根

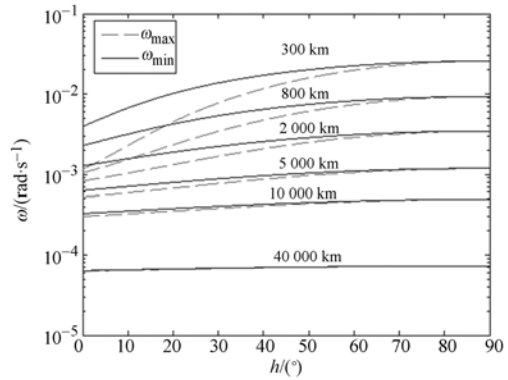


图 3 角速度最大值和最小值

Fig. 3 The maximum and minimum of angular velocity

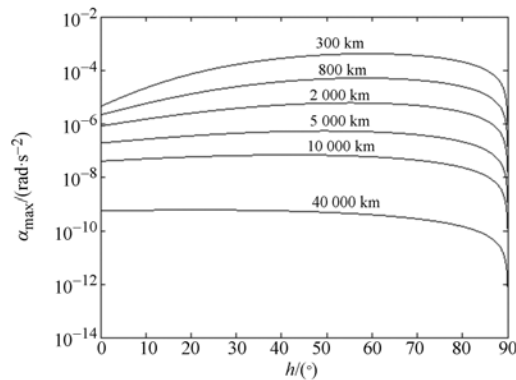


图 4 角加速度最大值图

Fig. 4 The maximum of angular acceleration

据“空间目标的测量坐标成等差数列”的约束条件, 实现空间目标快速识别, 具体过程见 3.2.4 节——快速识别算法。

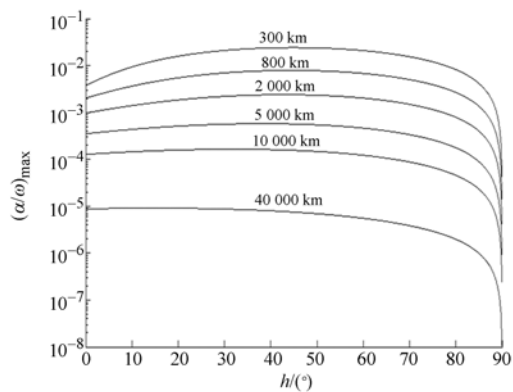


图 5 角加速度与角速度比值的最大值

Fig. 5 The maximum ratio of angular acceleration to angular velocity

3.2 空间目标的快速识别

3.2.1 CCD 图像预处理

CCD 图像预处理主要包括: 本底场处理、暗

场处理和平场处理。本底场:在积分时间为零的条件下,CCD 相机所采集的一帧图像,即为 CCD 相机的零点分布。通常情况下,本底场是比较稳定的。暗场:在关闭 CCD 相机快门的条件下,CCD 相机积分一段时间后所采集的一帧图像,实际上其包含了本底场。平场体现出 CCD 相机灵敏度的不一致性。经校正暗场和平场处理后,最后的图像为:

$$I(x, y) = k \cdot \frac{R_i(x, y) - d_t(x, y)}{F_l^i(x, y) - d_l^i(x, y)}, \quad (9)$$

其中: k 是比例系数; $R_i(x, y)$ 为原始图像; $d_t(x, y)$ 为暗场图像; $F_l^i(x, y)$ 为平场图像; t 和 t^i 分别为原始图像和平场图像的曝光时间。

3.2.2 连续帧间差分

通过连续帧间图像灰度值相减,进而分析图像序列中目标的运动特性。在实际计算过程中,常常对每帧图像进行二值化,即:如果某像素点处的差分大于给定阈值,则相应位置的灰度取为“1”,即为前景像素(检测到空间目标上的像素);否则取为“0”,即为背景像素。再将连续帧间图像逐点相减,形成差分图,从而完成空间目标的识别。

