

自适应加权质心算法在高精度星点定位中的应用

刘南南 徐抒岩 曹小涛 王 栋

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 为实现空间飞行器在高目标星等、像移和光学系统像差等因素影响下的高精度星点定位,提出了一种自适应加权质心细分定位算法。基于最大似然估计推导、建立数学模型并进行仿真实验。结果表明,与质心法、加权质心法及高斯拟合法等传统星点定位算法相比,提出的算法定位精度提高了 50% 以上,且具有良好的收敛速度,经过 5 次迭代后,质心定位误差相对较稳定,可以满足实际应用中对实时性的要求。

关键词 测量; 空间飞行器; 自适应加权质心算法; 最大似然估计; 星点定位

中图分类号 TP319 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0812002

Application of Adaptive Weighted Centroid Algorithm in High Accuracy Star Localization

Liu Nannan Xu Shuyan Cao Xiaotao Wang Dong

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract An adaptive weighted centroid localization algorithm is proposed to solve the problems caused compositely by the high magnitude stars, the image motion and the aberration of optical system in high accuracy star localization. A mathematical model based on the maximum likelihood estimation is derived and built to perform numerical simulations. The results show that the localization accuracy of the algorithm proposed is increased by over 50% compared with that of the traditional star localization algorithms such as centroid method, weighted centroid method and Gaussian fitting method. The proposed algorithm has good convergence rate, and the centroid location error is relatively stable after five iterations, which can meet the real-time requirement in practical applications.

Key words measurement; space craft; adaptive weighted centroid algorithm; maximum likelihood estimation; star localization

OCIS codes 120.4820; 150.1135; 150.0155; 100.2000

1 引 言

随着我国空间应用科学技术的发展,在空间飞行器上装载大口径的天文望远镜成为可能。由于摆脱了大气扰动的影响,空间天文望远镜可进行高分辨率的天文观测^[1]。对天文目标进行凝视观测的过程中,由于受到卫星平台的姿态变化和轨道运动,太阳帆板展开、姿控发动机、中继天线、控制力矩陀螺和后端制冷机等产生的振动,以及光机结构的热变形等因素的影响,空间天文望远镜光学系统的视轴会与目标偏离,导致其成像质量下降。因此,需要研发高精度稳像系统,以实现天文目标的精密观测^[2-3]。

高精度稳像系统常采用多级双检测型复合轴控制方案。粗级稳像控制精度一般为角秒量级,可采用星敏感器、光纤陀螺和编码器等测角传感器进行闭环控制。精级稳像控制精度一般要达到毫角秒量级,传统的测角传感器难以达到。国外具有代表性的 Hubble 空间望远镜、James Webb 空间望远镜等,都是利用大口径天文望远镜光学系统的边缘视场对恒星进行成像的,相应的仪器为高精度导星传感器(FGS),该传感器利用光学系统超长的焦距及相关算法获得高精度的惯性角位置偏移信息,以图像的方式为精级稳像控制系统

收稿日期: 2016-02-18; 收到修改稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61205143)

作者简介: 刘南南(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事高精度导航技术方面的研究。E-mail: lnn226@163.com

提供反馈信息,从而使整个系统形成闭环控制。

导星传感器在工作原理和工作环境等方面与星敏传感器都有差别。1) 由于空间天文望远镜导星视场大小和探测器灵敏度的限制,导星传感器可探测的极限星等较高,因此得到的目标星图像较暗,星图信噪比低。2) 导星传感器焦距很长,导致其上星点处于高动态条件。而稳像控制系统由多级控制结构组成,在精级控制系统稳定前,目标恒星相对探测器产生像移,因而所得光斑趋于椭圆化,使星图的信噪比降低。3) 由于导星传感器的视场位于光学系统的边缘视场,其成像质量比中心视场差,像散和彗差尤其严重,所以光斑为不对称的椭圆形状。以上这些因素都将影响导星传感器的星点定位精度,因此,快速高精度星点定位算法是导星传感器的关键技术之一^[4-5]。

传统的质心法由于算法简便性和稳健性,被广泛应用于星点定位^[6-7]。为进一步提高星点定位精度,学者们提出了许多新的星点定位方法。Lee^[8]提出了用于星点定位的点模型,使采样点的数据库可被建立并保存。Rufino等^[9]提出采用逆向传播(BP)神经网络对星点位置进行校正的方法。Quine等^[10]提出了一种误差函数拟合方法来确定星点位置,这种方法在探测器填充因子非100%时尤其适用。杨君等^[11]采用最小二乘拟合法来估计质心位置,主要对质心法的系统误差进行标定,这种方法在低信噪比条件下的精度不高。李凤娇等^[12]提出采用多尺度分析的方法提取激光中心点坐标,算法抗噪能力强,但测量的是激光光条图像。洪雪婷等^[13]提出基于光电混合联合变换的像移测量方法,但测量的是扩展目标的图像。张俊等^[14]提出采用迭代加权质心法提高测量精度,但不适用于椭圆型光斑图像。这些方法都不适用于导星传感器中低信噪比、椭圆型光斑的星点定位,因此,本文基于最大似然估计,针对性地提出一种自适应加权质心算法,给出数学模型及相应的计算流程,并进行对比仿真实验,以验证提出算法的有效性。

2 基本原理

在探测器获取图像的过程中不可避免地会引入噪声,这个过程可看作一个随机过程,将每个像元的输出视为样本值,采用最大似然估计建立似然函数的数学模型,估计未知参数(光斑中心位置)的值。光斑光强分布近似为高斯函数分布^[15],探测器接收的图像 $I(x, y)$ 可表示为

$$I(x, y) = \frac{U_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right] + n(x, y), \quad (1)$$

式中 U_0 为高斯分布光斑中心光强, σ 为高斯分布光强信号的光斑半径, x_0, y_0 为光斑中心点坐标, $n(x, y)$ 为噪声信号,可以看作一个随机过程变量, $n(x, y)$ 概率密度函数为

$$p[n(x, y)] = \exp\left[\frac{-n^2(x, y)/(2\sigma_{\text{det}}^2)}{2\pi\sigma_{\text{det}}^2}\right], \quad (2)$$

式中 σ_{det} 为探测器噪声的标准差。观测样本的对数似然函数为

$$\ln L(x_0, y_0) = \ln\left(\frac{1}{2\sigma_{\text{det}}^2}\right) - \frac{1}{2\sigma_{\text{det}}^2} \sum_{x, y} n^2(x, y), \quad (3)$$

可解得其最大似然估计为

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{x}_0 &= \frac{\sum_{x, y} x \exp\{-(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\} / (2\sigma^2) I(x, y)}{\sum_{x, y} \exp\{-(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\} / (2\sigma^2) I(x, y)} \\ \hat{y}_0 &= \frac{\sum_{x, y} y \exp\{-(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\} / (2\sigma^2) I(x, y)}{\sum_{x, y} \exp\{-(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\} / (2\sigma^2) I(x, y)} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

从(4)式可以看出,最大似然最优估计值是用无噪声的理想星点的光强信号作权值,进行加权质心计算后得出的结果。由此受到启发,提出一种自适应加权质心算法。首先设定一个初始加权函数,然后根据每次计算得出的特征值,自适应地调整加权函数,不断重复迭代,直到精度满足要求时停止迭代并输出高精度的质心位置。其计算流程如图1所示。具体实现流程如下。

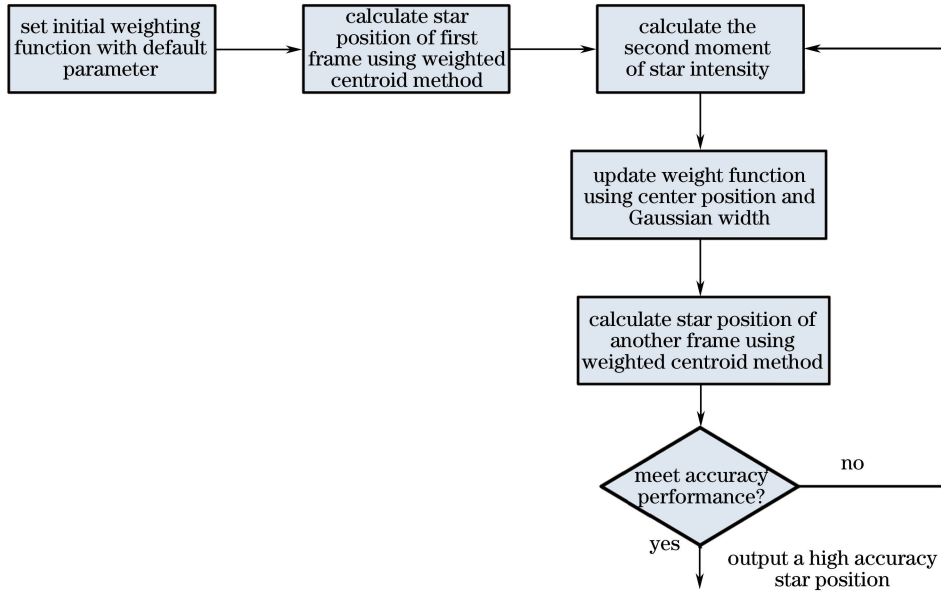


图 1 自适应加权质心算法流程图

Fig. 1 Flow chart of adaptive weighted centroid algorithm

1) 设初始权值函数为二维高斯函数

$$w(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_c)^2}{2\sigma_y^2}\right], \quad (5)$$