定义图像序列为 $I_k(x, y)$, 其中 (x, y) 表示空间坐标, k 表示图像的帧数 ($k=1, 2, 3, \dots, N$), $I_k(x, y)$ 表示第 k 帧图像上像元坐标为 (x, y) 的灰度值。假定图像大小为 $n \text{ pixel} \times m \text{ pixel}$, 图像像元的灰度均值为 μ_k , 方差为 σ , 则有:

$$\mu_k = \left(\sum_{x=0}^n \sum_{y=0}^m I_k(x, y) \right) / (n \times m), \quad (10)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\left(\sum_{x=0}^n \sum_{y=0}^m (I_k(x, y) - \mu_k)^2 \right) / (n \times m)}. \quad (11)$$

定义 CCD 图像的全局阈值为 T_k , 经阈值二值化后第 k 帧图像为 $f_k(x, y)$, 则有:

$$\begin{cases} T_k = \mu_k + C \times \sigma_k \\ f_k(x, y) = \begin{cases} 1 & I_k(x, y) > T_k, \\ 0 & I_k(x, y) \leq T_k \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

其中: C 表示标准差的倍数,其值直接影响空间目标可以检测到的最小信噪比,常常取值为 $3^{[9]}$ 。

连续帧间差分的计算公式如下:

$$F_k(x, y) = f_k(x, y) \& [f_k(x, y) - f_{k+1}(x, y)], \quad (13)$$

其中:运算符 $\&$ 表示执行逻辑运算符“与”操作。

3.2.3 数学形态学

空间目标序列图像经过连续帧间差分运算

后,会存在一些孤立噪声和空洞等,采用数学形态学处理可以解决此类问题。数学形态学是一种基于集合论的方法研究^[10],其处理过程为在空间域内,采用具有一定形态的结构元素作为模板,与原图像进行二维卷积运算,以识别出原图像中的相应形状。传统的数学形态学一般以二值图像作为处理对象,后来发展到灰度图像。

数学形态学^[10-13] 主要功能有:图像噪声滤除;边缘检测和提取;区域填充、凸壳、细化和粗化等。

以下为数学形态学中的常用操作:

(1) 膨胀:扩大图像

A 和 B 是两个集合, A 被 B 膨胀定义为:

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \Phi\}. \quad (14)$$

A 被 B 膨胀是在 \hat{B} 和 A 至少有一个元素重叠的情况下,所有位移 z 的集合。

(2) 腐蚀:消除物体边界点

A 和 B 是两个集合, A 被 B 腐蚀定义为:

$$A \ominus B = \{z | (B) \in_z A\}. \quad (15)$$

使用 B 对 A 进行腐蚀就得到所有对 B 进行平移 z 后包含于 A 的集合。

(3) 开运算与闭运算

用集合 B 对集合 A 做开运算,表示为 $A \circ B$, 定义为:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B. \quad (16)$$

因此,用集合 B 对集合 A 做开运算等价于,先用集合 B 对集合 A 进行腐蚀运算,然后再用集合 B 进行膨胀运算。

用集合 B 对集合 A 做闭运算,表示为 $A \cdot B$, 定义为:

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B. \quad (17)$$

因此,用集合 B 对集合 A 进行闭运算等价于,先用集合 B 对集合 A 进行膨胀运算,再用集合 B 进行腐蚀运算。

开、闭运算对 CCD 图像具有独特的平滑滤波作用。开运算可以抑制边界的凸起部分,光滑目标轮廓,消除比结构元素小的孤立点、碎线以及斑块等。闭运算可以填补边缘上的凹陷部分,将狭窄的缺口连接起来形成细长的弯口,使得目标的外轮廓线平滑。总之,开、闭运算在滤除图像噪声的同时,也能够较好地保护目标局部结构特征。

3.2.4 快速识别算法

首先,对连续 3 帧(4 帧)CCD 图像进行图像

预处理和连续帧间差分处理;然后经过数学形态学滤波来剔除相邻像素和小于给定阈值的像素;最后,根据“空间目标的测量坐标成等差数列”的约束条件,实现空间目标快速识别。光电望远镜静止时空间目标识别流程如图 6 所示。光电望远镜按照预报运动时,空间目标识别流程如图 7 所示。

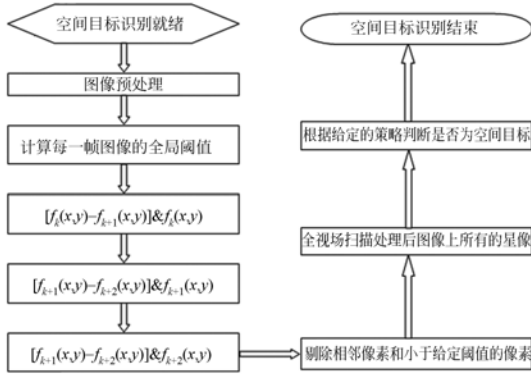


图 6 望远镜静止时空间目标识别流程

Fig. 6 Flowchart of space object recognition when telescope is in stationary

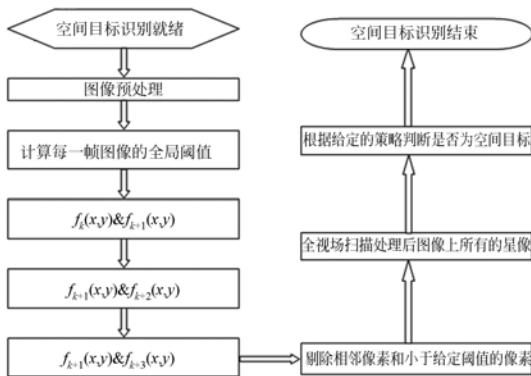


图 7 望远镜运动时空间目标识别流程

Fig. 7 Flowchart of space object recognition when telescope moves

3.3 星像质心计算

对空间目标和定标恒星而言,计算星像质心的方法主要有:二维修正矩方法、Gauss 函数拟合法和中值方法^[9]。

(1) 二维修正矩方法

在 CCD 图像中,计算定标恒星和空间目标的一阶矩,将其作为该星像质心。其计算公式为:

$$\begin{aligned} X &= \frac{\sum_{i \in S} f_i x_i}{\sum_{i \in S} f_i} \\ Y &= \frac{\sum_{i \in S} f_i y_i}{\sum_{i \in S} f_i} \end{aligned} \quad (18)$$

其中:S 为星像像元的集合; f_i 为 (x_i, y_i) 处像元

灰度值减去背景阈值后的所得值; (X, Y) 即为修正矩方法计算出的星像质心。

(2) Gauss 函数拟合法

CCD 图像中空间目标或定标恒星星像的光量分布符合二维 Gauss 曲面分布:

$$G(x, y) = B + \frac{S_{\text{sum}}}{2\pi R_x R_y} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2R_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2R_y^2}\right] \quad (19)$$

在一帧 CCD 图像中,一般情况下星像的 R_x 和 R_y 都是相同的; B 代表图像背景; S_{sum} 代表空间目标或定标恒星星像的亮度; (x_0, y_0) 为空间目标或定标恒星星像的中心坐标。

(3) 中值方法

首先,计算 CCD 图像在 y 方向上的累积分布函数:

$$Q(Y) = \sum_y M(y) = \sum_y \sum_x G(x, y) \quad (20)$$

然后,求解符合式(21)的 y_0 ,即为星像的 y 方向坐标:

$$Q(y_0) = \frac{1}{2}(Q_{y_{\text{max}}} - Q_{y_{\text{min}}}) \quad (21)$$

求解 $Q(y_0)$ 时,需要进行 3 次插值计算。 x_0 的计算方法与 y_0 相同。

相关研究结果表明^[9,14]:上述 3 种方法所计算的星像质心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。此外,二维修正矩算法复杂度较低,实时性最佳;而 Gauss 函数拟合法算法复杂,计算量最大。由于空间目标光电观测设备 CCD 视场较大,数据处理实时性要求较高,故推荐采用二维修正矩方法计算空间目标和定标恒星的星像质心。