式中含有 4 个待定参数,两个中心位置参数 x_c, y_c 初始设定为光强最大位置处的横、纵坐标,两个高斯宽度参数 σ_x, σ_y 初始设定为 1 pixel。

2) 用自适应加权质心算法计算第一帧的星点位置:

$$\begin{cases} \hat{x}_c = \frac{\sum_{i=1}^n xI(x, y)w(x, y)}{\sum_{i=1}^n I(x, y)w(x, y)} \\ \hat{y}_c = \frac{\sum_{i=1}^n yI(x, y)w(x, y)}{\sum_{i=1}^n I(x, y)w(x, y)} \end{cases}, \quad (6)$$

将该位置作为下一次迭代权值函数的中心位置参数。

3) 计算星点光强的二阶矩:

$$\begin{cases} S_{x^2} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^2 I(x, y) w(x, y) \\ S_{y^2} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N y^2 I(x, y) w(x, y) \end{cases}, \quad (7)$$

下一次迭代权值函数的高斯宽度参数为

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{\sqrt{S_{x^2}S - S_x^2}}{S} \\ \sigma_y = \frac{\sqrt{S_{y^2}S - S_y^2}}{S} \end{cases}. \quad (8)$$

4) 用新的中心位置参数和高斯宽度参数更新高斯权值函数,回到步骤 2),迭代计算星点质心位置,直到

所得结果的精度满足要求,迭代结束,输出高精度的质心位置。

自适应加权质心算法的迭代过程如图 2 所示,初始权值函数与实际光强信号的位置和宽度都相差很大,随着迭代的进行,权值函数形状不断接近实际光斑,质心定位精度也不断提高。用自适应加权质心算法进行大量仿真实验,质心定位精度与迭代次数的关系如图 3 所示,结果表明,该算法具有良好的收敛速度,经过 5 次迭代后,质心定位误差相对比较稳定,可满足实际应用中实时性的需求。

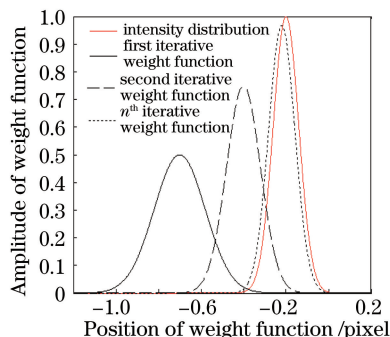


图 2 自适应加权质心算法的迭代过程
Fig. 2 Iteration process of adaptive weighted centroid algorithm

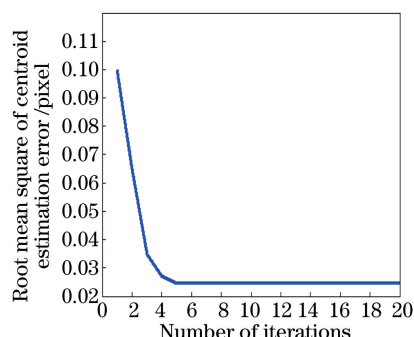


图 3 质心定位精度与迭代次数的关系
Fig. 3 Relationship between centroid localization accuracy and number of iterations

3 数值仿真实验

为验证提出算法的有效性,采用以下仿真实验方法。在 Matlab 仿真环境下,用高斯点扩展函数近似无穷远恒星目标的像点,将各种原因引起的位置和亮度的随机误差用高斯噪声分布替代,得到仿真模拟的星点图像。实验中光轴的指向为赤经 260° , 赤纬 -34° , 视场(FOV)为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 范围内从 Hubble 空间望远镜导航星表中选择可视星等 12 等以上的最亮的两颗导航星, 设定探测器离焦放置, 使 80% 的星点能量集中在 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 范围内, 仿真星图的图像大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 像移和非对称像差所产生的位置误差标准差为 0.03 pixel , 引起的光斑椭圆率变化最大为 0.5。探测器采用长光辰芯公司的 CMOS 探测器 GMAX504, 读出噪声为 12.3 e^- , 暗电流噪声为 $100 \text{ e}^- \cdot \text{pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 则由探测器噪声引起的亮度误差为 10%, 图 4 所示为模拟的含噪声星图, 其信噪比为

$$R_{SN} = \frac{S_{\max} - S_{\text{back}}}{\sigma_{\text{back}}}, \quad (9)$$

式中 S_{\max} 为像元最大灰度值, S_{back} 为背景像元的平均灰度值, σ_{back} 为背景像元灰度值的标准差。用(9)式计算可得信噪比为 21.72 dB。改变星点图像的光斑亮度以及位置误差和亮度误差的强度, 得到不同信噪比的星点图像, 提出的算法与质心法、加权质心法和高斯拟合法等传统的质心定位算法进行对比, 图 5 为几种细分算法的定位精度在不同噪声水平下的对比结果。