3.4 空间目标天文定位

光电望远镜系统常用轴系定位方式,其属于一种绝对式定位方法。设 CCD 图像的中心坐标为 (x_0, y_0) ,空间目标的星像质心为 (x_s, y_s) , CCD 图像比例尺为 (S_x, S_y) ,光电望远镜系统的指向为 (A_0, E_0) ,则空间目标的方位 A_s 和仰角 E_s 的计算公式:

$$\begin{cases} E_s = E_0 \pm (y_s - y_0) \times S_y \\ A_s = A_0 \pm (x_s - x_0) \times S_x / \cos E_s \end{cases} \quad (22)$$

其中:上式中加号和减号的选取和 CCD 图像上方位和仰角增大的方向有关。

由于本课题所使用的光电望远镜系统属于水平式机架,则地平坐标 (A_s, E_s) 与水平坐标 (L, B)

的转化关系式如下:

$$\begin{cases} E_s = \arcsin(\cos(L)\cos(B)) \\ A_s = \arctan(\sin(L)\cot(B)) \end{cases} \quad (23)$$

轴系定位算法较为简单,便于实现。由于存在制造、加工与安装等误差,光电望远镜系统存在静态指向误差。此外,空间目标观测过程中可能出现数显失跟、跟踪电路跳变等情况,从而使轴系定位方法的计算结果存在动态误差。综上所述,轴系定位输出结果具有稳定性低、精度低等特点,无法实现对空间目标的精密定位。

本文采用天文定位算法实现空间目标的精密定位。天文定位就是根据 CCD 图像上空间目标和定标恒星的相对位置,给出空间目标位置信息的一种定位方式,它通过建立定标恒星的理想坐标 (ζ, η) 和量度坐标 (x, y) 之间的映射关系来实现。

3.4.1 星表的选取

星表精度远高于观测设备的测量精度,选择星表时主要考虑的因素有:

(1)星表的坐标系必须是国际天球坐标系(International Celestial Reference System, ICRS);

(2)星表中要包含足够的定标恒星,全天分布均匀。

本文采用 Tycho-2 星表^[15],该星表给出亮于 12.0 等的约 2 500 000 颗恒星(平均密度在银道面上为 150 deg^{-2} ,在银极附近为 25 deg^{-2})的 J2000.0 的位置,平均精度为 60 mas,坐标系属于 ICRS。

3.4.2 定标恒星的理想坐标 (ζ, η)

理想坐标系是在切面上定义的一种直角坐标系。定标恒星在此坐标系中的理想坐标 (ζ_i, η_i) 和其赤道坐标 (α_i, δ_i) 是一一对应的。它的计算公式为:

$$\begin{cases} \zeta_i = \frac{\cos \delta_i \sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \\ \eta_i = \frac{\sin \delta_i \cos \delta_0 - \cos \delta_i \sin \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \end{cases} \quad (24)$$

其中: (α_0, δ_0) 为 CCD 图像中心对应的赤经和赤纬。

3.4.3 天文定位的 CCD 图像处理模型

在不考虑影响星像质量的前提下,可以采用以下 4 种 CCD 图像处理模型在量度坐标 (x, y) 和理想坐标 (ζ, η) 之间建立映射关系。

(1)二常数模型(需要 1 个定标恒星,并假定 CCD 图像 x 和 y 方向的比例尺相同,以及理想坐标 (ζ, η) 和量度坐标 (x, y) 的夹角 θ 已知)

$$\begin{cases} \zeta_i = a + \cos(\theta) x_i + \sin(\theta) y_i \\ \eta_i = d - \sin(\theta) x_i + \cos(\theta) y_i \end{cases} \quad (25)$$

(2)四常数模型(需要 2 个以上定标恒星,并假定 x 和 y 方向的比例尺相同)

$$\begin{cases} \zeta_i = a + b x_i + c y_i \\ \eta_i = d - e x_i + f y_i \end{cases} \quad (26)$$

(3)六常数模型(需要 3 个以上的定标恒星)

$$\begin{cases} \zeta_i = a + b x_i + c y_i \\ \eta_i = d + e x_i + f y_i \end{cases} \quad (27)$$

(4)十二常数模型(需要 6 个以上定标恒星)

$$\begin{cases} \zeta_i = a_1 + b_1 x_i + c_1 y_i + d_1 x^2 + e_1 xy + f_1 y^2 \\ \eta_i = a_2 + b_2 x_i + c_2 y_i + d_2 x^2 + e_2 xy + f_2 y^2 \end{cases} \quad (28)$$

3.4.4 空间目标位置的归算

设 CCD 图像上定标恒星的理想坐标为 (ζ_i, η_i) ,其对应的量度坐标为 (x_i, y_i) ,根据定标恒星的个数,采用不同的 CCD 图像处理模型计算模型系数。若空间目标的量度坐标为 (x_s, y_s) ,利用上述六常数模型就可得到空间目标的理想坐标 (ζ_s, η_s) ,而空间目标的观测位置 (α_s, δ_s) 可由下式得到:

$$\begin{cases} \tan(\alpha_s - \alpha_0) = \frac{\zeta_s}{\cos \delta_0 - \eta_s \sin \delta_0} \\ \tan \delta_s = \frac{(\eta_s \cos \delta_0 + \sin \delta_0) \cos(\alpha_s - \alpha_0)}{\cos \delta_0 - \eta_s \sin \delta_0} \end{cases} \quad (29)$$

3.4.5 实时天文定位方法

空间目标的实时天文定位基本步骤:

(1)本系统观测软件读取望远镜 L 轴和 B 轴码盘的数据,将光电望远镜指向换算为光电望远镜指向的天球坐标系数据(赤经 α 和赤纬 δ);

(2)在光电望远镜指向(赤经 α 和赤纬 δ)附近,快速检索 Tycho-2 星表,找出 CCD 视场中的定标恒星 $(\alpha_i, \delta_i, i=1, 2, \dots, n)$,并按其星等排队;

(3)根据 α_i, δ_i 和 α, δ 的差,以及 CCD 相机比例尺,计算每个定标恒星的粗略 CCD 坐标 $(x_i, y_i, i=1, 2, \dots, n)$;

(4)在 CCD 图像中,在定标恒星 $(x_i, y_i, i=1, 2, \dots, n)$ 附近寻找星像,通过图像处理方法得到定标恒星的测量坐标 $(X_i, Y_i, i=1, 2, \dots, n)$;

(5)通过 CCD 图像处理,得到空间目标的量度坐标 (X, Y) ;

(6) 利用定标恒星的 $(X_i, Y_i, \alpha_i, \delta_i, i=1, 2, \dots, n)$ 建立底片模型;

(7) 利用底片型参数和空间目标的测量坐标 (X, Y) , 计算空间目标的赤经 α 和赤纬 δ 。

4 测量实验与结果

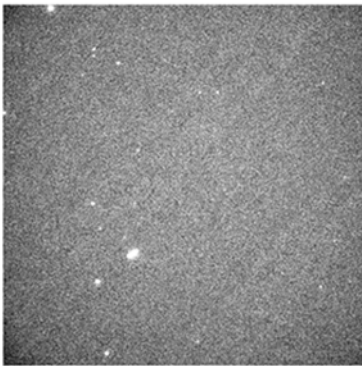
为了验证本文提出的空间目标快速识别与精密定位系统的有效性,在天气良好的观测夜,对空间目标和定标恒星进行观测试验,光电望远镜所采集图像的具体参数如表 1 所示。由于篇幅的限制,只取其中较为典型的 CCD 图像进行结果展示,如图 8 所示。首先分别对连续 3 帧 CCD 图像进行二值化处理;再进行帧间差分处理,并采用数学形态学滤波,以快速提取出空间目标;最后,根据本文提出的“基于约束条件的空间目标快速识别算法”完成空间目标的快速识别。本方法不需要更多的先验信息,算法简单且便于实现,运算速度快,有利于空间目标识别的实时性处理,已在实测图像中得到验证。其中二值化阈值常数 $C=3$,