图 4 模拟的含噪声星图
Fig. 4 Simulated star image with noise

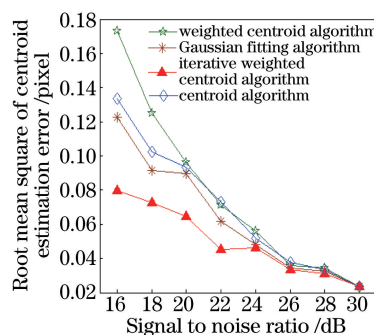


图 5 几种细分算法定位精度的比较
Fig. 5 Comparison of localization accuracy by various subdivision algorithms

图 5 中各种细分算法的定位精度随着星点图像信噪比的增加而提高。信噪比较大时,由于加权质心算法的固定权值函数不合适,可能将噪声放大而将信号削弱,定位精度比质心法差;高斯拟合法的定位精度介于质心法和加权质心法之间。自适应加权质心法经 5 次迭代后权值函数与光斑能量分布较接近,由于该算法的原理是增强目标信号、减少噪声成分,因此其定位精度比其他算法提高了 50% 以上。

由光学系统的像差(主要是像散)和恒星相对探测器像移产生的椭圆光斑的星点图像如图 6(a)所示。改变光斑的亮度、椭率以及位置误差、亮度误差的强度,得到不同信噪比的星点图像,设 x 轴为椭圆的长轴,放大的不同椭率的星点图像如图 6(b)~(d)所示,椭率的计算公式为^[16]

$$\epsilon = \left[\frac{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + (2\sigma_{xy}^2)^2}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

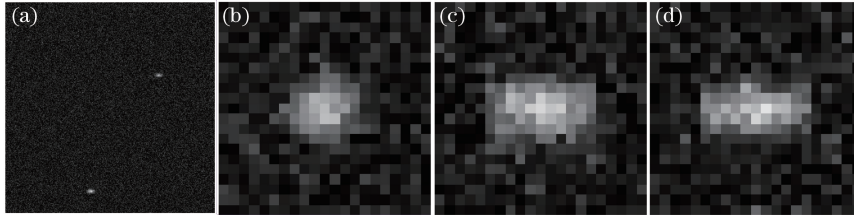


图 6 因像差和像移产生的椭圆光斑的星点图像。(a)椭圆星图;(b)椭率为 1.0;(c)椭率为 0.7;(d)椭率为 0.5

Fig. 6 Elliptical star image generated by aberration and image motion.

(a) Elliptical star image; (b) $\epsilon=1.0$; (c) $\epsilon=0.7$; (d) $\epsilon=0.5$

表 1 为几种细分算法定位在不同椭率和噪声水平下所得的精度结果,各种细分算法定位精度随着椭圆星点图像信噪比的增加而提高。随着椭率的减小(椭圆的长短轴长度相差更大),在椭圆光斑的长轴方向上由于截断误差的增加,定位精度比短轴方向低,质心法、加权质心法和高斯拟合法两轴的误差相差 15% 以上。由于自适应加权质心法可以根据光斑的形状自适应地改变权值函数的高斯宽度,两轴的定位精度基本一致,因而尤其适于椭圆光斑的质心定位。信噪比为 30 dB、椭率为 0.5 时,与质心法、加权质心法和高斯拟合法等传统星点定位算法相比,自适应加权质心算法的定位精度提高了 50% 以上。

表 1 不同星点定位算法对不同椭率和信噪比的椭圆星点图像的定位精度

Table 1 Localization accuracy of different star localization algorithms for elliptical star images with different R_{SN} and ϵ