形态学滤波结构元素是半径为 3 的圆盘型结构。图 8(a), 8(b) 和 (c) 为连续 3 帧 CCD 原始图像,图 8(d), (e) 和 (f) 为相应二值化处理结果,图 8(g), (h) 和 (i) 为帧间差分处理结果,图 8(j), (k) 和 (l) 相应形态学滤波结果,即空间目标快速识别结果。

表 1 光电望远镜系统的具体参数

| 参数 | 数值 |
|----------------|--------------------|
| 口径/mm | 400 |
| 焦距/mm | 600 |
| 光谱/nm | 500~800 |
| 望远镜视场/(') | 46.9×46.9 |
| CCD 图像尺寸/pixel | 512×512 |

实验平台为 Intel (R) Core (TM) 2 Duo E6550 处理器, 2G 内存, 软件平台为 Windows XP 操作系统, Visual C++ 6.0 编辑器。空间目标快速识别(包括图像二值化、帧间差分和形态学滤波等)的平均耗时约为 10 ms。一般来说,空间目标实时天文定位处理时间在 25 ms 左右,故其可以满足光电观测系统的实时性要求。



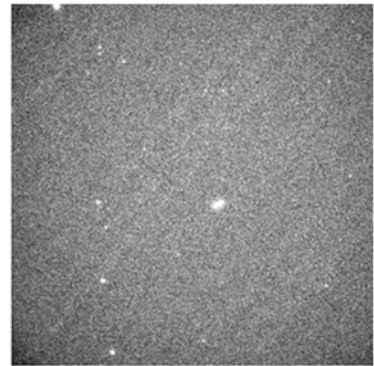
(a) 第一帧原始图像

(a) The 1 st frame original image



(b) 第二帧原始图像

(b) The 2 nd frame original image



(c) 第三帧原始图像

(c) The 3 rd frame original image



(d) 图 8(a) 对应的二值化处理结果

(d) Binary image of Fig. 8(a)



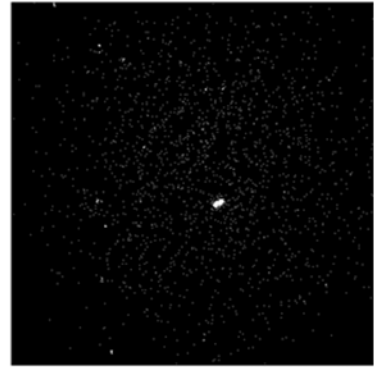
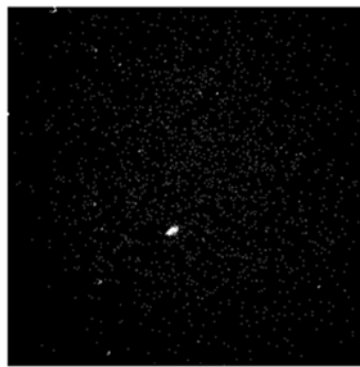
(e) 图 8(b) 对应的二值化处理结果

(e) Binary image of Fig. 8(b)



(f) 图 8(c) 对应的二值化处理结果

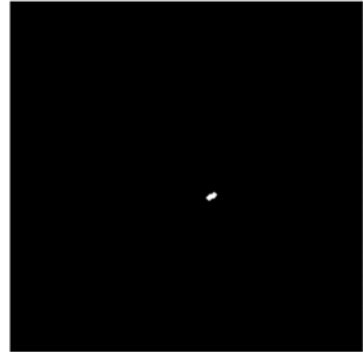
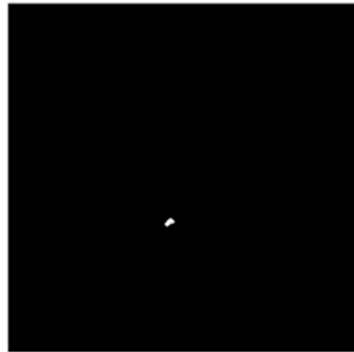
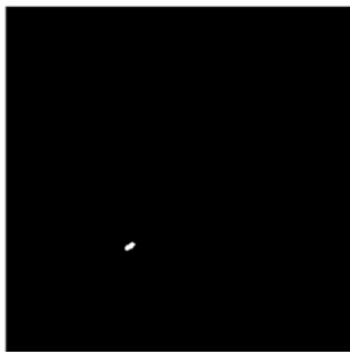
(f) Binary image of Fig. 8(c)