Algorithm	Axis	Root mean square / pixel					
		$\epsilon=0.7$			$\epsilon=0.5$		
		15 dB	20 dB	25 dB	15 dB	20 dB	25 dB
Centroid method	x axis	0.1724	0.1236	0.0488	0.1860	0.1267	0.0502
	y axis	0.1458	0.1132	0.0401	0.1524	0.1180	0.0493
Weighted centroid method	x axis	0.1679	0.1270	0.0521	0.1847	0.1255	0.0516
	y axis	0.1460	0.1162	0.0452	0.1530	0.1192	0.0505
Gaussian fitting method	x axis	0.1316	0.0996	0.0409	0.1387	0.1022	0.0438
	y axis	0.1220	0.0873	0.0388	0.1341	0.0880	0.0430
Adaptive weighted centroid method	x axis	0.0817	0.0724	0.0359	0.0824	0.0748	0.0372
	y axis	0.0894	0.0696	0.0346	0.0885	0.0732	0.0365

4 结 论

提出了一种自适应加权质心细分定位算法,采用基于最大似然估计的迭代过程,增强目标信号、减少噪声成分,适用于低信噪比的星图的星点定位;且在两个方向上分别求光斑宽度,尤其适于对椭圆星点光斑的定位。仿真结果显示,与质心法、加权质心法和高斯拟合法等传统星点定位算法相比,自适应加权质心算法的定位精度提高了 50% 以上,且具有良好的收敛速度,经过 5 次迭代后,质心定位误差相对比较稳定,满足实际应用中的实时性要求,可应用于空间望远镜导星传感器的设计。该算法为空间飞行器在高目标星等、像移和光学系统像差等多种因素影响下的高精度星点定位提供了一种解决方案。下一步工作主要是搭建实验平台进一步验证提出算法的适用性和稳健性。

参 考 文 献

- 1 Sabelhaus P A, Campbell D, Clampin M, *et al.* An overview of the James Webb Space Telescope (JWST) project[C]. SPIE, 2005, 5899: 241-254.
- 2 Beals G A, Crum R C, Dougherty H J, *et al.* Hubble Space Telescope precision pointing control system[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2012, 11(2): 119-123.
- 3 Acton D S, Atcheson P D, Cermak M, *et al.* James Webb Space Telescope wavefront sensing and control algorithms[C]. SPIE, 2004, 5487: 887-896.
- 4 Nelan E P, Lupie O L, McArthur B, *et al.* Fine guidance sensors aboard the Hubble Space Telescope: The scientific capabilities of these interferometers[C]. SPIE, 1998, 3350: 237-247.
- 5 Rowlands N, Vila M B, Evans C, *et al.* JWST fine guidance sensor: Guiding performance analysis[C]. SPIE, 2008, 7010: 701036.
- 6 Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Subdivided locating method of star image for star sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9): 812-815.
魏新国, 张广军, 江 洁. 星敏传感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(9): 812-815.
- 7 Liebe C C. Accuracy performance of star trackers—a tutorial[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2002, 38(2): 587-599.
- 8 Lee S. Pointing accuracy improvement using model-based noise reduction method[C]. SPIE, 2002, 4635: 65-71.
- 9 Rufino G, Accardo D. Enhancement of the centroiding algorithm for star tracker measure refinement [J]. Acta Astronautica, 2003, 53(2): 135-147.
- 10 Quine B M, Tarasyuk V, Mebrahtu H, *et al.* Determining star-image location: A new sub-pixel interpolation technique to process image centroids[J]. Computer Physics Communications, 2007, 177(9): 700-706.
- 11 Yang Jun, Zhang Tao, Song Jingyan, *et al.* High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 1002-1010.
杨 君, 张 涛, 宋靖雁, 等. 星点质心亚像元定位的高精度误差补偿法[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(4): 1002-1010.
- 12 Li Fengjiao, Li Xiaojing, Liu Zhen. A multi-scale analysis based method for extracting coordinates of laser light stripe centers[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1110002.
李凤娇, 李小菁, 刘 震. 基于多尺度分析的激光光条中心点坐标提取方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1110002.
- 13 Hong Xueting, Qian Yixian. High-accuracy measurement of sub-pixel image motion based on hybrid photo electric joint transform correlator[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0212001.
洪雪婷, 钱义先. 高精度光电混合联合变换相关的亚像元像移测量[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0212001.
- 14 Zhang Jun, Hao Yuncai, Liu Da. Investigation on the mechanism and positioning error of multi-star spots extraction of iteratively weighted center of gravity algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0204001.
张 俊, 郝云彩, 刘 达. 迭代加权质心法机理及多星定位误差特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0204001.
- 15 Winick K A. Cramér-Rao lower bounds on the performance of charge-coupled-device optical position estimators [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1986, 3(11): 1809-1815.
- 16 de Vries W H, Olivier S S, Asztalos S J, *et al.* Image ellipticity from atmospheric aberrations[J]. Astrophysical Journal, 2007, 662(1): 744-749.