(g) d & (d-e)的帧间差分处理结果
(g)Processing result of d & (d-e)

(h) e & (e-f)的帧间差分处理结果
(h)Processing result of e & (e-f)

(i) f & (e-f)的帧间差分处理结果
(i)Processing result of f & (e-f)



(j)图 8(g)的相应形态学滤波结果
(j)Morphological filtering of Fig. 8(g)

(k)图 8(h)的相应形态学滤波结果
(k)Morphological filtering of Fig. 8(h)

(l)图 8(i)的相应形态学滤波结果
(l)Morphological filtering result of Fig. 8(i)

图 8 空间目标快速识别结果

Fig. 8 Fast recognition results of space objects

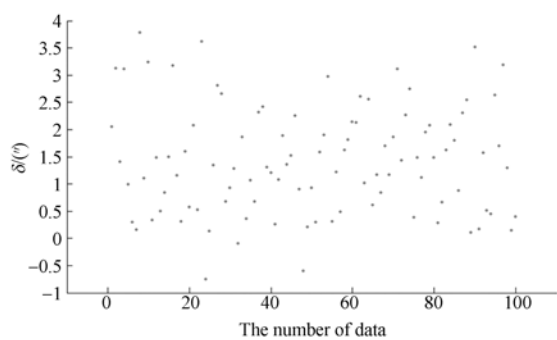
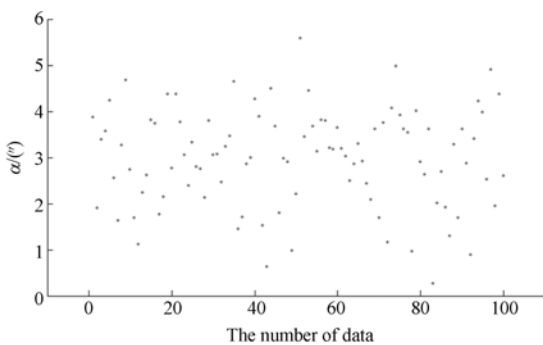


图 9 位置残差分布图

Fig. 9 Position residual distributions of space objects

为了分析本系统对测量数据的定位精度,采用外符合精度判定方法,即:选取某颗恒星,先对其进行空间目标快速识别,再使用除该恒星以外所有匹配的定标恒星计算底片模型常数,进而计

算出该恒星的赤道坐标(J2000.0 平历元),并与该恒星在 Tycho-2 星表中的理论位置(修正自行后)相比较而得到残差,如图 9 所示。赤经和赤纬精度计算公式采用中误差计算公式,即:

$$\begin{cases} \sigma_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_o - \alpha_c)^2 \times \cos^2 \delta_c}{n-1}} \\ \sigma_\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_o - \delta_c)^2}{n-1}} \end{cases} \quad (30)$$

定位系统总精度计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\delta^2} \quad (31)$$

赤经方向 σ_a 的精度(RMS)为 $3.16''$; 赤纬方向 σ_δ 精度(RMS)为 $1.74''$, 总精度为 $3.60''$, 完全满足光电望远镜观测系统的精度要求。本系统测量结果是在天球坐标系中的赤经和赤纬上得到的, 它们对于每个测站和观测的不同时间, 均属于一个非常稳定的坐标系; 此外, 其测量精度不受光电望远镜轴系误差和大气折射修正误差的影响,

参考文献:

- [1] 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.
WU L D. *Orbits and Detection of Satellite and Space Debris* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述 [J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [3] 姚睿, 张艳宁, 杨涛, 等. 基于迭代距离分类与轨迹关联检测空间弱小目标 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 179-189.
YAO R, ZHANG Y N, YANG T, *et al.*. Detection of small space target based on iterative distance classification and trajectory association [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 179-189. (in Chinese)
- [4] ABRAHAM D A. Detection-threshold approximation for non-Gaussian backgrounds [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2010, 35(2): 355-365.
- [5] ZHANG T, LI M, ZUO Z, *et al.*. Moving dim point target detection with three-dimensional wide-to-exact search directional filtering [J]. *Pattern Recogn. Lett.*, 2007, 28(2): 246-253.
- [6] 孙明国, 刘承志, 范存波, 等. 基于 SLR 精密轨道的天文定位精度分析 [J]. 天文学报, 2012, 53(2):

因而对光电望远镜轴系加工精度要求较低, 有利于降低光电望远镜的研制成本。

5 结 论

针对空间目标监视系统对处理速度、测量精度等的要求, 本文建立了空间目标快速识别与精密定位系统, 介绍了空间目标光电观测系统的系统构成和工作原理, 然后研究了空间目标运动特性、快速识别、星像质心计算和天文定位等算法。实验结果证明: 空间目标快速识别处理时间约为 10 ms, 实时天文定位处理时间约为 25 ms, 实时天文定位精度优于 $4''$, 可以满足空间目标监视技术的实时性好、精度高、稳定可靠等要求。

153-160.

- SUN M G, LIU CH ZH, FAN C B, *et al.*. Analysis on the accuracy of celestial positioning based on the SLR precise orbit [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2012, 53(2): 153-160. (in Chinese)
- [7] LANG D, HOGG D W, MIERLE K, *et al.*. Astrometry.net: blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images [J]. *Astron. J.*, 2010, 139(5): 1782-1800.
- [8] 黄宗福, 汪金真, 陈曾平. 光电探测中空间目标和恒星目标运动特性分析 [J]. 光电工程, 2012, 39(4): 67-72.
HUANG Z F, WANG J Z, CHEN Z P. Motion characteristics analysis of space target and Stellar target in opto-electronic observation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(4): 67-72. (in Chinese)
- [9] 孙荣煜, 赵长印. GEO 空间碎片的光学观测与精密定位 [J]. 天文学进展, 2012, 30(03): 394-410.
SUN R Y, ZHAO C Y. Optical survey technique for space debris in GEO [J]. *Progress in Astronomy*, 2012, 30(3): 394-410. (in Chinese)
- [10] 孙荣煜, 赵长印, 平一鼎, 等. 利用数学形态学算子方法处理无快门相机的拖尾图像 [J]. 天文学报, 2012, 53(1): 80-91.
SUN R Y, ZHAO CH Y, PING Y D, *et al.*. Using operators of morphological mathematic for processing smeared image of camera without shutter [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 53(1): 80-91. (in Chinese)

- [11] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing (3rd Edition)* [M]. Upper Saddle River:Prentice Hall Inc,2007.
- [12] 王卫星, 田利平, 王悦. 基于改进的图论最小生成树及骨架距离直方图分割细胞图像[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9):2464-2472.
WANG W X, TIAN L P, WANG Y. Segmentation of cell images based on improved graph MST and skeleton distance mapping [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9):2464-2472. (in Chinese)
- [13] 刘震, 尚砚娜. 多尺度光点图像中心的高精度定位[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6):1586-1591.
LIU ZH, SHANG Y N. High precision location for multi-scale light spot center [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1586-1591.
- [14] 冒蔚. CCD天体测量学[M]. 昆明:云南科技出版社, 2003.
MAO W. *CCD Astrometry* [M]. Kunming:Yunnan Science and Technology Publishing Press, 2003. (in Chinese)
- [15] SEIDELMANN P, GAUME R, ZACHARIAS N, *et al.*. Optical reference star catalogs for space surveillance: current status and future plans [R]. DTIC Document, 2007.

作者简介:



李振伟(1983—),男,河南安阳人,博士研究生,2005年于东北大学获得学士学位,2008年于中国科学院研究生院(国家天文台长春人造卫星观测站)获得硕士学位,主要从事空间目标光电观测技术方面的研究。E-mail: lizw@cho. ac. cn



张涛(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电工程总体设计等方面的研究。E-mail: zhangt@ciomp. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)